

中国计算机学会文集

CCF 2017 – 2018 中国计算机 科学技术发展报告

中国计算机学会 主编



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

CCF 2017-2018 中国计算机科学技术发展报告 / 中国计算机学会主编 . —北京：机械工业出版社，2018.10
(中国计算机学会文集)

ISBN 978-7-111-61138-7

I. C… II. 中… III. 计算机科学－发展－研究报告－中国－2017-2018 IV. TP3-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 230176 号

CCF 2017-2018 中国计算机科学技术发展报告

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）

责任编辑：张梦玲 责任校对：李秋荣

印 刷：中国电影出版社印刷厂

版 次：2018 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开 本：185mm×260mm 1/16

印 张：26

书 号：ISBN 978-7-111-61138-7

定 价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88379426 88361066

投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzit@hzbook.com

版权所有 • 侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问：北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

前　　言

计算和网络基础设施已经成为人类社会的重要基石，相应的计算技术发展水平也成为信息社会中衡量国家发展水平和竞争力的重要指标。“中国计算机科学技术发展报告”记录了和见证了中国计算机领域的发展，受到计算机学会广大会员和相关领域人士的广泛关注。

以蓬勃发展的人工智能为代表的计算技术得到了社会各界的广泛关注，国际上多个发达国家先后推出相应的发展计划，极大地推动了这一领域的发展。国内一大批高等学校先后设立了人工智能研究院以及相应的专业。与此同时，人工智能的蓬勃发展也同时对计算技术提出了全面的挑战——从计算机体系结构对算法的支撑到智能技术的应用。

今年的报告充分反映了这一趋势，多个方向的报告与此相关。今年的发展报告包含形式化方法的研究进展与趋势、大图数据管理与分析技术、AI 与系统软件的深度融合研究进展与趋势、知识图谱的系统工程观、生成对抗网络的研究进展与趋势、CAD/CAE 高精度仿真分析中的关键几何计算理论与方法的研究进展与趋势、记忆驱动的媒体学习与创意、网络智慧化技术研究进展与趋势、面向云端融合的分布式计算技术研究进展与趋势、自主可控抗恶劣环境计算技术及应用的研究发展与趋势这十个方向的报告，详细介绍了相应研究方向的现状、研究进展、国内外对比以及发展趋势等。

本年度发展报告对回顾、总结我国计算机科学技术的进展和推动未来的进步具有重要的作用。同时，也可以作为相关领域读者了解当前计算机科学技术发展动态的一个渠道。

本年度发展报告的组织、策划工作得到了中国计算机学会各专业委员会及广大会员的大力支持和积极响应，共收到 14 份反映不同方向进展的报告申请。经中国计算机学会学术工委组织评审，共有 10 篇报告收入本文集。在此，要特别向本年度所有发展报告的执笔人表示感谢，也要感谢各专业委员会的主任和秘书长付出的大量辛苦劳动。中国计算机学会高文理事长、杜子德秘书长等对本报告的整理和出版给予许多指导和支持，学术工委各位委员在选题、组织、评审等方面做了大量的工作，学会秘书处马琳女士协助处理了烦琐的事务性工作，在此一并表示感谢。

陈熙霖
中国计算机学会学术工作委员会主任
2018 年 9 月

目 录

前言

形式化方法的研究进展与趋势 CCF 形式化方法专业委员会

1 引言	2
2 国际研究现状	3
2.1 定理证明	3
2.2 形式模型	7
2.3 形式语义与形式建模	11
2.4 形式规约	12
2.5 形式验证技术与方法	14
2.6 形式验证工具以及应用	19
2.7 量子程序分析与验证	21
3 国内研究进展	22
3.1 定理证明	22
3.2 形式模型	23
3.3 形式语义与形式建模	25
3.4 形式规约	26
3.5 形式验证技术与方法	26
3.6 形式验证工具以及应用	29
3.7 量子程序分析与验证	30
4 国内外研究进展比较	30
4.1 定理证明	30
4.2 形式模型	31
4.3 形式语义与形式建模	31
4.4 形式规约	32
4.5 形式验证技术与方法	32
4.6 形式验证工具以及应用	33
4.7 量子程序分析与验证	33
5 发展趋势与展望	33
5.1 定理证明	33
5.2 形式模型	34
5.3 形式语义与形式建模	35

5.4 形式规约	35
5.5 形式验证技术与方法	35
5.6 形式验证工具以及应用	36
5.7 量子程序分析与验证	36
6 结束语	37
参考文献	37
作者简介	64

大图数据管理与分析技术 CCF 数据库专业委员会

1 引言	70
2 国际研究现状	71
2.1 大图数据查询处理与优化	71
2.2 大图数据挖掘与分析	75
2.3 大图数据库系统	80
2.4 基于硬件的大图处理问题	85
3 国内研究进展	87
3.1 大图数据查询处理与优化	87
3.2 大图数据挖掘与分析	88
3.3 大图数据库系统	89
3.4 基于硬件的大图处理问题	90
4 国内外研究进展比较	90
5 发展趋势与展望	91
6 结束语	92
参考文献	92
作者简介	98

AI 与系统软件的深度融合研究进展与趋势 CCF 系统软件专业委员会

1 引言	101
2 面向 AI 的系统：机器学习系统的支撑、拓展与优化技术	102
2.1 主流机器学习系统的分类与介绍	102
2.2 主流深度学习框架系统介绍	107
2.3 机器学习系统的流式实时扩展技术	108
2.4 针对特定任务的机器学习系统	109
2.5 机器学习系统自动化构建技术	109
2.6 新兴机器学习系统	110
2.7 机器学习系统优化技术	112
3 面向 AI 的系统：类脑神经网络计算系统软件	114

3.1	类脑神经网络模拟软件与建模语言	115
3.2	类脑计算芯片与软件工具链系统	117
3.3	类脑计算芯片与软件工具链	117
3.4	类脑计算模型与应用	118
3.5	类脑神经网络与深度学习	119
3.6	类脑计算模型与应用：脑认知与类脑计算	120
3.7	类脑神经网络建模语言与软件模拟	120
4	基于 AI 的智能系统：机器学习安全及其在系统安全中的应用	121
4.1	面向 AI 系统安全的对抗学习技术	121
4.2	基于 AI 的安全技术	122
5	基于 AI 的智能系统：基于 AI 的系统软件优化与缺陷检测	128
5.1	基于日志挖掘的系统故障检测与诊断	129
5.2	基于机器学习的分布式资源分配	129
5.3	基于机器学习的索引构建	130
6	发展趋势与展望	131
6.1	面向 AI 的系统：AI 系统的扩展与优化技术	131
6.2	面向 AI 的系统：类脑神经网络计算系统	132
6.3	基于 AI 的智能系统：基于 AI 的系统安全技术	132
6.4	AI 和系统：面向 AI 系统安全的对抗学习技术	133
7	结束语	134
	致谢	134
	参考文献	134
	作者简介	145

知识图谱的系统工程观 CCF 信息系统专业委员会

1	引言	148
2	从信息系统工程的观点看知识图谱	149
2.1	知识图谱的规模化发展	149
2.2	规模化的知识图谱系统工程	151
3	国内外研究现状与进展	154
3.1	国内外典型的知识图谱项目	155
3.2	知识图谱与智能问答研究现状分析	160
3.3	知识图谱与智能推理的发展动态	162
3.4	知识图谱与数据库系统	163
3.5	知识图谱与推荐系统	168
3.6	知识图谱与 IoT	170
4	发展趋势与展望	170

4.1 知识图谱的系统工程思维	170
4.2 大规模的知识图谱嵌入与基于表示学习的可微分推理	171
4.3 少样本、无监督的知识获取	172
4.4 区块链与去中心化的知识图谱	172
5 结束语	173
参考文献	173
作者简介	181

生成对抗网络的研究进展与趋势 CCF 人工智能与模式识别专业委员会

1 引言	183
1.1 生成对抗网络的产生背景	183
1.2 生成对抗网络结构介绍	184
1.3 与其他生成模型的差别	185
1.4 本文的组织安排	186
2 国际研究现状	186
2.1 生成对抗网络的理论研究进展	186
2.2 生成对抗网络的应用进展	188
2.3 生成对抗网络的评价指标	202
3 国内研究进展	203
3.1 生成对抗网络在国内的理论研究进展	203
3.2 生成对抗网络在国内的应用进展	205
4 发展趋势与展望	206
5 结束语	207
致谢	207
参考文献	207
作者简介	214

CAD/CAE 高精度仿真分析中的关键几何计算理论与方法的研究进展与趋势 CCF 计算机辅助设计与图形学专业委员会

1 引言	216
2 概述	217
2.1 面向产品设计仿真无缝融合的等几何分析方法	217
2.2 面向等几何分析的新型样条建模理论	219
2.3 面向等几何分析的计算域参数化方法	221
2.4 面向等几何分析的六面体网格生成	222
2.5 高效灵活的新型等几何分析方法	224
2.6 面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论	224

3 国内外研究进展	227
3.1 等几何分析方法研究进展	227
3.2 面向等几何分析的新型样条建模理论	230
3.3 面向等几何分析的计算域参数化	241
3.4 面向等几何分析的高质量六面体网格生成	245
3.5 高效灵活的等几何分析数值方法	252
3.6 面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论与方法	257
4 国内与国外研究进展比较	264
4.1 面向设计仿真无缝融合的等几何分析及其扩展方法	264
4.2 面向等几何分析的新型样条建模理论	265
4.3 面向等几何分析的计算域参数化	266
4.4 面向等几何分析的高质量六面体网格生成	266
4.5 面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化	267
5 发展趋势与展望	267
5.1 面向等几何分析的新型样条建模理论	268
5.2 面向等几何分析的计算域参数化方法	268
5.3 面向等几何分析的高质量六面体网格生成	269
5.4 高效灵活的新型等几何分析方法	269
5.5 面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论与方法	270
6 结束语	271
致谢	271
参考文献	271
作者简介	285

记忆驱动的媒体学习与创意	CCF 多媒体技术专业委员会
1 引言	287
2 国际研究现状	290
2.1 神经图灵机	290
2.2 记忆网络	294
2.3 可微分神经计算机	296
3 国内研究进展	298
3.1 外在记忆驱动下的自动问答	298
3.2 基于层叠记忆网络的电影视频问答	300
3.3 外在记忆驱动下的创意：文本生成图像	304
4 国内外研究进展比较	306
5 发展趋势与展望	307
6 结束语	307

参考文献	308
作者简介	311
网络智慧化技术研究进展与趋势	CCF 互联网专业委员会
1 引言	313
2 网络智慧化技术发展历程	314
3 网络智慧化技术内涵	317
4 机器学习算法分类	319
4.1 监督学习	319
4.2 无监督学习	320
4.3 增强学习	320
5 国内外研究进展与比较	321
5.1 流量分类	321
5.2 入侵检测	324
5.3 QoS/QoE 与 TCP 传输优化	328
5.4 降维和可视化	330
5.5 路由优化	333
6 发展趋势与展望	336
6.1 智慧化路由与流量调度	336
6.2 智慧化网络安全防御机制	336
6.3 网络资源智慧适配	336
6.4 智慧化网络规划	337
6.5 网络智慧化运维	337
7 结束语	337
参考文献	338
作者简介	346
面向云端融合的分布式计算技术研究进展与趋势	CCF 分布式计算与系统专业委员会
1 引言	348
2 国际研究现状	350
2.1 云端融合体系架构	350
2.2 云端融合资源优化技术	352
2.3 云端融合网络互联机制	354
2.4 云端融合环境中的资源管理与调度	355
2.5 云端融合软件架构设计	356
3 国内研究进展	357
4 国内外研究进展比较	359

5 发展趋势与展望	360
6 结束语	362
致谢	362
参考文献	363
作者简介	367
 自主可控抗恶劣环境计算技术及应用的 研究发展与趋势	
CCF 抗恶劣环境计算机专业委员会	
1 引言	370
2 基础技术研究现状	372
2.1 计算机体系结构设计技术	372
2.2 基础软硬件设计技术	374
2.3 计算机工程设计技术	376
2.4 传感及交互设计技术	379
2.5 测试性、可靠性及保障性设计技术	382
2.6 工控安全设计技术	384
3 技术应用进展	385
3.1 工业物联网	386
3.2 地面无人指挥平台	388
3.3 海上精确导航定位平台	390
3.4 深海空间站云计算平台	391
4 国内外研究进展比较	393
5 发展趋势与展望	394
6 结束语	395
致谢	396
参考文献	396
作者简介	401
关键词索引	402
作者索引	404

形式化方法的研究进展与趋势

CCF 形式化方法专业委员会

卜 磊¹ 陈立前² 陈 哲³ 陈振邦² 冯新宇¹ 冯 元⁴
贺 飞⁵ 李国强⁶ 刘万伟² 马菲菲⁷ 宋 富⁸ 田 聰⁹
王淑灵⁷ 吴志林⁷ 薛 白⁷ 杨鹏飞⁷ 尹良泽² 詹博华¹⁰
张 民¹¹ 张立军⁷ 张兴元¹² 赵永望¹³

¹南京大学，南京

²国防科技大学，长沙

³南京航空航天大学，南京

⁴悉尼科技大学，悉尼

⁵清华大学，北京

⁶上海交通大学，上海

⁷中国科学院软件研究所，北京

⁸上海科技大学，上海

⁹西安电子科技大学，西安

¹⁰慕尼黑工业大学，慕尼黑

¹¹华东师范大学，上海

¹²中国人民解放军陆军工程大学，南京

¹³北京航空航天大学，北京

摘要

形式化方法是计算机科学的一个传统研究方向，是保证计算机软硬件系统正确性与安全性的主要途径。本报告将对形式化方法各个方面最近 5 年的进展进行相对全面的总结，包括定理证明、形式模型、形式语义与形式建模、形式规约、形式验证技术与方法、形式验证工具及应用，以及量子程序的分析与验证。最后，本报告对形式化方法的发展趋势进行展望。

关键词：交互式定理证明，SMT，自动机，形式语义，分离逻辑，时序逻辑，演绎推理，抽象解释，模型检测，符号执行，量子程序的分析与验证

Abstract

Formal methods is a traditional research field in computer science, and is an important approach to guaranteeing the correctness, safety and security of computer hardware and software systems. This report will summarise the progress of different aspects of formal methods during the last five years, in a relatively complete way, including: theorem proving, formal models, formal semantics and formal modeling, formal specification, formal verification techniques and methodologies, formal verification

tools and applications, the analysis and verification of quantum programs. This report will also discuss the perspectives of formal methods in the future.

Keywords: Interactive theorem proving, SMT, automata, formal semantics, separation logic, temporal logic, deductive verification, abstract interpretation, model checking, symbolic execution, the analysis and verification of quantum programs

1 引言

随着信息技术的广泛应用，特别是信息技术与物理世界和人类社会的高度融合，整个社会的信息化程度不断提高，人们对计算机系统的可靠性与安全性提出了更高的要求。计算机系统的一个小小的错误或者安全隐患可能影响到国家安全或者人民群众的生命财产安全。

形式化方法是保证计算机系统正确性与安全性的一种重要方法，其采用数学（逻辑）证明的手段对计算机系统进行建模、规约、分析、推理和验证。

形式化方法是计算机科学的一个传统研究方向，迄今为止，共有 12 位学者因为或者部分因为形式化方法的研究工作而获得图灵奖。形式化方法是一个基础性和交叉性很强的研究方向，它与计算机科学的其他分支如计算理论、编程语言、软件工程、计算机安全等都密切相关；同时，近年来与生物信息、控制理论、电子自动化设计等多个学科交叉明显。

形式化方法越来越受到国际/国内计算机学术界的重视，比如国际组织 IFIP 下面至少有三个工作组（working group）与形式化方法相关，欧洲有专门的形式化方法组织 FME，美国计算机学会（ACM）在 2014 年成立了 SIGLOG，即逻辑与计算专委会（Special Interest Group on Logic and Computation），涵盖计算逻辑、自动机理论、形式语义、程序验证等方向，而中国计算机学会则在 2015 年成立了形式化方法专业组，今年刚刚正式更名为“形式化方法专业委员会”。

形式化方法方面的国际旗舰会议包括关注形式化方法的理论基础的 LICS (Logic In Computer Science)、关注形式化方法的理论和应用结合的 CAV (Computer-Aided Verification) 和 FM (International Symposium on Formal Method)、关注自动推理的 IJCAR (International Joint Conference on Automated Reasoning) 等。

由于形式化方法在保证计算机软硬件系统的正确性和可靠性方面的有效性，它已经被许多国际标准化组织列为安全攸关系统必备的技术手段。例如，国际航空软件标准 DO178B、DO178C 中明确要求开发安全可靠的航空软件必须使用形式化方法；又如，在软件安全等级 SIL1-4 中，安全级别最高的 SIL3 和 SIL4 要求必须使用形式化方法。而且，形式化方法已经逐渐为 IT 产业界所接受和采纳，例如：

- 微软开发了一系列影响深远的形式化验证工具，比如 Z3、Dafny、F*、SLAM 等，用于对其开发的众多软件的正确性进行分析。

- Facebook 将基于分离逻辑的验证工具 Infer 广泛用于其 Android 应用的开发过程中。
- 亚马逊在 2014 年成立了自动推理组，用 SMT 求解器去验证其 Web 服务的正确性。
- 国内的华为公司最近建立了形式验证团队，使用定理证明辅助工具来验证操作系统内核的正确性和安全性。

形式化方法使用数学（逻辑）证明的手段对计算机系统进行建模、规约、分析、推理，其主要涵盖以下几个研究方向：

- 定理证明：对逻辑推理过程进行研究，尽可能提高逻辑推理过程的自动化程度。
- 形式模型：对形式模型的理论性质和各种判定问题进行研究，提出高效的判定算法，并开发原型工具。
- 形式语义与形式建模：为了对计算机系统的行为进行推理验证，需要对编程语言的语义进行严格的定义，使用形式模型对计算机系统的行为进行建模。
- 形式规约：为了对计算机系统的行为进行推理验证，也需要对程序行为所满足的性质用某种形式语言（逻辑、自动机等）进行严格的定义。
- 形式验证技术与方法：在形式语义/形式建模以及形式规约的基础上，将计算机系统的分析与验证问题转化为逻辑推理问题或者形式模型的判定问题，用定理证明工具/求解器或者某个形式模型的原型工具来进行验证。
- 形式验证工具以及应用：基于形式验证理论、方法和技术上的研究成果，开发自动形式验证工具并在工业级系统中进行应用。
- 量子程序分析与验证：针对量子程序的特点发展其分析与验证理论、方法、及工具。

本报告将对形式化方法最近 5 年的国内外研究进展进行相对全面的介绍，并对发展趋势进行展望。

2 国际研究现状

2.1 定理证明

定理证明方面的研究可以分成两部分：交互式定理证明（interactive theorem proving）和自动推理（automated reasoning）。

交互式定理证明的目标是通过用户和计算机相互协助来完成一个形式化证明。这里所用到的工具叫作证明辅助工具（proof assistant）。现在最常用的两个证明辅助工具是 Coq 和 Isabelle。其他的证明辅助工具包括 HOL Light、HOL4、PVS、ACL2、Lean、Mizar 等。由于在证明的过程中用户可以向计算机提供各种帮助，因此这种方法可以用来验证

非常复杂的定理。但同时，现在的证明辅助工具操作起来还比较烦琐，所以使用的门槛较高。

自动推理的目标是让计算机完全自动地证明一个数学命题。目前这个领域最常用的算法包括 SMT（Satisfiability Modulo Theory）和归结（resolution）。基于 SMT 的证明器包括 Z3、CVC4 等。基于归结原理的证明器包括 SPASS、Vampire 等。这些算法的使用不需要（或需要更少的）人为干涉，所以在计算机系统的推理和验证方面得到了广泛的应用，但另一方面，能用这种方法证明的数学命题比较有限。

下面对交互式定理证明和自动推理这两方面近 5 年的国际研究现状进行总结。

2.1.1 交互式定理证明

交互式定理证明的自动化传统上依靠在证明辅助工具里实现证明策略（tactic）。几乎所有常用的证明辅助工具都提供了实现证明策略的语言。如何改善这些语言，让用户更直观地实现证明策略是一个长久的问题。在许多证明辅助工具里，证明策略可以用实现这个工具的语言（比如 OCaml 或 ML）来实现。在 Coq 里，Ltac 提供了一个更高层次的证明策略语言。Eisbach^[16]尝试在 Isabelle 里面实现类似的功能。Lean^[17]是一个最新的证明辅助工具，其中的一个设计重点是允许更有效的证明策略的实现^[18]。

另一种自动化方法是调用证明辅助工具之外的自动证明器^[1]。外部证明器的调用可以分成以下几个步骤。首先，根据要证明的子目标，从已有的定理中筛选一部分相对更有可能用到的定理（premise selection）。然后，这些筛选出来的定理和子目标一起被转换成无类型的一阶逻辑，交给自动证明器求解。最后，如果自动证明器能够证明命题，证明辅助工具可以直接信任这个结果，或通过自动证明器反馈的信息在自己的系统里重新合成证明。

很多证明辅助工具都在使用或尝试使用这种自动化方法。其中，Isabelle 里的 Sledgehammer 最具代表性，现在已成为 Isabelle 大多数应用中必不可少的工具。最近为改善 Sledgehammer，有以下一些研究：文献 [2] 加入了 SMT 证明器的使用，文献 [19] 改善了从 Isabelle 里的类型到无类型逻辑之间的转换，文献 [20] 用机器学习的方法改善了筛选已有定理的过程。自动证明器的使用在其他一些证明辅助工具中也进行了尝试，比如 HOL Light^[21]、Coq^[22]等。

使用外部自动证明器的一个弱点是无法处理涉及高阶逻辑的命题。虽然存在一些从高阶逻辑的命题转换到一阶逻辑的算法，但转换的过程可能会让命题变得非常烦琐。由 Jasmin Blanchette 主持的 Matryoshka 项目希望在已有的自动证明器的理论基础上加上对高阶逻辑的支持。最近的成果包括文献 [1-12]。

在证明辅助工具的设计中，逻辑基础是一个非常重要的课题。除了保证可靠性以外，选用的逻辑基础应当能够有效地表达需要证明的理论，并且让实际的证明过程尽可能方便。Isabelle/HOL、HOL Light、HOL4 等工具使用一种简单的（不包含依赖类型的）类型论（simple type theory，或者叫 higher-order logic）。Coq 和 Lean 使用依赖类型论（dependent type theory）。逻辑基础的一个最新进展是 homotopy type theory^[29]。这是一个基于依赖类

型的更复杂的类型论。除了这个逻辑在数学基础上本身的意义外，它也允许用相对简单的方式定义和计算代数拓扑里的基本群（和同伦群）^[30]。在另一个方向，也在尝试选用无类型的集合论作为逻辑基础。文献 [31] 用这个基础验证了一些包括基本群的传统数学理论。

数据类型是定理证明器的逻辑基础中最重要的部分之一。Coq 等基于依赖类型论的定理证明器，在引入数据类型时需要对其逻辑演算进行扩展，此类扩展的正确性由逻辑学家的元理论分析作为支撑。与此不同，在 HOL4、Isabelle/HOL 等基于简单类型论的定理证明器中，数据类型的引入所采用的是“定义扩展”（definitional extension）的方式。自 2011 年开始，Isabelle/HOL 中的数据类型定义机制发生了很大变化^[27]。基于范畴论构造的新数据类型包替换了原有的数据类型包，由此获得了更好的开放性和更加灵活多样的表达方式。这方面最新的进展是文献 [28] 在 HOL 中引入了“nonuniform 数据类型”。

数学理论的形式化既是交互式定理证明的原始目标，也是验证计算机系统的基础。这方面有两个大型项目在最近几年完成：奇序定理（odd order theorem）^[32] 和开普勒猜想的证明^[33]。这两个项目各自都耗费了超过 20 人年的时间。奇序定理是群论里面的一个结果，由 Feit 和 Thompson 在 1962 年证明，论文长达 255 页，其中涉及表示论、伽罗瓦理论等比较深奥的数学理论。开普勒猜想在 1998 年被 Hales 证明，其中涉及大量在计算机上进行的计算，所以证明的正确性也曾经存在争议。

除了这两个大型项目外，形式化数学在各个基础领域都有进展。在数学分析方面，文献 [6] 验证了常微分方程的一些基本理论。这项工作之后被用来验证 Smale's 14th problem 的一部分证明^[7]。同时，它也被用来验证一个混成系统的逻辑基础^[13]。在概率论方面，文献 [8] 在 Isabelle 里建立了基本理论。它在文献 [9] 里被用来验证关于马尔可夫链和马尔可夫决策过程的基本特征。在线性代数方面，最近被验证的结果包括 Jordan Normal Form^[24] 和 Perron-Frobenius 定理^[25]。线性代数最近被用于证明了一个关于深度学习表达能力的定理^[26]。

形式化数学也可以用于验证各种数值和符号算法。最近的工作包括在 Coq 里验证一个数值计算定积分的算法^[5]。这项工作实现并验证了一个完全可信的算法，并在测试的过程中找到了一些已有的实现上的错误。另一个主要的验证目标是多项式问题判定的算法。文献 [15] 在 Isabelle 里完成了一元多项式问题判定得到的证书（certificate）的验证。验证多元多项式判定证书所需要的柯西留数定理也已经被验证^[14]。这一系列工作的最终目标是将实数定理的专用证明器 MetiTarski 整合到 Isabelle 系统中。

其他一些最近被验证的定理包括哥德尔不完备定理^[3]、中心极限定理^[4]、格林公式^[10]、基本的纽结理论^[39] 等。

Alexandria^[23] 是由 Larry Paulson 主持的形式化数学方面的项目。它的目标包括整理已有的工作并填补空隙，以得到一个覆盖所有大学水平数学的形式化数学库。同时，它也希望提高 Isabelle 系统在形式化数学方面的可用性。这里包括提供各种定理搜索功能，以及自动向用户推荐证明方法。这个项目的另外一个目标是在 Isabelle 里融入和整理各种可以被验证的数值和符号算法。

2.1.2 自动推理

在理论计算机科学和人工智能领域中，逻辑公式的可满足性问题一直是一个重要的问题。世界各国学者在这方面做了大量研究工作，特别是在命题逻辑的可满足性问题(SAT)上取得了很大进展。SAT是命题逻辑推理中的一个经典的判定问题，也是第一个被证明为NP难的问题，一直备受关注。但是随着研究的深入，人们发现SAT的表达能力和应用范围有很大的局限性。因此，SMT近年来开始引起人们的极大兴趣。SMT的研究对象是各种领域知识的逻辑组合，经常表达为带等词的一阶逻辑公式^[50]。与SAT判断布尔公式的可满足性不同，SMT判断的是理论组合的可满足性，它的抽象层次更高，表达能力也更强。它可以看作是对SAT的扩展，将SAT中的某些布尔变量用理论谓词取代。例如， $x + 2 = y \vee x = f(y - x + 1)$ 是SMT的一个实例，它包含了两个理论：线性算术、未解释函数。如果用布尔变量P1表示线性理论上的谓词 $x + 2 = y$ ，P2表示包含未解释函数的等式 $x = f(y - x + 1)$ ，则此SMT公式将变为一个命题逻辑公式 $P1 \vee P2$ 。SMT涉及的理论是一些数学理论和计算机领域内用到的数据结构理论，包括差分逻辑(difference logic)、线性算术理论(linear arithmetic，包括线性实数算术(LRA)和线性整数算术(LIA))、位向量(bit vector)、数组(array)、未解释的函数(uninterpreted function)等^[51]。随着SMT应用范围的扩展，新的理论也被不断地加入，例如近年来兴起的集合理论。为了表达方便，自动推理领域使用记号SMT(T)来表示理论T上的SMT公式，如线性实数算术理论上的SMT公式记为SMT(LRA)，位向量上的SMT公式记为SMT(BV)等。

对SMT求解的研究不但是自动推理、约束求解领域主流国际会议IJCAR/CADE、CP和SAT的主题之一，在验证和分析领域的著名国际会议CAV、TACAS上也是非常受关注的议题。SMT也受到产业界的高度重视。微软、Intel、Cadence、NEC等公司的研究院或实验室都在开展与SMT相关的研究项目。自2005年以来，自动推理学界每年都举办SMT求解器比赛(SMT-COMP)^[52]，以促进研究者不断改进SMT求解器的性能。目前，比较有代表性的SMT工具包括美国爱荷华大学的CVC4^[53]、SRI International的Yices^[54]、微软的Z3^[55]等，它们被集成于多个研究领域的自动工具之中，如高阶逻辑的交互式理论证明器HOL、Isabelle、ACL2，模型检测工具BLAST、MAGIC，程序分析工具KLEE等。

SMT是理论谓词的逻辑组合，其可满足性涉及两个层面：命题逻辑层次与理论层次。根据如何处理这两个层面上的可满足性，SMT求解的主流算法经历了从积极(eager)类算法到惰性(lazy)类算法的演变。

SAT求解技术取得的重大进步推动了积极算法的发展，积极算法是早期的SMT求解器采用的算法，也称为bit-blasting。它是将SMT公式转换成可满足性等价的命题逻辑公式，一般为CNF形式，然后用SAT求解器求解。这种方法的好处是可以采用高效的SAT求解器，同时它的求解效率也依赖于SAT求解器的效率。对于不同的理论，积极算法需要用不同的转换方法和改进方法以提高转换和求解的效率。例如，对于EUF一般用per-constraint编码，对于DL通常用small-domain编码等。积极算法的正确性依赖于编码的正

确性和 SAT 求解器的正确性，而且对于一些大的例子来说，编码成 CNF 公式很容易引起组合爆炸，也就是公式的长度指数级增长，因此这类方法在实际应用中效果不是很好，一般解决不了规模较大的工业界实例。但由于位向量理论上的 SMT 公式 (SMT(BV)) 与命题逻辑公式较为相似，因此 bit-blasting 仍为求解 SMT(BV) 的主要算法。

惰性算法是目前主流的 SMT 求解方法，也是当前研究最多的算法。这种算法框架被称为 DPLL(T) 算法^[56]。其基本思路是：将 DPLL 风格的 SAT 判定过程与特定理论的求解器 (T-solver) 紧密结合，基于 DPLL 的 SAT 求解器负责命题逻辑部分的推理，得到对布尔变量的（部分）赋值，而理论求解器负责判断 SAT 求解器得到的赋值——理论谓词的合取的可行性。这里，DPLL(T) 中的 T 代表理论。如果 T 是线性算术理论，T-solver 可以是 Simplex 算法或它的变种。DPLL(T) 这一名称的含义是，这是一个集成了 DPLL 算法的框架，可以结合不同理论及其判定过程而实例化。早先的 DPLL(T) 算法是将 SAT 求解器 (DPLL 部分) 当作黑盒，理论求解器检查模型的一致性要等到 DPLL 算法给出一个解之后才进行，这种方法的缺点是理论求解器很少参与 DPLL 的求解过程。后来出现了 online 方法对其做了改进，使得理论求解器参与 DPLL，从而提高了求解效率。这些改进主要有理论预处理、选择分支、理论推导、理论冲突分析和引理学习等。为了 DPLL 求解与理论求解更为有效地结合，理论判定过程一般要设计为增量式的 (incremental) 和可回溯的 (backtrackable)。

DPLL(T) 算法是完备求解算法。为了对 DPLL(T) 的求解能力形成补充，近年来，研究人员开始尝试用非完备算法求解 SMT。Fröhlich 等人针对位向量理论上的 SMT 公式 (SMT(BV))，提出了在理论层面设计局部搜索算法，将 SAT 的局部搜索算法中的一些先进技术提升到理论层面上^[57]。Niemetz 等人进一步将位向量上的推理机制与局部搜索算法相结合^[58-59]，从而大幅提高了局部搜索的效果。特别是当将局部搜索与基于 bit-blasting 的完备算法混合使用时，对很多 SMT(BV) 实例的求解可以加速 1~3 个数量级。但位向量是比较接近于 SAT 的理论，在算术理论等其他理论上如何设计局部搜索算法仍是一个具有挑战性的问题。除了局部搜索之外，研究人员也尝试了其他新颖的非完备算法来求解 SMT 问题。在线性整数理论方面，Bromberger 等人提出了用空间超立方体探测 SMT(LIA) 公式解空间内部的方法，该方法适用于含整数解数目众多的 SMT(LIA) 公式，对于 SMT-LIB 中部分公式的求解速度比目前的 SMT 求解器快了几个数量级^[60]。在浮点数理论方面，Fu 等人将 SMT 转成一个无约束的优化问题，然后用蒙特卡罗马尔可夫链 (MCMC) 的方法求解，在一些实例上获得了比 Z3 等 SMT 求解器快 700 倍以上的效果^[61]。

2.2 形式模型

在计算机科学中，形式模型一般指用来对特定结构（比如串和树）进行接受、生成和变换的数学模型。形式模型包括自动机、文法和重写系统等。对形式模型的研究贯穿计算机科学的发展历程，它奠定了计算机科学的很多分支的理论基础。

图灵机——现代计算机的理论模型，是最早提出和被研究的形式模型之一，它被证明和其他几种形式模型（比如递归函数、 λ 演算等）是等价的。而有限自动机和上下文无关文法是编程语言的词法和语法分析的理论基础。

由于篇幅的限制，本报告主要集中在自动机模型上。经典的自动机模型包括有限自动机、下推自动机、图灵机等。为了将对系统行为的推理从有限状态扩展到无穷状态，从定性推理扩展到定量推理，研究人员考虑了经典自动机模型的各种扩展，比如带概率的自动机模型、时间自动机模型、混成自动机模型等。近 20 年来，在工业界尤其在硬件的分析和验证上取得很大成功的自动验证（模型检测）工具，比如 SPIN、UPPAAL、PRISM 等，分别建立在无穷串上的自动机、时间自动机以及概率自动机的基础上。

下面对概率自动机模型、混成自动机模型以及无穷状态并发系统模型近 5 年的国际研究进展进行介绍。

2.2.1 概率自动机模型

为了对概率系统的性质进行推理与验证，研究人员提出了很多概率自动机模型，包括：离散时间马尔可夫链（DTMC）^[86]，连续时间马尔可夫链（CTMC）^[71]，离散时间马尔可夫决策过程（MDP）^[75]，连续时间马尔可夫决策过程（CTMDP）^[89]、概率自动机（probabilistic automata）^[70]。离散时间马尔可夫链和离散时间马尔可夫决策过程可以看成概率自动机的子模型。

概率自动机模型的本质是在经典自动机模型中加入相同行为下的不确定性选择和对应的概率行为，从而在行为标记上同时表达非确定性和概率行为。文献 [103] 指出，概率模型中的非确定性选择非常适合刻画并发和分布式系统。概率系统的性质多用经典逻辑的概率扩展来进行规约，比如概率分支时序逻辑（PCTL）^[113] 概率线性时序逻辑（PLTL）以及它们的结合 PCTL*^[76]。概率模型检测的本质是将验证问题转化为数学问题。比如，离散时间马尔可夫链上的 PCTL 模型检测问题可归约到线性方程组的求解，其时间复杂度是多项式的^[113]；而其上的 PLTL 模型检测问题则更为复杂，是 PSPACE 完全的；该问题在马尔可夫决策过程中则更为复杂，时间复杂度是双指数的^[78]。在连续时间马尔可夫链上，文献 [71] 中最先提出了连续随机逻辑（CSL）的验证算法，随后，文献 [73] 中提出了高效的近似算法。在概率自动机上添加时间属性可以将其扩展为概率时间自动机，概率时间自动机的模型检测问题最早在文献 [97] 中得以研究，其验证基于度量时序逻辑（MTL）^[90]。因其直观易用，文献 [100] 对其进行了系统的研究，尽管 MTL 本身不可判定，但它的很多子逻辑都是可判定的。

和经典的模型检测问题一样，概率模型检测同样面临着状态空间爆炸的问题。针对这一问题的主要优化思路是状态约简和符号化方法。在状态约简方法中，互模拟技术被应用得最多，其主要思想就是把行为一致的状态放在一起，通过求得商系统来缩小状态空间。在概率自动机上，文献 [132] 中首先提出了概率自动机上基于状态的互模拟关系，随后，文献 [81] 中提出了基于分布的互模拟关系，[87] 中提出了基于分布的互模拟关系的高效算法。概率互模拟在逻辑刻画、度量刻画、算法研究以及弱互模拟关系

等方向的工作非常广泛，比如文献 [98, 79, 101, 85, 117]，*在理论层面还有一些基于范畴论的语义和互模拟、模拟关系的刻画，比如 [106]*。而符号化方法则是用二叉决策图（BDD）^[77]节省模型的存储，加快运算效率，近些年多端二叉决策图（MTBDD）在概率模型检测方面有着相当不错的结果^[84]。*基于概率自动机及其他概率模型的概率模型检测在验证实际软件、系统和协议中起到了关键作用。*概率模型检测工具 PRISM^[88]上已经有大量的应用案例，包括随机的分布式算法、通信协议、网络协议、多媒体协议、攻击下的安全性、量子加密协议、仿生算法、控制软件、博弈、性能评估和可靠性、电源管理等。*研究人员已经使用概率时间自动机和概率 I/O 自动机验证了许多在实践中被广泛应用的标准协议，比如 IEEE 802.3 载波监听多点接入/碰撞检测协议^[95-96]、IEEE 1394 火线根竞争协议^[94]、IEEE 802.11 无线局域网协议^[93]、IPv4 Zeroconf(零配置网络服务规范) 协议^[92]和 IEEE 802.15.4 载波侦听多路访问/冲突避免协议 (ZigBee)^[82-83]。*

2.2.2 混成自动机模型

混成系统是一种嵌入在物理环境下的实时系统，一般由离散组件和连续组件连接组成，组件之间的行为由计算模型进行控制，其演化过程由离散事件跳变和连续时间动态过程共同完成。而混成模型是针对混成系统的数学模型。

为了验证混成系统的性质，提出了多种混成模型，如混成自动机 (hybrid automata)^[130]、混成 Petri 网^[131]、混成程序^[132]等，其中混成自动机得到了最为广泛的认可与应用。相较于复杂度高的非线性混成自动机，线性混成自动机复杂度低，可应用于大规模系统形式化验证的优点使其成为过去 20 年混成模型形式化方法研究领域的热点，其理论及方法已颇为成熟，如基于线性混成自动机的验证工具 HyTech^[133]、HyperTech^[134]、d/dt^[135]、SpaceEX^[136]等。最近几年，能更准确刻画混成系统行为的非线性混成自动机的研究也已经引起了学者们的广泛关注，产生了丰富的研究理论及成果，如泰勒模型方法^[137]、边界可达性分析方法^[138-140]、凸优化方法^[141-144]、Hamilton-Jacobi 偏微分方程方法^[145-146]等。

以上提及的主要是针对混成系统中连续动态行为由常微分方程描述的混成模型。而对连续动态行为由时滞微分方程描述的时滞混成模型的形式化验证，自 2004 年文献 [147] 提出基于栅栏函数 (barrier certificate) 对时滞模型进行形式化验证的方法后，时滞混成模型的形式化验证研究基本处于停滞状态。而在近 5 年，时滞混成模型的形式化验证取得了重大的突破。文献 [148] 通过将时滞变量视作扰动因素，提出了非线性时滞动态网络的有界验证方法。文献 [149] 提出了一种基于区间泰勒模型近似的方法，通过计算可达集的过高估计来验证一类最简单的时滞微分方程的安全性和稳定性。文献 [150] 进一步将此方法推广到了验证时滞微分方程的行为是否满足用时序逻辑描述的安全性质中。文献 [151] 提出了基于欧拉方法计算时滞微分方程可达集过高估计的数值方法，同时能够给出严格的误差上界。文献 [152] 中利用敏感性分析给出了一类其解具有同胚性质的时滞微分方程，将常微分方程中利用边界计算可达集的方法推广到了此类时滞微分系统，提出了计算其可达集的过高和过低估计的方法。文献 [153] 将常微分方程可达集计算中的泰勒模型方法推广到了时滞模型中，计算了可达集的过高和过低估计。

2.2.3 无穷状态并发系统模型

无穷状态并发系统模型可以统一在进程重写系统 (Process Rewrite System, PRS) 中^[154]。在进程重写系统框架下，并发系统模型的分类如图 1 所示，其中有我们比较熟悉的有限系统 (FS)、为递归程序建模的系统下推系统 (PDA)、为并发程序建模的系统 Petri 网 (PN)、以及为并发交互系统建模的进程代数 (PA) 等。

在进程重写系统的等价性研究中，首先研究的是强互拟等价性问题，该研究起源于 20 世纪 80 年代。Baeten、Bergstra 和 Klop 在 1987 年证明了 BPA 强互模拟是可判定的^[155]。这在当时是一个相当令人惊奇的结果，因为众所周知的是，BPA 的语言等价问题是不可判定的。接着，Christensen、Hirshfeld、Moller 证明了 BPP 上的强互模拟等价性验证是可判定的^[156]。Hirshfeld 和 Jerrum 进一步将这两个结论加以推广，他们证明了一个包括 BPA 和 BPP 的模型——PA 上的强互模拟也是可判定的^[157]。Stirling 证明了 PDA 上强互模拟等价性验证是可判定的^[158]。Jančar 通过归约 Minsky 机停机问题证明了 PN 上强互模拟验证问题是不可判定的^[159]。因此在进程重写系统中，所有 PN 之上模型的强互模拟等价性验证都是不可判定的。

除了可判定性的研究外，强互模拟等价性验证问题的算法和复杂性也是这一类研究关注的焦点。Balcazar、Gabarró 和 Sántha 首先证明了有限状态系统判定互模拟等价是 P- 难的^[160]，因此进程重写系统上所有模型的强互模拟等价性验证都有 P- 难这个下界。Hirshfeld、Jerrum 和 Moller 在 normed BPA (nBPA) 和 normed BPP (nBPP) 上，证明了这两个模型的强互模拟等价性验证有多项式时间算法^[161-162]。一个模型是 normed，指的是这个模型中的所有进程都能有限终止。在一般 BPA 上，最近，Kiefer 证明了强互模拟等价性验证有 EXPTIME- 难下界^[163]。因此该问题目前的复杂性介于 EXPTIME 和 2-EXPTIME 之间。对于一般 BPP，Jančar 证明了该问题是 PSPACE- 完备的^[164]。最近，Benedikt 等证明了 PDA 上强互模拟的下界是 Non-Elementary^[165]。

如果考虑带内部动作的互模拟等价性验证研究，我们会考虑弱互模拟以及分支互模拟这两类等价性研究。针对弱互模拟，目前公开的问题非常多，我们知道：其一，在 PRS 的绝大部分模型上，如在 BPA 或 BPP 以上的模型，弱互模拟等价性验证是不可判定的；其二，在非常基本的无限状态系统——BPA 和 BPP，乃至 nBPA 和 nBPP 上，弱互模拟等价性验证的判定性至今仍然是公开的。分支互模拟等价是 van Glabbeek 和 Weijland 定义的一种比弱互模拟等价更精细的观测行为等价^[166]。2011 年，Czerwiński、Lasota 和 Hoffman 证明了在 nBPP 上分支互模拟是可判定的^[167]。Czerwiński 和 Jančar 证明了 nBPA 上分支互模拟验证是 NEXPTIME 可解的^[168]。

表 1 中列出了进程重写系统定义的 5 个模型到目前为止的已知判定结果。其中，

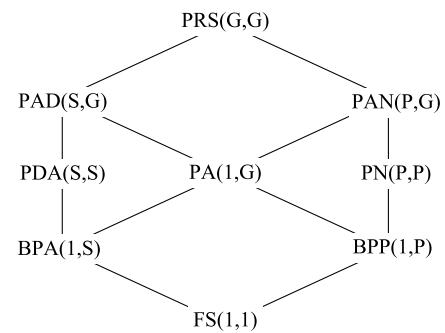


图 1 并发系统模型的分类

“ \sim ” “ \equiv ” “ \approx ” 分别表示强互模拟、分支互模拟和弱互模拟，“ \checkmark ” 表示可判定，“ \times ” 表示不可判定，“?” 表示未知。

表 1 进程重写系统定义的 5 个模型已知判定结果

	BPA	BPP	PDA	PN	PA	nBPA	nBPP	nPDA	nPN	nPA
\sim	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\times	?	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\times	\checkmark
\equiv	?	?	\times	\times	\times	\checkmark	\checkmark	\times	\times	\times
\approx	?	?	\times	\times	\times	?	?	\times	\times	\times

2.3 形式语义与形式建模

对计算机系统进行验证的基础是编程语言的形式语义和对系统行为的形式建模。

形式语义学 (formal semantic) 是研究程序设计语言的语义的学科，以数学为工具，利用符号和公式，精确地定义和严格地解释计算机程序设计语言的语义，从而消除语言设计者、开发者和使用者之间理解的差异性。形式语义学主要分成四大流派：操作语义、代数语义、指称语义和公理语义。其主要作用是帮助理解语言，支持语言标准化，指导语言设计，帮助编写编译器和语言系统，支持程序验证和软件可靠性，有助于软件规范化。4 种语义的主要区别如下所述：

- 1) 操作语义着重模拟数据处理过程中程序的操作。
- 2) 代数语义基于代数，用代数结构刻画程序语法实体，用代数公理刻画实体含义及语法实体间的关系。
- 3) 指称语义主要刻画数据处理的结果，而不是处理的细节。
- 4) 公理语义用公理化的方式描述程序对数据的处理，主要用于程序的推理和验证。

操作语义、代数语义、指称语义和公理语义之间的关系通常采用伽罗瓦连接理论。不同的语义模型之间的伽罗瓦连接理论可以抽象为从一个语义模型元素到另一个语义模型元素的函数，可用于证明程序语言不同语义之间的一致性。

形式建模将计算机软硬件系统的行为和性质用某种形式模型精确地刻画。形式建模一般采用通用形式建模语言（比如 Petri Net、Event-B、Pi-演算、CSP、SysML、Lusture 等）或者专用形式模型（比如有限自动机、下推自动机、概率自动机等）来进行。

早期程序语言的语义只是在论文中给出，这样的语义作用非常有限，既不能用计算机测试语义的正确性和一致性，也不能用于程序的验证和分析，比如文献 [183-184]。

中期的语义一般采用定理证明器（如 Coq、ACL2、Isabelle、HOL 等）的元语言实现，此类语义可用于程序语言语义和程序性质的手动或半自动化验证^[185-189]。另一种技术方法是采用函数式语言实现程序的语义，如文献 [188] 中采用 Haskell 实现 C99 的部分语义，这样的语义可以作为解释器执行 C99 程序。

K 框架是最近流行的一种定义语言的形式语义的途径，其基于重写逻辑，通过定义语言的操作语义，自动生成对应程序的形式分析与验证工具^[190]。2012 年，Ellison 和

Rosu 定义了 C99 标准中的大部分语言成分的语义和标准库函数^[182]，是迄今为止最完备的 C99 语言的语义，该语义在 K 框架中进行了实现，跟文献 [188] 中的语义类似，可作为解释器执行程序，并用 GCC 的压力测试程序进行大规模的测试验证，保证其语义正确性。同时，利用 K 框架的集成工具，可以根据语义快速生成 C99 程序的各种验证工具，如运行时验证、模型检查器、推理验证器等。文献 [218] 对 C 程序语义的定义和应用，给出了一种新型的程序语义的定义方法和程序语义应用模式。基于 K 框架，Java1.4^[191]、JavaScript^[192]、PHP^[193]、Python 3.3^[194]、Rust^[195] 等工业级编程语言的语义也陆续被实现和应用，这些语义大部分都进行了一致性测试，并生成了一些工具用于进行实验性的程序分析与验证。

形式建模方面，函数式程序可以用树自动机^[207]、高阶下推自动机^[208]来建模。尽管理论上 Ong 等人已经证明高阶下推自动机的模型检测问题的复杂性是 n -EXPTIME 完全的^[209]，但以东京大学 Kobayashi 团队为代表的研究小组相继提出一些高效的算法，大大缩短了验证的时间^[210]。另外，实时嵌入式系统一般使用时间自动机来建模，然后进行验证，这方面的主流工具为 UPPAAL^[211]。此外，一种基于 UML 的实时嵌入式系统建模语言 MARTE 近来逐渐成为研究的热点，并成为国际对象管理组织认定的标准建模语言^[212]。MARTE 为专门的系统标准（如 OSEK、ARINC 和 POSIX）提供相应的建模插件，以支持相应系统的建模。

自适应系统与多智能体一般使用 Petri 网^[206]、UML^[213]、Z^[214] 以及马尔可夫模型^[215]等来建模。最近，一些针对自适应系统的新的形式化建模方法被相继提出，如自适应抽象状态机模型^[216,218]和时间 Petri 网^[217]，前者通过 MAPE-K 控制循环描述系统分布式和去中心化的自适应行为，后者通过时间 Petri 网模型来描述系统的实时自适应行为。

最近，深度神经网络的形式建模迅速成为研究热点。神经网络常被形式化表示为一组在整数域或实数域上的线性算术方程组与激活函数对应的非线性方程组的集合^[219]。由于非线性方程的存在，无法利用已有的线性优化算法或者 SMT 求解器进行求解。目前比较普遍的方法是根据具体的非线性方程对线性优化算法或 SMT 求解器进行扩展，验证神经网络的安全性，或找到对抗干扰实例^[219-220]。

2.4 形式规约

除了需要对计算机系统进行形式建模之外，我们还需要对系统应满足的性质进行准确的规约。一般使用逻辑公式对系统的性质进行规约。经典的规约语言包括针对串行程序的一阶逻辑及其扩展分离逻辑、针对并发程序的时序逻辑等。

一阶逻辑在命题逻辑（布尔逻辑）的基础上加入关系（函数）符号和一阶量词。Floyd-Hoare 逻辑将一阶逻辑用于对串行程序的行为进行规约和推理^[231]。Floyd-Hoare 逻辑未提供对内存布局的描述手段，不能刻画“指针”等程序结构。为此，分离逻辑（separation logic）在 2000 年左右被提出^[232]。该逻辑在一阶逻辑的基础上引入了分离算子，即分离合取^{*} 和分离蕴含^{*}。分离算子可以非常方便地表示程序不同组成部分所操作

内存区域的独立性，并在推理规则中将 Floyd-Hoare 逻辑的不变式（invariance）规则替换为框架（frame）规则，从而实现对程序行为的局部推理，而分离逻辑中的归纳谓词则可以非常直观地描述链表和树等动态数据结构。分离逻辑提出后，有一大批在其之上的后续工作，大大推动了程序验证的发展。

Floyd-Hoare 逻辑和分离逻辑比较适合对串行程序终止时的输入和输出应该满足的关系进行规约，而并发程序一般不终止，对其进行规约需要不同的规约语言。时序逻辑是目前使用的主流的并发程序的规约语言。按照对时间的不同解释，时序逻辑大体可以分为线性时序逻辑和分叉时序逻辑两大类，前者如 LTL (Linear-time Temporal Logic) 等，后者如 CTL (Computation Tree Logic)、CTL* 等。

针对串行程序的形式规约语言近 5 年的进展集中在分离逻辑方面。研究人员近 5 年对于带归纳谓词的分离逻辑的各种片段的可判定性、复杂性、判定算法以及启发式算法进行了广泛的探讨。分离逻辑不仅可以描述形状性质，比如链表，也可以描述数据约束，比如有序性。

研究人员首先对不含数据约束的带归纳谓词的分离逻辑的判定算法进行了探讨。Cook 等人证明了含有单链表片段归纳谓词的分离逻辑子集的可满足性问题和蕴含问题是多项式时间可判定的^[233]。Antonopoulos 等人证明了带归纳谓词的分离逻辑的蕴含问题一般是不可判定的^[234]。另一方面，Iosif 等人将分离逻辑嵌入树深度受限的图上的一元二阶逻辑中，证明了带某一类归纳谓词的分离逻辑的蕴含问题是可判定的^[235]。而且，Brotherston 等人对于带比较一般的归纳谓词的分离逻辑的可满足性问题进行了深入的研究，他们证明了该逻辑的可满足性问题是 EXPTIME- 完全的^[236]。Iosif 等人将带归纳谓词的分离逻辑的蕴含问题归约成树自动机的语言包含问题，开发了分离逻辑蕴含问题求解器 SLIDE^[237]。

研究人员在含有可以描述数据约束的归纳谓词的分离逻辑方面也进行了广泛的探讨。Chin 等人和 Qiu 等人考虑了带归纳谓词和一般数据约束（比如算术约束、集合约束、多重集约束等）的分离逻辑，提出了求解蕴含问题的启发式算法^[238-239]。他们还对带线性算术数据约束的归纳谓词的分离逻辑的可满足性问题进行了研究，提出了启发式算法，并对这些算法在哪些子类上是完备的进行了探讨^[240-241]。Piskac 等人将分离逻辑公式嵌入经典一阶逻辑的含有集合变量和可达谓词的某种扩展，使得可以对序关系和集合数据约束进行描述推理^[242-243]。Enea 等人提出了可组合归纳谓词的概念，简化了对含有归纳谓词和复杂数据约束的分离逻辑公式的求解^[244]，但他们提出的算法是不完备的。

针对并发程序的规约逻辑 LTL 由 Pnueli 提出^[245]，其在命题逻辑的基础上引入了 Next(X) 和 Until(U) 两个时序算子。LTL 由于具有简洁、直观的特点，同时有具有相对较强的表达能力，因而在验证领域被广泛使用。LTL 能够表达全部 star-free 的 ω -正规性质，其模型检测问题及可满足性判定问题都是 PSPACE- 完全的^[246]。CTL 由 Clarke、Emerson 等人提出^[247]。同 LTL 相比，CTL 中引入了全称路径量词 A 和存在路径量词 E(二者互为对偶关系)。CTL 的模型检测问题可在多项式时间内完成^[248]；CTL 的可满足性问题是 EXPTIM- 完全的^[250]。CTL* 是 LTL 与 CTL 的共同超集。CTL* 公式的模型检测

问题也是 PSPACE-完全的^[248,251]，其可满足性问题是 2EXPTIME-完全的^[249]。

时序逻辑方面近 5 年的进展集中在经典时序逻辑 LTL、CTL 和 CTL* 的各种扩展上，包括博弈扩展、概率扩展、实时扩展、量子扩展等。

首先，研究人员提出了用于描述多主体系统性质的时序逻辑的博弈扩展，比如 ATL、ATL*^[252]、Strategy Logic^[253] 等。ATL 的模型检测问题是 PTIME-完全的^[252]；其可满足性问题是 EXPTIME-完全的^[254]。ATL* 是 ATL 的扩展，ATL* 的模型检测问题以及可满足性问题的复杂度均是 2EXPTIME-完全的^[252,255]。Strategy Logic 具有非常强的表达能力，即使是其一次交错片段（否定范式公式中量词 \forall 和 \exists 最多只能嵌套交错一次的公式构成的片段），也能够编码全部的 ATL* 公式。该逻辑可以描述纳什均衡、安全均衡等重要的性质。Strategy Logic 的模型检测问题和可满足性问题是非初等可判定的^[256]。但是，对于其一些简单的片段，如一次交错片段，其模型检测问题是 2EXPTIME-完全的^[256]。

时序逻辑的概率扩展主要包括 PCTL、PCTL* 等，它们的语义定义在离散马尔可夫链或者离散马尔可夫决策过程（MDP）上。对于离散马尔可夫链模型，PCTL 的模型检测问题可在多项式时间内完成^[113]，而 LTL 和 PCTL* 的模型检测问题仍是 PSPACE-完全的^[257-259]。对于离散马尔可夫决策过程，PCTL 的模型检测问题也可以在多项式时间内完成，但 LTL 的模型检测问题却是 2EXPTIME-完全的（即使是定性验证）^[78]。PCTL 的可满足性问题比较复杂，目前还没有完全得到解决。

时序逻辑的实时扩展，典型包括 MTL 和 TCTL：前者定义在线性结构上，后者定义在分支结构上。MTL 可以看作是 LTL 的扩展，它取消了 X 算子，并在 U 算子上附加一个区间下标 I ——其 Until 公式形如 $f_1 U_I f_2$ ，它显式地指明了 f_2 成立的时刻应当位于区间 I 内^[260]。TCTL 在 CTL 的基础上引入了时钟变量，并取消了 X 时序算子^[260]。这两类逻辑的语义均定义在实时系统上（如时间自动机）。MTL 的可满足性问题和针对时间自动机的模型检测问题在连续时间上是不可判定的^[261]，在离散时间上是 EXPSPACE-完全的^[262]。

时序逻辑的量子扩展主要包括 QCTL、QCTL* 等，其语义主要定义在量子马尔可夫链上。QCTL 在量子马尔可夫链上的验证可在多项式时间内完成^[272]；同样，该逻辑的可满足性的判定问题目前仍然没有解决。关于量子马尔可夫链上的 LTL 模型检测问题，国内外学者仍在进行研究。

另外，研究人员针对计算机安全的背景，提出了时序逻辑的“超性质”的扩展^[263]，主要包括 HyperLTL、HyperCTL* 等。HyperLTL 的模型检测算法在最坏情况下是非初等可判定的，同时这两种逻辑的可满足性问题也是非初等可判定的，但对于其某些特定片段却存在较为高效的算法^[263]。Finkbeiner 等人给出了关于 HyperLTL 和 HyperCTL* 的模型检测的实现^[264]。

2.5 形式验证技术与方法

形式验证包括 4 种技术与方法，即演绎推理、抽象解释、模型检测和符号执行。

演绎推理的基本思想是，将程序满足其形式规约的证明问题转化为一组数学命题的证明。这组数学命题被称为证明义务（proof obligation）。若这组证明义务的证明确实能够蕴含“程序满足其规约”这一命题，那么我们就说该证明系统是正确（sound）的。Floyd-Hoare 逻辑是一种经典的基于演绎推理的验证系统。

抽象解释理论是一种对程序语义进行可靠抽象（或近似）的通用理论^[331]。该理论为程序分析的设计和构建提供了一个通用的框架^[332]，并从理论上保证了所构建的程序分析的终止性和可靠性（即考虑了所有的程序行为）。抽象解释本质上是通过对程序语义进行不同程度的抽象以在分析精度和计算效率之间取得权衡。这种由（面向某类性质的）语义抽象及其上的操作所构成的数学结构称为抽象域。到目前，已出现了数十种面向不同性质的抽象域。其中，代表性的抽象域有区间抽象域、八边形抽象域、多面体抽象域等。

模型检测的基本思想是通过遍历系统的状态空间以验证系统模型是否满足给定的关键性质，并在不满足性质时给出具体反例路径。因此，如何对模型状态空间进行快速遍历对于模型检测至关重要，而状态空间爆炸问题则自然成为模型检测技术面临的主要问题。与模型检测技术取得成功的硬件领域相对比，软件系统的状态空间复杂性大幅提高。由于模型检测覆盖范围较广，鉴于篇幅所限，本报告中我们将以软件模型检测为代表，来对软件模型检测近期技术的进展做一个总结。

符号执行^[393-396]提供了一种系统性遍历程序路径空间的手段，符号执行中的程序路径精确刻画了这条路径上的程序信息，可基于路径信息开展多种软件验证确认阶段的活动，包括自动测试、缺陷（包括功能缺陷）查找以及部分程序验证等。理论上，相比于需要固定程序输入的分析方法，符号执行通过符号分析，能覆盖更多的程序行为。另一方面，符号执行技术依赖于 SAT/SMT 技术，求解器的能力是决定符号执行效果的关键因素；同时，符号执行中程序路径空间大小随着程序规模的增大而呈指数级增长，例如，单就串行程序来讲，一个具有 n 个条件语句的程序段，就有可能包含 2^n 条路径，这也是制约符号执行能力的关键因素。

2.5.1 演绎推理

近年来基于演绎推理的程序验证技术方面有大量突破性进展，在此很难一一介绍，我们仅仅介绍其中一些最具代表性的工作。

分离逻辑是近年来程序验证领域的重大突破之一，它由 Reynolds、O’Hearn、Ishtiaq 和 Yang 等人在 2000 年前后提出^[274-275, 196, 232]。并发分离逻辑是 Brookes^[278] 和 O’Hearn^[279] 对分离逻辑的扩展，支持对共享内存的并发程序的验证。它的基本思想是要求并发任务对共享资源（包括内存）的访问在互斥的临界区中进行。而在临界区之外，并发任务只能访问自己的私有资源。要实现这一点，必须有效保证共享资源和私有资源的分离，以及不同任务各自的私有资源的分离。而分离逻辑中的分离合取恰恰能够用来方便地描述这一点。并发分离逻辑主要针对良好同步（properly synchronized）的程序的验证，之后有大量工作对并发分离逻辑进行扩充，以支持细粒度并发或者无锁并发程序的验证。在 Brookes 和 O’Hearn 的综述文章中^[280]，对基于并发分离逻辑开展的工作有完整的介绍，

在此不再赘述。

并发分离逻辑及其扩展大多针对串行一致性内存模型上的并发程序开展验证。然而，由于处理器体系结构中以及编译器中引入的种种优化，导致并发程序的行为并不满足串行一致性。这些行为统称为弱内存模型。近年来，Viktor 等人对并发分离逻辑进行扩展，提出一系列在 C11 内存模型上的程序逻辑^[281-287]，证明 C11 内存模型（子集）上程序的正确性。

关系型程序逻辑可以验证两个程序之间的关系，或者一个程序在两种输入下的行为之间的关系。前者可用于程序精化的验证，而后者则可用于安全性质，特别是信息流控制（information flow control）机制的验证。Benton^[288] 和 Yang^[289] 较早提出关系型程序逻辑。Beringer 和 Hofmann 提出将关系型程序逻辑应用于信息流控制^[290]。Barthe 等在关系型程序逻辑方面开展了大量研究，主要将其应用于安全性质验证^[291-292]。Turon 等^[293] 和 Liang 等^[294] 提出了关系型程序逻辑来开展并发程序的精细化验证。作为对关系型程序逻辑的扩展，Sousa 和 Dillig 提出笛卡儿霍尔逻辑，用于验证 k -safety，即程序 k 次不同执行之间的关系^[295]。

近年来，有大量的基于演绎推理验证技术对实际系统在代码级的验证。其中比较有代表性的包括操作系统内核验证和编译器验证。操作系统内核验证相关的工作包括澳大利亚 NICTA 对 seL4 的验证^[296]、耶鲁大学团队对 CertiKOS 的验证^[297]、中科大团队对 μC/OS-II 的验证等^[40]。编译器验证工作中最著名的是 INRIA 对 CompCert 的验证^[298-299]以及后续工作^[300-302]。此外，还包括对分布式系统的验证^[303-304]、安全系统的验证^[305-308]、文件系统的验证^[309-310]等。

2.5.2 抽象解释

近年来，抽象解释的主要研究进展包括提高分析精度、可扩展性、可行性 3 方面。

在提高分析精度方面，抽象域本身表达能力的局限性是当前面临的主要问题。为了弥补抽象域表达能力的局限性，最近的研究进展可分为两类：（1）通过结合符号化方法来提高分析精度，利用 SMT 求解器^[347,342]、插值^[334]等技术来计算程序语句迁移函数的最佳抽象，以改进抽象域在语句迁移函数上的精度损失；（2）提高抽象域的非线性表达能力，如基于组合递推分析^[345-346]将符号化分析与抽象解释结合起来以生成多项式、指数、对数等形式非线性不变式，基于椭圆幂集来生成二次不变式^[323]等。另外，在面向特定应用改进精度方面，最近有研究^[326]针对实际计算机程序，尤其是嵌入式系统中数值都是有限二进制位数表示的问题，提出了改进策略来提高基于抽象域的分析的精度。

在提高可扩展性方面，如何有效降低存储开销和提高计算效率是目前考虑的主要问题。在这方面，近年来的研究进展包括：

1) 利用变量访问的局部性原理，降低当前抽象环境中所涉及的变量维数，并根据数据流依赖的稀疏性，降低抽象状态的存储开销和传播开销。基于该思想，Oh 等人^[354-355]提出了一种通用的全局稀疏分析框架，在不损失分析精度的前提下能够显著降低时空开销，并在商业化静态分析工具 Sparrow 上进行了应用，取得了显著的可扩展性提升效果。

2) 利用矩阵分解等在线分解优化策略来对抽象域操作的实现算法进行优化。基于该思想,最近Singh等人对实际静态分析工具中常用的八边形抽象域的实现进行了优化,优化后八边形分析的性能提升达140多倍^[359];对多面体抽象域的实现进行了优化,优化后多面体分析的性能提升了2~5个数量级,并且很多原有实现分析不出来的规模较大的实例采用优化后的方法能够分析出来^[360];在此基础上,Singh等人还提出了一种通用的基于分解的优化策略^[361],能够在不改变基抽象域的基础上自动实现分解的优化,从而不需要人工重新实现基抽象域,并基于这一思想实现了开源抽象域库ELINA。这种基于在线分解的方法在提高抽象域的分析效率时不会造成精度损失。最近,Singh等人^[362]还提出了一种基于强化学习来加速静态程序分析的方法,在每次迭代中,利用强化学习来决策选哪个转换子,以在精度和不动点迭代收敛速度之间进行权衡。在抽象域编码实现上,Becchi等人^[324-325]最近改进了未必封闭多面体域(支持严格不等式约束)的双重描述法,在表示中避免了松弛变量的引入,极大地提高了分析效率,并在原有广泛使用的多面体抽象域实现库PPL的基础上开发了新的开源实现PPLite。为了提高形态分析的分析效率,Li等人^[343]提出一种方法对程序的抽象状态做二次抽象以合并相似的抽象状态,从而降低形态分析中析取抽象状态数,提高了分析效率。

在提高可行性方面,复杂数据结构自动分析的支持、不同谱系目标程序的支持、活性性质分析的支持是目前主要的关注点。在复杂数据结构的自动分析方面,最近的研究重点关注针对数组内容的精确分析^[348]、混杂数据结构的建模^[344]、数值与形态混合的程序分析^[330,337]、关系型形态分析^[340]。在支持不同谱系目标程序方面,最近的研究重点关注多线程程序的自动分析^[349]、中断驱动型程序的自动分析^[365-366,363]、概率程序的分析^[327]、操作系统代码的安全和功能性分析^[356,344]、JavaScript等动态语言的分析^[458]。在目标性质支持方面,近年来在抽象解释领域出现了一些新的用来分析时序性质和终止性的方法^[351-352]。

2.5.3 模型检测

将状态空间符号化表达,并在符号化后的空间上进行计算和遍历是软件模型检测的基本方法。然而,即使是符号化后的状态空间,其验证也并不是一个简单的问题。因此,如何对复杂状态空间进行抽象简化一直是相关研究的一个重要方向。

反例制导的抽象精化方法(Counter-Example Guided Abstraction Refinement, CEGAR)^[385]是当前复杂系统模型检测的主要手段之一。其基本思路为当抽象后模型违反给定性质时,将相关反例在原系统上进行确认,如确认成立则发现反例,否则分析出抽象过程中导致此虚假反例出现的因素,从而对上次抽象进行精化。在CEGAR框架当中如何对相关“反例”进行确认,并进一步对抽象过程进行精化是其中一项重要问题。近年来,此方向上最主要的一个研究方法是基于插值(interpolant)来对抽象谓词进行精化的研究,Wolverine^[392]、UFO^[378],以及文献[383]等均是近年来相关方向的典型工作。以上基于谓词抽象的软件系统模型检测方法在相关领域中发挥了重要作用,比如提高了适用系统规模,可生成实际反例,不会产生误报等。然而,由于软件系统的高复杂性,相关方

法目前可解决问题的规模仍然受到一定限制。

相对应地，在模型状态空间过于复杂的情况下，有界模型检测（Bounded Model Checking, BMC）^[381]思想被提出。BMC思想也被应用在了软件模型检测方向上。自CBMC^[386]、F-Soft^[390]等以来，近10年有大量工具出现并得到有效应用。目前相关方向的工作主要集中于如何对代码中各种数据结构，如数组、位向量、堆等进一步提供编码机制，如何对给定深度内行为空间进行有效编码及剪枝等来提升可验证系统规模，并提高验证效率等^[387-388]。

上文大量BMC工作通过对状态间迁移关系进行一定深度展开后再进行SAT/SMT编码及求解的方式进行。Bradley在2011年提出了IC3方法^[382]，采用逐步展开并推导证明的方式进行求解，以其优异性能及可扩展性在硬件验证领域迅速引起了广泛关注，相关技术也被应用到软件验证中^[384]。除了SMT、IC3之外，将验证问题以Horn子句形式进行编码并求解也是近年来相关方向研究热点之一。随着相关约束求解技术的提升，SeaHorn^[389]、VeriMap^[379]、TRACER^[391]等基于Horn子句的软件验证工具快速涌现。

在上述几大方向的基础上，通过多技术深度融合来进行代码验证是近年来的重要趋势之一。如将抽象解释（Abstract Interpretation）与模型检测相结合，将插值技术与SMT结合等。其中最具有代表性的工作即为近年来引起广泛影响的CPAchecker工具^[380]，其在上述工作基础上提出了可配置验证框架，通过统一接口集成多种求解器和技术来对软件系统进行验证，以期能够得到更好的性能和可扩展性。

在模型检测方面，随着研究工作的逐步深入，可处理问题种类逐步增加，处理效率也得以稳步提升，相关领域引起了越来越广泛的关注。自2012年起召开的一年一度的Software Verification Competition更是会对现有各类验证工具的实用性和处理问题能力进行激烈竞赛和详细分类评估。我们推荐对此领域感兴趣的读者对该竞赛进行关注，从而对软件模型检测的当前处理能力及热点研究现状有一个快速的了解。

2.5.4 符号执行

目前，符号执行技术仍面临提高可扩展性（scalability）与可行性（feasibility）这两方面的挑战。在可扩展性方面，路径空间爆炸和复杂路径约束是导致此挑战的主要原因，因此相关工作主要集中在缓解路径空间爆炸和约束求解优化两个方面；在可行性方面，相关工作则主要集中在环境建模和多形态分析目标两个方面。下面分别对这两方面国际上的最近的研究进展进行介绍。

在缓解路径空间爆炸方面，目前已有工作基本分为两个思路：首先是在具体目标下提供高效的搜索策略，使符号执行分析更快地达到目标，包括提高程序的覆盖率^[459-461]、判断某个程序点是否可达^[462]、产生满足正规性质的程序路径^[463]、探索程序不同版本的差异部分^[464-465]等；然后是通过约束输入范围、削减或合并路径来减小程序的路径空间，包括基于输入模板^[400-401]、程序切片^[402,406,404]、程序抽象（包括摘要技术）^[408-415]、偏序约简^[416-417]、条件合并^[418-419]以及等价路径约简^[420,443,421,407]等方法。此外，还有一些并行符号执行^[466-467]的工作，其基本思想是在多台机器上并行探索程序路径空间，目标也

是缓解路径空间爆炸，不同工作的差别在于探索任务的分配方式及并行算法。

在约束求解方面，已有工作也可分为两方面：在调用求解器前对路径条件的查询进行优化，以减少求解器的调用次数或降低求解时间；支持复杂程序特征的高效编码。第一个方面包括查询缓存和重用^[422-423,425]、基于约束独立性的优化^[401,399]、增量式求解^[401,424]等；第二个方面包括对机器数^[403-404]、数组^[404,397]、浮点^[426-430]、字符串^[431]、动态数据结构^[432-434]等的支持。

在环境建模方面，已有工作基本都是在分析的精确性、可靠性、建模工作量以及可扩展性之间进行权衡和折中，包括手工建模^[401,468]、自动综合^[435]、动态执行^[398]、全栈执行^[402]等。

在多形态分析目标方面，主要是应对多语言和多应用领域的复杂性，包括 C++ 程序^[469-470]、高级语言中多态的处理^[471]、二进制程序^[436,405,437]、脚本语言程序^[439]、分布式程序^[438]、数据库操作程序^[440]、无线传感器网络程序^[441]、并发或并行程序^[442-444]、嵌入式程序^[445]、PLC 程序^[446]等的符号执行方法。

同时，面向新的分析需求，也有一些新的符号执行技术出现，其中比较有代表性的是概率符号执行技术^[449-451]，其基本思想是通过符号执行来得到程序的路径，然后使用 SMT 解空间体积计算技术来计算每条路径的路径条件的解的个数，通过每条路径对应的解的个数，可以计算每条路径的概率。基于此，可以开展包括低概率缺陷查找、低概率路径的测试用例生成、生成程序的性能分布^[452]、刻画代码变迁^[453]等活动。此外，符号执行技术与其他技术之间紧密融合，以提高分析的效果，也是目前新的发展趋势，包括与模型检测^[447]、抽象解释^[455]、模糊测试^[448]、随机测试^[454]等技术结合，以提高程序的覆盖率或缺陷发现效率。

2.6 形式验证工具以及应用

形式化方法早期主要在硬件验证和协议验证中取得应用。近年来，随着形式化技术的快速发展，形式化方法在越来越多的软件系统验证和嵌入式系统验证中得到应用，并取得显著成效。本报告主要围绕软件形式验证工具和面向嵌入式系统的混成系统验证工具进行介绍。

2.6.1 软件形式验证工具

目前软件形式化验证工具的主流技术有两种：基于抽象的技术路线和基于循环/递归展开的技术路线。前者利用抽象技术将程序状态空间映射到一个有限且规模较小的抽象状态空间，再通过遍历所有可达的抽象状态来判断系统是否正确。采用抽象路线的软件形式化验证工具包括 SLAM^[476]、BLAST^[472]、CPAChecker^[475]、UAutomizer^[477]等。后者将程序中所有循环和递归按给定的深度展开，得到一个不含循环和递归的简单程序。这类简单程序的验证问题被归结为一个逻辑公式的可满足性问题，再借助已有的 SMT 工具（如 Z3、MathSAT、Yices）进行求解。采用循环/递归展开技术路线的软件形式化验证工

具包括 CBMC^[474]、ESBMC^[479]、2LS^[473]等。

以抽象解释为代表的程序分析工具近年来也得到了长足发展。相关工具不断涌现，出现了 PolySpace^[480]、Astrée^[481]、aiT WCET Analyzer^[482]、CodeHawk^[483]、Sparrow^[484]、Zoncolan (Facebook)、Julia^[485]等商业化工具和 Frama-C Value Analysis^[486]、CCCheck (Code Contract Static Checker)^[487]、Interproc^[488]、crab-llvm^[489]、IKOS^[490]、MemCAD^[491]、Fluctuat^[492]、Jandom^[493]、JsCFA^[494]、MuJS^[495]等学术界工具。Miné 等人基于 Astrée 开发了面向异步实时程序的扩展版本 AstréeA，以支持多线程 C 程序中运行时错误、数据竞争、死锁等错误的检测，并成功分析了 ARINC 653 航空应用（约 220 万行代码）^[525-526]。

软件形式化验证工具的一个发展趋势是模型检测技术与抽象解释等程序分析技术的融合。Beyer 等人在 2007 年提出可配置程序分析 (Configurable Program Analysis, CPA)^[478] 的思想，实现了静态分析与模型检测在一个理论框架下的融合。基于可配置程序分析的软件验证工具 CPAChecker 曾 4 次 (2012、2013、2015 和 2018 年) 夺得国际软件验证大赛总成绩的冠军。Heizmann 等人于 2013 年提出了一种融合自动机理论^[477]的软件验证方法。他们基于该方法实现的 UAutomizer 工具连续夺得 2016 年和 2017 年国际软件验证大赛总成绩第一名。

作为程序的一种重要形态，并行程序验证成为目前形式化验证的一个热点领域。国际上出现了较多的并行程序验证工具。这些工具分别使用了偏序规约、限界模型检测、抽象精化、组合验证等技术，支持 PThread、OpenMP 以及 MPI 等并行框架，可以对常见静态属性和用户自定义断言属性进行验证。由于并行程序的行为空间异常复杂，目前这一领域的工具开发还处于学术研究阶段，国际上针对并行程序验证的主流工具有 CBMC^[507]、ESBMC^[479]、Lazy-CSeq^[496]、SMACK^[497]、以及 CPA-Seq^[498]等。

随着软件形式化验证工具的日益完善，软件形式化验证在工业界软件，尤其是操作系统、驱动程序、嵌入式程序的分析与验证中得到了成功应用。耶鲁大学采用形式验证开发了一个全新的操作系统 CertiKOS^[499]，号称是世界上第一个“没有 bug”的反黑客攻击操作系统。美国国防高级研究计划局 (DARPA) 在 2012 ~ 2017 年实施了一个 HACMS 项目 (High-Assurance Cyber Military System)^[500]，采用了形式验证方法，在开发一套开源的、高安全确保的操作系统和控制系统组件。微软研究院目前正和卡内基梅隆大学等合作，开展一项雄心勃勃的程序证明项目，即“珠穆朗玛峰 (Everest)”项目^[501]。亚马逊针对其云计算 IaaS 和 PaaS 平台的 S3 对象存储系统、DynamoDB NoSQL 数据库服务、EBS 弹性块存储服务等 10 个系统上使用了形式化验证，显著提高了系统的安全可靠性^[502]。

2.6.2 混成系统验证工具

近年来，相关领域国际科研工作者在非线性混成自动机模型检测工具上投入了大量的精力并取得了一定进展。特别是泰勒模型 (taylor model)，支持函数 (support function) 等数学模型被应用到了混成系统状态域的表达与计算当中。近年出现的工具 Flow*^[505]就是一个成功应用泰勒模型对非线性混成系统进行验证的示例。Flow* 要求混成自动机的流条件必须由多项式微分方程描述。用户给定初始区间与一个固定的基本时间步之后，可利

用泰勒模型来分析它的可达区间。事实上，泰勒模型很适合连续状态的计算，但是当进行离散跳转时需要和转换卫式做相交操作，而这个操作的复杂度很高。与 Flow^{*} 不同，SpaceEx^[506] 允许系统中的不变式、迁移卫式等元素可以为凸函数。同样在给定一个基本时间步之后，可以利用 support function 来计算在此时间步之后的系统状态域。相关工具目前已经在部分非线性系统上进行了验证，但如何扩展可验证系统种类与规模，仍然是一项值得关注的问题。近年来出现的 CORA^[503]、C2E2^[504]、HyPro/HyDRA^[510]、XSpeed^[509] 等工具多采用了类似方法。

除了上述连续时间验证工具，Hylaa^[507]、JuliaReach^[508] 等离散时间非线性混成系统验证工具也于近年来开始出现并得到关注。而机器人、汽车设计等领域的工程设计人员也在 CPSWEEK、ESWEEK、SPIN 等多个重要场合提到了基于离散时间混成自动机进行验证与测试生成对实际项目开发与分析的重要意义。

上述工具主要侧重于非线性系统验证，在线性系统上，近年来的 HyComp^[511]、Lyse^[512] 等工具则是基于约束编码与求解手段的典型代表。由于当前约束求解主要集中于解决线性约束，非线性约束难以求解，HySAT/iSAT^[513] 及 dReach^[514] 提出了基于区间运算进行非线性行为 SMT 编码与求解，并在一些案例上取得较好结果。由于篇幅所限，其他以 KeYmaera^[49] 为代表的混成系统定理证明工具等在此不再赘述。

2.7 量子程序分析与验证

传统计算机科学研究和发展的经验充分说明，要发挥量子计算机的超强计算能力，量子软件是必不可少的。同时，由于量子计算机和传统计算机在信息处理方面有着本质的区别（比如量子信息的不可克隆性和纠缠的非局域作用等特征），量子程序设计将是一个非常困难而容易犯错的过程，甚至需要和经典程序设计完全不同的思维方式。因此，一套行之有效的分析和验证技术对于保证量子程序的正确性显得尤为重要。另一方面，量子硬件设计与制造技术的飞速发展使得人们已经开始乐观预测多于 100 个量子比特的特定用途的量子计算机有望在 5~10 年内实现（最近谷歌展示了 72 个量子比特的计算机芯片）。到那时，量子程序设计和程序验证将成为真正发挥量子计算机作用的关键。

程序分析技术在编译器设计及程序优化等方面有着重要的应用。普林斯顿大学、加州大学圣巴拉拉分校等单位合作设计的量子程序语言 Scaffold^[527] 的编译器 ScaffCC 中已经采用了数据流分析的一些方法，分析量子程序中的纠缠并检查程序是否违反量子不可克隆原理。应明生等研究了有限维希尔伯特空间中循环体为酉算子的量子循环程序的终止问题^[528]，这一结果被进一步推广到循环体为一般超算子的情形，并提供了计算平均执行时间的一般性方法^[529]。注意到微软新近推出的量子程序语言 Q#^[530] 已经支持循环，这一工作可以用来分析 Q# 程序的正确性。Perdrix 与 Jorrand^[531-532] 将抽象解释技术引入量子程序分析，特别是程序中的纠缠及其演化的分析。Honda^[533] 进一步分析了可用 stabilizer formalism 描述的一类特殊量子程序中的纠缠。

量子程序验证研究的一个重要方面是发展适用于量子计算的程序逻辑。Brunet 与

Jorrand^[534]提出了将 Birkhoff- von Neumann 量子逻辑应用于量子程序推理的方法；Baltag 与 Smets^[535]发展了一种可用于量子系统中信息流形式化的动态逻辑；冯元等^[536]发现了关于量子程序的一些有用的推理规则。Chadha、Mateus 与 Sernadas^[537]给出了量子程序在只允许有界迭代的限制下的一个 Floyd-Hoare 型证明系统；Kakutani^[538]试图将 den Hartog 的概率 Hoare 逻辑推广到量子情形，但这些尝试都不成功。应明生建立了一个真正完整的量子 Floyd-Hoare 逻辑，证明了其（相对）完备性^[539]。值得指出的是，量子 Floyd-Hoare 逻辑完备性的证明用到了与经典 Floyd-Hoare 逻辑完备性的证明很不一样的方法，需要采用一些分析数学的技术。

模型检测是计算机系统，包括硬件和软件系统形式化验证的一种重要技术，由于其完全机械化和可以提供错误诊断信息，在工业界得到了广泛的应用。有趣的是，针对量子程序和协议的验证，我们有两种不同的量子马尔可夫链模型以及适用于各自模型的形式化验证方法。I型量子马尔可夫链的状态空间为系统的所有可能量子状态的集合，模型的变迁由描述量子系统演化的超算子给出。对这种类型的量子马尔可夫链，其状态空间的 BSCC 分解、可达空间概率、重复可达概率、persistence 概率等问题都存在多项式时间算法^[542-543]。与之对比，II型量子马尔可夫链的状态空间和传统马尔可夫模型一样是完全经典的，因此在一般情形下也是有限的，但连接经典状态的转移概率被替换成描述量子系统变迁的（不保迹）超算子。这一模型可以非常方便地描述带经典控制流的量子软件系统。文献 [272-273, 544] 中研究了 II型量子马尔可夫链模型下的各种可达性问题，并详细讨论了其对于 QCTL 分枝时序逻辑公式和 ω -正则语言描述的性质的模型检测。通过将概率测度推广到以超算子为值的测度，Anticoli 等开发了一款工具^[546]，可将量子程序语言 Quipper 的程序翻译到 II型量子马尔可夫链，然后用 QPMC 进行验证。

3 国内研究进展

3.1 定理证明

国内在交互式定理证明方面的研究主要集中于证明辅助工具的应用研究上。

在操作系统和编译器方面，文献 [40] 在 Coq 中形式化了一个抢占式操作系统内核验证框架，并基于该框架首次验证了一个商业化抢占式实时操作系统内核 μC/OS-II 的关键功能的正确性；文献 [41] 在 Coq 中形式化了同步数据流语言 Lustre 的编译器，文献 [48] 在 Coq 中实现了同步语言 SIGNAL 的编译器；文献 [43] 对安全增强操作系统中一种常用的访问控制模型在 Isabelle/HOL 中进行了形式化，并验证了其安全性和完备性。

在混成系统验证方面，文献 [73] 在 Isabelle/HOL 中形式化了基于 HCSP 的混成系统建模和验证框架，实现了混成系统的定理证明器，并将其应用到高速列车和航天控制软件的安全性验证中。

在算法验证方面，文献 [42] 在 Isabelle/HOL 证明了判定正则语言的 Myhill-Nerode 定理的正确性；文献 [44] 对可计算性理论进行了形式化，证明了图灵机、算盘机和递归函数 3 种计算模型之间的等价性。

在形式化数学方面，文献 [45-46] 基于 HOL4 系统完成了工程数学中的很多理论的形式化证明，其中复数和 gauge 积分形式化理论库已被英国剑桥大学 HOL4 官方接收，除此之外，他们还研究了空间总线 SpaceWire 的形式化验证。

国内对于自动推理的研究起步较晚，但在某些方面取得了突出成果。

清华大学的周旻博士等人提出了一个名为“惰性分解与调解（lazy decomposition and conciliation）”的 SMT 并行求解框架，并基于 Z3 实现了工具 PZ3。PZ3 在具有稀疏结构的实例上通常可取得超线性的加速比，与国际上先进的 SMT 并行求解器 PCVC4 相比更加高效^[62]。

SMT 公式的可满足性是判定问题，即判断一个给定的 SMT 公式是否有解。在很多情况下，不仅要知道解是否存在，还关心解空间的大小，因此有必要将 SMT 由判定问题扩展为计数问题。中科院软件所的研究人员首先研究了 SMT 公式的解计数/解空间体积计算问题 (#SMT)，并提出了一个基于 DPLL(T) 的精确计算方法——逐簇法^[63]。由于 #SMT 问题具有#P 的复杂度，对于实际应用中的问题，估算更为可行的方法。清华大学的周旻博士提出了一种 SMT(LRA) 解空间大小估算算法，结合了 BDD 的数据结构以及一种采用射线式采样的蒙特卡罗算法^[64]。中科院软件所的葛存菁等人针对凸多面体的体积估算问题，改进了经典的多相位蒙特卡罗算法，可以快速估算出几十维的高维凸多面体体积，并基于此设计了 SMT(LRA) 的解空间大小估算方法^[65]。对于位向量理论上的#SMT 问题和一般的#SAT 问题，葛存菁等人也提出了一个新的基于哈希函数的近似方法，可得到有理论保证的估算结果，并且其求解效率比国际上同类工具提升了 1~2 个数量级^[66]。

此外，国防科技大学张建民、李思昆教授等研究了 SMT 的极小不可满足核问题，通过对极小不可满足核问题的检测，可为 SMT 公式的不可满足性提供精确的解释^[67]。

3.2 形式模型

3.2.1 概率自动机模型

概率自动机及概率模型检测国内近五六年来也涌现了相当多的优秀的结果。概率模型检测方面，文献 [107, 121] 给出了概率混成系统安全性质验证的算法和验证的框架，文献 [108-109] 给出了连续时间马尔科夫过程上连续随机逻辑验证的算法和工具，文献 [110] 给出了马尔科夫人口模型上连续随机逻辑验证的算法，文献 [111] 将概率模型检测中的模型、逻辑、算法进行整合，实现了中国范围内第一个大规模的模型检测工具 iscasMc，该工具由中国科学院软件研究所的张立军研究员主持开发和维护，在概率模型检测功能上做到了广而精。在概率自动机理论和概率模型上的互模拟理论方面，文献

[80, 111-118] 研究了各种概率模型中强互模拟、弱互模拟、模拟以及基于分布的互模拟等概念，并在逻辑刻画、度量刻画、算法优化等角度进行了深入研究，而文献 [119-120] 也在概率自动机理论和概率程序分析方面做出了突破。除此以外，在有关概率模型检测的逻辑理论中，文献 [126] 将线性时序逻辑中安全性 (safety) 和活性 (liveness) 的概念推广到概率分支时序逻辑上，在拓扑刻画、公式分解及安全性活性判定方面取得了突破性的成果，其他在连续时间概率逻辑中的突破工作可参见文献 [127, 129]，这些理论工作对概率模型检测的理论和方法研究都有着长足的作用。

3.2.2 混成自动机模型

近 5 年来，国内学者在混成自动机模型形式化验证方面取得了丰富的成果。文献 [172] 和文献 [169, 171] 中分别提出了基于 SAT-LP-IIS 结合的混成自动机有界验证剪枝与编码技术，以及基于不可行路径的有界验证结论全局推导等技术，有效提高了可验证系统的规模与验证效率。针对半代数混成系统的概率验证问题，文献 [170] 基于栅栏函数的思想，提出了新型方法求取安全概率精确下界。文献 [547] 中提出了利用凸优化计算具有指数变化条件栅栏函数的方法对多项式混成模型进行了形式化验证。文献 [175] 通过释放栅栏函数的约束条件对文献 [547] 做了进一步的推广；文献 [173] 中提出了计算多项式混成模型不变量的方法。文献 [174] 研究了一类解析解可得的非线性模型的可达集计算问题。文献 [144] 将刻画非线性系统可达集的 Hamilton-Jacobi 偏微分方程的求解问题转化为凸优化问题，在此方法中，仅需求解一个凸优化就可同时得到可达集的高估计和低估计。

特别需要强调的是，国内学者近 5 年推动了时滞混成模型形式化验证的发展。文献 [178] 中提出了一种基于区间泰勒模型近似的方法，通过计算可达集的过高估计来验证一类简单时滞微分方程的安全性和稳定性。文献 [152] 提出了基于欧拉方法计算时滞微分方程可达集过高估计的数值方法，同时能够给出严格的误差上界。文献 [153] 中利用敏感性分析给出了一类其解具有同胚性质的时滞微分方程，将常微分方程中利用边界计算可达集的方法推广到了此类时滞微分系统，提出了计算其可达集的过高和过低估计的方法。文献 [153] 中记载了第一个计算时滞系统可达集低估计的工作。

3.2.3 无穷状态并发系统模型

国内上海交通大学 BASICS 实验室在此领域有突出的研究贡献，主要贡献包括证明了 nBPA 上的分支互模拟是可判定的，解决了一个长期公开的问题^[178]，给出了进程重写系统中的 9 类模型上的分支互模拟的可判定与不可判定的分界线^[179]。最近，又证明了 nBPA 上的分支互模拟是 EXPTIME-完备的^[180]，并且给出了一个 nBPA 上分支互模拟判定问题的指数时间下界。该归约构造了指数个冗余集以达到目标^[181]。另外，研究了 PDA 及其扩展系统的等价和可达性问题的判定性结论。在 PDA 的等价性验证方面，证明了将内部动作限制在 popping 动作或 pushing 动作的 PDA 的分支互模拟是可判定的。这一结果比已知的 PDA 的互模拟等价的可判定性和语言等价的可判定性都强。再进一步，证明了这一结果在一定意义上是最强的。

3.3 形式语义与形式建模

形式语义方面最近 5 年的国内研究主要包括如下工作：文献 [197] 中定义了 PTSC 语言的指称语义，其中 PTSC 语言是一种具备概率、时间、共享变量通信并发的语言；文献 [197, 199] 分别对 PTSC 和 Verilog 的操作语义和指称语义的连接理论进行了研究；文献 [200] 中定义了一种模式图建模语言 MDM 的操作语义；文献 [201] 中定义了一种概率中断建模语言 pIML 的指称语义；[202] 定义 SystemC 的指称语义；[204] 定义了一种 Orc 语言的指称语义；文献 [203] 中对 Rust 编程语言操作语义进行了研究，将大部分 Rust 语义成分的语义在 K 框架中实现，语义用 Rust 编译器压力测试程序进行了语义正确性的测试，并利用 K 框架的工具生成了 Rust 程序解释器、调试器和验证工具。

形式建模方面，最近 5 年国内的研究主要包括以下工作：

西安电子科技大学段振华教授的团队建立了一个并行时序逻辑的建模语言 MSVL (Modeling, Simulation and Verification Language)，它是 PTL(Projection Temporal Logic) 的一个可执行子集。他们定义了 MSVL 的模型语义、操作语义和公理语义，开发了相应的编译器。模型检测的一大难题就是系统模型的提取，使用 MSVL 可以直接对系统建模，得到 MSVL 程序，也可以将原有的系统，如 C/Verilog/VHDL 程序转换为 MSVL 程序^[221-222]。为方便转换，开发了相应的转换工具 C2M 和 V2M，从而形成了一个基于 PPTL 和 MSVL 的统一模型检测方法 UMC(Unified Model Checkiing)。另外，为了缓解状态空间爆炸问题，该团队提出了几个很有创新性的理论和方法：①大幅度改进了 CEGAR 方法，将精化时间复杂度从指数阶降为多项式（平方阶），同时将反例路径检测算法时间复杂度从多项式降为线性的；②提出了基于 Craig 插值（interpolation）的安全插值和检错插值，大大缩减了静态分析的状态空间，提高了效率；③提出了一个基于 MSVL 的运行时程序验证方法：一个待验证的系统模型用 MSVL 程序 M 表达，无论直接编码或者转化得到，一个正则性质则用 PPTL 公式表达，该性质的非又可以通过自动转化工具 P2M 转为 MSVL 程序 M'。对新程序 M 和 M' 进行编译，生成可执行代码。执行程序，如果得到 false，则程序满足性质；如果得到 true，一条执行路径便是一个反例。程序的输入怎么产生呢？可以通过两种方法：①应用 DSE 方法对 M 和 M' 进行符号约束，再应用 Z3 求解得到输入变量的初值集；②应用静态分析 CEGAR 方法得到反例路径，再执行程序检测反例的真假。为方便使用，开发了一个工具集 MSV，包括建模工具、执行工具、验证工具、转换工具等。

中国科学技术大学提出了一种基于依赖/保证的模拟关系 RGSim 和一种霍尔风格的程序逻辑实现并发程序精化验证^[223]。

文献 [224] 等提出利用模糊规则和 Petri Net 刻画自适应系统。文献 [225] 等提出基于控制理论的自适应软件建模方法。文献 [226, 227] 等提出对安全威胁相关性质进行描述的时序逻辑 DT-MTL，利用交错自动机生成运行时监控器来实现对无人飞行系统及无人机系统的运行时验证。

3.4 形式规约

南京大学赵建华、李宣东教授的研究团队，提出了分离逻辑的一种变种，称之为 Scope Logic^[265]。该种逻辑中引入了 3 类基本算子，分别对应于基本内存访问、结构字段访问、数组访问操作。这种扩展可以较好地与命令式语言之间产生对应。

中科院软件所的吴志林等人对带归纳谓词的分离逻辑的判定算法进行了深入的研究。他们首先考虑了对 Cook 等人的单链表片段上的多项式时间的结果的扩展，证明了含有双链表片段的归纳谓词的分离逻辑的可满足性问题是 NP- 完全的，而且他们将 Cook 等人的多项式时间的结果扩展到树结构上^[266]。他们对于含有线性算术约束和可组合归纳谓词的分离逻辑子集的判定算法进行了深入的探讨^[267-268]。

西安电子科技大学段振华教授的团队提出了投影时序逻辑 PTL，研究了命题 PTL (PPTL) 的判定性、复杂性和表达性，建立了 PPTL 的一个合理的 (soundness) 且完备的 (completeness) 公理系统。由于 PPTL 是可判定的，而且它的表达能力是完全正则的，不但能够表达常用的 LTL 和 CTL 可以表达的时序性质，而且能够表达更重要的程序性质，例如区间相关的性质以及周期性重复的闭包性质。

华东师范大学的蒲戈光等人在 LTL 的可满足性问题方面展开了深入的探讨，提出了高效的判定算法，并开发了求解器^[122-125,128]。

上海科技大学的宋富等人在文献 [269] 中证明了 ATL、AMC 和 ATL* 在下推多智能体系统上的模型检测问题分别是 EXPTIME-、2EXPTIME- 和 3EXPTIME- 完全的。在文献 [270] 中对策略逻辑 SL 的子类模型检测问题进行了研究，证明 SL[1G] 和 BSIL 子类模型检测问题分别是 3EXPTIME- 和 2EXPTIME- 完全的。

在时序逻辑的概率扩展方面，刘万伟、宋磊、王戟、张立军等人在文献 [271] 中提出了 P μ TL，同 μ^P - 演算相比，它仅包含 $X \geq P$ 这样的概率时序算子。然而，它同样可以规约“区域安全”性质，并与 PCTL 的表达能力不兼容。他们证明了 P μ TL 的可满足性问题属于 2EXPTIME-。

在时序逻辑的量子扩展方面，冯元等人给出了量子马尔可夫链上关于 QCTL 的模型检测算法^[272]。随后，在文献 [273] 中，又给出了关于 ω - 正规性质的模型检测算法。

3.5 形式验证技术与方法

3.5.1 演绎推理

在针对实际系统的基于演绎推理的验证方面，清华大学团队在 Coq 中开展了 Lustre 语言编译器 L2C 的验证^[311-313]。L2C 以扩展的 Lustre 语言为源语言，以 Clight (CompCert 中的 C 语言子集) 为目标语言。编译器在 Coq 中实现并验证。L2C 可以和 CompCert 无缝衔接，最终实现从 Lustre 到汇编的可信编译。中科大团队对商业化嵌入式实时系统 μ C/

OS-II 在 Coq 中开展验证^[40]，完成了近 70% 常用 API 的验证。验证忠于系统原有代码的实现，对源代码改动极少。这是国际上首次对产品级抢占式并发内核的验证。北京航空航天大学团队和合作者对航空航天操作系统的事实标准 ARINC 653 进行了完整的形式化建模，并在模型层面进行了隔离性的验证^[314]。解放军理工大学团队在 Isabelle/HOL 中对优先级继承协议、访问控制协议和文件比较算法等开展了验证^[315, 69, 316]。

在程序逻辑方面，中科大团队先后提出一系列关系型并发程序精化验证逻辑，包括验证线性一致性的逻辑^[294]、对无锁并发程序进展性验证的程序逻辑^[317]、对阻塞算法进展性验证的程序逻辑 LiLi^[318] 及其扩展^[319]等。中科院软件所团队对混成 CSP 提出了一系列程序逻辑^[320-321]，并使用程序逻辑开展了对高铁控制系统的验证^[176]。

3.5.2 抽象解释

国防科技大学的陈立前等人在数值抽象域的设计与实现、基于抽象解释的静态分析等方面开展了深入的研究：针对已有数值抽象域在表达能力方面存在的凸性局限性，提出了绝对值八边形抽象域^[329]、区间线性模板约束抽象域^[368]等非凸数值抽象域，以更精确地分析程序中的析取行为，减少误报；为了提高抽象解释分析的精度，提出了一种结合抽象域与 SMT 的块级抽象解释技术^[375]；基于抽象解释提出了一种面向中断驱动型程序的可靠数值性质分析方法，以检查中断驱动型嵌入式软件中的数值相关运行时错误，并在实际航天工业代码上开展了示范应用^[365-366]；在抽象解释框架下提出了一种通过结合形态抽象和数值抽象来分析链表操作程序的方法，以发现同时包含形态和数值信息的复杂程序性质^[330]；提出了一种深度融合数组抽象和数组上动态数据结构（如数组内部维护的链表）抽象的方法，自动验证了 Minix、TinyOS 等操作系统内存管理、驱动程序等相关模块的正确性性质^[344]。

北京邮电大学的金大海、宫云战等人基于抽象解释围绕区间抽象域扩展、抽象内存建模、缺陷关联等及其在缺陷检测中的应用开展了研究^[336]，并把相关技术应用于缺陷检测工具 DTS 中。南京大学的潘建东等人针对显式和隐式含有析取语义的循环结构，提出了基于循环分解和归纳推理的不变式生成改进方法，缓解了抽象解释分析中出现的语义损失问题^[369]。苏州大学陈冬火等人提出了一种基于凸多面体抽象域的自适应状态空间离散化方法，实现了自适应的基于凸多面体域的强化学习算法^[367]。

3.5.3 模型检测

清华大学形式化验证团队研究基于屏障证书的混成系统验证，提出了一种更一般的、基于指数条件的屏障证书，可以为系统的可达集形成一个更加精确的上近似^[547]。

清华大学贺飞等人研究基于假设/保证（assume/guarantee）规则的组合推理方法。将组合验证和符号化这两种应对模型检测状态空间爆炸的有效技术结合起来，提出了一个完全符号化的、基于假设 - 保证推理的组合验证方法^[548]。他们还提出回归组合验证的思想，给出了基于假设 - 保证推理的回归组合验证框架，并证明了该框架的正确性和完备性^[549]。该团队还研究了概率系统的组合验证问题，通过引入权重自动机，首次实

现了一个正确且完备的概率系统自动组合验证框架^[550,276]。

清华大学贺飞等人开发了一个面向构件化系统的模型检测工具 Beagle。针对构件化系统的特点实现了专属的高效验证算法^[277]，并成功应用于高铁控制设备、航空发动机控制软件的分析与验证中。

南京大学卜磊等提出了在路径求解中不可行子路径定位及状态空间剪枝的方法^[377]，并将其应用到线性数值计算软件代码 BMC 中。南京大学团队在 LLVM 框架下，开发了相关验证工具 BRICK，在数值计算代码的有界模型检测上取得良好效果。

由国防科技大学研发的并行程序验证工具 Yogar-CBMC 在 SV-COMP 2017 和 2018 中连续两年获并行程序验证冠军。该工具结合限界模型检测、抽象精化和图分析等方法对并行程序的并行行为进行抽象，避免了限界模型检测过程中生成复杂的约束表达式。而西安电子科技大学田聪等提出了一个高效的反例路径检测算法和抽象模型精化方法，并将其在软件模型检测工具 CPAChecker 中使用，大幅度提高了程序验证的效率和可验证程序的规模^[375-376]。

在时序性质验证方面，上海科技大学宋富等提出了顺序递归程序 CTL 性质模型检查算法，基于该算法设计实现的模型检查工具 PuMoC 可用于验证布尔程序、C/C++ 和 Java 程序^[373]，同时提出了两种时态逻辑 SCTPL 和 SLTPL 用于更加简洁地描述程序的性质及其程序栈的行为，设计实现了 SCTPL 和 SLTPL 模型检查工具 Pommade，并应用于二进制恶意软件的检测和 C 程序 API 约束检查^[374]。

国防科技大学刘万伟等人针对采用线性规约的软件验证问题，提出了一种轻量级的“保持反例的规约化简”方法^[372]。与传统的规约化简方法相比，它不要求保持规约的等价性，因此扩展了规约化简的范围。

Craig interpolant 生成在软件验证，特别是基于抽象的 CEGAR 验证框架中发挥着重要作用。中科院软件所詹乃军等提出首个非线性 Craig Interpolant 生成算法，将任何两个非线性公式的插值问题归结为两个半代数系统的插值问题，并进一步利用 Positivstellensatz 定理归结为半定规划问题而进行有效求解^[370-371]。相关工作在非线性代码验证、模型检测、定理证明等方面具有重要意义。

3.5.4 符号执行

国内在符号执行方面开展研究的单位主要集中在中国科学院、南京大学、国防科技大学、武汉大学、华东师范大学、西安交通大学等一些单位。下面从缓解路径空间爆炸、约束求解、工具支撑等几个方面阐述国内的进展。

在缓解路径空间爆炸方面，南京大学的李游等人提出了基于子路径频谱覆盖频率的符号执行制导策略，指导符号执行优先探索程序中的罕至部分，以更好地覆盖程序并发现错误^[460]。此外，他们还提出了基于目标的符号执行制导策略，用于确认警报的正确性，降低人工审查的开销。国防科技大学的张羽丰、陈振邦、王戟等人提出了正规性质（所有可用有限状态机表达的性质）制导的动态符号执行方法^[463]，以引导符号执行过程更快地找到被分析程序中满足给定正规性质的路径；在此基础上，提出了基于符号执行

的正规性质符号化验证方法^[407]，能有效削减程序的路径空间，提高验证效率。国防科技大学的陈立前等人基于符号执行技术提出了一种针对浮点程序鲁棒性的自动分析方法^[456]。华东师范大学的苏亭、蒲戈光等人把软件模型检测技术与动态符号执行相结合，用于提高数据流测试的效率^[447]。西安交通大学王海军等人提出了一种程序依赖引导的符号执行技术^[421]，利用程序依赖关系引导符号执行选择性地探索程序路径，在保证和传统符号执行相同的错检测能力的情况下，约简执行重复程序行为的测试案例。

在约束求解方面，南京大学卜磊等提出了将基于机器学习的优化分析技术纳入符号执行框架进行约束求解的方法，通过后台猜值、前台执行确认的迭代方式对难解路径约束进行求解，在含复杂非线性约束、三方库函数调用等的复杂代码案例上取得良好实验效果^[429]。国防科技大学的张羽丰、陈振邦、王戟等人提出了猜测符号执行方法^[424]，以减少符号执行过程中求解器的调用次数。武汉大学贾向阳等提出了一种基于约束之间的逻辑子集/超集关系，可在符号执行中重用约束求解结果，以提高符号执行效率的方法^[425]。

在工具支撑方面，中国科学院软件研究所许振波、张健等人开发了面向真实 C 语言程序的符号执行分析工具 Canalyze^[457]，支持多种程序错误检测的跨过程分析框架。到目前为止，Canalyze 已经在一些重要的开源程序（例如 bftpd-3.8、httpd-2.4.4）中找到上百个程序错误。国防科技大学的张羽丰、陈振邦、王戟等人基于 JPF 开发了针对 Java 的动态符号执行工具，在开源 Java 程序上发现了多个缺陷；同时，开发了 C 程序的单元符号执行工具，支持包含结构体、动态数据结构、指针、浮点 C 程序的符号化分析，并在国防安全关键嵌入式控制程序上进行了应用。华东师范大学的苏亭、蒲戈光等人开发了 C 程序动态符号执行工具 CAUT，并在多个实际嵌入式系统上开展了应用。

3.6 形式验证工具以及应用

3.6.1 软件形式验证工具

在软件形式化验证工具的研发方面，清华大学形式化验证团队开发了一个面向 C 语言的程序验证工具 Ceagle，并基于 Ceagle 参加了国际软件验证大赛（SV-COMP），取得了 2017 年 3 个二级分支（ReachSafety：Array，ReachSafety：ECA，MemSafety：Array）第 1 名的成绩。由国防科技大学研发的并行程序验证工具 Yosar-CBMC 在 SV-COMP 2017 和 SV-COMP 2018 中连续两年获得并行程序验证冠军。该工具结合限界模型检测、抽象精化和图分析等方法对并行程序的并行行为进行抽象，避免了在限界模型检测过程中生成复杂的约束表达式。国防科技大学的陈立前等人基于抽象解释框架，采用开源编译器前端 CIL、开源数值抽象域库 APRON 实现了一个面向 C 程序的数值静态分析工具 CAI，能够分析 C 程序中变量的取值范围并检测除零错、数组越界、算术上溢、空指针解引用等运行时错误，并支持中断驱动型嵌入式软件的分析。

在软件形式化验证应用方面，国内取得了系列成果。中科院软件所研究并行程序的数据竞争和死锁检测^[515]；大连理工大学研究多核限界模型检测^[516]；清华大学研究面向

多核处理器的低级并行程序验证^[517]；国防科技大学研究基于共享内存的并行程序验证^[518]。清华大学研究面向车辆总线网络的运行时验证^[519]。北京邮电大学基于抽象解释开发了缺陷检测工具^[573]。

3.6.2 混成系统验证工具

国内在混成自动机验证工具上也取得系列成果。中科院软件所相关课题组在混成系统形式化方法研究中开发了 MARS 和 HHL 证明器等工具。MARS 主要用于混成系统的建模分析和验证^[520]。HHL 证明器^[521]是面向混成系统的交互式定理证明器。它以 Isabelle/HOL 为基础，形式化了以 HCSP(Hybrid CSP) 为建模语言，以时态演算为性质描述语言的混成 Hoare 逻辑，在此基础上实现了混成系统的验证框架。HHL 证明器主要用于验证基于 HCSP 的混成系统模型的正确性。这些工具应用到了高铁列控系统^[176]和月球车导航与控制系统^[177]等典型混成系统形式化验证上。

南京大学课题组所开发的混成自动机验证工具集 BACH^[522]对单自动机、组合自动机等线性混成系统提供全面支持，可以对路径验证、有界验证、全局验证、乃至在线验证等问题进行快速判定^[169]。BACH 在可处理问题规模与效率上较国际相关领域工具具有明显优势，在国际混成系统有界验证工具比赛有界验证 track 上连续两年获得第一，在国际相关领域引起关注并产生影响。基于工具集 BACH，南大课题组也开展了系列工业级实际系统应用探索。相关典型应用包括 CPS 系统在线验证工作^[523]已经成功部署于列车控制国家工程中心硬件在环仿真平台。以 BACH 作为底层验证器的 IoT 验证修复工具原型“门神”系列，由于其在智能家居领域的重要前景，入选微软年度大会 TechFest，引起广泛关注^[524]。

3.7 量子程序分析与验证

中国科学院软件研究所詹乃军研究组^[540]基于 Isabelle/HOL 设计实现了一个量子 Floyd-Hoare 逻辑的定理证明器。为了提高其自动化程度，文献 [541] 中研究了量子程序不变式与 ranking 函数的生成算法，并将量子程序不变式生成问题转换为半正定规划问题。

中国科学院软件研究所张立军研究组和悉尼科技大学合作开发了一款模型检测工具 QPMC^[545]。该工具使用了一种类似于概率模型检测工具 PRISM^[88]的语法，可以对简单量子程序和协议的 QCTL 性质进行自动化验证。

4 国内外研究进展比较

4.1 定理证明

交互式定理证明在国内的起步较晚，一直到 2000 年以后，清华大学、华东师范大学

等相继举办 Coq 暑期班，它在国内形式化方法领域才逐渐得到推广应用。国外对于交互式定理证明的理论技术和应用两方面都进行了研究，而国内主要集中于交互式定理证明在形式化领域的应用研究。近年来，由于安全攸关软件的发展需求，国内关于交互式定理证明在系统验证等方向的应用研究明显增多，也取得了一些显著的成果，但距离国际领先水平仍存在些许差距。

国内外对 SMT 的研究，大致是因为国外起步较早，所以研究成体系，技术比较成熟。国内的研究起步较晚，但是在某些特定的研究方向上有一定优势。SMT 在国外的发展有很长的历史，主流的求解算法均产生在国外的研究机构。欧美的一些大学和科研机构成立有专门的 SMT 研究组，并开发出一系列成熟的求解工具。最具影响力的 SMT 求解器有 Z3、CVC4，其中微软在很长一段时间内处于领先地位。

相对来说，国内专门研究 SMT 的研究组较少，只有中科院、清华等少数科研院所和高校的科研人员从事这一研究。就研究内容而言，国内的研究工作重点放在一些新兴方向上面，所研发的求解器支持的理论较少。

4.2 形式模型

关于概率自动机模型的研究，绝大多数活跃在国外，国内对于概率自动机模型的研究尚还不够重视，活跃在这一领域的学者还是太少。一方面，我国概率模型检测的起步相对落后于西方，从 2010 年以后才陆续出现我国学者在这一领域发表成果；另一方面，概率自动机模型的研究往往是跨学科、跨背景的，需要一些背景知识和研究经验。不过令人欣喜的是，近些年来越来越多的中国学者在这一方向有所成果、我们也能时常在这一领域看到中国学者的名字。我们在概率自动机以及概率模型检测方面的脚步，已经有追赶上国外的趋势。纵观这一领域，某个重要的定义或者重要领域的发现和开发往往源于西方，而我国学者在之后能做出相当多的成果，这表明现在国内已经具有研究概率模型检测的能力和实力，但在创新性方面表现略显不足。

总体来讲，国内在混成自动机模型的研究方面处于国际前沿，与美国和欧洲等处于同一水平。近年来，中国科学院软件研究所、华东师范大学、南京大学、北京航空航天大学等团队在混成系统建模、验证、分析和设计等方面取得多项具有国际影响的成果，例如，中科院软件所詹乃军等解决了半代数集成为多项式混成系统不变式的充要条件问题，首次提出了时滞混成系统形式验证问题等；北京航空航天大学余志坤等提出基于数值求解的混成系统可达集高效计算方法等。

在无穷状态并发系统模型的研究中，国内的研究进展与国外几个顶级实验室进展速度相当，多方之间在友好竞争当中，获得了越来越多的成果。

4.3 形式语义与形式建模

目前国内程序语言形式语义研究人员相比国外程序语言研究者偏少，研究力量不足，

归其原因是这方面的工作比较基础和冷门，入门门槛高且就业难。

在操作语义和指称语义方面，国外大部分对工业级程序语言的语义进行研究，对语义通常会在定理证明器或 K 框架中实现，实现的语义会进行测试并用于程序的分析和验证；对语义的研究不仅仅为了更好地理解程序语言，而是为了更好地对程序进行分析和验证。与之相反，国内程序语言的语义研究，主要（除 Rust 外）是针对一些学术性语言，还停留在形式语义研究初期的目的，即为了更好地理解程序语言，而非对这些语义进行应用。

尽管国内形式建模方面的研究在近 5 年有较为快速的发展，也有大量的论文发表，然而与国外研究相比，国内的研究多是在国际上提出的形式模型的基础上，做一些扩展性研究工作，缺少原创性工作。另外，与国外许多相对成熟的建模与验证工具相比，如 SPIN^[228]、PAT^[229]、K 框架^[190]、UPPAAL^[211]等，国内开发的形式建模工具多是已有工具的扩展，缺少独立开发的原创性工具，导致在国际上的影响较小。

另一方面，形式化方法作为解决工业应用领域系统安全可靠性问题的重要技术，在国内缺少比较有影响力的成功案例。国际上，有很多有影响力的案例使得产业界对形式化建模与验证有足够的重视，如 Event-B 曾成功用于巴黎地铁的设计与开发^[205]，亚马逊也将 TLA+ 用于 Web Service 的设计与开发^[230]。然而，国内产业界由于形式化方法过于抽象、扩展性等问题，对形式化的重视力度不够，在系统的实际设计与开发过程中未充分发挥形式化方法的作用，缺少具有影响力的成功案例。

4.4 形式规约

国内从事形式规约的研究人员不多，目前流行的形式规约语言，比如分离逻辑、时序逻辑等，基本是国外的研究人员提出来的。国内研究人员在形式规约语言的研究工作集中在对已有规约语言的理论性质（比如表达能力和判定算法）的探讨上。国内研究人员最近 5 年在分离逻辑和时序逻辑的各种扩展上开展了较深入的工作，总体来讲较以前有所进步。

4.5 形式验证技术与方法

与国际研究现状相比，国内在基于演绎推理的验证技术方面工作相对较少，特别是在新型验证理论和程序逻辑方面的工作相对较少。关注的程序性质主要集中在功能正确性方面，对于其他性质（如信息流控制等安全性）的验证工作较少。在并发程序精化验证方面，特别是并发程序的活性验证方面的工作处于国际领先地位。

我国在实际系统方面的验证工作较为活跃，但很多工作集中在模型和算法层面，对于代码的验证工作相对较少。与国际同行相比，验证的系统的规模和影响力上面有所欠缺。

近年来，国外在抽象解释的理论、方法、工具等方面形成了许多有影响力成果，也形成了较多有影响力的开源和商业化的有效工具平台，并且有些工具在工业界取得了

成功应用。国内在新型抽象域的设计与实现、特定领域应用（如中断驱动型程序的分析）方面研究形成特色。然而，国内在基于抽象解释的程序分析工具研发、产业影响等方面还与国外存在一定差距，相信随着国内软件可信需求的不断提升，差距会不断缩小。

在模型检测方面，近年来，国外在软件形式化验证的理论、方法和技术等方面产生了大量有影响力成果，形成了许多高效的软件形式化验证工具。国内在特定领域的研究形成特色，已经达到国际领先的水平，如国防科技大学研发的并行程序验证工具 Yogar-CBMC 等。

在符号执行方面，总体而言，国内在符号执行各个方面研究正逐渐与国外接轨，包括理论、方法与工具等，国内相关研究学者的工作也能发表在主流的符号执行相关的国际会议或期刊上，这些工作也引起了国外学者的注意，同时与国外相关学者的交流与合作也越来越多。然而，国内在符号执行的工具和平台的开发、产业影响方面还与国外存在一定差距，相信随着国内软件行业自主可控需求的不断提升，这部分的差距会不断缩小。

4.6 形式验证工具以及应用

近 10 年来，国外在软件形式化验证的理论、方法和技术等方面产生了大量有影响力成果，形成了许多高效的软件形式化验证工具。国内在软件形式化验证工具开发方面起步较晚，通用工具的研发与国外仍存在较大差距。然而，国内在某些特定领域的研究形成特色，已经达到国际领先的水平，如国防科技大学研发的并行程序验证工具 Yogar-CBMC 等。

在混成自动机验证工具方面，国内外研究各有侧重与特色。国内工作在混成系统定理证明、线性混成自动机有界验证等领域处于国际领先地位。而国外近年来则在非线性混成自动机有界可达性检验方面取得系列进展，开发了以 Flow^{*}、SpaceEx 等为代表的系列工具。

4.7 量子程序分析与验证

从量子程序的分析与验证来讲，国内与国外基本处于同一水平，国内中科院软件所应明生教授团队在量子程序的分析与验证方面处于国际引领地位。

5 发展趋势与展望

5.1 定理证明

定理证明本质上可以看作一个证明搜索问题。由于一般使用的逻辑的不可判定性，一个能够高效率地解决所有证明问题的算法是不存在的。因此启发法（heuristic）的使用

尤其重要。目前交互式定理证明里的自动化在一般情况下还远远不及人类的能力，其中主要问题是人在证明中使用的有目的的搜索还无法在计算机上实现。机器学习，尤其是深度学习的方法为实现这种有目的的搜索提供了新的希望。文献 [34] 中首次把递归神经网络运用到定理证明问题上。在这项工作中，机器学习被用于使用自动定理证明器之前筛选已有定理 (premise selection)，但没有用于指导证明搜索本身。对使用各种机器学习方法指导证明搜索本身也开始有一些研究，比如文献 [36-38]。使用机器学习的一个主要问题是如何获取大量的可供学习的数据。现在使用的一些主要的数据库来自 Mizar 和 HOL Light，各包括几万个定理。更大的数据库还有待建立。除了定理证明本身，机器学习也开始应用于非形式化数学到形式化数学的自动转换^[35]。

当前基于 DPLL(T) 框架的主流 SMT 求解技术已经趋于成熟，但尚不能完全满足现实应用的需要，在一些特定的发展方向上仍有很大的研究空间，包括 SMT 的扩展问题、非完备求解算法等。

SMT 本身为判定问题，但科学的研究和现实世界中的很多问题不仅关心解的存在性，而且要进一步探寻最优解，乃至解空间的大小，因此对 SMT 问题类型的扩展近年来引起了国际学界的重视。上文所提到的 SMT 解计数问题即是一个重要的 SMT 扩展问题，在程序分析与验证、近似推理等领域有广泛的应用前景。另一个热门的扩展方向是将 SMT 由判定问题扩展到优化问题，即优化模理论 (optimization modulo theory)。优化模理论问题旨在求出满足 SMT 约束的最优解，在实际应用中很有意义。目前代表性的研究来自于意大利 Trento 大学^[68-69]。

作为一个 SMT 求解的完备算法框架，DPLL(T) 虽然已取得了巨大的成功，但本质上是基于回溯框架的指数级复杂度的算法，其求解效率难以持续突破，在求解规模上很受限制。近年来，在 SAT 领域，基于局部搜索的 SAT 算法在工业化的例子上取得了较大成功，与基于 CDCL 的完备算法形成了并驾齐驱的局面。在 SMT 领域，当前已有非完备的 SMT 求解算法出现，主要用于 BV 理论。非完备算法在设计上具有灵活性，并对问题的规模不敏感，会是将来 SMT 求解算法的一个发展趋势。

5.2 形式模型

概率自动机模型不仅在概率模型检测上有重要的理论价值和应用场景，在概率程序语义和验证 [91, 99]、随机算法 [115, 72, 105] 甚至机器学习领域^[74, 102]也都有着广泛的应用。这表明，概率自动机模型不仅在形式化验证领域是一个有研究价值的热门话题，在计算机的其他领域，甚至数学、物理、生物、医学等其他自然科学领域，也都有着相当广泛的研究前景，包括概率自动机模型及其相关理论、验证问题和应用都有广泛的研究空间和很高的研究价值。经过了近 30 年对概率模型检测的研究，其理论基础已十分坚实，很多重要问题已经得到解决，但同时不乏一些重要的公开问题（如 PCTL 公式可满足性的判定问题）仍然存在。这一领域仍有很多虽然看起来不大却依然重要的问题有待解决和开发，同时该领域与计算机科学其他领域及其他自然科学的结合也必将成为

新的研究方向。

混成自动机模型的研究取得了一定的进展，但仍有许多问题亟待解决。未来5年，混成自动机模型的研究将集中在以下几个方面：随机和概率混成系统的形式验证，时滞混成系统的形式验证，大规模非线性混成动态模型的形式验证，开放动态模型的行为预测与验证。

无穷状态并发系统模型研究方面取得了很大的进展，有关强互模拟的判定问题大部分已解决，而当允许内部迁移时，互模拟的可判定性结果很少。所以着重解决2.2.3节表1中列出的悬而未决的公开问题，是本领域的趋势。因为这些问题长期公开，所以用已有的证明方法很难得到结果，如何开发新的证明方法，是这一领域的关键所在。

5.3 形式语义与形式建模

从目前国内外程序语言语义的研究来看，未来程序语言语义的研究将针对工业级的程序语言，而非学术性无实际应用的语言；语义研究的目的也不在仅仅为了更好地理解程序语言，而是为了更好地对程序进行分析与验证。

另一方面，多年前就寄望于程序语言设计者在设计语言时对程序的语义进行形式化定义的问题尚未解决。虽然在学术性程序语言提出时，设计者会给出其形式语义，但是对于工业级程序语言，比如C、Rust和Go，设计者都没有定义形式语义，甚至没有完整的形式化语法定义。主要原因是工业级程序语言相对复杂，语义的定义困难，具备这方面能力的工业界人员少，也没有易用的语义开发框架。

新型计算系统如大数据系统、人工智能系统、无人驾驶系统等的出现为形式建模技术的发展带来新的机遇和挑战。系统的智能性、实时性、空间离散性等特征对系统的安全性和可靠性提出更高的要求，迫切需针对这些系统的特性发展新的建模理论、方法和工具，这将成为形式化方法领域研究的热点问题。然而随着系统的复杂性越来越高、特性越来越多，很难定义一种统一的建模方法来完整地描述系统的所有特性。如何在模型的表达能力与验证问题的可判定性及复杂度等方面做出取舍，都是非常具有挑战性的工作。

5.4 形式规约

新的计算模式比如大数据、机器学习算法等不断涌现。这些计算模式下的程序的行为与经典的串行和并发程序非常不同，需要设计新的规约语言以及分析验证方法与技术。针对这些新的计算模式的形式规约语言将是今后5年左右的研究热点。

5.5 形式验证技术与方法

近年来，伴随着云计算、人工智能等各种研究热点，在相关领域中开展的验证也越

来越得到人们的重视。在云计算和分布式系统验证方面，逐步出现了一些对分布式算法和系统的验证工作^[303-304]。但其中对分布式数据一致性协议和算法的验证尚处于起步阶段，国内外相关工作较少。

人工智能算法和演绎推理技术的结合是另外一个很有发展前景的方向。国内外已经有了初步的采用模型检测或者其他技术来对人工智能算法进行验证的工作，但基于演绎推理的验证工作较少。这里的主要困难在于，基于演绎推理的验证技术需要对正确性有形式化定义（什么是正确），同时验证过程本身要求明确验证对象工作的原理（为什么正确）。而以上这两点在人工智能研究领域尚未有明确答案。

未来，抽象解释技术将进一步在新的架构、语言、应用等实际需求驱动下不断发展，值得关注的方向包括对弱内存模型的分析验证^[335,322]、神经网络的分析与验证^[339,364]、大数据处理相关错误的分析^[353]、Python 程序的自动分析^[338]等。与约束求解、自动推理、人工智能等基础支撑技术的紧密结合^[358,350,328,341,357]，将是抽象解释后续研究趋势之一^[333]。同时，降低误报率将依然是基于抽象解释的程序分析技术拓展实际应用的研究挑战和重点。

在模型检测部分，我们主要侧重于一般软件代码近年来相关验证工作的介绍。在此之外，近年来相关领域关注热点进一步拓展到针对多线程代码验证，对递归等特定类型程序验证，对领域相关代码验证等。除了上述安全性（safety）/可达性验证（reachability）之外，软件代码的活性（liveness）/可终止性（termination）验证也是近年来关注热点所在。

在符号执行方面，符号执行技术将进一步在软件工程、安全、系统、网络等相关领域的实际需求驱动下不断发展；面向大规模软件的高效符号执行方法、技术和工具将是下一步的研究挑战和重点；同时，符号执行搜索策略的更加智能化也将是下一步的研究重点；此外，与其他技术在不同层面的密切结合，以进一步提高软件分析效果，也将是符号执行后续的研究趋势之一。

5.6 形式验证工具以及应用

软件形式化验证面临严重的状态空间爆炸问题。软件形式化验证工具研发的一个重要趋势是多技术融合。利用形式化方法的严格性和其他技术的可伸缩性，力求在验证规模和验证精度上达成协调和统一。

混成系统由于其行为离散、连续交织非常复杂，难以掌握与控制，现阶段可进行有效分析的系统种类和规模仍有一定限制。当前主要关注问题包括大规模组合非线性混成系统验证、开放动态系统行为预测与验证、概率随机行为建模与验证、混成系统控制生成以及混成系统测试生成等。相关领域科研人员力图在上述问题上取得突破，力图对实际系统规模问题具备分析能力，从而保障相关系统运行安全。

5.7 量子程序分析与验证

总的来说，虽然量子程序的分析与形式化验证领域已经取得了一些可喜的进展，但

目前的研究还非常零散，很多问题甚至还不清楚如何准确定义。这大体上有两方面的原因：

- 1) 尽管最近几年量子硬件设备的物理实现取得了长足的进展，但距离能够运行真正实用的量子程序的通用量子计算机仍然非常遥远。因此绝大部分传统计算机科学家以及程序设计和验证方面的专家还持观望态度，并没有对这一领域给予足够多的重视。
- 2) 由于量子程序和传统计算机程序相比具有很大的不同，特别是由于量子叠加和纠缠的存在，量子程序的验证往往非常困难。但是，我们有理由相信，量子程序理论和验证的研究将会吸引越来越多计算机科学家的关注，从而带动这一领域蓬勃发展。

6 结束语

形式化方法是计算机科学的传统研究方向，其涵盖很多不同的研究方向。本报告对形式化方法各个方面近 5 年的研究进展进行了相对全面的总结，对发展趋势进行了展望。希望本报告能够让计算机科学与技术的其他领域的研究人员和 IT 产业界的从业人员更好地了解形式化方法这个学科的内涵、外延以及国内外研究现状，促进形式化方法跟其他领域的交叉融合，促使形式化方法在 IT 产业界得到更多应用。

参考文献

- [1] J C B, Cezary Kaliszyk, Lawrence C Paulson, Josef Urban. Hammering towards QED [J]. Journal of Formalized Reasoning, 2016, 9(1) : 101-148.
- [2] J C B, Sascha Böhme, Lawrence C Paulson. Extending Sledgehammer with SMT solvers [J]. Journal of Automated Reasoning, 2013, 51(1) : 109-128.
- [3] L C Paulson. A mechanised proof of Gödel's incompleteness theorems using Nominal Isabelle [J]. Journal of Automated Reasoning, 2015, 55(1) : 1-37.
- [4] J Avigad, J Hözl, Luke Serafin. A formally verified proof of the Central Limit Theorem [J]. Journal of Automated Reasoning, 2017, 59(4) : 389-423.
- [5] A Mahboubi, G Melquiond, T Sibut-Pinote. Formally verified approximation of definite integrals [C]. ITP 2016, LNCS 9807, 2016: 274-289.
- [6] F Immler, C Traut. The Flow of ODEs [C]. ITP 2016, LNCS 9807, 2016: 184-199.
- [7] F Immler. A Verified ODE Solver and the Lorenz Attractor [J]. Journal of Automated Reasoning, 2018, 61(1-4) : 73-111.
- [8] J Hözl, A Heller. Three Chapters of Measure Theory [C]. ITP 2011, LNCS 6898, 2011: 135-151.
- [9] J Hözl. Markov chains and Markov decision processes in Isabelle/HOL [J]. Journal of Automated Reasoning, 2017, 59(3) : 345-387.
- [10] M Abdulaziz, L C Paulson. An Isabelle/HOL Formalization of Green's Theorem [C]. ITP 2016, LNCS

- 9807, 2016: 3-19.
- [11] J Blanchette, N Peltier, S Robillard. Superposition for datatypes and codatatypes [C]. IJCAR 2018, LNCS 10900, 2018: 370-387.
 - [12] A Bentkamp, J Blanchette, S Cruanes, U Waldmann. Superposition for lambda-free higher-order logic [C]. IJCAR 2018, LNCS 10900, 2018: 28-46.
 - [13] B Bohrer, V Rahli, I Vukotic, M Volp, A Platzer. Formally verified differential dynamic logic[C]. CPP 2017, 2017: 208-221.
 - [14] W Li, L Paulson. A formal proof of Cauchy's residue theorem[C]. ITP 2016, LNCS 9807, 2016: 235-251.
 - [15] W Li, G O Passmore, L C Paulson. Deciding Univariate Polynomial Problems Using Untrusted Certificates in Isabelle/HOL[J/OL]. Journal of Automated Reasoning. <http://doi.org/10.1007/s10817-017-9424-6>, 2017.
 - [16] D Matichuk, T C Murray, M Wenzel. Eisbach: A Proof Method Language for Isabelle[J]. Journal of Automated Reasoning, 2016, 56(3) : 261-282.
 - [17] L de Moura, S Kong, J Avigad, F van Doorn, J von Raumer. The Lean Theorem Prover[C]. CADE 2015. LNAI 9195, 2015: 378-388.
 - [18] G Ebner, S Ullrich, J Roesch, J Avigad, L de Moura. A Metaprogramming Framework for Formal Verification[C]. ICFP 2017, 2017: 34: 1-34: 29.
 - [19] J C Blanchette, S Bohme, A Popescu, N Smallbone. Encoding Monomorphic and Polymorphic types[C]. TACAS 2013. LNCS 7795. 2013: 493-507.
 - [20] J C Blanchette, D Greenaway, C Kaliszyk, D Kuhlwein, J Urban. A Learning-Based Fact Selector for Isabelle/HOL[J]. Journal of Automated Reasoning, 2016, 57(3) : 219-244.
 - [21] C Kaliszyk, J Urban. Learning-assisted Automated Reasoning with Flyspeck[J]. Journal of Automated Reasoning, 2014, 53(2) : 173-213.
 - [22] L Czajka, C Kaliszyk. Hammer for Coq: Automation for Dependent Type Theory [J]. Journal of Automated Reasoning, 2018: 61(1-4) : 423-453.
 - [23] Alexandria[OL]. <http://www.cl.cam.ac.uk/~lp15/Grants/Alexandria/>.
 - [24] R Thiemann, A Yamada. Formalizing Jordan Normal Forms in Isabelle/HOL[C]. CPP 2016, 2016: 88-99.
 - [25] Divasón, S Joosten, O Kunčar, R Thiemann, A Yamada. Efficient Certification of Complexity Proofs - Formalizing the Perron-Frobenius Theorem[C]. CPP 2018, 2018: 2-13.
 - [26] A Bentkamp, J C Blanchette, D Klakow. A formal proof of the expressiveness of deep learning[C]. ITP 2017, LNCS 10499, 2017: 46-64.
 - [27] J Biendarra, J C B, A Bouzy, M Desharnais, M Fleury, J Hözl, O Kunčar, A Lochbihler, F Meier, L Panny, A Popescu, C Sternagel, R Thiemann, D Traytel. Foundational (co)datatypes and (co)recursion for higher-order logic[C]. FroCoS 2017, LNCS 10483, 2017: 3-21.
 - [28] J C B, Fabian Meier, A Popescu, D Traytel. Foundational nonuniform (co)datatypes for higher-order logic[C]. LICS 2017, 2017: 1-12.
 - [29] S Awodey, Á Pelayo, M A Warren. Voevodsky's Univalence Axiom in homotopy type theory[J]. Notices of the American Mathematical Society, 2013, 60(9) : 1164-1167.

- [30] D Licata, M Shulman. Calculating the fundamental group of the circle in homotopy type theory[C]. LICS 2013 , 2013 : 223-232.
- [31] B Zhan. Formalization of the fundamental group in untyped set theory using auto2[C]. ITP 2017 , LNCS 10499 , 2017 : 514-530.
- [32] Gonthier, G, Asperti, A, Avigad, J, Bertot, Y, Cohen, C, Garillot, F, Le Roux, S, Mahboubi, A, OConnor, R, Biha, SO, et al. : A machine-checked proof of the odd order theorem[C]. In ITP 2013 , LNCS 7998 , 2013 : 163-179.
- [33] T Hales, M Adams, G Bauer, T Dang, J Harrison, L T Hoang, C Kaliszyk, V Magron, S Mclaughlin, T T Nguyen, Q T Nguyen, T Nipkow, S Obua, J Pleso, J Rute, A Solovyev, T Ta, N T Tran, T D Trieu, J Urban, K Vu, R Zumkeller. A formal proof of the Kepler conjecture[J]. Forum of Mathematics. 2017.
- [34] G Irving, C Szegedy, A A Alemi, N Eén, F Chollet, J Urban. DeepMath - Deep Sequence Models for Premise Selection[C]. NIPS 2016 , 2016 : 2243-2251.
- [35] C Kaliszyk, J Urban, J Vyskocil. Automating Formalization by Statistical and Semantic Parsing of Mathematics[C]. ITP 2017 , LNCS 10499 , 2017 : 12-27.
- [36] S Loos, G Irving, C Szegedy, C Kaliszyk. Deep Network Guided Proof Search[C]. LPAR 2017 , EPiC 46 , 2017 : 85-105.
- [37] T Gauthier, C Kaliszyk, J Urban TacticToe: Learning to Reason with HOL4 Tactics[C]. LPAR 2017 , EPiC 46 , 2017 : 85-105.
- [38] M Farber, C Kaliszyk, J Urban. Monte Carlo Tableau Proof Search[C]. CADE 2017 . LNCS 10395 . 2017 : 563-579.
- [39] T V H. Prathamesh. Formalizing Knot Theory in Isabelle/HOL[C]. ITP 2015 . LNCS 9236 , 2015 : 438-452.
- [40] F Xu, M Fu, X Feng, X Zhang, H Zhang, Z Li. A Practical Verification Framework for Preemptive OS Kernels[C]. In CAV 2016 , part II , 2016 : 59-79.
- [41] G Shi, Y Gan, S Shang, S Wang, Y Dong, P Yew. A formally verified sequentializer for lustre-like concurrent synchronous data-flow programs[C]. ICSE (Companion Volume) 2017 , 2017 : 109-111.
- [42] C Wu, X Zhang, C Urban. A Formalisation of the Myhill-Nerode Theorem Based on Regular Expressions [J]. Journal of Automated Reasoning , 2014 , 52(4) : 451-480.
- [43] C Wu, X Zhang, C Urban. A Formal Model and Correctness Proof for an Access Control Policy Framework[C]. CPP 2013 , 2013 : 292-307.
- [44] J Xu, X Zhang, C Urban. Mechanising Turing Machines and Computability Theory in Isabelle/HOL[C]. ITP 2013 , LNCS 7998 , 2013 : 147-162.
- [45] Shi Z, Li L, Guan Y, et al. Formalization of the Complex Number Theory in HOL4 [J]. Applied Mathematics & Information Sciences , 2013 , 7(1) : 279-286.
- [46] Shi Z, Gu W, Li X, Guan Y, Ye S, Zhang J. The gauge integral theory in HOL4[J]. Journal of Applied Mathematics , 2013 : 1-7.
- [47] N Zhan, S Wang, H Zhao. Formal Verification of Simulink/Stateflow Diagrams: A Deductive Approach [M]. Berlin: Springer, 2017.
- [48] Yang, Z, Bodeveix, JP, Filali, M et al. Towards a verified compiler prototype for the synchronous language SIGNAL[J]. Front. Comput. Sci. , 2016 , 10(1) : 37-53.
- [49] A Platzer, J Quesel. KeYmaera: A hybrid theorem prover for hybrid systems[C]. IJCAR 2008 , LNCS

- 5195, 2008: 171-178.
- [50] D Kroening, O Strichman, Decision Procedures—An Algorithmic Point of View [M]. Berlin: Springer, 2008.
 - [51] 金继伟, 马菲菲, 张健, SMT 求解技术简述 [J]. 计算机科学与探索, 2015, 9(7): 769-780.
 - [52] SMT-COMP[OL]. <http://www.smtcomp.org/>.
 - [53] C Barrett, C L Conway, M Deters, L Hadarean, D Jovanovic, T King, A Reynolds, C Tinelli. CVC4 [C]. CAV 2011, LNCS 6806, 2011: 171-177.
 - [54] B Dutertre. Yices 2.2[C]. CAV 2014, LNCS 8559, 2014: 737-744.
 - [55] Lde Moura, N Bjørner. Z3: An Efficient SMT Solver[C]. TACAS 2008, LNCS 4963, 2008: 337-340.
 - [56] R Nieuwenhuis, A Oliveras, C Tinelli. Solving SAT and SAT Modulo Theories: From an abstract Davis-Putnam-Logemann-Loveland procedure to DPLL(T)[J]. Journal of ACM 53(6), 2006: 937-977.
 - [57] A Fröhlich, A Biere, C M Wintersteiger, Y Hamadi. Stochastic Local Search for Satisfiability Modulo Theories[C]. AAAI 2015, 2015: 1136-1143.
 - [58] A Niemetz, M Preiner, A Biere. Precise and Complete Propagation Based Local Search for Satisfiability Modulo Theories[C]. CAV 2016, LNCS 9779, 2016: 199-217.
 - [59] A Niemetz, M Preiner, A Biere. Propagation based local search for bit-precise reasoning[J]. Formal Methods in System Design, 2017, 51(3): 608-636.
 - [60] M Bromberger, C Weidenbach. Fast Cube Tests for LIA Constraint Solving[C]. IJCAR 2016, LNCS 9706, 2016: 116-132.
 - [61] Z Fu, Z Su. XSat: A Fast Floating-Point Satisfiability Solver[C]. CAV 2016, LNCS 9780, 2016: 187-209.
 - [62] Xi Cheng, Min Zhou, Xiaoyu Song, Ming Gu, Jiaguang Sun, Parallelizing SMT solving: Lazy decomposition and conciliation[J]. Artificial Intelligence 257, 2018: 127-157.
 - [63] F Ma, S Liu, J Zhang, Volume Computation for Boolean Combination of Linear Arithmetic Constraints [C]. CADE 2009, LNCS 5663, 2009: 453-468.
 - [64] M Zhou, F He, X Song, S He, G Chen, M Gu. Estimating the Volume of Solution Space for Satisfiability Modulo Linear Real Arithmetic[J]. Theory of Computing Systems, 2015, 56(2): 347-371.
 - [65] Cunjing Ge, Feifei Ma, Peng Zhang, Jian Zhang. Computing and estimating the volume of the solution space of SMT(LA) constraints[J/OL]. Theoretical Computer Science. <http://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.10.019>.
 - [66] Cunjing Ge, Feifei Ma, Tian Liu, Jian Zhang, Xutong Ma, A New Probabilistic Algorithm for Approximate Model Counting[C]. IJCAR 2018, LNCS 10900, 2018: 312-328.
 - [67] Jianmin Zhang, ShengYu Shen, Jun Zhang, Weixia Xu, Sikun Li. Extracting minimal unsatisfiable subformulas in satisfiability modulo theories[J]. Comput. Sci. Inf. Syst, 2011, 8(3): 693-710.
 - [68] Roberto Sebastiani, Patrick Trentin. OptiMathSAT: A Tool for Optimization Modulo Theories[C]. CAV 2015, LNCS 9206, 2015: 447-454.
 - [69] Roberto Sebastiani, Silvia Tomasi. Optimization Modulo Theories with Linear Rational Costs[J]. ACM Transactions on Computational Logic, 2015, 16(2): 12: 1-12: 43.
 - [70] Michael O Rabin. Probabilistic Automata[J]. Information and Control, 1963, 6 (3): 230-245.
 - [71] Adnan Aziz, Kumud Sanwal, Vigyan Singhal, Robert Brayton. Model checking continuous time markov chains[J]. ACM Transactions on Computational Logic, 2000, 1(1): 162-170.

- [72] Christel Baier. Quantitative Analysis of Randomized Distributed Systems and Probabilistic Automata[M]. Springer, 2013.
- [73] Christel Baier, Boudewijn R Haverkort, Holger Hermanns, Joost Pieter Katoen. Model checking continuous-time markov chains by transient analysis[C]. CAV 2000, LNCS 1855, 2000: 358-372.
- [74] Borja Balle, Jorge Castro. Adaptively learning probabilistic deterministic automatafrom data streams[M]. Berlin: Kluwer Academic Publishers, 2014.
- [75] Richard Bellman. A markovian decision process[J]. Indiana University Mathematical Journal, 1957, 6 (4) : 679-684.
- [76] Andrea Bianco, Luca De Alfaro. Model checking of probabalistic and nondeterministicsystems [C]. FSTTCS 1995 , LNCS 1026, 1995: 499-513.
- [77] R E Bryant. Graph- based algorithms for boolean function manipulation [J]. IEEE transactionon computers, 1986, 35(8) : 677-691.
- [78] Costas Courcoubetis. The complexity of probabilistic verification[J]. Journal of the ACM, 1995, 42(4) : 857-907.
- [79] Josee Desharnais, Abbas Edalat, Prakash Panangaden. A logical characterizationof bisimulation for labeled markov processes[C]. LICS 1998, 1998: 478-487.
- [80] Christian Eisentraut, Jens Chr. Godskesen, Holger Hermanns, Lei Song, LijunZhang. Probabilistic bisimulation for realistic schedulers[C]. FM 2015, LNCS 9109, 2015: 248-264.
- [81] Yuan Feng, Lijun Zhang. When equivalence and bisimulation join forces in probabilisticautomata[C]. FM 2014, LNCS 8442, 214: 247-262.
- [82] M Fruth. Probabilistic model checking of contention resolution in the IEEE 802. 15. 4low- rate wireless personal area network protocol[C]. ISOLA 2006 , 2006: 290-297.
- [83] M Fruth. Formal Methods for the Analysis of Wireless Network Protocols. PhD thesis[D]. Oxford: Oxford University, 2011.
- [84] M Fujita, P C Megeer, C Y Yang. Multi-Terminal Binary Decision Diagrams; An Efficient Data Structure for Matrix Representation[M]. Berlin: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [85] Jan Friso Groote, David N Jansen, Jeroen J A Keiren, Anton Wijs. An O(mlogn) algorithm for computing stuttering equivalence and branching bisimulation[J]. ACMTransaction on Computational Logic, 2017, 18(2) : 13 : 1-13 : 34.
- [86] Hans Hansson, Bengt Jonsson. A logic for reasoning about time and reliability [J]. Formal Aspectsof Computing, 1994, 6(5) : 512-535.
- [87] Holger Hermanns, Jan Kreal, Jan Kretinsky. Probabilistic Bisimulation: Naturallyon Distributions[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [88] Andrew Hinton, Marta Kwiatkowska, Gethin Norman, David Parker. PRISM: A tool for automatic verification of probabilistic systems[C]. TACAS 2006, LNCS 3920, 2006: 441-444.
- [89] Ronald A Howard. Dynamic programming and markov processes[J]. MathematicalGazette, 1960, 3 (358) : 136.
- [90] Ron Koymans. Specifying real-time properties with metric temporal logic[J]. Real-TimeSystems, 1990, 2 (4) : 255-299.
- [91] Dexter Kozen. Semantics of probabilistic programs[C]. FOCS 1979 , 1979: 101-114.
- [92] M Kwiatkowska, G Norman, D Parker, J Sproston. Performance analysis ofprobabilistic timed automata

- using digital clocks[J]. Formal Methods in System Design, 29, 2006: 33-78.
- [93] M Kwiatkowska, G Norman, J Sproston. Probabilistic model checking of the IEEE 802.11 wireless local area network protocol [C]. PAPM/PROBMIV 2002, LNCS 2399, 2002: 169-187.
- [94] M Kwiatkowska, G Norman, J Sproston. Probabilistic model checking of deadline properties in the IEEE 1394 FireWire root contention protocol[J]. Formal Aspects of Computing, 2003, 14(3): 294-318.
- [95] M Kwiatkowska, G Norman, J Sproston, F Wang. Symbolic model checking for probabilistic timed automata[C]. FORMATS/FTRTFT 2004, LNCS 3253, 2004: 293-308.
- [96] M Kwiatkowska, G Norman, J Sproston, F Wang. Symbolic model checking for probabilistic timed automata[J]. Information and Computation, 2007, 205(7): 1027-1077.
- [97] M Kwiatkowska, G Norman, J Sproston, F Wang. Symbolic Model Checking for Probabilistic Timed Automata[J]. Information and Computation, 2007, 205(7): 1027-1077.
- [98] K G Larsen, A Skou. Bisimulation through probabilistic testing[J]. Information and Computation, 1989, 94(1): 344-352.
- [99] A Legay, A S Murawski, J Ouaknine, J Worrell. On automated verification of probabilistic programs[C]. TACAS 2008, LNCS 4963, 2008: 173-187.
- [100] J Ouaknine, J Worrell. Some recent results in metric temporal logic[C]. FORMATS 2008, LNCS 5215, 2008: 1-13.
- [101] P Panangaden. Metrics for labelled markov processes[J]. Theoretical Computer Science, 2004, 318(3): 323-354.
- [102] D Ron, Y Singer, N Tishby. The power of amnesia: learning probabilistic automata with variable memory length[J]. Machine Learning, 1996, 25(2-3): 117-149.
- [103] V Sassone, M Nielsen, G Winskel. Models for concurrency: Towards a classification[J]. Theoretical Computer Science, 1996, 170(1-2): 297-348.
- [104] R Segala. Modeling, Verification of Randomized Distributed Realtime Systems[D]. Cambridge: MIT, 1995.
- [105] M Swaminathan, J Katoen, E-R Olderog. Layered reasoning for randomized distributed algorithms[J]. Formal Aspects of Computing, 2012, 24(4-6): 477-496.
- [106] N Urabe, I Hasuo. Generic forward and backward simulations III: quantitative simulations by matrices[C]. CONCUR 2014, LNCS 8704, 2014: 451-466.
- [107] L Zhang, Z She, S Ratschan, H Hermanns, E Hahn. Safety verification for probabilistic hybrid systems[J]. European Journal of Control, 2012, 18(6): 305-587.
- [108] Y Gao, E Hahn, N Zhan and L Zhang. CCMC : A Conditional CSL Model Checker for Continuous-Time Markov Chains[C]. ATVA 2013, LNCS 8172, 2013: 464-468.
- [109] Y Gao, M Xu, N Zhan, L Zhang. Model checking conditional CSL for continuous-time markov chains[J]. Information Processing Letters, 2013, 113(1-2): 44-50.
- [110] D Spieler, E Hahn, L Zhang. Model Checking CSL for Markov Population Models[C]. QAPL 2014, EPTCS 154, 2014: 93-107.
- [111] E Hahn, Y Li, S Schewe, A. Turrini, L. Zhang. iscasMc : A Web-Based Probabilistic Model Checker[C]. FM 2014, LNCS 8442, 2014: 312-317.
- [112] D N Jansen, L Song, Zhang. Revisiting weak simulation for substochastic markov chains[C]. QUEST 2013, LNCS 8054, 2013: 209-224.
- [113] C E Isentraut, H Hermanns, A Turrini, L Zhang. Deciding bisimilarities on distributions[C]. QUEST

- 2013, LNCS 8054, 2013; 72-88.
- [114] L Song, L Zhang, J C Godskesen. Bisimulations Meet PCTL Equivalences for Probabilistic Automata [C]. CONCUR 2011, LNCS 6901, 2011; 108-123.
- [115] L Song, L Zhang, J C Godskesen. Bisimulations and Logical Characterizations on Continuous- Time Markov Decision Processes[C]. VMCAI 2014, LNCS 8318, 2014; 98-117.
- [116] L Song, L Zhang, H Hermanns, J C Godskesen. Incremental bisimulation abstraction refinement[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2014, 13(4s) : 1-23.
- [117] L Zhang, D N Jansen. A space-efficient simulation algorithm on probabilistic automata[J]. Information and Computation 249, 2016; 138-159.
- [118] P Yang, D N Jansen, L Zhang. Distribution-Based Bisimulation for Labelled Markov Processes[C]. FORMATS 2017, LNCS 10419, 2017; 170-186.
- [119] C Eisentraut, H Hermanns, J Schuster, A Turrini, L Zhang. The Quest for Minimal Quotients for Probabilistic Automata[C]. TACAS 2013, LNCS 7795, 2013; 16-31.
- [120] Y Feng, L Zhang, D N Jansen, N Zhan, B Xia. Finding Polynomial Loop Invariants for Probabilistic Programs[C]. ATVA 2017, LNCS 10482, 2017; 400-416.
- [121] S Wang, N Zhan, L Zhang. A Compositional Modelling and Verification Framework for Stochastic Hybrid Systems[J]. Formal Aspects of Computing, 2017, 29(4) : 751-775.
- [122] J Li, L Zhang, G Pu, M Y Vardi, J He. LTL Satisfiability Checking Revisited[C]. TIME 2014, 2014; 91-98.
- [123] J Li, G Pu, L Zhang, Z Wang, J He, K G Larsen. On the relationship between LTL normal forms and Büchi automata[C]. Theories of Programming and Formal Methods, LNCS 8051, 2013; 256-270.
- [124] J Li, Y Yao, G Pu, L Zhang, J He. Aalta: an LTL satisfiability checker over Infinite/Finite traces[C]. FSE 2014, 2014; 731-734.
- [125] J Li, L Zhang, G Pu, M Y Vardi, J He. Ltlf satisfiability checking[J]. Computer Science, 2014, 12 (2) : 123-137.
- [126] J P Katoen, L Song, L Zhang. Probably safe or live[C]. CSL-LICS 2014, 2014; 55 : 1-55 ; 10.
- [127] Y Peng, S Wang, N Zhan, L Zhang. Extending Hybrid CSP with Probability and Stochasticity[C]. SETTA 2015, LNCS 9409, 2015; 87-102.
- [128] J Li, L Zhang, S Zhu, G Pu, M Y Vardi, J He. An explicit transition system construction approach to LTL satisfiability checking[J]. Formal Aspects of Computing, 2017, 30(2) : 1-25.
- [129] L Zhang, D N Jansen, F Nielson, H Hermanns. Automata-Based CSL Model Checking[C]. ICALP 2011, LNCS 6756, 2011; 271-282.
- [130] T A Henzinger. The Theory of Hybrid Automata[C]. LICS 1996, 1996; 278-292.
- [131] R David. Modeling of hybrid systems using continuous and hybrid Petri nets[C]. PNPM 1997, 1997; 47-58.
- [132] A Platzer. Differential dynamic logic for hybrid systems[J]. Journal of Automated Reasoning, 2008, 41 (2) : 143-189.
- [133] T A Henzinger, P H Ho, H Wong-Toi. HYTECH: A model checker for hybrid systems[C]. CAV 1997, LNCS 1254, 1997; 460-463.
- [134] G Frehse. PHAVer: Algorithmic verification of hybrid systems past HyTech[C]. HSCC 2005, LNCS 3414, 2005; 258-273.

- [135] E Asarin, T Dang, O Maler. d/dt : A tool for reachability analysis of continuous and hybrid systems [C]. IFAC Nonlinear Control Systems, IFAC Proceedings, 34(6) : 741-746, 2001.
- [136] G Frehse G, C Le Guernic, A Donzé, S Cotton, R Ray, O Lebeltel, R Ripado, A Girard, T Dang, O Maler. SpaceEx: Scalable verification of hybrid systems[C]. CAV 2011, LNCS 6806, 2011: 379-395.
- [137] X Chen, E Abraham, S Sankaranarayanan. Flow * : An analyzer for non- linear hybrid systems[C]. CAV 2013, LNCS 8044, 2013: 258-263.
- [138] B Xue, A Easwaran, N Cho, M Fränzle. Reach- Avoid Verification for Nonlinear Systems Based on Boundary Analysis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(7) : 3518-3523.
- [139] B Xue, M Fränzle, P N Mosaad. Just scratching the surface: Partial exploration of initial values in reach-set computation[C]. CDC 2017, 2017: 1769-1775.
- [140] B Xue, Z She, A Easwaran. Under- Approximating Backward Reachable Sets by Polytopes[C]. CAV 2016, 2016: 457-476.
- [141] H Didier, K Milan. Convex computation of the region of attraction of polynomial control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(2) : 297-312.
- [142] M Shankar, V Ram. Convex computation of the reachable set for hybrid systems with parametric uncertainty[C]. ACC 2016, 2016: 5141-5147.
- [143] B Xue, M Fränzle, N Zhan. Under- Approximating Reach Sets for Polynomial Continuous Systems[C]. HSCC 2018 , 2018: 51-60.
- [144] H Kong, EBartocci, T A Henzinger. Reachable Set Over- Approximation for Nonlinear Systems Using Piecewise Barrier Tubes[C]. CAV 2018 , 2018: 449-467.
- [145] O Bokanowski, N Forcadel, H Zidani. Reachability and minimal times for state constrained nonlinear problems without any controllability assumption[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2010, 48(7) : 4292-4316.
- [146] J F Fisac, M Chen, C J Tomlin andS S Sastry. Reach- avoid problems with time- varying dynamics, targets and constraints[C]. HSCC 2015 , 2015: 11-20.
- [147] S Prajna, A Jadbabaie. Methods for safety verification of time- delay systems[C]. CDC 2005 , 2005: 4348-4353.
- [148] Z Huang, C Fan, S Mitra. Bounded invariant verification for time- delayed nonlinear networked dynamical systems[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2017, 23 : 211-229.
- [149] L Zou, M Fränzle, N Zhan, P N Mosaad. Automatic verification of stability and safety for delay differential equations[C]. CAV 2015 , 2015: 338-355.
- [150] P N Mosaad, M Fränzle, B Xue. Temporal Logic Verification for Delay Differential Equations[C]. ICTAC 2016 , 2016: 405-421.
- [151] M Chen, M Fränzle, Y Li, P N Mosaad, N Zhan. Validated simulation- based verification of delayed differential dynamics[C]. FM 2016 , 2016: 137-154.
- [152] B Xue, P N Mosaad, M Fränzle, M Chen, Y Li, N Zhan. Safe Over- and Under- Approximation of Reachable Sets for Delay Differential Equations[C]. FORMATS 2017 , 2017: 281-299.
- [153] Goubault Eric, Putot Sylvie, Sahlmann Lorenz. Inner and Outer Approximating Flowpipes for Delay Differential Equations[C]. CAV 2018 , 2018: 523-541.
- [154] R Mayr. Process rewrite systems[J]. Information and Computation, 2000, 156(1-2) : 264-286.
- [155] J C M Baeten, J A Bergstra, J W Klop. Decidability of bisimulation equivalencefor processes generating

- context-free languages[C]. PARLE Parallel Architectures and Languages Europe , LNCS 259 , 1987 : 94-111.
- [156] S Christensen, Y Hirshfeld, F Moller. Bisimulation equivalence is decidable for basic parallel processes [C]. CONCUR 1993 , LNCS 715 , 1993 : 143-157.
- [157] Y Hirshfeld, M Jerrum. Bisimulation equivalence is decidable for normed process algebra[C]. ICALP 1999 , LNCS 1644 , 1999 : 412-421.
- [158] C Stirling. Decidability of bisimulation equivalence for normed pushdown processes[C]. CONCUR 1996 , LNCS 1119 , 1996 : 217-232.
- [159] P Jančar. Undecidability of bisimilarity for Petri nets and some related problems [J]. Theoretical Computer Science , 1995 , 148(2) : 281-301.
- [160] J Balcázar, J Gabarró, M Sánchez. Deciding bisimilarity is P-complete[J]. Formal Aspects of Computing , 1992 , 4(1) : 638-648.
- [161] Y Hirshfeld, M Jerrum, F Moller. A polynomial-time algorithm for deciding equivalence of normed context-free processes[C]. FOCS 1994 , 1994 : 623-631.
- [162] Y Hirshfeld, M M Jerrum, F Moller. A polynomial-time algorithm for deciding bisimulation equivalence of normed Basic Parallel Processes[J]. Theoretical Computer Science , 1996(259) : 1-8.
- [163] S Kiefer. BPA bisimilarity is EXPTIME-hard[J]. Information Processing Letters , 2013 , 103(4) : 101-106.
- [164] P Jančar. Strong bisimilarity on basic parallel processes in PSPACE-complete[C]. LICS 2003 , 2003 : 218-227.
- [165] M Benedikt, et al. Bisimilarity of Pushdown Automata is Nonelementary [C]. LICS 2013 , 2013 : 488-498.
- [166] R van Gabbek, W Weijland. Branching time and abstraction in bisimulation semantics[J]. Journal of the ACM , 1996 , 43(3) : 555-600.
- [167] W Czerwinski, P Hofman, S Lasota. Decidability of Branching Bisimulation on Normed Commutative Context-Free Processes[C]. CONCUR 2011 , LNCS 6901 , 2011 : 528-542.
- [168] W Czerwiński, P Jančar. Branching Bisimilarity of Normed BPA Processes Is in NEXPTIME[C]. LICS 2015 , 2015 : 168-179.
- [169] D Xie, W Xiong, L Bu, X Li. Deriving Unbounded Reachability Proof of Linear Hybrid Automata during Bounded Checking Procedure[J]. IEEE Transactions on Computers , 2017 , 66(3) : 416-430.
- [170] C Huang, X Chen, W Lin, Z Yang, X Li. Probabilistic Safety Verification of Stochastic Hybrid Systems Using Barrier Certificates [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems , 2017 , 16(5) : 186 : 1-186 ; 19.
- [171] D Xie, L Bu, X Li. Deriving Unbounded Proof of Linear Hybrid Automata from Bounded Verification [C]. RTSS 2014 , 2014 : 128-137.
- [172] D Xie, L Bu, J Zhao, X Li. SAT-LP-IIS Joint-directed Path-oriented Bounded Reachability Analysis of Linear Hybrid Automata. FMSD 2014 , 2014 : 45(1) : 42-62.
- [173] Q Wang, Y Li, B Xia, N Zhan. Generating semi-algebraic invariants for non-autonomous hybrid systems [J]. Journal of System Science and Complexity , 2017 , 30(1) : 234-253.
- [174] T Gan, M Chen, Y Li, B Xia, N Zhan. Reachability analysis for solvable dynamical systems[J]. IEEE Transaction on Automatic Control , 2018 , 63(7) : 2003-2018.

- [175] L Dai, T Gan, B Xia, N Zhan. Barrier certificates revisited [J]. *Journal of Symbolic Computation*, 2017, 80: 62-86.
- [176] L Zou, J Lv, S Wang, N Zhan, T Tang, L Yuan, Y Liu. Verifying Chinese train control system under a combined scenario by theorem proving[C]. *VSTTE 2013, LNCS 8164*, 2013: 262-280.
- [177] M Yang, N Zhan. Combining Formal and Informal Methods in the Design of Spacecrafts[C]. *SETSS 2014, LNCS 9506*, 2014: 290-323.
- [178] Y Fu. Checking Equality and Regularity for Normed BPA with Silent Moves[C]. *ICALP 2013, Part II, LNCS 7966*, 2013: 244-255.
- [179] Q Yin, Y Fu, C He, M Huang, X Tao. Branching BisimilarityChecking for PRS[C]. *ICALP 2014, Part II, LNCS 8573*, 2014: 363-374.
- [180] C He, M Huang. Branching Bisimilarity on Normed BPA Is EXPTIME- Complete[C]. *LICS 2015*, 2015: 180-191.
- [181] M Huang, Q Yin. Two Lower Bounds for BPA[C]. *CONCUR 2017, LIPIcs 85*, 2017: 20: 1-20: 16.
- [182] C Ellison, G Rosu, An executable formal semantics of C with applications[C]. *POPL 2012*, 2012: 533-544.
- [183] Y Gurevich, J K Huggins. The semantics of the C programming language[C]. In *CSL 1993, LNCS 702*, 1993: 274-308.
- [184] J V Cook, E L Cohen, T S Redmond. A formal denotational semantics for C[R]. Technical Report 409D, Trusted Information Systems, 1994.
- [185] J V Cook, S Subramanian. A formal semantics for C in Nqthm[R]. Technical Report 517D, Trusted Information Systems, 1994.
- [186] M Norrish. C formalised in HOL[R]. Technical Report UCAM-CL-TR- 453, University of Cambridge, 1998.
- [187] M Norrish. A formal semantics for C ++ [R]. Technical report, NICTA, 2008.
- [188] N S Papaspyrou. Denotational semantics of ANSI C[J]. *Computer Standards and Interfaces*, 2001, 23 (3) : 169-185.
- [189] S Blazy, X Leroy. Mechanized semantics for the Clight subset of the C language [J]. *Journal of Automated Reasoning*, 2009, 43(3) : 263-288.
- [190] G Rosu, T-F Serbanuta. An overview of the K semantic framework [J]. *The Journal of Logic and Algebraic Programming*, 2010, 79(6) : 397-434.
- [191] D Bogdanas, G Rosu. K-Java: A Complete Semantics of Java[C]. *POPL 2015*, 2015: 445-456.
- [192] D Park, A Stefanescu, G Rosu. KJS: a complete formal semantics of JavaScript[C]. *PLDI 2015*, 2015: 346-356.
- [193] D Filaretti, S Maffeis. An Executable Formal Semantics of PHP[C]. *ECOOP 2014, LNCS 8586*, 2014: 567-592.
- [194] D Guth. A formal semantics of Python 3. 3 [D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
- [195] S Kan, D Sanan, S Lin, Y Liu, K-Rust: An executable formal semantics for Rust[OL]. CoRR, vol. abs/1804.07608, 2018.
- [196] P O' Hearn, J Reynolds, H Yang. Local reasoning about programs that alter data structures[C]. *CSL 2001, LNCS 2142*, 2001: 1-19.

- [197] H Zhu, F Yang, J He, J Bowen, J Sanders, S Qin: Linking operational semantics and algebraic semantics for a probabilistic timed shared-variable language [J]. *The Journal of Logic and Algebraic Programming*, 2012, 81(1) : 2-25.
- [198] H Zhu, J Sanders, J He, S Qin, Denotational Semantics for a Probabilistic Timed Shared-Variable Language [C]. UTP 2012, LNCS 7681, 2012: 224-247.
- [199] H Zhu, P Liu, J He, S Qin. Mechanical Approach to Linking Operational Semantics and Algebraic Semantics for Verilog Using Maude [C]. UTP 2012, LNCS 7681, 2012: 164-185.
- [200] M Yang, Z Wang, G Pu, S Qin, B Gu, J He. The stochastic semantics and verification for periodic control systems[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(12) : 2675-2693.
- [201] Y Huang, Y Zhao, S Qin, J He. Probabilistic Denotational Semantics for an Interrupt Modelling Language [C]. ICECCS 2015, 2015: 160-169.
- [202] H Zhu, J He, S Qin, P Brooke. Denotational semantics and its algebraic derivation for an event-driven system-level language[J]. *Formal Aspects of Computing*, 2015, 27(1) : 133-166.
- [203] F Wang, F Song, M Zhang, X Zhu, J Zhang. KRust: A Formal Executable Semantics of Rust [C]. TASE, 2018.
- [204] Q Li, Y Zhao, H Zhu, J He. A UTP semantic model for Orc language with execution status and fault handling[J]. *Frontiers of Computer Science*, 2014, 8(5) : 709-725.
- [205] J Abrial. Modeling in Event-B: System and Software Engineering [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [206] J Peterson. Petri Net Theory and the Modeling of Systems[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1981.
- [207] H Comon, M Dauchet, R Gilleron, C Loding, F Jacquemard, D Lugiez, S Tison, M Tommasi. Tree Automata Techniques and Applications[OL]. <http://www.grappa.univ-lille3.fr/tata>.
- [208] T Cachat. Higher Order Pushdown Automata, the Caucal Hierarchy of Graphs and Parity Games [C]. ICALP 2003, LNCS 2719, 2003: 556-569.
- [209] L Ong. On Model-Checking Trees Generated by Higher-Order Recursion Schemes[C]LICS 2006, 2006: 81-90.
- [210] N Kobayashi. Higher-Order Model Checking: From Theory to Practice [C]. LICS 2011, 2011: 219-224.
- [211] K G Larsen, P Pettersson, W Yi. Uppaal in a nutshell[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 1997, 1(1-2) : 134-152.
- [212] M Faugere, T Bourbeau, S Gerard, et al. MARTE: Also an UML Profile for Modeling AADL Applications [C]. ICECCS 2007, 2007: 359-364.
- [213] G Booch, J Rumbaugh, I Jacobson. The Unified Modeling Language user guide [M]. New Jersey: Addison-Wesley, 2001.
- [214] S Kuno and K Fujino. An Application of formal language Z in Software engineering[J]. Technical Report of Ieice Kbse, 1994, 94: 25-32.
- [215] M Beal. The infinite hidden Markov model[J]. NIPS 2001, 2011: 577-584.
- [216] P Arcaini, E Riccobene, P Scandurra. Formal Design and Verification of Self-Adaptive Systems with Decentralized Control[J]. ACM Transactions on Autonomous & Adaptive Systems, 2017, 11(4) : 1-35.
- [217] M Camilli, A Gargantini, P Scandurra. Zone-based formal specification and timing analysis of real-time self-adaptive systems[J]. *Science of Computer Programming*, 2018(159) : 28-57.

- [218] R Lemos, H Giese, H Müller, et al. Software Engineering for Self- Adaptive Systems. A Second Research Roadmap[C]. Software Engineering for Self-Adaptive Systems II. LNCS 7475 , 2013 : 1-32.
- [219] X Huang, M Kwiatkowska, S Wang, et al. Safety Verification of Deep Neural Networks[C]. CAV 2017 , LNCS 10426 , 2017 : 3-29.
- [220] G Katz, C Barrett, D Dill, et al. Reluplex: An Efficient SMT Solver for Verifying Deep Neural Networks [C]. CAV 2017 , LNCS 10426 , 2017 : 97-117.
- [221] Y Yu, Z Duan, C Tian, et al. Model Checking C Programs with MSVL[C]. SOFL 2012 , LNCS 7787 , 2012 : 87-103.
- [222] 段振华, 张康, 田聪, 等. 一种硬件语言 VHDL 到 MSVL 的自动转换系统 [P]. CN 104503816 A , 2015.
- [223] H Liang, X Feng, M Fu. Rely-Guarantee-Based Simulation for Compositional Verification of Concurrent Program Transformations[J]. ACM Transactions on Programming Languages & Systems , 2014 , 36(1) : 1-55.
- [224] Z Ding, Y Zhou, M Zhou. Modeling Self-Adaptive Software Systems By Fuzzy Rules and Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems , 2018 , 26(2) : 967-984.
- [225] W Yang, C Xu, M Pan, et al. Efficient validation of self- adaptive applications by counterexample probability maximization[J]. Journal of Systems and Software , 2018(138) : 82-99.
- [226] G Zhou, W Dong, W Liu, et al. Optimizing Monitor Code Based on Patterns in Runtime Verification [C]. QRS 2017 Companion , 2017 : 348-354.
- [227] 刘斌斌, 刘万伟, 毛晓光, 等. 无人驾驶汽车决策系统的规则正确性验证 [J]. 计算机科学 , 2017 , 44(4) : 72-74.
- [228] G Holzmann. The model checker SPIN[J]. IEEE Transactions on Software Engineering1997 , 23(5) : 279-294.
- [229] J Sun, Y Liu, J Dong. Model Checking CSP Revisited: Introducing a Process Analysis Toolkit[C]. ISOLA 2008 , CCIS 17 , 2008 : 307-322.
- [230] C Newcombe, T Rath, F Zhang, et al. How Amazon web services uses formal methods [J]. Communications of the ACM , 2015 , 58(4) : 66-73.
- [231] C A R Hoare. An Axiomatic Basis for Computer Programming [J]. Communications of the ACM , 1969 , 12(10) : 576-583.
- [232] J C Reynolds. Separation Logic: A Logic for Shared Mutable Data Structures[C]. LICS 2012 , 2012 : 55-74.
- [233] B Cook, C Haase, J Ouaknine, M Parkinson, J Worrell. Tractable Reasoning in a Fragment of Separation Logic[C]. CONCUR 2011 , LNCS 6901 , 2011 : 235-249.
- [234] T Antonopoulos, N Gorogiannis, C Haase, M Kanovich, J Ouaknine. Foundations for Decision Problems in Separation Logic with General Inductive Predicates [C]. FoSSaCS 2014 , LNCS 8412 , 2014 : 411-425.
- [235] R Iosif, A Rogalewicz, J Simacek. The tree width of separation logic with recursive definitions[C]. CADE 2013 , LNCS 7898 , 2013 : 21-38.
- [236] J Brotherston, C Fuhs, J A N Perez, N Gorogiannis. A decision procedure for satisfiability in separation logic with inductive predicates[C]. LICS 2014 , 2014 : 25 : 1-25 : 1.
- [237] R Iosif, A Rogalewicz, T Vojnar. Deciding entailments in inductive separation logic with tree automata

- [C]. ATVA 2014 , LNCS 8837 , 2014: 201-218.
- [238] W N Chin, C David, H H Nguyen, S Qin. Automated verification of shape, size and bag properties via user-defined predicates in separation logic[J]. Science of Computer Programming, 2012 , 77(9).
- [239] P Madhusudan, X Qiu, A Stefanescu. Recursive proofs for inductive tree data- structures[C]. POPL 2012 , 2012: 123-136.
- [240] Q L Le, J Sun, W-N Chin. Satisfiability modulo heap-based programs[C]. CAV 2016 , LNCS 9779 , 2016: 382-404.
- [241] M Tatsuta, Q L Le, W Chin. Decision procedure for separation logic with inductive definitions and Presburger arithmetic[C]. APLAS 2016 , LNCS 10017 , 2016: 423-443.
- [242] R Piskac, T Wies, D Zufferey. Automating separation logic using SMT[C]. CAV 2013 , LNCS 8044 , 2013: 773-789.
- [243] R Piskac, T Wies, D Zufferey. Automating separation logic with trees and data[C]. CAV 2014 , LNCS 8559 , 2014: 711-728.
- [244] C Enea, M Sighireanu, Z Wu. On automated lemma generation for separation logic with inductive definitions[C]. ATVA 2015 , LNCS 9364 , 2015: 80-96.
- [245] A Pnueli. The Temporal Logic of Programs[C]. FOCS 1977 , 1977: 46-57.
- [246] A Prasad Sistla, Edmund M Clarke. The Complexity of Propositional Linear Temporal Logics [J]. Journal of ACM , 1985 , 32(3) : 733-749.
- [247] E A Emerson, E M Clarke. Characterizing Correctness Properties of Parallel Programs Using Fixpoints [C]. ICALP 1980 , LNCS 85 , 1980: 169-181.
- [248] E M Clarke, E A Emerson, A P Sistla. Automatic verification of finite- state concurrent systems using temporal logic specifications [J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS) , 1986 , 8(2) : 244-263.
- [249] Vardi, M Y, L Stockmeyer. Improved upper and lower bounds for modal logics of programs[C]. STOC 1985 , 1985: 240-251.
- [250] M J Fischer, R E Ladner. Propositional modal logic of programs[J]. Journal of Computer and Systems Sciences , 1979(18) : 194-211.
- [251] E A Emerson, Chin-Laung Lei. Modalities for model checking: Branching time logic strikes back[J]. Science of Computer Programming, 1987 , 8(3) : 275-306.
- [252] R Alur, TA Henzinger, O Kupferman. Alternating-Time Temporal Logic[J]. Journal of ACM , 2002 , 49 (5) : 672-713.
- [253] K Chatterjee, TA Henzinger, N Piterman. Strategy Logic[J]. Information and Computation , 2007 , 208 (6) : 677-693.
- [254] Dirk Walther, Carsten Lutz, Frank Wolter, Michael Wooldridge, ATL Satisfiability is Indeed ExpTime-complete[J]. Journal of Logic and Computation , 2006 , 16(6) : 765-787.
- [255] Sven Schewe. ATL * Satisfiability Is 2EXPTIME-Complete[C]. ICALP 2008 , 2008: 373-385.
- [256] F Mogavero, A Murano, G Perelli, M Y Vardi. Reasoning About Strategies: On the Model-Checking Problem[J]. ACM Transactions on Computational Logic , 2014 , 15(4) : 34: 1-34: 47.
- [257] M Y Vardi. Automatic verification of probabilistic concurrent finite- state programs[J]. FOCS 1985 , 1985: 327-338.
- [258] M Y Vardi, P Wolper. Reasoning about infinite computations[J]. Information and Computation , 1994 ,

- 115(1) : 1-37.
- [259] M Y Vardi. Probabilistic linear-time model checking: An overview of the automata-theoretic approach [C]. ARTS 1999, LNCS 1601, 1999: 265-276.
- [260] R Alur, C Courcoubetis, D Dill, Model-checking in dense real-time[J]. Information and Computation, 1993(104) : 2-34.
- [261] T A Henzinger. The temporal specification and verification of real-time systems [D]. Palo Alto: Technical Report STAN-CS-91-1380, Stanford University, 1991.
- [262] R Alur, T A Henzinger. Real-time logics: complexity and expressiveness [J]. Information and Computation, 1993(104) : 35-77.
- [263] Clarkson, M R, Finkbeiner, B, Koleini, M, Micinski, K K, Rabe, M N, Sánchez, C. Temporal logics for hyperproperties[C]. POST 2014. LNCS 8414, 2014: 265-284.
- [264] B Finkbeiner, M N Rabe, C Sánchez. Algorithms for Model Checking HyperLTL and HyperCTL* [C]. CAV 2015, Part I, LNCS 9206, 2015: 30-48.
- [265] J Zhao, X Li. Scope Logic with Local Reasoning and Pre/Post-State Properties[OL]. <http://arxiv.org/abs/1012.2553>. 2010.
- [266] Taolue Chen, Fu Song, Zhilin Wu, Tractability of Separation Logic with Inductive Definitions: Beyond Lists[C]. CONCUR 2017, LIPIcs 85, 2017(37) : 1-17.
- [267] X Gu, T Chen, Z Wu. A complete decision procedure for linearly compositional separation logic with data constraints[C]. IJCAR 2016, LNCS 9706, 2016: 532-549.
- [268] Z Xu, T Chen, Z Wu. Satisfiability of Compositional Separation Logic with Tree Predicates and Data Constraints[C]. CADE 2017, LNCS 10395, 2017: 509-527.
- [269] T Chen, F Song, Z Wu. Global Model Checking on Pushdown Multi-Agent Systems[C]. AAAI 2016, 2016: 2459-2465.
- [270] T Chen, F Song, Z Wu. Verifying Pushdown Multi-Agent Systems against Strategy Logics[C]. IJCAI 2016, 2016: 180-186.
- [271] W Liu, L Song, J Wang, L Zhang. A Simple Probabilistic Extension of Modal Mu-Calculus[C]. IJCAI 2015, 2015: 882-888.
- [272] Y Feng, N Yu, M Ying. Model checking quantum Markov chains[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2013, 79(7) : 1181-1198.
- [273] Y Feng, E M Hahn, A Turrini, S Ying. Model Checking ω -regular Properties for Quantum Markov Chains[C]. CONCUR 2017, LIPIcs 85, 2017: 35: 1-35: 16.
- [274] J Reynolds. Intuitionistic Reasoning about Shared Mutable Data Structure[C]. Millennial Perspectives in Computer Science, Proceedings of the 1999 Oxford-Microsoft Symposium in Honour of Sir Tony Hoare, 1999.
- [275] S Ishtiaq, P O' Hearn. BI as an Assertion Language for Mutable Data Structures[C]. POPL 2001, 2001: 14-26.
- [276] Fei He, Xiaowei Gao, Miaofei Wang, Bow-Yaw Wang, Lijun Zhang. Learning Weighted Assumptions for Compositional Verification of Markov Decision Processes (journal version of the POPL' 15 paper) [J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM), Article 21, 2016, 25(3) : 39.
- [277] Fei He, Liangze Yin, Bow-Yaw Wang, Lianyi Zhang, Guanyu Mu, Wenrui Meng. VCS: A Verifier for

- Component-Based Systems[C]. ATVA 2013 , 2013 ; 478-481.
- [278] S Brookes. A Semantics for Concurrent Separation Logic [C]. CONCUR 2004 , LNCS 3170 , 2004 : 16-34.
- [279] P O' Hearn. Resources, Concurrency and Local Reasoning[C]. CONCUR 2004 , LNCS 3170 , 2004 : 49-67.
- [280] S Brookes and P O' Hearn. Concurrent separation logic[EB/OL]. SIGLOG News 3(3) : 47-65 , 2016.
- [281] V Vafeiadis, C Narayan. Relaxed separation logic: a program logic for C11 concurrency[C]. OOPSLA 2013 , 2013 : 867-884.
- [282] A Turon, V Vafeiadis, D Dreyer. GPS: navigating weak memory with ghosts, protocols, and separation [C]. OOPSLA 2014 , 2014 : 691-707.
- [283] O Lahav, V Vafeiadis. Owicki-Gries Reasoning for Weak Memory Models[C]. ICALP (2) 2015 , LNCS 9135 , 2015 : 311-323.
- [284] M Doko, V Vafeiadis. A Program Logic for C11 Memory Fences[C]. VMCAI 2016 , LNCS 9583 , 2016 : 413-430.
- [285] M Doko, V Vafeiadis. Tackling Real-Life Relaxed Concurrency with FSL ++ [C]. ESOP 2017 , LNCS 10201 , 2017 : 448-475.
- [286] J Kaiser, H Dang, D Dreyer, O Lahav, V Vafeiadis. Strong Logic for Weak Memory: Reasoning About Release-Acquire Consistency in Iris[C]. ECOOP 2017 , LIPIcs 74 , 2017 : 17 : 1-17 : 29.
- [287] K Svendsen, J Pichon-Pharabod, M Doko, O Lahav, V Vafeiadis. A Separation Logic for a Promising Semantics[C]. ESOP 2018 , LNCS 10801 , 2018 : 357-384.
- [288] N Benton. Simple relational correctness proofs for static analyses and program transformations[C]. POPL 2004 , 2004 : 14-25.
- [289] H Yang. Relational separation logic[J]. Theoretical Computer Science , 2007 , 375(1-3) : 308-332.
- [290] L Beringer, M Hofmann. Secure information flow and program logics[C]. CSF 2007 , 2007 : 233-248.
- [291] G Barthe, J Manuel Crespo, C Kunz. Product programs and relational program logics[J]. The Journal of Logic and Algebraic Programming , 2016 , 85(5) : 847-859.
- [292] A Aguirre, G Barthe, M Gaboardi, D Garg, P- Y Strub. A relational logic for higher-order programs [C]. ICFP 2017 , 2017 : 21 : 1-21 : 29.
- [293] A Turon, D Dreyer, L Birkedal. Unifying refinement and hoare-style reasoning in a logic for higher-order concurrency[C]. ICFP 2013 , 2013 : 377-390.
- [294] H Liang, X Feng. Modular verification of linearizability with non-fixed linearization points[C]. PLDI 2013 , 2013 : 459-470.
- [295] M Sousa, I Dillig. Cartesian hoare logic for verifying k-safety properties[C]. PLDI 2016 , 2016 : 57-69.
- [296] G Klein, J Andronick, K Elphinstone, T Murray, T Sewell, R Kolanski, G Heiser. Comprehensive formal verification of an OS microkernel[J]. ACM Transaction on Computer Systems , 2014 , 32(1) : 2 : 1-2 : 70.
- [297] R Gu, Z Shao, H Chen, X Wu, J Kim, V Sjöberg, D Costanzo. CertiKOS: An Extensible Architecture for Building Certified Concurrent OS Kernels[C]. OSDI 2016 , 2016 : 653-669.
- [298] X Leroy. Formal verification of a realistic compiler[J]. Communication of ACM , 2009 , 52(7) : 107-115 , 2009.
- [299] X Leroy. A Formally Verified Compiler Back-end[J]. Journal of Automated Reasoning , 2009 , 43(4) :

- 363-446.
- [300] J Ševčík, V Vafeiadis, F Zappa Nardelli, S Jagannathan, P Sewell. CompCertTSO: A Verified Compiler for Relaxed-Memory Concurrency[J]. Journal of ACM, 2013, 60(3): 22: 1-22; 50.
- [301] G Stewart, L Beringer, S Cuellar, A Appel. Compositional CompCert [C]. POPL 2015, 2015: 275-287.
- [302] J Kang, Y Kim, C-K Hur, D Dreyer, V Vafeiadis. Lightweight Verification of Separate Compilation [C]. POPL 2016, 2016: 178-190.
- [303] C Hawblitzel, J Howell, M Kapritsos, J Lorch, B Parno, M Roberts, S Setty, B Zill. IronFleet: proving practical distributed systems correct[C]. SOSP 2015, 2015: 1-17.
- [304] M Lesani, C Bell, A Chlipala. Chapar: Certified causally consistent distributed key-value stores[C]. POPL 2016, 2016: 357-370.
- [305] C Hawblitzel, J Howell, J Lorch, A Narayan, B Parno, D Zhang, B Zill. Ironclad Apps: End-to-End Security via Automated Full-System Verification[C]. OSDI 2014, 2014: 165-181.
- [306] L Beringer, A Petcher, K Ye, A Appel. Verified Correctness and Security of OpenSSL HMAC[C]. USENIX Security 2015, 2015: 207-221.
- [307] A Appel. Verification of a Cryptographic Primitive: SHA-256[J]. ACM Transaction on Programming Language and Systems 2015, 37(2): 7: 1-7; 31.
- [308] K Ye, M Green, N Sanguansin, L Beringer, A Petcher, A Appel. Verified Correctness and Security of mbedTLS HMAC-DRBG[C]. CCS 2017, 2017: 2007-2020.
- [309] H Chen, D Ziegler, T Chajed, A Chlipala, M Frans Kaashoek, N Zeldovich. Using Crash Hoare logic for certifying the FSCQ file system[C]. SOSP 2015, 2015: 18-37.
- [310] H Chen, T Chajed, Alex Konradi, S Wang, A Ileri, A Chlipala, M Kaashoek, N Zeldovich. Verifying a high-performance crash-safe file system using a tree specification[C]. SOSP 2017, 2017: 270-286.
- [311] 尚书, 甘元科, 石刚, 王生原, 董渊. 可信编译器L2C的核心翻译步骤及其设计与实现[J]. 软件学报, 2017, 28(5): 1233-1246.
- [312] G Shi, Y Gan, S Shang, S Wang, Y Dong, P-C Yew. A formally verified sequentializer for lustre-like concurrent synchronous data-flow programs[C]. ICSE (Companion Volume) 2017, 2017: 109-111.
- [313] G Shi, Y Zhang, S Shang, et al. A formally verified transformation to unify multiple nested clocks for a Lustre-like language[J]. Science China Information Science, 2019, 62(1).
- [314] Y Zhao, D Sanán, F Zhang, Y Liu. Reasoning About Information Flow Security of Separation Kernels with Channel-Based Communication[C]. TACAS 2016, LNCS 9636, 2016: 791-810.
- [315] Xingyuan Zhang, Christian Urban, Chunhan Wu. Priority Inheritance Protocol Proved Correct[C]. ITP 2012, LNCS 7406, 2012: 217-232.
- [316] 宋丽华, 王海涛, 季晓君, 张兴元. 文件比较算法fcomp在Isabelle/HOL中的验证[J]. 软件学报, 2017, 28(2): 203-215.
- [317] H Liang, X Feng, Z Shao. Compositional verification of termination-preserving refinement of concurrent programs[C]. CSL-LICS 2014, 2014: 65: 1-65; 10.
- [318] H Liang, X Feng. A program logic for concurrent objects under fair scheduling[C]. POPL 2016, 2016: 385-399.
- [319] H Liang, X Feng. Progress of concurrent objects with partial methods[C]. POPL 2018, 2018: 20: 1-20: 31.

- [320] S Wang, N Zhan, D Guelev. An Assume/Guarantee Based Compositional Calculus for Hybrid CSP[C]. TAMC 2012 , LNCS 7287 , 2012 : 72-83.
- [321] D Guelev, S Wang, N Zhan. Compositional Hoare-Style Reasoning About Hybrid CSP in the Duration Calculus[C]. SETTA 2017 , LNCS 10606 , 2017 : 110-127.
- [322] J Alglave, P Cousot. Ogre and Pythia: an invariance proof method for weak consistency models[C]. POPL 2017 , 2017 : 3-18.
- [323] X Allamigeon, S Gaubert, E Goubault, S Putot, N Stott. A fast method to compute disjunctive quadratic invariants of numerical programs [J]. EMSOFT 2017 , ACM Transactions on Embedded Computing Systems, TECS, 2017 , 16(5) .
- [324] A Beechi, E Zaffanella. A Direct Encoding for NNC Polyhedra[C]. CAV 2018 , LNCS 10981 , 2018 : 230-248.
- [325] A Beechi, E Zaffanella. An Efficient Abstract Domain for Not Necessarily Closed Polyhedra [C]. SAS 2018 .
- [326] S Bygde, B Lisper, N Holsti. Improved precision in polyhedral analysis with wrapping[J]. Science of Computer Programming, 2017 , 133(1) : 74-87.
- [327] A Chakarov, S Sankaranarayanan. Expectation Invariants as Fixed Points of Probabilistic Programs[J]. SAS 2014 , LNCS 8723 , 2014 : 85-100.
- [328] K Chae, H Oh, K Heo, H Yang. Automatically Generating Features for Learning Program Analysis Heuristics for C-like Languages[C]. OOPSLA 2017 , 2017 : 101 : 1-101 : 25.
- [329] L Chen, J Liu, A Miné, D Kapur, J Wang. An Abstract Domain to Infer Octagonal Constraints with Absolute Value[C]. SAS 2014 , LNCS 8723 , 2014 : 156-175.
- [330] L Chen, R Li, X Wu, J Wang. Static analysis of lists by combining shape and numerical abstractions [J]. Science Computer Programming 95 , 2014 : 320-342.
- [331] P Cousot, R Cousot. Abstract Interpretation: a unified lattice mode for static analysis of programs by construction or approximation of fixpoints[C]. POPL 1977 , 1977 : 238-252.
- [332] P Cousot, R Cousot. Systematic design of program analysis frameworks[C]. In POPL 1979 , 1979 : 269-282.
- [333] P Cousot, R Cousot. Abstract interpretation: past, present and future[C]. CSL-LICS 2014 , 2014 : 2 : 1-2 : 10.
- [334] P Cousot. Abstracting Induction by Extrapolation and Interpolation [C]. VMCAI 2015 , LNCS 8931 , 2015 : 19-42.
- [335] A Dan, Y Meshman, M Vechev, E Yahav. Effective Abstractions for Verification under Relaxed Memory Models[C]. VMCAI 2015 , LNCS 8931 , 2015 : 449-466.
- [336] Y Dong, D Jin, Y Gong. Symbolic Procedure Summary Using Region-based Symbolic Three- valued Logic[J]. Journal of Computers, 2014 , 9(3) : 774-780.
- [337] Z Fu. Modularly Combining Numeric Abstract Domains with Points- to Analysis, and a Scalable Static Numeric Analyzer for Java[C]. VMCAI 2014 , LNCS 8318 , 2014 : 282-301.
- [338] A Fromherz, A Ouadjaout, A Miné. Static value analysis of Python programs by abstract interpretation [C]. NFM 2018 , LNCS 10811 , 2018 : 185-202.
- [339] T Gehr, M Mirman, D Drachsler- Cohen, P Tsankov, S Chaudhuri, M Vechev. AI2: Safety and Robustness Certification of Neural Networks with Abstract Interpretation[C]. IEEE S&P , 2018 .

- [340] H Illous, M Lemerre, X Rival. ARelational Shape Abstract Domain [C]. NFM 2017, LNCS 10227, 2017; 212-229.
- [341] S Jeong, M Jeon, S Cha, H Oh. Data-Driven Context-Sensitivity for Points-to Analysis [C]. OOPSLA 2017, 2017; 100: 1-100; 28.
- [342] J Jiang, L Chen, X Wu, J Wang. Block-wise abstract interpretation by combining abstract domains with SMT [C]. VMCAI 2017, LNCS 10145, 2017; 310-329.
- [343] H Li, F Berenger, B-Y Chang, X Rival. Semantic-Directed Clumping of Disjunctive Abstract States [C]. POPL 2017, 2017; 32-45.
- [344] J Liu, X Rival, L Chen. Automatic Verification of Embedded Manipulating Dynamic Structures Stored in System Code Contiguous Regions [C]. EMSOFT, 2018.
- [345] Z Kincaid, J Breck, A Forouhi Boroujeni, T Reps. Compositional recurrence analysis revisited [C]. PLDI 2017, 2017; 48-262.
- [346] Z Kincaid, J Cyphert, J Breck, T Reps. Non-linear Reasoning for Invariant Synthesis [C]. POPL, 2018; 54: 1-54; 33.
- [347] Y Li, A Albarghouthi, Z Kincaid, A Gurkinkel, M Chechik. Symbolic optimization with SMT solvers [C]. POPL 2014, 2014; 607-618.
- [348] J Liu, X Rival. Abstraction of Arrays Based on Non Contiguous Partitions [C]. VMCAI 2015, LNCS 8931, 2015; 282-299.
- [349] A Miné, D Delmas. Towards an industrial use of sound static analysis for the verification of concurrent embedded avionics software [C]. EMSOFT 2015, 2015; 65-74.
- [350] Antoine Miné, Jason Breck, Thomas W Reps, An Algorithm Inspired by Constraint Solvers to Infer Inductive Invariants in Numeric Programs [C]. ESOP 2016, LNCS 9632, 2016; 560-588.
- [351] Caterina Urban, Antoine Miné, Proving Guarantee and Recurrence Temporal Properties by Abstract Interpretation [C]. VMCAI 2015, LNCS 8931, 2015; 190-208.
- [352] Caterina Urban: FuncTion: An Abstract Domain Functor for Termination - (Competition Contribution) [C]. TACAS 2015, LNCS 9035, 2015; 464-466.
- [353] Caterina Urban, Peter Müller. An Abstract Interpretation Framework for Input Data Usage [C]. ESOP 2018, LNCS 10801, 2018; 683-710.
- [354] Hakjoo Oh, Kihong Heo, Wonchan Lee, Woosuk Lee, Daejun Park, Jeehoon Kang, Kwangkeun Yi: Global Sparse Analysis Framework [J]. ACM Transactionon Programming Languageand Systems, 2014, 36(3): 8: 1-8; 44.
- [355] Hakjoo Oh, Wonchan Lee, Kihong Heo, Hongseok Yang, Kwangkeun Yi: Selective X- Sensitive Analysis Guided by Impact Pre- Analysis [J]. ACM Transactionon Programming Languageand Systems, 2016, 38(2): 6: 1-6; 45.
- [356] Abdelraouf Ouadjaout, Antoine Miné, Noureddine Lasla, Nadjib Badache. Static analysis by abstract interpretation of functional properties of device drivers in TinyOS [J]. Journal of Systems and Software 120, 2016; 114-132.
- [357] Yassamine Seladji. Finding Relevant Templates via the Principal Component Analysis [C]. VMCAI 2017, LNCS 10145, 2017; 483-499.
- [358] Vijay D' Silva, Caterina Urban: Abstract Interpretation as Automated Deduction [C]. CADE 2015, LNCS 9195, 2015; 450-464.

- [359] Gagandeep Singh, Markus Püschel, Martin T. Vechev: Making numerical program analysis fast[C]. PLDI 2015 , 2015: 303-313.
- [360] Gagandeep Singh, Markus Püschel, Martin Vechev. Fast Polyhedra Abstract Domain[C]. POPL 2017 , 2017: 46-59.
- [361] Gagandeep Singh, Markus Püschel, Martin Vechev. A Practical Construction for Decomposing Numerical Abstract Domains[C]. POPL 2018 , 2018: 55: 1-55: 28.
- [362] Gagandeep Singh, Markus Püschel, Martin Vechev. Fast Numerical Program Analysis with Reinforcement Learning[C]. CAV 2018 , LNCS 10981 , 2018: 211-229.
- [363] Chungha Sung, Markus Kusano, Chao Wang. Modular verification of interrupt-driven software[C]. ASE 2017 , 2017: 206-216.
- [364] Shiqi Wang, Kexin Pei, Justin Whitehouse, Junfeng Yang, Suman Jana. Formal Security Analysis of Neural Networks using Symbolic Intervals[C]. USENIX Security , 2018.
- [365] Xueguang Wu, Liqian Chen, Antoine Miné, Wei Dong, Ji Wang. Numerical Static Analysis of Interrupt-driven Programs via Sequentialization[C]. EMSOFT 2015 , 2015: 55-64.
- [366] Xueguang Wu, Liqian Chen, Antoine Miné, Wei Dong, Ji Wang. Static Analysis of Run-Time Errors in Interrupt-Driven Programs via Sequentialization[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)15(4) , 2016: 70: 1-70: 26.
- [367] 陈冬火, 刘全, 朱斐, 金海东. 基于凸多面体抽象域的自适应强化学习技术研究 [J]. 计算机学报 , 2018, 41(1): 112-131.
- [368] 姜加红, 尹帮虎, 陈立前. 基于区间线性模版约束的程序分析 [J]. 计算机学报 2018, 41(3): 545-557.
- [369] 潘建东, 陈立前, 黄达明, 孙浩, 曾庆凯. 含有析取语义循环的不变式生成改进方法 [J]. 软件学 , 2016, 27(7): 1741-1756.
- [370] Liyun Dai, Bican Xia, Naijun Zhan. Generating Non- linear Interpolants by Semidefinite Programming [C]. CAV 2013 , LNCS 8044 , 2013: 364-380.
- [371] Ting Gan, Liyun Dai, Bican Xia, Naijun Zhan, Deepak Kapur, Mingshuai Chen. Interpolant Synthesis for Quadratic Polynomial Inequalities and Combination with EUF[C]. IJCAR 2016 , LNCS 9706 , 2016: 195-212.
- [372] W Liu, RWang, X Fu, J Wang, W Dong, X Mao. Counterexample Preserving Reduction for Symbolic Model Checking[C]. ICTAC 2013 , LNCS 8049 , 2013: 249-266.
- [373] Fu Song, Tayssir Touili. POMMADE: PushdOwn Model-checking for Malware Detection[C]. FSE 2013 , 2013: 607-610.
- [374] Fu Song, Tayssir Touili. Efficient CTL Model- Checking for Pushdown Systems [C]. Theoretical Computer Science , 2014, 549(11): 127-145.
- [375] Cong Tian, Zhenhua Duan. Detecting spurious counterexamples efficiently in abstract model checking [C]. ICSE 2013 , 2013: 202-211.
- [376] Cong Tian, Zhenhua Duan, Zhao Duan. Making CEGAR More Efficient in Software Model Checking [J]. IEEE Transaction on Software Engineering , 2014, 40(12): 1206-1223.
- [377] Dingbao Xie, Lei Bu, Jianhua Zhao, Xuandong Li. SAT- LP- IIS joint- directed path- oriented bounded reachability analysis of linear hybrid automata[J]. Formal Methods in System Design , 2014, 45(1): 42-62.

- [378] Aws Albarghouthi, Yi Li, Arie Gurfinkel, Marsha Chechik. Ufo: A Framework for Abstraction and Interpolation-Based Software Verification[J]. CAV 2012, LNCS 7358, 2012: 672-678.
- [379] De Angelis, Emanuele, Fabio Fioravanti, Alberto Pettorossi, Maurizio Proietti. Verimap: A tool for verifying programs through transformations[C]. TACAS 2014, LNCS 8413, 2014: 568-574.
- [380] Dirk Beyer, M Erkan Keremoglu. CPAchecker: A Tool for Configurable Software Verification[C]. CAV 2011, LNCS 6806, 2011: 184-190.
- [381] A Biere, A Cimatti, E M Clarke, O Strichman, Y Zhu. Bounded Model Checking[C]. Advance in Computers, 2003(58): 118-149.
- [382] Aaron Bradley. SAT-based model checking without unrolling[C]. VMCAI 2011, LNCS 6538, 2011: 70-87.
- [383] Martin Brain, Vijay D' Silva, Alberto Griggio, Leopold Haller, Daniel Kroening. Interpolation-based verification of floating-point programs with abstract CDCL [C]. SAS 2013, LNCS 7935, 2013: 412-432.
- [384] Alessandro Cimatti, Alberto Griggio. Software Model Checking via IC3[C]. CAV 2012, LNCS 7358, 2012: 277-293.
- [385] E M Clarke, O Grumberg, S Jha, Y Lu, H Veith. Counterexample-guided abstraction refinement[C]. CAV 2000, LNCS 1855, 2000: 154-169.
- [386] E M Clarke, D Kroening, F Lerda. A tool for checking ANSI-C programs[C]. TACAS 2004, LNCS 2988, 2004: 168-176.
- [387] L Cordeiro, B Fischer, J Marques-Silva, SMT Based Bounded Model Checking for Embedded ANSI-C Software[J]. IEEE Transaction on Software Engineering, 2012, 38(4): 957-974.
- [388] Stephan Falke, Florian Merz, Carsten Sinz. The Bounded Model Checker LLBMC (Tool Demonstration) [C]. ASE 2013, 2013: 706-709.
- [389] Arie Gurfinkel, Temesghen Kahsai, Anvesh Komuravelli, Jorge A Navas. The seahorn verification framework[C]. CAV 2015, LNCS 9206, 2015: 343-361.
- [390] F Ivancic, I Shlyakhter, A Gupta, M K Ganai. Model checking C programs using F-SOFT[C]. ICCD 2005, 2005: 297-308.
- [391] Joxan Jaffar, Vijayaraghavan Murali, Jorge A. Navas, Andrew E. Santosa. TRACER: A symbolic execution tool for verification [C]. CAV 2012, LNCS 7358, 2012: 758-766.
- [392] D Kroening, G Weissenbacher. Interpolation-based software verification with Wolverine [C]. CAV 2011, LNCS 6806, 2011: 573-578.
- [393] Robert S. Boyer, Bernard Elspas, Karl N. Levitt. SELECT-a formal system for testing and debugging programs by symbolic execution[J]. ACM SigPlan Notices, 1975, 10(6): 234-245.
- [394] Lori A Clarke. A program testing system[C]. Proceedings of the ACM Annual Conference, 1976: 488-491.
- [395] James C King. Symbolic execution and program testing[J]. Communications of the ACM, 1976, 19(7): 385-394.
- [396] 张健. 精确的程序静态分析 [J]. 计算机学报, 2008, 31(9): 1549-1553.
- [397] Vijay Ganesh, David L Dill. A decision procedure for bit-vectors and arrays[C]. CAV 2007, LNCS 4590, 2007: 519-531.
- [398] Patrice Godefroid, Nils Karlund, Koushik Sen. DART: Directed Automated Random Testing[C]. PLDI

- 2005 , 2005 : 213-223.
- [399] Koushik Sen, Darko Marinov, Gul Agha. CUTE: A Concolic Unit Testing Engine for C[C]. FSE 2005 , 2005 : 263-272.
- [400] Patrice Godefroid, Michael Y Levin, David A Molnar. Automated Whitebox Fuzz Testing[C]. NDSS 2008 , 2008 : 151-166.
- [401] Cristian Cadar, Daniel Dunbar, Dawson Engler. KLEE: Unassisted and Automatic Generation of High-Coverage Tests for Complex Systems Programs[C]. OSDI 2008 , 2008 : 209-224.
- [402] Vitaly Chipounov, Volodymyr Kuznetsov, George Candea. S2E: A Platform for In- Vivo Multi- Path Analysis of Software Systems[C]. ASPLOS 2011 , 2011 : 265-278.
- [403] Patrice Godefroid, Adam Kiezun, Michael Y. Levin. Grammar-Based Whitebox Fuzzing[C]. PLDI 2008 , 2008 : 206-215.
- [404] Junaid Haroon Siddiqui, Sarfraz Khurshid. Scaling symbolic execution using ranged analysis [C]. OOPSLA 2012 , 2012 : 523-536.
- [405] Heming Cui, Gang Hu, Jingyue Wu, Junfeng Yang. Verifying systems rules using rule-directed symbolic execution[C]. ASPLOS 2013 , 2013 : 329-342.
- [406] David Trabish, Andrea Mattavelli, Noam Rinetzky, Cristian Cadar. Chopped Symbolic Execution[C]. ICSE 2018 , 2018 : 350-360.
- [407] Hengbiao Yu, Zhenbang Chen, Ji Wang, Zhendong Su, Wei Dong. Symbolic Verification of Regular Properties[C]. ICSE 2018 , 2018 : 871-881.
- [408] Peter Boonstoppel, Cristian Cadar, Dawson R Engler. RWset: Attacking Path Explosion in Constraint-Based Test Generation[C]. TACAS 2008 , LNCS 4963 , 2008 : 351-366.
- [409] Joxan Jaffar, Vijayaraghavan Murali, Jorge A Navas. Boosting concolic testing via interpolation[C]. FSE 2013 , 2013 : 48-58.
- [410] Patrice Godefroid. Compositional dynamic test generation[C]. POPL 2007 , 2007 : 47-54.
- [411] Prateek Saxena, Pongsin Poosankam, Stephen McCamant, Dawn Song. Loop- extended symbolic execution on binary programs[C]. ISSTA 2009 , 2009 : 225-236.
- [412] Patrice Godefroid, Daniel Luchaup. Automatic partial loop summarization in dynamic test generation [C]. ISSTA 2011 , 2011 : 23-33.
- [413] Jan Strejček, Marek Trtík. Abstracting path conditions[C]. ISSTA , 2012 : 155-165.
- [414] Rui Qiu, Guowei Yang, Corina S Pasareanu, Sarfraz Khurshid. Compositional Symbolic Execution with Memoized Replay[C]. ICSE 2015 , 2015 : 632-642.
- [415] Qiuping Yi, Zijiang Yang, Shengjian Guo, Chao Wang, Jian Liu, Chen Zhao. Eliminating Path Redundancy via Postconditioned Symbolic Execution [J]. IEEE Transactionon Software Engineering , 2018 , 44(1) : 25-43.
- [416] Koushik Sen. Scalable automated methods for dynamic program analysis[D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign , 2006.
- [417] Chao Wang, Zijiang Yang, Vineet Kahlon, Aarti Gupta. Peephole Partial Order Reduction[C]. TACAS 2008 , LNCS 4963 , 2008 : 382-396.
- [418] Volodymyr Kuznetsov, Johannes Kinder, Stefan Bucur, George Candea. Efficient State Merging in Symbolic Execution[C]. PLDI 2012 , 2012 : 193-204.
- [419] Thanassis Avgerinos, Alexandre Rebert, Sang Kil Cha, David Brumley. Enhancing symbolic execution

- with veritesting[C]. ICSE 2014 , 2014: 1083-1094.
- [420] Dawei Qi, Hoang D T Nguyen, Abhik Roychoudhury. Path exploration based on symbolic output[J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology , 2013 , 22(4) : 32; 1-32; 41.
- [421] Haijun Wang, Ting Liu, Xiaohong Guan, Chao Shen, Qinghua Zheng, Zijiang Yang. Dependence Guided Symbolic Execution[J]. IEEE Transaction on Software Engineering , 2017 , 43(3) : 252-271.
- [422] Willem Visser, Jaco Geldenhuys, Matthew B Dwyer. Green: reducing, reusing and recycling constraints in program analysis[C]. FSE 2012 , 2012: 58; 1-58; 11.
- [423] Andrea Aquino, Francesco A Bianchi, Meixian Chen, Giovanni Denaro, Mauro Pezzè. Reusing constraint proofs in program analysis[C]. ISSTA 2015 , 2015: 305-315.
- [424] Yufeng Zhang, Zhenbang Chen, Ji Wang. Speculative Symbolic Execution[C]. ISSRE 2012 , 2012: 101-110.
- [425] Xiangyang Jia, Carlo Ghezzi, Shi Ying. Enhancing reuse of constraint solutions to improve symbolic execution[C]. ISSTA 2015 , 2015: 177-187.
- [426] Earl T Barr, Thanh Vo, Vu Le, Zhendong Su. Automatic detection of floating-point exceptions[C]. POPL 2013 , 2013: 549-560.
- [427] Kiran Lakhota, Nikolai Tillmann, Mark Harman, and Jonathan de Halleux. Flopsy - search-based floating point constraint solving for symbolic execution[C]. ICTSS 2010 , LNCS 6435 , 2010: 142-157.
- [428] Anthony Romano. Practical floating-point tests with integer code[C]. VMCAI 2014 , LNCS 8318 , 2014: 337-356.
- [429] Xin Li, Yongjuan Liang, Hong Qian, Yi-Qi Hu, Lei Bu, Yang Yu, Xin Chen, Xuandong Li. Symbolic execution of complex program driven by machine learning based constraint solving [C]. ASE 2016 , 2016: 554-559.
- [430] Zhouhai Fu, Zhendong Su. XSat: A Fast Floating- Point Satisfiability Solver [C]. CAV 2016 , LNCS 9779 , 2016: 187-209.
- [431] Nikolaj Bjørner, Nikolai Tillmann, Andrei Voronkov. Path Feasibility Analysis for String-Manipulating Programs[C]. TACAS 2009 , LNCS 5505 , 2009: 307-321.
- [432] Sarfraz Khurshid, Corina S Pasareanu, Willem Visser. Generalized Symbolic Execution for Model Checking and Testing[C]. TACAS 2003 , LNCS 2619 , 2003: 553-568.
- [433] David A Ramos, Dawson R Engler. Under-Constrained Symbolic Execution: Correctness Checking for Real Code[C]. USENIX Security 2015 , 2015: 49-64.
- [434] Nicolás Rosner, Jaco Geldenhuys, Nazareno Aguirre, Willem Visser, Marcelo F Frias. BLISS: Improved Symbolic Execution by Bounded Lazy Initialization with SAT Support [J]. IEEE Transaction on Software Engineering , 2015 , 41(7) : 639-660.
- [435] Jinseong Jeon, Xiaokang Qiu, Jonathan Fetter-Degges, Jeffrey S Foster, Armando Solar-Lezama. Synthesizing framework models for symbolic execution[C]. ICSE 2016 , 2016: 156-167.
- [436] Sang Kil Cha, Thanassis Avgerinos, Alexandre Rebert, David Brumley. Unleashing Mayhem on Binary Code[C]. S&P 2012 , 2012: 380-394.
- [437] Yan Shoshitaishvili, Ruoyu Wang, Christopher Salls, Nick Stephens, Mario Polino, Andrew Dutcher, John Grosen, Siji Feng, Christophe Hauser, Christopher Krügel, Giovanni Vigna. SOK: (State of) The Art of War: Offensive Techniques in Binary Analysis[C]. S&P 2016 , 2016: 138-157.
- [438] Radu Banabic, George Candea, Rachid Guerraoui. Finding trojan message vulnerabilities in distributed

- systems[J]. ASPLOS 2014, 2014: 113-126.
- [439] Stefan Bucur, Johannes Kinder, George Candea. Prototyping symbolic execution engines for interpreted languages[J]. ASPLOS 2014, 2014: 239-254.
- [440] Michael Emmi, Rupak Majumdar, Koushik Sen. Dynamic Test Input Generation for Database Applications[C]. ISSTA 2007, 2007: 151-162.
- [441] Raimondas Sasnauskas, Olaf Landsiedel, Muhammad Hamad Alizai, Carsten Weise, Stefan Kowalewski, Klaus Wehrle. KleeNet: Discovering Insidious Interaction Bugs in Wireless Sensor Networks Before Deployment[C]. IPSN 2010, 2010: 189-196.
- [442] Xianjin Fu, Zhenbang Chen, Hengbiao Yu, Chun Huang, Wei Dong, Ji Wang. Poster: Symbolic Execution of MPI Programs[C]. ICSE 2015, 2015: 809-810.
- [443] Shengjian Guo, Markus Kusano, Chao Wang, Zijiang Yang, Aarti Gupta. Assertion guided symbolic execution of multithreaded programs[C]. FSE 2015, 2015: 854-865.
- [444] Hengbiao Yu. Combining symbolic execution and model checking to verify MPI programs[C]. ICSE 2018, 2018: 527-530.
- [445] Drew Davidson, Benjamin Moench, Thomas Ristenpart, Somesh Jha. FIE on Firmware: Finding Vulnerabilities in Embedded Systems Using Symbolic Execution[C]. USENIX Security 2013, 2013: 463-478.
- [446] Shengjian Guo, Meng Wu, Chao Wang. Symbolic execution of programmable logic controller code [C]. FSE 2017, 2017: 326-335.
- [447] Ting Su, Zhoulai Fu, Geguang Pu, Jifeng He, Zhendong Su. Combining Symbolic Execution and Model Checking for Data Flow Testing[C]. ICSE 2015, 2015: 654-665.
- [448] Maria Christakis, Peter Müller, Valentin Wüstholtz. Guiding dynamic symbolic execution toward unverified program executions[C]. ICSE 2016, 2016: 144-155.
- [449] Sheng Liu, Jian Zhang. Program analysis: from qualitative analysis to quantitative analysis (NIER track)[C]. ICSE 2011, 2011: 956-959.
- [450] Jaco Geldenhuys, Matthew B Dwyer, Willem Visser. Probabilistic symbolic execution[C]. ISSTA 2012, 2012: 166-176.
- [451] Antonio Filieri, Corina S Pasareanu, Willem Visser. Reliability analysis in symbolic pathfinder[C]. ICSE 2013, 2012: 622-631.
- [452] Bihuan Chen, Yang Liu, Wei Le. Generating performance distributions via probabilistic symbolic execution[C]. ICSE 2016, 2016: 49-60.
- [453] Antonio Filieri, Corina S Pasareanu, Guowei Yang. Quantification of Software Changes through Probabilistic Symbolic Execution[C]. ASE 2015, 2015: 703-708.
- [454] Xinyu Wang, Jun Sun, Zhenbang Chen, Peixin Zhang, Jingyi Wang, Yun Lin. Towards optimal concolic testing[C]. ICSE 2018, 2018: 291-302.
- [455] Nick Stephens, John Grosen, Christopher Salls, Andrew Dutcher, Ruoyu Wang, Jacopo Corbetta, Yan Shoshitaishvili, Christopher Kruegel, Giovanni Vigna. Driller: Augmenting Fuzzing Through Selective Symbolic Execution[C]. NDSS, 2016.
- [456] Liqian Chen, Jiahong Jiang, Banghu Yin, Wei Dong, Ji Wang. Robustness Analysis of Floating-Point Programs by Self-Composition[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014: 789213: 1-789213: 12.
- [457] Zhenbo Xu, Jian Zhang, Zhongxing Xu, Jiteng Wang. Canalyze: a static bug-finding tool for C programs

- [C]. ISSTA 2014, 2014; 425-428.
- [458] A Cox, B Evan Chang, X Rival. Desynchronized Multi-State Abstractions for Open Programs in Dynamic Languages[C]. ESOP 2015, LNCS 9032, 2015: 483-509.
- [459] Tao Xie, Nikolai Tillmann, Jonathan de Halleux, Wolfram Schulte. Fitness-guided path exploration in dynamic symbolic execution[C]. DSN 2009, 2009: 359-368.
- [460] You Li, Zhendong Su, Linzhang Wang, Xuandong Li. Steering Symbolic Execution to Less Traveled Paths[C]. OOPSLA 2013, 2013: 19-32.
- [461] Hyunmin Seo, Sunghun Kim. How we get there: a context-guided search strategy in concolic testing [C]. FSE 2014, 2014: 413-424.
- [462] Kin-Keung Ma, Khoo Yit Phang, Jeffrey S Foster, Michael Hicks. Directed Symbolic Execution[C]. SAS 2011, LNCS 6887, 2011: 95-111.
- [463] Yufeng Zhang, Zhenbang Chen, Ji Wang, Wei Dong and Zhiming Liu. Regular property guided dynamic symbolic execution[C]. ICSE 2015, 2015: 643-653.
- [464] Suzette Person, Guowei Yang, Neha Rungta, Sarfraz Khurshid. Directed incremental symbolic execution [C]. PLDI 2011, 2011: 504-515.
- [465] Paul Dan Marinescu, Cristian Cadar. make test- zesti: A symbolic execution solution for improving regression testing[C]. ICSE 2012, 2012: 716-726.
- [466] S Bucur, V Ureche, C Zamfir, G Candea, Parallel symbolic execution for automated real-world software testing[C]. EuroSys 2011, 2011: 183-198.
- [467] R Qiu, S Khurshid, C S Pasareanu, J Wen, G Yang: Using Test Ranges to Improve Symbolic Execution [C]. NFM 2018, LNCS 10811, 2018: 416-434.
- [468] C S Pasareanu, D Giannakopoulou, M Gheorghiu Bobaru, J M Cobleigh, H Barringer: Learning to divide and conquer: applying the L * algorithm to automate assume-guarantee reasoning[J]. Formal Methods in System Design 2008, 32(3): 175-205.
- [469] Guodong Li, Indradeep Ghosh, Sreeranga P Rajan: KLOVER: A Symbolic Execution and Automatic Test Generation Tool for C ++ Programs[C]. CAV 2011, LNCS 6806, 2011: 609-615.
- [470] Robin David, Sébastien Bardin, Josselin Feist, Laurent Mounier, Marie-Laure Potet, Thanh Dinh Ta, Jean-Yves Marion. Specification of concretization and symbolization policies in symbolic execution[C]. ISSTA 2016, 2016: 36-46.
- [471] Lian Li, Yi Lu, Jingling Xue, Dynamic symbolic execution for polymorphism[C]. CC 2017, 2017: 120-130.
- [472] Dirk Beyer, Thomas Henzinger, Ranjit Jhala, Repack Majumdar. The Software Model Checker Blast [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007, 9 (5-6): 505-525.
- [473] Peter Schrammel, Daniel Kroening. 2LS for Program Analysis[C]. TACAS 2016, LNCS 9636, 2016: 905-907.
- [474] Kroening, Daniel, Michael Tautschnig. CBMC- C bounded model checker[C]. TACAS 2014, LNCS 8413, 2014: 389-391.
- [475] Beyer, Dirk, M Erkan Keremoglu. CPAchecker: A tool for configurable software verification[C]. CAV 2011, LNCS 6806, 2011: 184-190.
- [476] Ball, Thomas, Byron Cook, Vladimir Levin, Sriram K Rajamani. SLAM and Static Driver Verifier: Technology transfer of formal methods inside Microsoft[C]. IFM 2004, LNCS 2999, 2004: 1-20.

-
- [477] Heizmann, Matthias, Jochen Hoenicke, Andreas Podelski. Software model checking for people who love automata[C]. CAV 2013 , LNCS 8044 , 2013: 36-52.
 - [478] Beyer, Dirk, Thomas A Henzinger, Grégory Théoduloz. Configurable software verification: Concretizing the convergence of model checking and program analysis[C]. CAV 2007 , LNCS 4590 , 2007: 504-518.
 - [479] L C Cordeiro, J Morse, D Nicole, B Fischer. Context bounded model checking with ESBMC 1. 17- (competition contribution) [C]. TACAS 2012 , LNCS 7214 , 2012: 534-537.
 - [480] PolySpace[OL]. <http://www.mathworks.com/products/polyspace.html>.
 - [481] Astrée[OL]. <http://www.astree.ens.fr/>.
 - [482] aiT WCET Analyzer[OL]. <http://www.absint.com/ait/>.
 - [483] Code Hawk[OL]. <http://kestreltechnology.com/technology.html>.
 - [484] Sparrow[OL]. <http://ropas.snu.ac.kr/sparrow/>.
 - [485] Julia[OL]. <http://juliasoft.com/abstract-interpretation/>.
 - [486] Frama-C Value Analysis[OL]. <http://frama-c.com/value.html>.
 - [487] Manuel Fähndrich, Francesco Logozzo. Static Contract Checking with Abstract Interpretation [C]. FoVeOOS 2010 , LNCS 6528 , 2010.
 - [488] Interproc[OL]. <http://pop-art.inrialpes.fr/people/bjeannet/bjeannet-forge/interproc/index.html>.
 - [489] Crab-llvm[OL]. <http://github.com/seahorn/crab-llvm>.
 - [490] IKOS[OL]. <http://ti.arc.nasa.gov/opensource/ikos/>.
 - [491] MemCAD[OL]. <http://www.di.ens.fr/~rival/memcad.html>.
 - [492] Fluctuat[OL]. <http://www.lix.polytechnique.fr/~putot/fluctuat.html>.
 - [493] Jandom[OL]. <http://github.com/jandom-devel/Jandom>.
 - [494] JsCFA[OL]. <http://github.com/fiigii/JsCFA-prototype>.
 - [495] MuJS[OL]. <http://github.com/SPY-Lab/mu-js>.
 - [496] O Inverso, E Tomasco, B Fischer, S La Torre, G Parlato. Bounded model checking of multi-threaded C programs via lazy sequentialization[C]. CAV 2014 , LNCS 8559 , 2014: 585-602.
 - [497] Carter M, He S, Whitaker J, et al. SMACK software verification toolchain[C]. ICSE Companion 2017 , 2017: 589-592.
 - [498] Wendler P CPAchecker, with Sequential Combination of Explicit-State Analysis and Predicate Analysis [C]. TACAS 2013 , LNCS 7795 , 2013: 613-615.
 - [499] CertiKOS 操作系统[OL]. <http://flint.cs.yale.edu/certikos/>.
 - [500] Fisher K, Launchbury J, Richards R. The HACMS program: using formal methods to eliminate exploitable bugs[J]. Philosophical Transactions of The Royal Society 2017 , A375(2104).
 - [501] Project Everest -Verified Secure Implementations of the HTTPS Ecosystem[OL]. <http://www.microsoft.com/en-us/research/project/project-everest-verified-secure-implementations-https-ecosystem/>, <http://project-everest.github.io/>.
 - [502] Chris Newcombe, Tim Rath, Fan Zhang, Bogdan Munteanu, Marc Brooker, Michael Deardeuff. How Amazon web services uses formal methods[J]. Communication of ACM , 2015, 58(4): 66-73.
 - [503] M Althoff, D Grebenyuk, N Kochdumper. Implementation of Taylor models in CORA 2018 [C]. In Proc. of the 5th International Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid Systems , 2018.

- [504] C Fan, B Qi, S Mitra, M Viswanathan, P S Duggirala. Automatic reachability analysis for nonlinear hybrid models with c2e2[C]. CAV 2016, LNCS 9779, 2016: 531-538.
- [505] X Chen, EÁbraham, S Sankaranarayanan. Flow * : An analyzer for non- linear hybrid systems[C]. CAV 2013, LNCS 8044, 2013: 258-263.
- [506] G Frehse. Reachability of hybrid systems in space-time[C]. In Alain Girault and Nan Guan, editors, Proc. Int. Conf. Embedded Software, EMSOFT 2015, 2015: 41-50.
- [507] S Bak, P S Duggirala. Hylaa: A tool for computing simulation-equivalent reachability for lin- ear systems [C]. HSCC 2017, 2017: 173-178.
- [508] Sergiy Bogomolov, Marcelo Forets, Goran Frehse, Frederic Viry, Andreas Podelski, Christian Schilling. Reach set approximation through decomposition with low- dimensional sets and high- dimensional matrices[C]. HSCC 2018, 2018: 41-50.
- [509] Rajarshi Ray, Amit Gurung, Binayak Das, Ezio Bartocci, Sergiy Bogomolov, Radu Grosu. XSpeed: Accelerating reachability analysis on multi-core processors[C]. HVC 2015, LNCS 9434, 2015: 3-18.
- [510] Stefan Schupp, Erika Abraham, Ibtissem Ben Makhlouf, Stefan Kowalewski[C]. HyPro: A C ++ library for state set representations for hybrid systems reachability analysis. NFM 2017, LNCS 10227, 2017: 288-293.
- [511] Alessandro Cimatti, Alberto Griggio, Sergio Mover, Stefano Tonetta. HYCOMP: an SMT-based Model Checker for Hybrid Systems[C]. TACAS 2015, LNCS 9035, 2015: 52-67.
- [512] Sergiy Bogomolov, Goran Frehse, Mirco Giacobbe, Thomas A Henzinger. Counterexample- guided refinement of template polyhedral[C]. TACAS 2017, LNCS 10205, 2017: 589-606.
- [513] Martin Franzle, Christian Herde. HySAT: An efficient proof engine for bounded model checking of hybrid systems[J]. Formal Methods in System Design, 2007, 30(3): 179-198.
- [514] Sicun Gao, Soonho Kong, Edmund Clarke. dReach: Reachability Analysis for Nonlinear Hybrid Systems [C]. TACAS 2015, LNCS 9035, 2015: 200-205.
- [515] Guo Y, Cai Y, Yang Z. AtexRace: across thread and execution sampling for in- house race detection [C]. FSE 2017, 2017: 315-325.
- [516] Weiqiang Kong, Leyuan Liu, Takahiro Ando, Hirokazu Yatsu, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda, Facilitating Multicore Bounded Model Checking with Stateless Explicit- State Exploration [J]. The Computer Journal, 2015, 58(11): 2824-2840.
- [517] 朱允敏, 张丽伟, 王生原, 等. 面向多核处理器的低级并行程序验证 [J]. 电子学报, 2009, 37(s1): 1-6.
- [518] L Yin, W Dong, W Liu, Y Li, J Wang. YOGAR- CBMC: CBMC with scheduling constraint based abstraction refinement- (competition contribution)[C]. TACAS 2018, LNCS 10806, 2018: 422-426.
- [519] Shuo Zhang, Fei He, Ming Gu. VeRV: A Temporal and Data-Concerned Verification Framework for the Vehicle Bus Systems[C]. INFOCOM 2015, 2015: 1167-1175.
- [520] M Chen, X Han, T Tang, S Wang, M Yang, N Zhan, H Zhao, L Zou. MARS: A Toolchain for Modelling, Analysis and Verification of Hybrid Systems [C]. Provably Correct Systems. Springer International Publishing, 2017.
- [521] S Wang, N Zhan, L Zou. An Improved HHL Prover: An Interactive Theorem Prover for Hybrid Systems [C]. ICFEM 2015, LNCS 9407, 2015: 382-399.

- [522] Lei Bu, You Li, Linzhang Wang, Xuandong Li. BACH: Bounded reachability checker for linear hybrid automata[C]. FMCAD 2008 , 2008 : 1-4.
- [523] Tao Li, Feng Tan, Qixin Wang, Lei Bu, Jiannong Cao, Xue Liu. From Offline toward Real Time: A Hybrid Systems Model Checking and CPS Codesign Approach for Medical Device Plug- and- Play Collaborations[C]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems , 2014 , 25(3) : 642-652.
- [524] Lei Bu, Wen Xiong, Chieh-Jan Mike Liang, Shi Han, Dongmei Zhang, Shan Lin, Xuandong Li. Systematically Ensuring The Confidence of Real Time Home Automation IoT Systems [C]. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems , 2018 , 2(3) : 22 : 1-22 : 23.
- [525] Antoine Miné, David Delmas. Towards an industrial use of sound static analysis for the verification of concurrent embedded avionics software[C]. EMSOFT 2015 , 2015 : 65-74.
- [526] Antoine Miné, Laurent Mauborgne, Xavier Rival, Jérôme Feret, Patrick Cousot, Daniel Kästner, Stephan Wilhelm, Christian Ferdinand. Taking Static Analysis to the Next Level: Proving the Absence of Run-Time Errors and Data Races with Astrée[C]. ERTS2 2016 , 2016 : 570-579.
- [527] A JavadiAbhari, S Patil, D Kudrow, J Hecke, A Lvov, F T Chong, M Martonosi, ScaffCC: Scalable Compilation and Analysis of Quantum Programs [J]. arXiv. org , vol. quant-ph . pp. arXiv:1507.01902-17 , 08-Jul-2015.
- [528] M Ying, Y Feng. Quantum loop programs[J]. Acta Informatica , 2010 ; 47(4) : 221-250.
- [529] M Ying, N Yu, Y Feng, R Duan. Verification of quantum programs [J]. Science of Computer Programming , 2013 ; 78(9) : 1679-1700.
- [530] The Q# Programming Language[OL]. <http://docs.microsoft.com/en-us/quantum/quantum-qsharp-intro?view=qsharp-preview>.
- [531] S Perdrix. Quantum Entanglement Analysis Based on Abstract Interpretation [C]. SAS 2008 , LNCS 5079 , 2008 : 270-282.
- [532] P Jorrand, S Perdrix. Abstract Interpretation Techniques for Quantum Computation [C]. in Semantic Techniques in Quantum Computation , no. 6 , S. Gay and I. Mackie , Eds. Cambridge: Cambridge University Press , 2009 : 206-234.
- [533] K Honda. Analysis of Quantum Entanglement in Quantum Programs using Stabilizer Formalism[J]. QPL 2015 , EPTCS 195 , 2015 : 262-272.
- [534] O Brunet, P Jorrand. Dynamic quantum logic for quantum programs [J]. International Journal of Quantum Information , 2011 , 2(1) : 45-54.
- [535] A Baltag, S Smets. LQP: the dynamic logic of quantum information[J]. Mathematical Structure in Computer Science , 2006 , 16(3) : 491-525.
- [536] Y Feng, R Duan, Z Ji, M Ying. Proof rules for the correctness of quantum programs[J]. Theoretical Computer Science , 2007 , 386(1) : 151-166.
- [537] R Chadha, P Mateus, A Sernadas. Reasoning About Imperative Quantum Programs [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science , 2006(158) : 19-39.
- [538] Y Kakutani. A Logic for Formal Verification of Quantum Programs[C]. ASIAN 2009 , LNCS 5913 , 2009 : 79-93.
- [539] M Ying. Floyd-Hoare logic for quantum programs[J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems , 2011 , 33(6) : 1-49.

- [540] T Liu, Y Li, S Wang, M Ying, N Zhan. A Theorem Prover for Quantum Hoare Logic and Its Applications[J]. arXiv.org, vol. cs. LO. p. arXiv: 1601. 03835, 15-Jan-2016.
- [541] M Ying, S Ying, X Wu. Invariants of quantum programs-characterisations and generation[C]. POPL 2017, 2017: 818-832.
- [542] S Ying, Y Feng, N Yu, M Ying. Reachability Probabilities of Quantum Markov Chains[C]. CONCUR 2013, LNCS 8052, 2013: 332-348.
- [543] J Guan, Y Feng, M Ying. Decomposition of quantum Markov chains and its applications[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2018(95): 55-68.
- [544] Y Feng, N Yu, M Ying. Reachability Analysis of Recursive Quantum Markov Chains[C]. MFCS 2013, LNCS 8087, 2013: 385-396.
- [545] Y Feng, E M Hahn, A Turrini, L Zhang. QPMC: A Model Checker for Quantum Programs and Protocols [C]. FM 2015, LNCS 9109, 2015: 265-272.
- [546] L Anticoli, C Piazza, L Taglialegne, P Zuliani. Towards Quantum Programs Verification - From Quipper Circuits to QPMC[C]. RC 2016, LNCS 9720, 2016: 213-219.
- [547] Hui Kong, Fei He, Xiaoyu Song, William N N. Hung, Ming Gu. Exponential-Condition-Based Barrier Certificate Generation for Safety Verification of Hybrid Systems[C]. CAV 2013, LNCS 8044, 2013: 242-257.
- [548] Fei He, Bow-Yaw Wang, Liangze Yin, Lei Zhu. Symbolic Assume-Guarantee Reasoning through BDD Learning[C]. ICSE 2014, 2014: 1071-1082.
- [549] Fei He, Shu Mao, Bow-Yaw Wang. Learning-based Assume-Guarantee Regression Verification[C]. CAV 2016, LNCS 9780, 2016: 310-328.
- [550] Fei He, Xiaowei Gao, Bow-Yaw Wang, Lijun Zhang. Leveraging Weighted Automata in Composition Reasoning about Concurrent Probabilistic Systems[C]. POPL 2015, 2015: 503-514.

作者简介

卜磊 南京大学, 副教授, 主要研究实时混成 CPS 系统、软件代码等复杂系统形式化验证与分析测试技术。CCF 形式化方法专委会委员、系统软件专委会委员。



陈立前 国防科技大学, 副教授, 主要研究程序分析与验证、抽象解释, CCF 形式化方法专委会委员。



陈哲 南京航空航天大学，副教授，主要研究形式化方法、软件验证、航空电子系统的可靠性与安全性验证、软件工程，CCF 形式化方法专委会委员。



陈振邦 国防科技大学，副教授、硕导，主要研究形式化方法、程序分析及其应用，CCF 形式化方法专委会委员。



冯新宇 南京大学，教授，主要研究程序设计语言、形式化程序验证、软件安全，CCF 形式化方法专委会委员、系统软件专委会委员。



冯元 悉尼科技大学量子软件与信息中心，教授，主要研究量子程序分析与验证。



贺飞 清华大学，副教授、博导，主要研究形式化方法、程序分析与验证等，CCF 形式化方法专委会委员。



李国强 上海交通大学，副教授、博导，主要研究形式化验证、程序语言理论、知识表示与推理，CCF 形式化方法专委会委员。



刘万伟 国防科技大学，副教授，主要研究时序逻辑、模型检测、自动机理论，CCF 形式化方法专委会委员。



马菲菲 中国科学院软件研究所，副研究员，主要研究自动推理、约束求解。



宋富 上海科技大学，助理教授、研究员、博导，主要研究形式化方法、程序分析与验证、计算机安全和软件工程，CCF 形式化方法专委会委员。



田聪 西安电子科技大学，教授，主要研究可信软件理论与方法，大数据和机器学习软件开发方法，CCF 形式化方法专委会委员，CCF 青工委委员，女工委委员。



王淑灵 中国科学院软件研究所，副研究员，主要研究形式化方法、交互式定理证明以及混成系统建模与验证，CCF 形式化方法专委会委员。



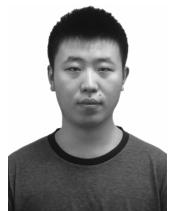
吴志林 中国科学院软件研究所，副研究员，主要研究程序分析与验证、计算逻辑、自动机理论，CCF 形式化方法专委会委员。



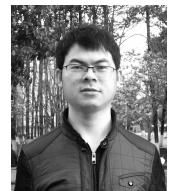
薛 白 中国科学院软件研究所，副研究员，主要研究混成系统分析与验证。



杨鹏飞 中国科学院软件研究所，博士生，主要研究概率模型检测。



尹良泽 国防科技大学，讲师，主要研究形式化方法、程序分析与验证。



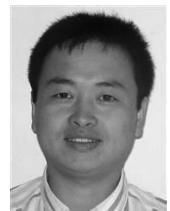
詹博华 慕尼黑工业大学，博士后，主要研究交互式定理证明、证明自动化、形式化数学和程序验证。



张 民 华东师范大学，副教授，主要研究形式化方法、程序分析与验证、计算机系统建模和软件工程，CCF 形式化方法专委会委员。



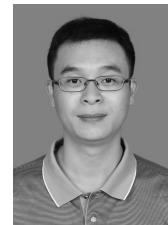
张立军 中国科学院软件研究所，研究员，主要研究概率模型检测，CCF 形式化方法专委会委员。



张兴元 中国人民解放军陆军工程大学，教授，主要研究计算机辅助定理证明，CCF 形式化方法专委会委员。



赵永望 北京航空航天大学，副教授，主要研究形式化方法、操作系统内核、程序验证等，CCF 形式化方法专委会委员、系统软件专委会委员。



大图数据管理与分析技术

CCF 数据库专业委员会

袁野¹ 王一舒¹ 王国仁²

¹东北大学，沈阳

²北京理工大学，北京

摘要

图作为表示数据之间关系的基本结构在社交网络分析、人脑网络分析、知识图谱分析等领域有着广泛应用。随着大数据时代的到来，数据井喷式增长。这种数据的激增，带动了图规模的不断增大，数据结构日益复杂。在大图数据上，因其规模宏大、结构复杂以及动态变化三个特点，传统的图数据存储、索引、查找和分析方法在时间和空间上耗费巨大，已经不能满足现有的需要，为大图数据的高效管理和计算带来了巨大的挑战。另一方面，随着新的研究热点不断兴起，如时序图和动态图上的图处理、图查询语言、基于硬件的图处理等，也为大图数据管理与分析研究带来了新的机遇。本报告从大图数据的查询处理与优化技术、大图数据的挖掘与分析技术、大图数据系统以及基于硬件的大图处理四个方面，总结了近年来国内外研究的最新进展，并对国内外研究现状进行了分析和对比，最后归纳了现有大图数据研究面临的困难并对未来的发展趋势和主要研究方向进行了展望。

关键词：大图数据，查询处理，数据挖掘与分析，图数据管理系统

Abstract

Graphs, as a kind of fundamental structure expressing data relationships, have a wide application in many fields such as social network analysis, brain network analysis and knowledge graph analysis. With the arrival of big data, the data increase in exponential term. The surge of data has led to the increasing of the graph scale and complexity of the graph data structure. Because of its large scale, complex structure and dynamic change, the traditional graph data storage, indexing, search and analysis methods can not meet the needs of time and space, which brings great challenges to the efficient management and calculation of big graph data. On the other hand, with the emergence of new research hotspots, such as graph processing on temporal graph and dynamic graph, graph query language, hardware-based graph processing and so on, it also brings new opportunities for the management and analysis of big graph data. In this report we summarize the state-of-the-art work from big graph data query processing and optimization, big graph data mining and analysis, big graph data management system and hardware-based big graph processing. And analyze and compare the current research status at home and abroad. We sum up the difficulties in big graph data research, and look forward to the development trend and main research direction to address in future.

Keywords: big graph data, query processing, data mining and analysis, graph data management system

1 引言

随着社交网络等新型应用的兴起和云计算等新技术的快速发展，人类获取数据的规模正以前所未有的速度爆炸式地增长，与大数据相关的技术变革成为当今世界的热点话题。大数据在信息科学、物理学、生物学、环境生态学等领域以及军事、金融、通信等行业普遍存在，并引起人们的极大关注。在这些领域或行业中，数据通常具有关联性，从而产生了大图数据。图是表示对象与对象之间关系的方法，一个图由若干顶点和连接它们的边组成。图是计算机科学中最常用的一类抽象数据结构，在结构和语义方面比线性表和树更复杂，更具有一般性表示能力。现实世界中的许多应用场景都需要用图结构表示，与图相关的处理和应用几乎无所不在。比如，传统应用中的最优运输路线的确定、疾病爆发路径的预测、科技文献的引用关系、生物信息网络分析等，新兴应用中的社交网络分析、知识图谱、数据万维网、人脑网络等，都可以看作大图数据的应用。

传统的图数据管理与分析技术通常针对彼此独立的“小图”分别进行处理，尽管图的数目可能较多，但通常不需要复杂的迭代过程，也不会产生大量的消息，算法的时间和空间开销一般较低。但是，真实世界中实体规模的扩张，导致相应图模型的数据规模迅速增长，动辄有数十亿个顶点和上万亿条边，而这些庞大的顶点数和边数构成的结构信息只是惊人的大图数据规模的冰山一角。复杂应用中的图数据为了表达复杂的语义，在顶点和边上往往附带各类属性信息，这些属性信息内容丰富，需要大量的空间开销。而且，相比于基于属性的简单查询和搜索，大图上的统计分析算法往往需要基于图的结构进行循环和递归操作，直至达到收敛的条件，因此需要频繁地处理并行迭代过程中由于通信交互产生的消息数据等中间结果。此外，除了静态的结构和属性信息外，很多情况下大图是动态变化的，如时序图、动态图等，这种动态变化随着某种特定的属性，不断改变着大图的规模和结构，因此需要对这些变化过程进行详细的记录。面对如此大规模的静态和动态数据，其存储、索引、查找和分析等处理的时间开销和空间开销远远超出了传统集中式图数据管理的承受能力，因此如何解决大图数据的分布式存储技术、查询处理与优化技术、挖掘和分析技术、系统的执行保证技术，已经成为数据库领域急需解决的问题，也是一项极具挑战性的工作。而且，随着研究的不断深入，研究者们已经不满足于仅通过传统的方法探讨基本的图管理与分析问题，一些新兴的研究热点也在不断涌现，如图查询语言、基于硬件的图处理等。对于这些研究方向，虽然早期也有一些相关的探讨，但随着计算机软硬件的不断发展，如何提出更准确高效的方法来解决这些问题，为图管理与分析工作带来了新的机遇与挑战。

2 国际研究现状

2.1 大图数据查询处理与优化

大规模图数据库的管理与分析中，核心任务之一就是解决图查询处理与优化问题。如何高效准确地对图数据进行查询，在几乎所有的图数据相关的问题中都有广泛的应用价值。针对不同的查询目标，查询的类型有很多种，如路径问题、图模式匹配问题等都是图上经典的查询问题。而随着研究的不断深入，研究者们在早期的研究基础上，开始深入研究图查询语言问题。下面将介绍一些图查询处理问题及其解决方法，这些方法被证明在大规模图查询中是准确并且有效的。

2.1.1 大图数据路径问题

路径问题是最基本的图查询问题，许多经典的查询问题如 k -近邻问题、图匹配问题等都是以路径问题为研究基础的。路径问题中最经典的问题包括最短路径问题和可达性查询问题。现如今路径查询方法日趋成熟，因此，现有的路径问题多数是在基本的路径问题的基础上进行扩展的，通过定义新的路径问题或者在新的环境下研究路径问题。

最短路径算法大多关注响应在内存中的最短路径查询。对于无权网络，广度优先搜索可以被直接用于计算最短路径。Dijkstra^[1]、Floyd^[2]、Bellman-Ford^[3]等算法均被广泛地用于有权网络上的最短路径求解问题。COLA^[4]是计算大规模路网中的近似约束最短路径查询。COLA 可找出顶点间总成本不超过给定约束且总长度接近于最短的路径。COLA 中使用文献 [5] 中提出的算法来划分路网，构建的覆盖图压缩了原始路网，覆盖图中每一顶点包含两个索引标签集，分别记录覆盖图中以该点为终点的所有路径的入标签集和覆盖图中以该点为起点的所有路径的出标签集。

时序图上的路径查询比静态图上的路径查询更为复杂，简单地求两个顶点间的最短路径已经不能满足时序图上的查询需求。在时序图上，路径问题要考虑两个部分：时间和路径长度。经典的时序图上的路径问题有最早到达路径、最迟离开路径和最短持续时间路径。TTL^[6]通过为时序的边构建索引来解决时序图上的路径问题，标签分为两个部分：入标签和出标签。标签中包含路径的起始顶点、路径的终止顶点、起始时间、终止时间和搭乘的车辆以及顶点之间的规范路径。文献 [7-8] 提出了一种基于图转换的路径查询方法。这种图转换方法的基本思想是为时序图中的顶点构建副本，构成我们熟悉的静态图，然后在静态图上进行路径查找。将时序图转换为静态图后，通过广度优先遍历就可以直接解决时序图上的路径问题。由于将时序图转化为静态图后会增大原有的图规模，而且广度优先遍历的效率相对较低，所以该方法不能很好地适用于大规模图数据。因此文献 [9] 最后给出了时序图上并行处理路径问题的方法。

可达性查询问题则关注如何构建合适的索引，在传递闭包和广度优先遍历中取得平衡，高效准确地判断顶点之间的可达关系，如 2-hop^[10]、Chain-cover^[11]、Optimal-tree^[12]、Path-tree^[13]等都是经典的可达性查询索引。LI + 索引^[14]可以用来解决大图中标签约束的可达性查询问题。与简单可达性查询不同，标签约束的可达性查询在保证两个顶点之间存在路径的前提下，还要保证这条路径中边的标签都属于给定的标签集。LI 选择少量的地标顶点，并且为这些地标顶点建立索引，索引中含有这些地标顶点到所有顶点的路径，以及该路径经过的边的标签集，然后通过广度优搜索查询顶点间标签约束的可达性。LI + 在 LI 的基础上，对非地标顶点也建立索引，其索引内容为该非地标顶点可到达的地标顶点以及该条路径上边的标签集，并且为每个地标顶点增添一组相应的集合以存储该地标顶点可到达的顶点。LI + 算法通过宽度优先搜索阶段可以更快地发现地标顶点，并且可以有效地确定不相关的顶点从而进行剪枝。

从另一个方面来看，可以通过减小图的大小来实现减少可达性查询的消耗。buTR^[15]通过传递缩减和等价缩减来减小图的大小，以加速图中可达查询处理。buTR 减少处理顶点的数量和平均遍历的时间，并通过启发式方法来估计线性时间内每个顶点的可达顶点数，采用自下而上的方式处理顶点。在有向无环图中进行传递缩减和等价缩减，可更快地完成可达查询，并且减少索引空间的大小和建立索引的时间，从而显著地改善时间和空间成本，实现大规模图中的可达性查询。

随着图的结构越来越复杂，研究者们开始研究在时序图上的可达性查询问题。文献 [16] 提出了 TopChain 方法来解决时序图上的可达路径查询问题。这种方法先通过为每个顶点构建副本，将时序图完全转成静态图，然后将图划分成不相交且包含了图中所有顶点的链，根据链中顶点的关系为每个顶点构建标签，最后通过标签判断两个顶点的可达性。该方法的索引较为简单，但索引规模较大，只能应用于中小规模的图。

2.1.2 大图数据图模式匹配问题

图模式匹配问题按图数据是在顶点还是边上包含语义信息分为语义匹配和结构匹配。图匹配的许多前期研究基于严格的图结构相似性，即保证所匹配的顶点周围具有相同的连通结构，这种匹配问题称为结构匹配，主要应用于化学物质相似结构的检测。结构匹配的代表性算法包括 1976 年最早提出的 Ullmann 算法^[11]以及近年来在该算法基础上改进的 VF2^[17]、GraphQL^[18]和 Spath^[19]等算法。随着社交网络、网络共享社区的出现，对这些数据建立的图往往在顶点和边上带有丰富的语义信息，如在社交网络图中，顶点包含了用户的身份信息，边包含了用户间的关注类型信息。在匹配这类图数据时，需要同时保证匹配结果在结构和语义信息上与模式图一致，这种匹配问题称为语义匹配。典型的 GraphGrep^[20]算法就是将带有语义信息的顶点编码后作为索引对图数据进行快速匹配。语义匹配算法一方面可以通过在已有的结构匹配算法基础上引入对顶点和边的语义约束改进而成，也可以如 GraphGrep 等算法通过设计基于语义信息的索引特征实现对语义图的快速匹配。目前，图模式匹配的研究方向主要包括在分布式环境下进行图模式匹配以及图模式匹配的衍生问题。

对于结构匹配问题，SEED^[21]实现了在大规模图中寻找所有和指定模式图同构的子图。SEED 是一种在分布式环境中可扩展的子图枚举方法，即可以在当前一些通用的数据流引擎中实现。SEED 方法在 TwinTwigJoin^[22]基础上设计了一种高效的分布式图存储机制，即 SCP 存储机制。在 SEED 方法中是以分解和连接的方式解决子图枚举问题，首先将模式图分解为由星和团两种组件构成的连接单元，在分解过程中构成连接树，然后将这些连接单元的匹配相连接从而获得最终结果。由于图规模的不断增大，单个服务器已经不能满足查询需求，所以研究者们提出了基于分布式的子图匹配方法。文献 [23] 提供了基于 Cypher 查询语言的分布式图匹配技术。该方法首先定义一个新的 EPGM 算子：给定一个逻辑图 G 和一个查询图 Q，图模式匹配运算符返回一组新的逻辑图 G_Q ，使得 Q 与 G_Q 同构。接着将 Cypher 查询转换为关系代数。为了计算嵌入，Cypher 将查询分解为一系列关系操作并递增构造最终的嵌入。通过贪心算法将查询分解为顶点和边集，通过迭代连接、嵌入和选择最小化中间结果大小的查询计划来构造一个密集的查询计划。从初始集合中删除该计划覆盖的顶点和边，直到只剩下一个计划为止。文献 [24] 提出了 VCBC 技术和 CBF 计算框架来解决子图匹配中匹配结果集输出成本过大的危机和压缩后子图匹配的计算问题。在现有研究中，有的盲目将所有结果导入磁盘，有的则完全不输出，前者面临着大量的 I/O 操作，而后者在每次请求时都会面临重新计算的成本。

对于语义匹配问题，CGQ^[25]算法可以解决关系感知的上下文匹配问题，即给定目标图和模式图，CGQ 可以查询出嵌入在目标图中与模式图拥有相似上下文的最大子图，其中上下文是指图中稀有并且重要的关系。CGQ 首先通过计算每个特征的统计显著性来确定该特征的重要性，从而学习、了解某一模式图的上下文。随后给出了两图上下文相似度的计算公式，即图的上下文感知相似性的度量就是映射边缘之间上下文相似度的累加和。CGQ 先标识目标图中可能包含与查询图最匹配的区域，随后只处理这些区域，从而减少了一定的搜索空间。文中以自顶向下的递归方式对目标图的整个边集进行分层分割，每个分区由多维的最小边界矩形（MBR）构成，使用 MBR 的概念来总结一组边的关系。CGQ-Tree 索引用来加快搜索与查询相似的边，索引树的叶子顶点中存放一些分区的 MBR 以及构成这些 MBR 的边，非叶子顶点中仅存放一些 MBR。在 CGQ 框架中还利用了邻居向量、权重向量更好地进行搜索，避免了局部最大值问题。CGQ 可以进行有效的映射，保证最初映射的边是最终最大子图中的边，并且尽早剪枝以避免上下文相似性较低的最大子图的生成。

随着图的结构越来越复杂，研究者们在基础的子图匹配问题上进行了更多扩展，基于图匹配问题提出了一些新的问题。TurboFlux^[26]是一种快速连续性的子图匹配系统，以解决动态图数据库中的连续子图匹配问题。与典型的子图匹配不同，连续的子图匹配是由数据顶点和边的更新操作触发的，所以我们需要为每个数据顶点维护候选查询顶点，而不是维护每个查询顶点的候选数据顶点。因此文献提出了 DCG (Data-Centric Graph) 和边缘转换模型。DCG 用于存储分解的高效可更新的完全图，边缘转换模型可以有效地识别增加边或删除边的操作是否会影响当前部分解并有助于产生正/负匹配。文献 [27] 为图提出一类 Keys，表示在图中对于某一类型的实体，在图的模式匹配中以指定的条件唯

一地标识该实体。文献 [27] 将 Keys 的概念应用于实体匹配中，并给出一个基于 MapReduce 的算法，实现实体匹配的并行处理。实体匹配比传统的子图同构更为复杂，现有的子图匹配算法不能应用于实体匹配，而实体匹配比传统的子图匹配更能识别关系中的元组。现有的工作主要集中于单查询处理问题上，而文献 [28] 提出了子图同构搜索的多查询优化问题。首先在 PCM 中组织公共子图和原始查询，通过 PCM 来计算查询的执行顺序，保证公共子图的结果可以被重用，并通过尽可能早地释放缓存结果来实现有效的内存使用。为了平衡缓存内存使用和结果检索时间，通过将查询顶点基于特殊的图划分分成不相交的列表来对结果集进行部分压缩。

对于时序图，DurablePattern^[29]是时序图上的 Top-k 持久图模式查询方法，用来寻找的是给定查询模式图在时序图中存在时间最长的匹配。将时序图看作依据时刻的一系列快照。DurablePattern 算法通过遍历图快照的紧凑表示来识别持久匹配。为了修剪候选匹配的数量，DurablePattern 引入了基于 Bloom 过滤器的邻居和路径时间索引，同时，算法在匹配期间由阈值驱动，使用基于时间的索引来有效地确定持续时间阈值的适当值。

2.1.3 大图数据查询语言技术

随着图数据研究的不断深入，人们对大规模社交网络、RDF 图、语义网络等网络上的在线查询需求不断增大，研究者们尝试定义类数据日志的语言来满足图数据库应用的需求^[30]。最早是由 Consens 和 Mendelzon 在 1990 年提出的 GraphLog^[31]，用来查询超文本文档构成的图。早期的查询语言还包括 Lorel^[32]、StruQL^[33]、UnQL^[34]、G +^[35]、G-Log^[36]、SoSQL^[37]，都是用来表示合取查询、常规路径查询或两者的组合。随着图的规模不断扩大，结构日益复杂，研究者们致力于提出更高效、兼容性更好的图查询语言。

Cypher^[38]是基于 Neo4j 数据库中属性的图查询语言。Cypher 结构满足线性查询，使用户可以将查询处理视为从查询文本的开头开始，然后直线前进到最后。查询中的每个子句都是一个函数，它接收一个表并输出一个表，该表既可以扩展字段的数量，也可以添加新的元组。PGQL^[39]结合了图形模式匹配以及类似 SQL 的语法和功能，并且对常规路径查询和图形构建提供全面的支持。PGQL 查询可以嵌套在 SQL 查询中，并且支持常规路径查询，该查询不仅限于边上标签的约束，还有沿着路径的顶点和边的属性的约束。PGQL 有一个内部图类型来支持图转换应用程序，允许构造一个或多个图并从查询中返回。相比于 Cypher，PGQL 查询语言具备图形查询功能，即常规路径查询和图形构建。在 Cypher 和 PGQL 的基础上，G-CORE^[40]提出了一种属性图的封闭查询语言，可以作为集成多种模型和方法进行图查询的基础。G-CORE 可以实现常规路径表达式语法，支持多图查询和连接、多值属性处理、图聚合操作以及路径查询，其中路径查询包括存储路径、路径可达性查询、加权最短路径查询和强路径模式查询，并且 G-CORE 语言支持嵌套查询。GraQL^[41]实现了高内存容量集群上托管的高性能属性图数据库上的查询，是多线程系统图引擎系统的属性图数据模型的前端语言。GraQL 通过表格数据支持图数据模型，创建了两个新的语法结构来实现顶点和边的声明，并指定它们与表示数据的底层表的连接。GraQL 还支持从单个表创建多个顶点和边类型，从多个表的关系操作创建多个顶点

和边类型，并且支持标准 SQL 关系操作。同时，查询语法支持在每个顶点的键（或其他属性）上指定条件表达式。文献 [42] 提出了一种基于 SQL 的新的高级图查询语言，其基于 SQL 的语法和语义，将查询概念转移到图数据库的领域，并根据图的特征进行扩展。该语言支持使用嵌套图条件、距离约束进行图模式匹配，以及嵌套投影、最短路径和连接组件的计算，并且可以将图查询作为子查询嵌入到关系查询中。同时，其为提出的查询语言提供了执行引擎，该引擎使用优化的图数据结构而不是关系表来实现较高的查询性能。

知识图谱上传统的查询方法，如 SPARQL，不能为以特定方式连接多个实体并返回连接实体的元组的关系查询提供良好的支持，其结果受到底层知识图谱或链接开放数据集合所包含的属性和事实的限制。TriniT^[43]是用来解决知识图谱上的关系查询问题的综合系统。TriniT 通过在大型 Web 语料库上运行开放信息抽取技术来扩展知识图谱，并捕获文本表达式的三元组及其上下文，通过命名实体消除技术获得具有结构化事实的文本三元组作为组合数据集。TriniT 通过扩展知识图谱解释确实的实体、类、谓词或事实。为了查询扩展的知识图谱，TriniT 扩展了 SPARQL 概念，以允许每个 SPO 组件称为表示实体、类或谓词的 URI、类型化文字或者文本短语。

文献 [44] 提出了支持图处理的 RDBMS，利用已有深入研究的 RDBMS 在 SQL 层面支持图处理。为了使 RDBMS 可以支持图算法，文中提出了 4 个关系代数运算，即 MM-join、MV-join、anti-join 和 union-by-update。其中 MM-join 和 MV-join 是两个矩阵之间以及矩阵和向量之间的连接操作和每组间的聚合计算式。anti-join 用于删除图中对于后面计算不必要的顶点/边缘，并且可以用作选择操作。union-by-update 解决了许多迭代图计算任务中需要的值的更新，如 PageRank、SimRank 和 HITS 中会使用这一关系代数运算。这 4 个关系代数运算是由 6 个基本关系代数运算和 group-by&aggregation 定义的。

由于图的结构越来越复杂，简单的静态图已经不能满足人们的查询需求。因此，文献 [45] 支持在 Neo4j 数据库中实现超图上的 OLAP 操作。该方法支持 OLAP 超图的概念，允许在真实世界的大数据场景中发现可能重复的关系，即多超图。立足于经典的 OLAP 操作，在图形上下文中正式定义它们的含义。文献 [46] 提出的在 Spark 中实现的 Portal 对时序图进行有效的查询和探索性分析。可以将时序图看作依据时刻的一系列快照。Portal 的语言支持很多操作，包括时间的选择、连接和聚合以及进行趋势分析。其使用类似于 SQL 语句，具有 Select…TFrom…TWhere…TGroup 的结构。Portal 的趋势分析是指使用线性回归计算最小二乘线的斜率，在缺少顶点值时进行调整。Portal 一定程度上满足了可扩展性和效率的要求，同时还考虑了可用性和易传播性。

2.2 大图数据挖掘与分析

数据挖掘技术及数据挖掘算法研究是人工智能和数据库领域研究的热点问题，是一种新的商业信息处理技术。在许多应用领域中，数据被建模为实体，实体的各种属性为数据添加了标签，属性可能关系到实体之间的联系，形成了复杂的结构数据。利用图数

据挖掘技术挖掘系统网络中的数据，获取潜在信息，并应用到模式识别、电子商务、金融等领域，满足众多实际需求。下面将介绍几个常见的图挖掘问题以及解决方法，这些方法被证明在大规模图挖掘中是准确并且有效的。

2.2.1 大图数据社区发现问题

在现实生活中，网络是由多个社区结构构成的，社区内部的顶点之间的连接相对紧密，社区与社区之间的联系相对稀疏。社区相当于一个网络系统中的功能单元。社区结构反映了顶点之间关系的局部聚集特征，因为社区一般由性质相似或功能相近的网络顶点所组成，这一特征有助于揭示社区结构和功能之间的关系。社区发现过程相当于在网络上做聚类，聚出来的类就是社区。社区发现的早期研究工作，大部分围绕此类型展开^[47]。现有研究对社区结构尚未达成统一的共识，也没有建立有效的社区数学模型，但大量学者提出了许多方法来发现复杂网络中的社区结构。典型的算法有最优化算法^[48]、谱方法^[49]、标签传播方法^[50]、信息论方法^[51]等。最新的社区方法除了通过新的技术提高社区发现的效率和准确度之外，还关注在具有特殊结构的图上定义新的社区问题，并提出相应的解决方法。

社区发现又分为非重叠社区发现和重叠社区发现。非重叠社区发现是指识别出的社区之间互不重叠，每个顶点仅属于一个社区。ATC^[52]是一个基于属性的 truss 社区发现模型，其定义了一个属性分数函数，可以在属性同质性和覆盖率之间实现平衡，并且定义了 (k, d) -truss，用于为密集连接的社区建模。ATC 通过基于贪心算法的 BULK 移除候选图中具有最小属性边际增益的顶点，通过 ATindex 索引维护已知的图形结构和属性信息，最后 LocATC 高效地检测算法来实现社区发现算法。EquiTruss^[53]是基于 truss 分解的社区发现算法。该方法引入 k -truss 等价关系来描述 k -truss 社区中边的固有密度和内聚性，然后将图的所有边划分为一系列 k -truss 等价类，以此来构成空间有效并且保持 truss 结构的等价索引结构 EquiTruss。与其他需要重复访问原始图的社区发现方法相比，EquiTruss 可以直接在等式上进行，而不需要重复地、耗时地访问原始图，这在理论上是最优的。另外，当原始图边缘插入和删除边时，EquiTruss 可以进行高效的动态更新。

对于重叠社区，IEDC^[54]是一种通用社区检测算法，通过一个集成的框架来提取重叠和非重叠的社区结构，并且其不需要假设网络上的结构连通性。IEDC 基于由关联顶点方法设计的概率模型框架，该框架既可以发现社区中重叠的部分，又可以发现社区中不重叠的部分，并且某一顶点属于特定社区的概率取决于其邻居以及由生成随机模型计算的社区之间的交互。IEDC 会通过链接聚类方法确定社区的种子集合，然后计算网络顶点的内部关联度和每个社区的顶点的外部关联度。IEDC 是基于良好的评估标准的概率模型框架，其要优于早期的最先进的检测社区的算法，有更好的准确性和可接受的时间复杂度。

随着图的结构越来越复杂，研究者们开始研究在具有特殊结构的大规模图上的社区发现问题。Fang Yixiang 等人在文献 [55] 中提出了在大规模属性图上给定一点进行社区搜索的算法，并定义了属性社区，通过 CL-tree 索引树，高效地进行属性社区查询。文中基于 CL-tree 索引树提出了三种属性社区查询算法，依据如何验证关键字候选集，将算法

分为增量算法和递减算法。对于增量算法，提出了增量空间有效算法（Inc-S）和增量时间有效（Inc-T）算法，以在内存消耗和计算开销之间进行折中。对于递减算法不仅涉及候选关键字集的生成，还涉及了候选关键字集的验证。其中递减算法（Dec）虽不直观，但效率最高。文献 [56] 提出了空间图上的社区发现问题，并给出在线空间图上的社区定义，然后提出了四种近似算法来解决该问题。对于四种近似算法，其中 AppInc 算法以递增的方式来生成最终结果；AppFast 通过二分搜索来近似最终结果的半径；为了提高结果的精确性，AppAcc 定义了锚点，对于每个锚点，找出以锚点为中心并满足条件的圆，最后返回其中半径最小的圆，AppAcc 算法因提高了准确性，因此其执行效率较低；Exact + 算法减少潜在的锚点，然后执行 AppAcc 算法。从整体上看，对于中等大小的图，Exact + 近似算法不仅可以保证结果的精确性，还可以保证合理的效率。但对于具有数百万个顶点的大规模图，AppFast 算法和 AppAcc 算法的执行效率要比 Exact + 高很多。

2.2.2 大图数据频繁子图挖掘问题

在图数据库中挖掘频繁子图对数据分析和数据挖掘起着至关重要的作用，通过对这些频繁模式的解析找到图数据之间的关联或者相关性，进而发现一些未知的、新颖的、包含在其他模型里面的频繁模式。目前存在两类不同的图数据中频繁子图挖掘问题，即在小图数据集和单个大图上挖掘频繁子图。早期已经提出了较多高效的、可扩展的算法来挖掘小图数据集中所有完整的频繁子图模式，随着图数据规模的不断增大，越来越多的应用需要在单个大图上进行频繁子图挖掘。SUBDUE^[57] 和 GBI^[58] 是早期的解决单一大图频繁子图挖掘的代表性算法，可用于通过频繁的模式来替代输入图的顶点实现压缩图的目的。这些算法都采用了启发式搜索策略，都是近似的处理方法，不能求出所有频繁子图，挖掘过程中会丢失很多的频繁模式，计算量大，并且不容易扩展到大图模式挖掘中。

ScaleMine^[59] 是单图上的并行频繁子图挖掘系统。ScaleMine 通过两阶段处理来查找频繁子图。第一阶段为近似阶段，在收集各种统计量的同时，快速识别出频繁出现的子图；第二阶段利用近似结果求出精确解，达到较好的负载均衡，修剪搜索空间，制定有效的执行计划，并指导任务内部的并行性。在 GRAMI^[60] 中，将频率计算建模为一种限制满足问题，并提出了高效的迭代增量处理策略。GRAMI 算法泛化了子图同构的概念，可以用于挖掘基于任意距离限制的模式，有着更好的适用性。然而，GRAMI 无法处理实际应用中固有的不确定性。频繁子图可能会丢失。由于不精确图匹配问题的 NP 完全性，保证找到最优解的方法需要指数时间和空间。在 GRAMI 基础上，文献 [61] 提出了基于近似图匹配的单图频繁子图挖掘混合方法 POSGRAMI。POSGRAMI 首先遍历图并探索频繁子图的搜索空间，来生成可能性图候选。然后，通过结构 - 语义相似度计算，来检测可能性图匹配中生成候选子图之间的近似图匹配。之后，确定每个成长子图的频率，进行子图支持计算，生成结构 - 语义子图。最后，使用可能相似性获得了一组频繁出现在该输入图中的频繁子图。POSGRAMI 不仅通过结构相似性方法发现频繁的子图，还通过应用语义过滤器来修剪它们，以提取一些可能的频繁子图。IncGM +^[62] 是在单个演化图中

进行频繁子图挖掘的快速增量方法。IncGM + 将“边缘”的概念应用于图上下文，即频繁子图和不频繁子图边界上的一组子图。IncGM + 维护边缘子图并利用它们来对搜索空间进行剪枝，每次图更新后，仅需评估这些子图。为了提高效率，IncGM + 提出了一种有效的索引结构，当图更新时可以动态修改此索引来反映更新后的图，保持最小的内存开销。此外，使用增量解决方法，即利用过去迭代期间收集的信息来提高下次迭代的效率。

为了提高频繁子图挖掘的准确性和算法效率，文献 [63] 提出了一个新的框架用来研究频繁子图挖掘的度量支持，该框架将模式图和数据图结合，转换成包含模式图的实例和信息的超图，提高了频繁子图挖掘结果的准确性。基于超图，文中提出了两种新的度量支持，并且这两种度量方法都具有反单调性。除此之外，文中证明了其他已经提出的度量方法也可在此框架下运行，如 MNI 度量和 MIS 度量经过一定的改变后，都可在超图框架下运行。文献 [64] 为在单图中查找频繁子图提供了适用于任何挖掘算法的优化算法，该方法采用上限测度方法进行过滤，以此提高频繁子图挖掘算法的效率。

为了更好地适应大规模图，研究者们开始探讨如何在分布式系统下解决频繁子图挖掘问题。Ap-FSM^[65] 是基于 Pregel 实现的大规模单图近似频繁子图挖掘算法。Ap-FSM 首先在 worker 上通过在每个迭代中执行一个顶点和一个边扩展，在多个迭代中识别频繁子图。然后高效地执行子图扩展，发现频繁子图。最后引入两步优化，用于执行子图修剪。Ap-FSM 克服了对大规模大图进行频繁子图挖掘的挑战，并且在分布式图形环境中实现了高可扩展性和加速，在从单个大图中查找频繁子图时结果非常准确。WFSM-MR^[66] 是基于 MapReduce 框架的加权频繁子图挖掘方法，用于从具有加权边的大图集中发现有意义的加权频繁子图。WFSM-MR 首先对图进行预处理，计算所有图的权重，并识别加权频繁的边。然后将数据集拆分，使得不同输入块之间存在的边缘总数几乎相同。然后将输入块加载到 Hadoop 分布式文件系统中。之后，对图所需的数据结构进行初始化，减少候选子图构造和加权支持计算的工作量。最后，使用 Map 和 Reduce 函数，迭代得到较大尺寸的加权频繁子图。

2.2.3 大图数据影响力最大化问题

影响力最大化问题是指在特定的传播模型下，如何寻找 k 个最具影响力的顶点使得在该模型下社交网络中被影响的顶点最多，信息传播的范围最广。该问题在病毒营销领域具有重要的应用背景，它已经引起了学术界和工业界的广泛研究。影响力最大化算法基本上都是通过采样来实现的，在初始阶段人们普遍采用蒙特卡罗模拟进行采样。随着研究的深入，研究者们不满足于简单的影响力最大化问题，而是在影响力最大化问题的基础上，提出了更多有应用价值的问题。

现实生活中，用户之间相互影响力的概率大小与其传播信息的类型是相关的，并不是一成不变的。针对这种情况，文献 [67] 提出了一种新型的影响力最大化问题：寻找 k 个种子顶点及与其相关的 r 个标签，以便最大限度地影响到目标用户集合，并用 TRS 采样方法解决该问题。TRS 是一种基于反向可达集合采样^[68] 的采样方法。RRS 采样通过单路径选择方法来选择标签，此方法根据标签计算路径概率大小来选取标签，但是此方法

的不足之处是选取的标签虽然可以使得路径的概率较大，但是标签可能只会出现在一条边上，而在其余的路径上不会出现。和 RRS 采样不同的是，TRS 采样需要考虑顶点之间的信息类型，对各种信息类型面向目标用户逐一进行采样，即对目标用户建立基于标签的方向可达集合。TRS 通过批处理路径选择来应对多标签和多路径问题，以此通过计算标签集合与其子集所在路径的关系来选取标签。

文献 [69] 基于传统的影响力最大化问题提出了最大影响力社区发现问题。该方法基于 k -Clique 问题，定义了一种新的社区—— kr -Clique 社区。在 kr -Clique 社区中，任意两个顶点可以在 r 步内访问到 kr -Clique 社区中的其余顶点。社区影响力指的是社区中的所有顶点对社区外顶点的影响力大小，即社区内的所有单一顶点可以将信息影响到社区外顶点的个数的总和。为了快速找到具有最大影响力的 kr -Clique 社区，文献 [69] 还定义了 C-Tree 的数据结构来存储并计算 kr -Clique 社区影响力。

文献 [70] 提出了个性化社会影响标签探索问题，与传统的影响力最大化问题不同的是，在本文献中所研究的不是致力于将信息通过 k 个社交网络中的用户使得信息尽可能地影响到其他的用户，而是着重研究个人通过多个话题对整个社交网络用户的影响。首先，提取隐含在社交网络中的所有话题，然后将包含 k 个话题的集合设置为标签。采用 Lazy Propagation 采样方法，将传播概率和采样次数结合在一起，概率越高的边相对于小的边会被更多次地访问到，减少了在采样过程中对某些边的访问次数，使得在更短的时间内得到更多的采样。然后在这种新的采样模型下，对顶点进行采样预处理，即单一顶点建立反向可达集合，然后在这些集合上使用贪心策略来寻找可以使得目标用户最大化影响网络的大小为 k 的标签。本文首次研究了基于标签的单一用户对于社交网络整体的影响力最大化，用户之间基于标签的影响概率是通过历史数据计算得出的，但是一旦有新的话题出现，这是在历史数据所查询不到的，这样也就无法相对准确地计算关于新话题的影响概率。与文献 [70] 中的问题相似，PRR-Boost^[71]是用来解决 k -boosting 问题的方法。 k -boosting 问题旨在通过再次寻找 k 个用户作为 boosting 用户来提高和 boosting 用户相关的用户的传播概率，从而提高种子顶点的影响力。首先，通过影响提升模型判断顶点是否为 boosting 顶点并计算传播概率。然后，在影响提升模型的基础上，以广度优先遍历通过采样建立 PRR 图，并对 PRR 图进行压缩。最后在 PRR 图中，通过寻找 k 个顶点作为 boosting 顶点，使信息尽可能广地传播。相比较传统的影响力最大化算法，PRR-Boost 可以使得信息在社交网络传播得更广，但是相应地也就需要更多的计算时间。

MIA 是用来解决距离感知的影响力最大化问题的模型。对某一具体地点，当需要对这一地点进行推广宣传的时候，尽可能地寻找在距离上与此地点较近的用户作为种子顶点来进行推广宣传。所以此问题与传统影响力最大化问题最大的不同之处就在于将距离因素考虑在内且种子顶点的寻找是为了宣传某个有具体的地理位置的顶点。MIA 通过找出两点间的所有路径，来选择具有最大影响路径的概率作为两顶点的传播概率。并且，将图分为若干矩形块，每一个矩形的中心作为锚点，然后通过这些锚点的地理位置来计算顶点影响力的上边界以及顶点边际效应的上边界等。

现存的影响力最大化算法大部分都是注重离线过程的，在这些算法中不会在结果出

来之前向用户提供任何输出，也不允许用户提前终止程序。文献 [73] 致力于研究影响力最大化问题的在线处理，用户可以在任何时间终止算法得到解决方案及其近似保证，还可以在重启算法时继续运行之前的程序，得到具有更高近似解的结果。该方法通过降低结果的近似度来解决影响力最大化问题的在线处理。无论是 RRS 采样还是蒙特卡罗采样，都是通过采样的多少来控制结果近似度大小的。因此，本文采用 RRS 采样方法进行采样，如果算法被用户终止，即在现已采样的样品中求得所需结果，但用户需要更高的近似度结果，则算法继续运行采样，且之前采样的样品也进行保留，如此便可以得到具有更高近似度的结果。

2.3 大图数据系统

现有图系统大部分都是在分布式框架下完成的。分布式图处理系统主要包括基于整体同步并行模型（Bulk Synchronous Parallel, BSP）^[74]的专用的分布式图处理系统以及构建于通用分布式系统如 MapReduce^[75]、Spark^[76]之上的图处理系统。MapReduce 是一种适合于云计算平台的分布式并行的计算框架，其处理过程可以认为是基于数据流的模型。执行一个作业的计算逻辑主要分为两个阶段：Map 阶段与 Reduce 阶段。文献 [75] 提出了 Mapreduce 框架下的大图处理优化策略。首先，从理论上定义了 MapReduce 框架下大图处理的一种新的类 SGC，目标是实现大图处理的可扩展性、稳定性和健壮性。此外，文献 [75] 定义了两个图操作符，分别用于从顶点向邻接边传递消息和聚集从邻接边到顶点的消息。各类主要的图算法都基于该框架进行了设计，并获得了明显的性能提升。但是作为通用计算模型，在图处理方面，连续的作业调度和任务分配，代价较高，对于图拓扑结构信息的反复磁盘读取，尤其是从分布式文件系统上读取，也增大了 I/O 开销。此外，在迭代处理方面，需要用户编程控制，较为烦琐。BSP 是一种异步的 MIMD-DM 模型，提供块间同步处理、块内异步并行的计算^[74]。BSP 的计算逻辑由一系列的迭代步组成，其中的每一步迭代称为一个“超步”，BSP 是目前进行分布式大图处理的主流模型，典型的基于 BSP 的系统包括 Pregel^[77]、Trinity^[78]。与 MapReduce 相比，BSP 在多次迭代时的数据反复迁移和作业连续调度，其特有的超步和全局同步机制，使迭代处理的控制更加灵活，在大规模图处理方面很有开发前景。但目前上述系统还处于研究开发阶段，所处理的数据置于内存，未考虑索引问题，虽然是分布式并行处理系统，数据处理规模也受到极大的制约。此外，BSP 中各任务之间的消息通信也是难以消除的效率瓶颈，而在容错管理等方面，尚无完善的理论。因此，研究者们致力于构建统一的图管理模型，增强系统的可扩展性以适应不同结构的图，并且处理图上经典的查询处理与挖掘问题。

2.3.1 大图数据系统物理模型

由于规模庞大，大图数据无法容纳在一台服务器的内存乃至外存中，因此大图数据的存储往往使用分布式系统架构。现有研究工作主要包括以 Trinity^[78]等为代表的基于内存的分布式大图数据存储和以 MapReduce 为代表的基于外存的分布式大图数据存储。基

于内存的分布式大图数据处理系统将大图数据分割成细粒度的数据块，并分散地存储在系统中各个 Slave 顶点的内存中。

Trinity^[78]使用分布式内存云存储大图数据，系统中的内存资源被划分成 2^p 个内存桶，并分散在 m 个 Slave 顶点中，同时使用类似 HDFS 的分布式文件系统备份每一个内存桶。Trinity 使用 key-value 模型，其中每个 key 是长度为 64 位的标识符，系统中每个 Slave 顶点都保存一份映射表，用于定位存储给定 key 的内存桶。每个内存桶使用一个哈希表存储该桶中每个 key 对应 value 的内存偏移量和长度，以此实现分布式内存中 key-value 对的存储与寻址。Trinity 将图的顶点和边表示成 key-value 对，也称 (CellID, Cell) 对。对于图顶点，Cell 中存储其邻居顶点的 CellID 以及其他信息如顶点名字、描述等。对于图中的一条边，Cell 中可以存储与边相关的信息，如顶点、权值等。

GraphX^[79]使用 key-value 模型存储大图数据，将图表示成一个顶点的集合和一个边的集合，并使用 Spark RDD 抽象模式将其存储在分布式内存系统中。GraphX 使用哈希划分将图的所有顶点分配到 Slave 顶点中，以此支持高效的连接操作，并根据用户指定或者系统默认的顶点切割方式将图的所有边划分到 Slave 顶点中。GraphX 使用与顶点划分同步生成的路由表，以此建立顶点划分和边划分之间的关联，并定位包含给定顶点的边划分。

TurboGraph^[80]将入边数据和目的顶点组织在一起并按照目的顶点的 ID 分为若干页。在迭代计算中，采用 pin-and-slide 模型，即首先加载一个页的数据到内存，然后按照入边数据，依次加载对应的源顶点数据块到内存，以便获取消息数据并完成目的顶点的更新计算，直到所有的页完成计算后，本轮迭代处理完毕。避免了迭代过程中大量中间结果的磁盘访问开销，并利用 FlashSSD 的特性实现磁盘读写和计算的并行化，显著提升了系统的处理性能。TurboGraph ++^[81]是在 TurboGraph 的基础上构建的可扩展的并且高效的图分析系统。TurboGraph ++ 提出了新的图形处理抽象化概念，称为嵌套窗口流，嵌套窗口流通过使用固定的内存预算来处理顶点的多跳邻域，高效地支持以邻域为中心的分析处理。TurboGraph ++ 利用 BBP 平衡了机器之间的工作负载，计算顶点属性值和邻接表的缓冲区所必需的内存预算。并且，利用 3-LPO 来充分利用每台机器中的所有硬件资源。3-LPO 以 I/O 任务既不干扰也不阻塞计算任务的方式并行化和重叠 CPU 计算任务、磁盘 I/O 任务和网络 I/O 任务。而查询处理时间由 CPU、磁盘和网络之间的最大瓶颈硬件资源决定。

Da Yan 等人在文献 [82] 中提出了一个类 Pregel 系统 Quegel。Quegel 系统运行两类程序，加载输入图形并处理传入图形查询的服务器程序，以及供用户将其查询提交给服务器程序的客户机程序。Quegel 系统需管理三种数据：依赖于顶点的数据 V-data，依赖于顶点和查询的数据 VQ-data 以及依赖于查询的数据 Q-data。Quegel 系统的服务器程序采用 master-slave 的方式进行查询，采用平衡二叉搜索树来存储该表以节省空间。与 Pregel 相比，Quegel 可以根据需要充分利用带宽处理轻量级图查询，并使用共享超级轮执行模型更有效利用集群资源。

另一方面，大量基于 MapReduce/Hadoop 的大图查询和分析方面的研究工作以外存介

质为基础，并使用 HDFS 存储大图数据，如文献 [75, 83] 等。在存储过程中，普遍将大图数据存储为边的集合，并使用哈希划分将大图数据分散在各个 Slave 顶点中，每个 Slave 顶点存储大图数据的一部分边。在计算过程中，用户编写的 Map 函数载入所有大图数据的边，并按需选取顶点或边的信息构建 key-value 对，以此为基础启动 MapReduce 计算过程。基于 MapReduce 的大图操作往往需要多轮 MapReduce 过程才能求解计算结果。文献 [75] 研究大图操作在 MapReduce 计算框架下的复杂性并给出若干问题的最优算法。文献 [83] 提出了社会网络图中高效的分层采样方法，并将其实现于 MapReduce 计算框架中。上述方法致力于优化算法在 MapReduce 计算框架下的 CPU 代价、通信代价以及迭代轮数，而大图数据的存储往往使用较为原始的边集合模式，将获取图的拓扑、图中包含信息的探索任务交给用户定义的 Map 函数和 Reduce 函数。与此同时，基于外存的大图存储无法高效地支持大图操作过程中的大量存在的随机读取，因此只适用于需要读取整个图才能完成的查询和分析操作，如子图匹配，PageRank 等，而对于最短路径等问题则缺乏良好的支持。

$G^{[84]}$ 设计了由一组单顶点图数据库组成的分布式图数据库。在单顶点图数据库中，每个顶点由用户指定的唯一外部顶点标识符和自动生成的唯一内部顶点标识符标识。每条边由源顶点 ID、目标顶点 ID 和动态生成的边 ID 进行标识，且同一个顶点对之间允许存在多条边。顶点或边会与一个字符串标签相关联来进行分类和高效遍历。为了支持高吞吐量和低延迟， G 引入了一种新的基于远程过程调用（RPC）的通信模型，允许数据库在存储不同分片的各种机器之间高效地移动数据。同时，在分布式图系统中有两种客户端，一种是查询管理器，一种是普通客户端。查询管理器会打开与分布式图数据库的每个单独分片的通信通道，之后可以将 RPC 发布到数据库的任何顶点以执行各种图操作。普通客户端将不会直接连接到分布式图数据库，而是连接到查询管理器，查询管理器将代表客户端执行查询，这样做可以用查询管理器来控制负载。

随着社交网络的不断发展，人们对于图数据的实时处理的需求不断增大，研究者们开始关注动态图系统和时序图系统的研究。TGraph^[105] 是由静态图管理系统 Neo4j^[85] 衍生出来的时序图管理系统，其利用 Neo4j 存储图中的顶点、关系和静态属性。而对于动态属性，TGraph 先将数据写入内存数据结构 MemTable 中，然后将 MemTable 写入第 0 层的磁盘文件 UnStableFile 中，根据时间的改变依次递增地合并 UnStableFile 文件，直到第 4 层为止。然后将第 4 层的 UnStableFile 文件存放入 StableFile 中。每个 UnStableFile 和 StableFile 都保存了一个时间阈值内的数据。然后用 MetaFile 记录每个文件的名称和其存储数据对应的时间阈值。

2.3.2 大图数据分割与布局

图划分是大图数据系统进行分布式计算的前提。由于图计算通常按照拓扑结构访问数据，所以每次迭代处理均会引入巨大的通信开销，成为制约分布式处理性能的关键因素。因此，一个良好的划分算法应保证划分后的子图在负载均衡的前提下，减少子图之间的交互边（切分边）规模，从而减少网络通信。在图数据的划分方面，图的最优均衡

划分问题被证明为 NP 完全问题，现有研究工作主要包括一系列以高质量划分为目标、生成单一划分模式的近似算法。现有大图数据划分主要采用多层划分方式或流划分方式。

在多层划分方面，G. Karypis 等提出了具有影响力的 METIS 算法^[86]，METIS 算法可以优化切边的数量或计算顶点之间的通信数量，然而 METIS 算法没有考虑基于通信代价和计算代价的代价模型来最优化处理进程，在粗粒度化过程中使用的最大匹配算法计算开销巨大，而且算法需要使用大量的内存资源。文献 [87] 基于多层划分的思想提出了适用于 Trinity 的 MLP 算法，用于分布式的大图划分。MLP 算法在大图粗粒度化过程中使用标签扩散的方式，为每一个图顶点分配一个标签，并逐轮更新图顶点的标签。标签更新过程中，顶点 v 的标签被更新为所有邻居顶点中出现次数最多的标签，更新过程持续直至标签不再改变或者达到预定的轮数。随后标签相同的顶点被粗粒度化为同一个顶点，并进入下一轮粗粒度化过程。与 METIS 相同，文献 [87] 使用内存图划分算法将小规模的粗粒度图划分，并反向映射成原始顶点和边上的划分。

文献 [88] 提出了可扩展的并行化尺寸约束的标签传播算法，并将其集成到多层次框架中，实现复杂网络的分布式图划分算法。其首先采用并行的具有尺寸约束的标签传播算法对图模型进行聚类，使得图模型的尺寸不断收缩，并且递归执行此操作，直到图足够小。之后在每个处理单元上收集分布式粗粒度图，即每个处理单元都有完整的粗粒度图副本。然后算法采用粗粒度分布式进化算法 KaFFPaE^[89] 对之前生成的粗粒度图进行划分，并得到前 k 个高质量的划分结果。最后将得到最好的划分方案广播给所有的处理单元，每个处理单元将在他们本地的粗粒度图副本上执行方案。该方法通过并行处理减少程序运行所需时间，并且提高了不规则图和具有分层聚类结构图的解决方案的质量，相较于传统的划分方式，更适用于大型复杂网络。PARAGON^[90] 是并行的结构感知图划分方法。PARAGON 允许多个服务器并行进行细化，每个服务器都负责细化一组分区。此外，为了降低主顶点和从顶点之间的通信成本，还采用启发式尝试查找将最小网络通信成本的服务器作为主顶点。主顶点的选择可以由每个服务器在本地进行，而不需要彼此同步。

流划分方式与多层划分不同，在大图数据的载入过程中利用一次扫描完成大图数据的划分。在此过程中，顺序读入一个图顶点 v 之后，算法立即决定将 v 分配到哪一个图划分中。C. Tsourakakis 等提出的 Fennel 算法^[91] 是流划分方式的代表工作之一，Fennel 算法在流划分方式中整合两种启发式策略：邻居策略，即将新读入的顶点 v 分配到邻居顶点最多的划分中；非邻居策略，即将新读入的顶点 v 分配到非邻居顶点最少的划分中。虽然流划分方式可以大大提高图数据划分的速度，然而流划分方式对图数据载入的顺序是敏感的，随机的读入顺序往往导致低质量的图数据划分结果。文献 [92] 提出了 Sheep 算法用于分布式的图划分过程。Sheep 算法产生的结果与图数据的分布无关，因此适用于分布式的计算环境。Sheep 算法首先在每个 Slave 顶点中将所有图顶点排序，然后按照该排序在各个 Slave 顶点中为存储的部分数据建立 Elimination 树结构。随后，使用最小化通信代价上界的方法划分各个 Elimination 树，并将 Elimination 树的划分结果反向映射得到原始图数据的划分结果。Elimination 树结构的规模远小于原始图结构，与多层划分算法以及其他流划分算法相比，Sheep 算法运行速度更快。文献 [92] 指出 Sheep 同样

对图顶点读入顺序敏感，并验证根据图顶点度的排序即可产生较好的图数据划分结果。为了进一步加速图划分过程，H. P. Sajjad 等提出了并行、分布式的 HoVerCut 算法^[93]，利用多线程技术加速单个 Slave 顶点的图划分速度，并支持分布式图划分过程。HoVerCut 算法在每个 Slave 顶点上建立多个子划分器，子划分器之间使用轻量级的内存共享。算法使用一个滑动窗口连续读入图中的若干条边，并将窗口内的边分配到合适的子划分器中，每个子划分器维护自身状态信息，并使用启发式策略将得到的边分配到相应的图划分之中。

Leopard^[94]是针对不断变化的大图而设计出一种基于流划分的动态图划分算法。Leopard 在单向流划分的基础上采取了同时考虑访问局部性和容错性的方法，更好的访问局部性提高了性能。相对于在图上执行的特定操作的分类，Leopard 定义了有效的边割算法，当计算整个图的边切时，定义有效的边返回“半切”，“半切”相对于最终边切值的完全切边只产生一半的影响。此外，Leopard 还支持分区的增减。对于一个新的分区，该方法选择一组顶点作为种子，迭代分区中顶点的邻居运行顶点重新分配评分算法，直到所有的分区大致平衡。Leopard 要求为图的一个小的局部部分计算重新分配分数，使得添加新分区的开销最小，提高划分效率。

2.3.3 大图数据系统任务执行保障

现存的基于图的大数据应用基本上都是采用分布式图处理系统的形式来实现的，但是随着图数据规模的不断膨胀和复杂分析操作的需要，现存的分布式图处理系统需要不断地增加计算顶点来扩展负载能力。然而增加计算顶点对系统的故障恢复能力有两方面的负面影响。大规模分布式系统中包含大量 Slave 顶点，任一时刻都可能发生 Slave 顶点失效的情况，因此大规模分布式系统需要针对 Slave 顶点、计算任务提供容错性保证。

Pregel 使用检查点技术实现系统的容错性，在每一次超级轮之前，Master 顶点控制 Slave 顶点将其存储的图划分保存到永久存储介质中，保存内容包括图顶点和边的值、收到的消息，聚集顶点的状态由 Master 顶点负责保存。Pregel 通过心跳协议检测 Slave 顶点的状态，如果 Master 顶点在给定时间内没有收到 Slave 顶点的心跳回应，则该 Slave 顶点被标记为失效。随后 Master 顶点重新将相应的图划分载入到有效的 Slave 顶点中，并从最近一次保存的检查点开始，重新运行若干超级轮，直至达到最新的系统状态。Pregel 可以使用带限制的检查点技术削减冗余的计算和通信，该方法中系统额外记录 Slave 顶点发出的消息，系统恢复过程只在丢失的图划分中进行，负责这些图划分的 Slave 顶点重新运行丢失的超级轮直至系统最新状态。带限制的检查点方法要求用户编写的程序必须是确定的或者伪随机的。

Trinity 为基于 BSP 的同步计算模式和异步计算模式提供不同的容错机制。Trinity 使用与 Pregel 相似的检查点技术为基于 BSP 的同步计算模式提供 Slave 顶点和计算任务的恢复功能。系统在若干个超级轮之后，将检查点状态写入永久存储介质，在 Slave 顶点失效的情况下使用与 Pregel 相似的 Slave 顶点和计算任务恢复方法。对于异步的计算模式，Trinity 使用周期性的中止机制，向所有 Slave 顶点周期性地发送中止指令。收到中止指令的 Slave 顶点在完成现有计算任务后进入暂停状态。系统使用 Safra 的终止检测算法检查

系统是否全部中止。随后，系统将状态快照写入永久存储介质中。在恢复过程中，对于只读的查询，系统重新启动失效的划分部分，并运行丢失的计算过程。对于有更新操作的任务，系统使用远程顶点内存中缓存的日志信息来恢复丢失的计算过程。

GraphX 是 Apache 开源项目 Spark 提供的图处理库，构建于 Spark 中的 RDD 抽象模式之上。RDD (Resilient Distributed Dataset) 是通过 Spark 程序中 Map 函数或 Reduce 函数建立，并存储在内存或外存中的只读数据划分。Spark 为 RDD 维护历史操作序列，一旦发生 Slave 顶点失效，Spark 将自动恢复 RDD 存储结构，GraphX 系统的容错性依赖于 Spark 提供的 RDD 容错性机制。

MapReduce 构建于 Google 分布式文件系统 GFS^[95]之上，其中每个数据块备份 k 份并存储在 k 个 Slave 顶点中，以此提供良好的数据可获取性。在计算任务提交之后，Master 顶点通过数据块的位置优先使用拥有所需数据的 Slave 顶点执行 Map 函数，如果拥有所需数据的 k 个 Slave 顶点由于负载过度无法执行 Map 函数，Master 顶点将指派网络位置相近的 Slave 顶点来完成 Map 函数的计算。MapReduce 的任务调度过程优先利用数据的局部性，在无法使用本地数据的情况下，将任务调度至临近的 Slave 顶点。此外，MapReduce 通过心跳协议检测各个 Slave 顶点的运行状态，如果 Slave 顶点长时间没有回复 Master 顶点的心跳消息，该顶点中的数据块将通过系统中存在的备份被恢复到其他 Slave 顶点中。Master 顶点将重新指派 Slave 顶点来完成失效顶点正在运行的 Map 操作或 Reduce 操作。失效顶点完成的 Map 操作或 Reduce 操作也需要重新指派 Slave 顶点再次运行，因为失效顶点的外存中保留的计算结果是无法获取的。如果 Slave 顶点 A 失效后，A 负责的操作被分配给 B，那么需要读取 A 的计算结果的 Slave 顶点都会被 Master 顶点告知，并从 B 中读取相应的计算结果。MapReduce 中的 Master 顶点可以通过定期写入检查点状态信息的方式提供容错性。如果 Master 顶点失效，系统指派新的 Master 顶点载入最近的检查点状态信息。MapReduce 检测每个 Slave 顶点的任务执行时间，如果某个 Slave 顶点在执行 Map 或 Reduce 函数的过程中速度过慢，系统将正在执行的操作转移到其他低负载的 Slave 顶点中运行，以此获取更好的负载平衡和更短的系统响应时间。

2.4 基于硬件的大图处理问题

虽然，对于大规模图数据的查询处理，研究者们已经进行了很长时间的研究。但是，由于数据规模的不断扩大，处理大规模图上的问题仍是一个巨大的挑战。研究者们一直致力于寻找新的解决方案，来处理大规模图数据。由于 GPU 具有高度的并行性和很高的存储访问带宽，因此，利用 GPU 加速图处理具有广阔的应用前景^[96]。虽然 GPU 可以提供高度的并行性，但是利用 GPU 来进行图处理仍存在一些限制。首先，图计算往往表现出不规则的数据访问模式，其应用可能达不到 GPU 的峰值性能。此外，由于 GPU 的内存大小与 CPU 内存相比非常有限，并且将数据从主机内存移动到 GPU 内存会造成额外的开销，因此 GPU 内存可能成为潜在的瓶颈。而且，图计算中的条件分支不能充分利用 GPU 中 SIMD 执行所提供的高度并行性，这导致了所谓的分支分歧，可能会大大降低性能。

为了解决这些在 GPU 上进行图处理的挑战，研究者们提出了许多方法来解决这些问题。

GTS^[97]为了克服 GPU 设备中和主机中的内存容量限制，GTS 使用 CUDA 流方法将未访问的图数据传送到 GPU 设备内存，将访问过的数据转存到磁盘上。这样 GTS 不需要对图进行划分，即无须预处理即可处理大规模图。GTS 通过标记属性数据和拓扑数据来区分图数据。属性数据是指在顶点核心执行过程中被需要和更新的顶点和边的信息，而拓扑数据是图的基本结构数据。GTS 在 PCIe SSD 中存储图，并触发 GPU 的直接数据传输。当拓扑数据通过 PCIe 从 SSD 流到 GPU 时，成百上千 GPU 内核可以被使用。换句话说，将属性数据复制到 GPU 设备内存中，然后拓扑数据由用户定义的 GPU 内核函数处理，通过流从主机内存复制到 GPU 设备内存中。GTS 采用将属性数据存储在设备内存中，并将拓扑数据交换到磁盘。在 GTS 中，通过使用异步 GPU 流方法，数据可以被异步传输，从而可以将内存访问延迟从 GPU 转移到主存中，提高 GPU 利用率。

Gunrock^[98]是基于 BSP 模型的 GPU 图处理系统。Gunrock 将大图分成多个分区，每个分区运行一个用户自定义的内核，内核中的所有线程都是并发执行的。Gunrock 提出了两种工作负载映射策略，即 per-thread 细粒度映射和 per-warp & per-CTA 粗粒度映射。在 per-thread 细粒度映射中，一个线程映射到前沿顶点的邻区列表中。在这种方法中，线程在指定顶点的邻接列表中加载偏移量，然后，线程顺序处理相邻列表中的所有边。由于邻接表大小的差异会引起 per-thread 细粒度映射的性能，因此，Gunrock 提出了 per-warp & per-CTA 粗粒度策略。该方法根据邻接表的大小将邻接表划分为三个类别，然后将每个类别映射到一个策略中，从而解决映射问题。这两种策略侧重于不同的任务粒度。实验表明，per-thread 细粒度策略适合于直径较大，度分布相对均匀的图。对于幂律图，per-warp & per-CTA 粗粒度映射的性能更好。文献 [99] 提出了一种基于 GPU 的动态图存储分析框架，可以支持现有的图算法。该动态图分析框架支持从滑动窗口机制生成的隐式更新和从上层应用程序或用户生成的显式更新两种更新操作。对于给定图流，该框架支持即时查询和监控任务。动态查询缓冲区模块针对图提交的查询进行批处理。所有临时查询和监视任务都将传输到图分析模块，以进行 GPU 加速处理，分析模块与图交互处理查询和跟踪任务。随后，查询结果将被传回主机。并且该框架支持并行更新算法，该算法支持高效的流更新，从而能够使用 GPU 高速分析来处理图。

Lux^[100]是可以加速图算法计算的分布式多 GPU 系统。由于图应用程序在实际的计算中具有较高的不规则内存访问率，因此图处理性能在很大程度上受到当今机器的内存带宽的限制。而 GPU 可以提供比现有 CPU 架构更高的内存带宽，而且由于具有多 GPU 的顶点的高功效性和硬件平行性，所以在高性能计算中是很普遍的。Lux 是通过利用多 GPU 集群中的聚合内存带宽实现快速图处理的分布式多 GPU 系统。在 Lux 系统中，整个图以最小化存储器层次结构中的数据传输来分配到一个或多个顶点的 DRAM 和 GPU 存储器上。Lux 提供了用以优化算法效率的 push 执行模型和支持重要 GPU 优化的 pull 执行模型。相比较传统的图处理系统，Lux 可以将图算法处理速度提高 20 倍以上，但是，Lux 系统所针对的目标是可以表示为迭代计算法的图应用程序，所以 Lux 无法对不可表示为迭代计算的图算法进行加速处理。

3 国内研究进展

3.1 大图数据查询处理与优化

对于大规模图上的路径问题，东北大学 Cheng 等人提出的 DistR^[101]是通过分布式策略解决大规模图数据上可达性查询问题的方法。DistR 具体分 2 步：分布式图缩减和分布式合并。在分布式图缩减步骤中，找到原始图的所有最大子图，其可达性概率可以在多项式时间内计算，计算它们并相应地减少图。完成此步骤后，只剩下一个小图。在分布式合并步骤中，本文将问题转换为关系连接过程，并 Dist-2hop 构建索引，提供可达性查询的近似答案。DistR 可以在多项式时间内计算图的大部分可达性关系，将较大的问题分解为易处理的子问题，以产生对最终解决方案的估计。

国内在图模式匹配问题上有着很深入的研究，近三年中，国内主要针对图模式匹配的扩展问题进行了研究。北京航空航天大学 Ma 等人^[102]在模式匹配的现有方法基础之上添加了对图结构和容量的约束，从而提出了团队模拟匹配。该问题首先将 top-k 团队组建问题视为一种新的模式匹配问题。然后，提出批处理算法解决了 top-k 团队组建问题，批量算法需要判断某一模式是否可以被满足，随后用统一的方法来处理模式和数据图更新的需求，其中包含了一种基于模式碎片的增量策略和一种将模式和数据图更新影响进行本地化的方法，以解决问题固有的不确定性。最后，提出了一种统一的增量算法来处理单独和同时发生的模式和数据更新问题，并提供了一种优化技术，使增量 top-k 算法具有早期返回属性。北京大学 Du 等人提出 Lmatch^[103]来解决基于有限模拟下的个性化图模式匹配问题。其中个性化是指允许图中的每个顶点或边缘具有不同强度的匹配条件，文中为模式图中的每个顶点赋予权重，以表示该点在模式图中的影响强度。有限模拟需满足文献 [104] 中提到的 k -限制相似条件和边缘标签。文中提出通过有限模拟进行图模式匹配时，存在最大的匹配图，Lmatch 算法即是寻找出这一最大的匹配图。Lmatch 算法可在多项式时间内高效完成通过有限模拟进行的图模式匹配查询问题，但同 NP 难的子图双模拟匹配相比，有限模拟最终得出的结果会存在一些冗余的边。东北大学 Yuan 等人^[105]通过过滤 - 验证框架对大规模不确定图上基于阈值的概率模式匹配进行了研究，在该问题中顶点是确定的，边是不确定的。在过滤阶段，通过 PM 树建立的切割选择过程获得匹配切割，并对图进行结构修剪和概率修剪，以此细化候选集。在验证阶段，通过高效的采样算法来验证每个剩余的候选匹配然后确定最终答案集。为了更好地适应大规模图，西北工业大学 Suo 等人提出的 ParMa^[106]实现了分布式并行平台上的高效子图模式匹配。该方法将数据图划分为一组平衡的子图，存储在不同的计算顶点上，为了便于分布式子图匹配，该方法将整个图中边界顶点的 k 跳结构存储在图形分区中。ParMa 首先搜索图形分区上 k 跳图模式的匹配，然后迭代地加入以生成查询图的匹配。对于时序图，国防

科技大学 Sun 等人^[107]引入 Hasse 图来表示查询图的时序关系。然后设计了 Hasse 缓存结构，提出了一种基于 Hasse 图的连续时序子图模式匹配算法。该算法利用动态图的概率减少中间结果，同时实现拓扑匹配和时间关系验证。相较于搜索整个查询图，该方法首先搜索查询边的时序关系是否匹配查询边，并通过使用 Hasse 图同时实现拓扑匹配和时序关系验证，提高了算法的性能。

目前，国内对图查询语言的研究相对较少。微软亚洲研究院提出的 G-SQL^[108]是利用图引擎提供的快速图探索功能来应对多路连接查询，使用 RDBMS 提供成熟的数据管理功能。同时提供了一个统一的成本模型来协调底层 SQL 执行引擎和本地图查询处理引擎。G-SQL 利用混合架构，使用本地图计算引擎 Trinity 来提供快速的图探索，使用 RDBMS 或 SQL 引擎来处理关系查询并提供其他功能，如数据持久性、完整性和一致性。借助 Trinity 将多路连接操作转换为内存图中的子图匹配或图遍历操作，利用快速图遍历来避免在关系表上进行昂贵的多路连接查询。Trinity 管理图拓扑，RDBMS 管理拓扑以外的数据。

3.2 大图数据挖掘与分析

当前大多数社区检测方法集中在分离的社区，即每个顶点只能属于一个社区。然而，现实世界中社区往往是相互重叠的，即一个顶点可以属于不同的社区。为了解决重叠社区问题，华南理工大学 Wen 等人提出的 MCMOEA^[109]是一个基于极大团的多目标演化算法，用来解决重叠社区检测问题。将 MOEA 应用于重叠社区检测的一个阻碍是个体的表示方案，现有的表示方法大致可以分为 2 类：①基于原型的方法；②基于顶点的方法。然而这两种方法都有其缺点。因此本文提出了最大团图的概念，它使用一组最大团作为顶点，并将最大团之间的连接作为边。基于最大团图，本文提出了基于团的表示方案 MCMOEA，其中个体的每个基因代表相应的最大团的社区标签，之后将基于团的表示方案和相应的演化算子与 MOEA 框架相结合，构成基于最大团的 MOEA。山西大学 Bai 等人^[110]提出了一种新的基于图聚类的描述模型来解决社区发现问题。社区描述模型可评估某一顶点在某一社区中的重要性即局部重要性，也可评估某一顶点在所有社区中的重要性，以反映某点是否可代表某社区。基于描述模型，文中提出了社区检测的迭代搜索算法 ISCD。ISCD 通过相似性度量来将每个顶点分配到相应的社区中，若某一顶点的邻居顶点对某一社区有着较高的代表性，则该顶点很有可能属于这一社区。

对于频繁子图挖掘问题，北京邮电大学 Xu 等人设计了基于差分隐私的频繁子图挖掘方法 DFG^[111]，该方法按照大小增加的顺序识别频繁的子图。DFG 首先估计频繁子图的最大尺寸，之后利用频繁的子图识别方法从输入数据库中识别频繁的子图，最后利用基于格的噪声支持推导方法来计算每个识别的频繁子图的噪声支持。在这个过程中，DFG 使用二元估计方法来估计频繁的子图的数量，利用条件指数方法对候选子图进行剪枝，来提高私有选择的准确性。DFG 算法在满足差分保密性的前提下，可以从一组具有高数据效用的输入图中找到频繁子图。该方法不仅适用于频繁子图的挖掘，而且也适用于其

他类型的频繁模式的挖掘。由于算法设计存在特殊约束，频繁子图挖掘很难在分布式系统中实现。因为在分布式平台中，如果输入图形在各个 worker 上进行分区，则子图的本地支持对于确定子图是否全局频繁没有多大用处。此外，支持计算不能任意延迟，因为候选频繁子图只能根据 Apriori 原则从频繁的子图中生成。因此，国防科技大学 Zhao 等人^[112]提出了基于 Pregel 的大规模单图上频繁子图挖掘分布式方法 pegi。pegi 算法根据可用的 worker 采用随机分区方法对图进行分配。然后迭代进行模式增长和嵌入发现。为了方便评估边支持度，本文采用了增长存储方法，从而将当前子图的嵌入具体化到树结构中，即嵌入树。河北工程大学 Wu 等人提出了基于邻接矩阵和权重的不确定最大频繁子图挖掘算法 UMFGAMW^[113]。UMFGAMW 设计了一种新的顶点排序策略，并给出了不确定图的标准矩阵编码的定义，用于建立邻接矩阵与不确定图之间的对应关系。该策略可以降低不确定图编码的复杂度，提高不确定子图标准编码的匹配速度。UMFGAMW 提出了不确定图权重和不确定边的平均权重的概念，充分考虑了满足图数据集中最小支持阈值的不确定子图的重要性。根据不确定边的权值的限制条件可以有效地减少挖掘结果的数量。

3.3 大图数据系统

国内对于大图数据系统有着一定的研究。清华大学 Zhu 等人的 Gemini^[114]将大图进行划分并分布在不同的顶点上，图中的信息和更新通过显示消息传递来共享。Gemini 采用 master-mirror 方式对图中顶点进行存储，每个顶点被分配给一分区，该顶点即是该分区的 master 顶点，作为维护顶点状态数据的主副本。mirror 顶点类似占位符，仅用于更新传播，并不包含实际数据。Gemini 在每个 master-mirror 之间会创建一对有向边，其中只有一条边可以使用传播模式。图中的边采取两种模式进行存储，采用位图辅助压缩稀疏行存储稀疏边，采用双压缩稀疏列存储稠密的边。Gemini 是一个分布式图形处理系统，其关注计算和通信组件的性能，采用高效的划分，积极压缩计算时间，同时隐藏通信成本，从而达到了在保持高效的同时实现可扩展，弥补了高效共享内存系统可扩展性差和可扩展分布式系统性能差的不足。北京航空航天大学 Ju 等人提出的 iGraph^[115]是分布式增量图处理系统，用于连续更新的动态图。其采用基于散列的方法对初始图和更新的数据进行分区，行数据处理器以批处理方式持续分析传入的更新数据，更新数据块将依次保存在缓存图更新信息中，同时，所有变化的顶点以及每个变化频率的信息将被发送到热点检测器上，其中采用标准评分方法来检测图的热点，同时，其定期触发热点重新平衡以均衡所有分区的计算成本，然后对它们执行基于贪心策略的全局优化算法，以计算出所有热点的最佳位置。当获得热点的最佳位置后，将在分区之间进行数据通信，调度器将顶点的 ID 及其改变的索引发送到原始数据处理器中的图传送表。

对于图划分问题，Gemini 提出了一种轻量级基于块儿的多级分区的划分方法，其基于拓扑结构将相邻的顶点划分为同一分区。采用该种方法划分使得每个块内的顶点拥有

连续性的特征，从而简化了顶点数据的表示，减小了内存的消耗。华中科技大学 Hao 等人提出了一种面向关联的流式图划分方法 Assc^[116]。该方法为了最小化划分结果之间的相互作用，在将顶点和边进行划分时需要考虑顶点之间的联系。针对大规模图数据连续快速到达的流式情况，Assc 使用基于滑动窗口的流模型进行建模，并考虑在滑动窗口中最近到达的图数据之间的联系。Assc 首先计算顶点排名，然后根据顶点的排名和顶点之间的联系使用吸引力传播的变体方法对图数据中顶点和边进行聚类，实现对图的划分。在划分过程中主要面临以下 2 个问题：①如果顶点排序不够好，可能会导致数据分布严重偏斜；②过多的合并顶点意味着更少的副本和更高的内部关联，这也会导致数据分布偏差。针对以上 2 个问题，Assc 使用混合近似 PageRank 方法计算顶点排名。最后，Assc 提出了一种保持数据平衡分配的方法，即通过为聚类设置比例阈值来确保数据平衡分配。相比于传统图划分方法，Assc 可以处理增量生成的流式数据，并且减少划分结果之间的交互。

3.4 基于硬件的大图处理问题

目前国内对于基于硬件的大图处理问题的研究还比较少。东北大学的 Li 等人^[117]研究了基于 GPU 的具有数据更新的道路网中的 KNN 查询问题。文献 [117] 首先提出了一种新的索引结构 G-Grid 和索引更新算法，其可以缓存和延迟索引更新，避免了不必要的索引更新。G-Grid 索引由三部分组成，其一是表示道路网的图网格，在 CPU 和 GPU 的内存中维护两个相同的图网格，并且为了保留 GPU 上高度并行访问的内存局部性，该图网格基于一维数组进行存储。其二是在 CPU 的内存中，用哈希表以 key-value 对的形式存储索引中对象位置的对象表。其三是缓存对象所更新位置的消息列表，首先将该消息列表存储在主存储器中，并在需要时将它们发送给 GPU 进行处理。同时查询服务器需要更新 G-Grid 索引以使对象位置保持更新，当有更新消息到达后，将此消息缓存在消息列表中，并仅在查询其相应的单元格时对其进行处理，而不影响查询答案的更新。对于 GPU 上高度并行的算法，该算法用于有效处理缓存更新，同时清除缓存的更新，从而实现延迟更新策略。文中进一步提出了 GPU-CPU 协作解决 KNN 查询处理的算法，服务器收到查询问题时，首先使用 CPU 识别查询区域，然后使用 GPU 处理该区域中的缓存更新，利用 GPU 计算出候选答案集，再使用 CPU 计算出最终查询结果。该算法利用了 GPU 的高并行能力来进行大量数据对象的距离计算，并且利用了 CPU 在分支操作中的高效率来比较距离并产生最终的查询答案。该算法在查询时间和索引大小方面都优于其他解决 KNN 查询问题的算法。

4 国内外研究进展比较

从以上分析和总结可以看出，近年来国际学术界对大图数据查询处理与优化、大图

数据挖掘与分析以及大图数据系统开展了广泛而深入的研究工作。而国内的研究者们在相关领域也开展了许多深入的研究工作，并取得了一些重要的研究成果。对于经典的图查询处理与挖掘问题如图模式匹配、频繁子图挖掘等，国内研究工作的数量与国际研究工作的数量不相上下。但是，对于新兴研究方向如图查询语言、时序图、基于硬件的图处理等，国内的研究工作数量还相对较少，并且对于图系统，国内的研究大多是基于已有系统的进一步研究，几乎没有完整的图系统构建。而且从整体上看，在数据库顶级和会议期刊上发表的论文数量方面，国内研究者的论文数量是要远远小于国际研究者发表的论文数量的。由此可见，国内的研究工作的广度和覆盖度还有所不足，技术的前沿性还有待提高。

5 发展趋势与展望

由于现有的图数据具有规模宏大、结构复杂、动态多变的特征，目前图数据研究存在下面这些问题：

(1) 对于大图数据查询处理和优化

大图数据的存储空间将越来越大，严重影响传统的基于内存的图数据查询处理技术。因此当前的工作大都采用分布式环境来处理查询，将大图数据分割为多个部分，分别在不同的计算机内存处理，但是由于图数据的高度耦合性和分布式系统高昂的通信代价，会较大地影响计算速度。另一方面一些工作对原始图数据进行压缩，然后将压缩的图数据放入内存中进行处理，但这种方式经常会产生不精确的查询结果。一些大图的分布式系统也支持图数据的查询处理，但分布式图处理系统存在负载难以均衡、网络开销大、单点故障频发、难以实现和调试等问题，特别是在大规模分布式异构集群环境下，这些因素成为制约大图查询处理的性能瓶颈。

(2) 对于大图数据挖掘与分析

针对大图的挖掘和分析算法都是基于并行迭代模型的，而迭代计算依赖于特定的图类型和算法特点，所有迭代的行为一般是静态的，缺乏对迭代过程状态变化规律的建模、分析和预测方法，也缺乏针对高频迭代计算过程中数据读写和交互的动态调整机制，大大制约了迭代数据分析的执行效率。同时，在分布式环境下，面向动态图的挖掘和分析技术的研究刚刚起步，特别针对高频多态迭代任务，在数据更新驱动的增量数据概要维护技术和增量的迭代计算方法方面，还没有得到充分的重视和研究。

(3) 对于大图数据系统

现有针对图数据的模型和存储工作主要支持简单图，尚不能有效地支持复杂图和超图等更为复杂的图模型，因此无法胜任以复杂图、超图为应用环境。在分布式环境下，目前的图处理系统只使用单一模式的图划分，在具有多样性的图操作负载下，单一模式的图划分无法为所有操作提供良好的性能保证，严重制约了分布式图处理系统的可用性。以异构图划分为基础的图处理系统尚未开发，现有工作也缺乏对基于异构图划

分的查询和分析操作的性能挖掘。而目前的大图数据系统的执行保障使用检查点技术或者基于单一划分模式的备份技术为系统提供容错性，检查点技术的备份操作 I/O 开销巨大，严重影响系统的运行性能。而基于单一划分模式的备份技术无法在提供容错性的同时高效地支持多样性的图计算任务。与此同时，基于单一图划分的系统大幅限制系统优化的空间，降低系统潜在的最优性能。在某个划分负载巨大的情况下，单一划分模式可选的后备资源远远少于基于异构图划分的存储模式，因此在负载平衡和任务调度方面降低了系统潜在的最优性能。

由此可以看出在未来的大图数据研究工作中，需要①提出效果更好、准确性更高、可扩展性更高的算法来解决现有图管理与分析问题；②在现有的图管理与分析问题的基础上，提出新的有实际应用价值的问题，并设计合理高效的方法解决这些问题；③对结构更为复杂、规模更为庞大的图，如超图、时序图、动态图等，提出有效的方法解决图上的问题；④相较于在单一服务器上处理大规模图数据，提出合理的对图进行划分的方法并且分布式处理图管理与分析问题；⑤对于新的研究热点进行深度的探讨和研究，如图查询语言、基于硬件的图处理等，提出准确高效的方法解决这些问题。

6 结束语

随着网络和数据库技术的飞速发展，以及语义网络、社交网络、生物信息网络等新兴领域的飞速发展，数据的结构越来越复杂，数据量呈几何状增长，这为大规模图数据上的研究工作带了巨大的挑战。随着图数据的存在性越来越普遍，图数据上的查询处理也得到了越来越多研究者的广泛关注，因此大图数据管理与分析技术的研究与开发不仅具有重要的理论研究意义，而且具有广泛的实际应用价值。国内图数据库的研究正在快速地发展，但是与国外的研究工作相比，在质量和数量上都有一定的差距。希望在未来有更多的研究成果可以为图数据库管理与分析工作打下坚实的基础。

参考文献

- [1] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik , 1959 , 1 (1) : 269-271.
- [2] Floyd R W. Algorithm 97: shortest path[J]. Communications of the ACM , 1962 , 5(6) : 345.
- [3] Ford Jr L R. Network flow theory[R]. RAND CORP SANTA MONICA CA , 1956.
- [4] Wang S, Xiao X, Yang Y, et al. Effective indexing for approximate constrained shortest path queries on large road networks[J]. VLDB Endowment , 2016 , 10(2) : 61-72.
- [5] Delling D, Goldberg A V, Razenshteyn I, et al. Graph partitioning with natural cuts[C]. Parallel & Distributed Processing Symposium (IPDPS) , 2011 IEEE International. IEEE , 2011 : 1135-1146.
- [6] Wang S, Lin W, Yang Y, et al. Efficient route planning on public transportation networks: A labelling

- approach[C]. Proc of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York: ACM, 2015: 967-982.
- [7] Wu H, Cheng J, Huang S, et al. Path problems in temporal graphs[J]. VLDB Endowment, 2014, 7 (9) : 721-732.
- [8] Wu H, Cheng J, Ke Y, et al. Efficient Algorithms for Temporal Path Computation [J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2016, 28(11) : 2927-2942.
- [9] Karypis G, Kumar V. A parallel algorithm for multilevel graph partitioning and sparse matrix ordering [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1998, 48(1) : 71-95.
- [10] Cohen E, Halperin E, Kaplan H, et al. Reachability and Distance Queries Via 2-Hop Labels[J]. Siam Journal on Computing, 2002, 32(5) : 937-946.
- [11] Chen Y, Chen Y. An efficient algorithm for answering graph reachability queries[C]. Data Engineering, 2008. ICDE 2008. IEEE 24th International Conference on. IEEE, 2008: 893-902.
- [12] Agrawal R, Borgida A, Jagadish H V. Efficient management of transitive relationships in large data and knowledge bases[J]. Acm Sigmod Record, 1989, 18(2) : 253-262.
- [13] Jin R, Xiang Y, Ruan N, et al. Efficiently answering reachability queries on very large directed graphs [C]. 2008 ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM, 2008: 595-608.
- [14] Valstar L D J, Fletcher G H L, Yoshida Y. Landmark indexing for evaluation of label-constrained reachability queries[C]. 2017 ACM International Conference on Management of Data. ACM, 2017: 345-358.
- [15] Zhou J, Zhou S, Yu J X, et al. DAG reduction: fast answering reachability queries[C]. 2017 ACM International Conference on Management of Data. ACM, 2017: 375-390.
- [16] Wu H, Huang Y, Cheng J, et al. Efficient processing of reachability and time-based path queries in a temporal graph[J]. arXiv preprint arXiv:1601.05909, 2016.
- [17] Cordella L P, Foglia P, Sansone C, et al. A (sub) graph isomorphism algorithm for matching large graphs[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2004, 26(10) : 1367-1372.
- [18] He H, Singh A K. Query language and access methods for graph databases [M]. Boston: Springer, 2010.
- [19] Zhao P, Han J. On graph query optimization in large networks[J]. VLDB Endowment, 2010, 3(1-2) : 340-351.
- [20] Shasha D, Wang J T L, Giugno R. Algorithmics and applications of tree and graph searching[C]. twenty-first ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART symposium on Principles of database systems. ACM, 2002: 39-52.
- [21] Lai L, Qin L, Lin X, et al. Scalable distributed subgraph enumeration[J]. VLDB Endowment, 2016, 10 (3) : 217-228.
- [22] Lai L, Qin L, Lin X, et al. Scalable subgraph enumeration in mapreduce[J]. VLDB Endowment, 2015, 8(10) : 974-985.
- [23] Junghanns M, Kießling M, Averbuch A, et al. Cypher-based graph pattern matching in Gradoop[C]. Fifth International Workshop on Graph Data-management Experiences & Systems. ACM, 2017: 3.
- [24] Qiao M, Zhang H, Cheng H. Subgraph matching: on compression and computation [J]. VLDB Endowment, 2017, 11(2) : 176-188.
- [25] Vachery J, Arora A, Ranu S, et al. CGQ: Relationship- Aware Contextual Graph Querying in Large

- Networks[J]. arXiv preprint arXiv: 1801. 06402, 2018.
- [26] Kim K, Seo I, Han W S, et al. TurboFlux: A Fast Continuous Subgraph Matching System for Streaming Graph Data[C]. 2018 International Conference on Management of Data. ACM, 2018: 411-426.
- [27] Fan W, Fan Z, Tian C, et al. Keys for graphs[J]. VLDB Endowment, 2015, 8(12): 1590-1601.
- [28] Ren X, Wang J. Multi- query optimization for subgraph isomorphism search[J]. VLDB Endowment, 2016, 10(3): 121-132.
- [29] Semertzidis K, Pitoura E. Top- k Durable Graph Pattern Queries on Temporal Graphs [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2018.
- [30] Angles R, Arenas M, Barceló P, et al. Foundations of modern query languages for graph databases[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2017, 50(5): 68.
- [31] Consens M P, Mendelzon A O. GraphLog: a visual formalism for real life recursion[C]. ninth ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART symposium on Principles of database systems. ACM, 1990: 404-416.
- [32] Abiteboul S, Quass D, McHugh J, et al. The Lorel query language for semistructured data [J]. International journal on digital libraries, 1997, 1(1): 68-88.
- [33] Fernández M, Florescu D, Levy A, et al. Declarative specification of Web sites with S[J]. The VLDB Journal—The International Journal on Very Large Data Bases, 2000, 9(1): 38-55.
- [34] Buneman P, Fernandez M, Suciu D. UnQL: a query language and algebra for semistructured data based on structural recursion[J]. The VLDB Journal, 2000, 9(1): 76-110.
- [35] Curz I F. G⁺+: Recursive Queries without Recursion[C]. 12th Int. Conference on Expert Database Systems. 1988: 355-368.
- [36] Paredaens J, Peelman P, Tanca L. G-Log: A graph-based query language[J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 1995 (3): 436-453.
- [37] Ronen R, Shmueli O. SoQL: A language for querying and creating data in social networks[C]. Data Engineering, 2009. ICDE'09. IEEE 25th International Conference on. IEEE, 2009: 1595-1602.
- [38] Francis N, Green A, Guagliardo P, et al. Cypher: An evolving query language for property graphs[C]. 2018 International Conference on Management of Data. ACM, 2018: 1433-1445.
- [39] van Rest O, Hong S, Kim J, et al. PGQL: a property graph query language[C]. Fourth International Workshop on Graph Data Management Experiences and Systems. ACM, 2016: 7.
- [40] Angles R, Arenas M, Barceló P, et al. G-CORE: A core for future graph query languages[C]. 2018 International Conference on Management of Data. ACM, 2018: 1421-1432.
- [41] Chavarría-Miranda D, Castellana V G, Morari A, et al. Graql: A query language for high-performance attributed graph databases[C]. Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops, 2016 IEEE International. IEEE, 2016: 1453-1462.
- [42] Krause C, Johannsen D, Deeb R, et al. An SQL-based query language and engine for graph pattern matching[C]. International Conference on Graph Transformation. Springer, Cham, 2016: 153-169.
- [43] Yahya M, Barbosa D, Berberich K, et al. Relationship queries on extended knowledge graphs[C]. Ninth ACM International Conference on Web Search and Data Mining. ACM, 2016: 605-614.
- [44] Zhao K, Yu J X. All-in-One: Graph Processing in RDBMSs Revisited[C]. 2017 ACM International Conference on Management of Data. ACM, 2017: 1165-1180.
- [45] Gómez L, Kuijpers B, Vaisman A. Performing OLAP over Graph Data: Query Language, Implementation, and a Case Study[C]. International Workshop on Real-Time Business Intelligence and

- Analytics. ACM, 2017; 6.
- [46] Moffitt V Z, Stoyanovich J. Portal: A Query Language for Evolving Graphs[J]. ArXiv e-prints, 2016.
- [47] 李晓佳, 张鹏, 狄增如, 等. 复杂网络中的社团结构 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5 (3) : 19-42.
- [48] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks[J]. national academy of sciences, 2002, 99(12) : 7821-7826.
- [49] Donetti L, Munoz M A. Detecting network communities: a new systematic and efficient algorithm[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2004(10) : 10012.
- [50] Raghavan U N, Albert R, Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks[J]. Physical review E, 2007, 76(3) : 036106.
- [51] Rosvall M, Bergstrom C T. An information-theoretic framework for resolving community structure in complex networks[J]. National Academy of Sciences, 2007, 104(18) : 7327-7331.
- [52] Huang X, Lakshmanan L V S. Attribute-Driven Community Search[J]. Vldb Endowment, 2017, 10 (9) : 949-960.
- [53] Akbas E, Zhao P. Truss-based Community Search: a Truss-equivalence Based Indexing Approach[C]. International Conference on Very Large Data Bases, VLDB. 2017; 1298-1309.
- [54] Hajiabadi M, Zare H, Bobarshad H. IDEC: An integrated approach for overlapping and non-overlapping community detection[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 123 : 188-199.
- [55] Fang Y, Cheng R, Luo S, et al. Effective community search for large attributed graphs [J]. Vldb Endowment, 2016, 9(12) : 1233-1244.
- [56] Fang Y, Cheng R, Li X, et al. Effective community search over large spatial graphs [J]. Vldb Endowment, 2017, 10(6) : 709-720.
- [57] Yoshida K, Motoda H, Indurkha N. Graph-based induction as a unified learning framework [J]. Applied Intelligence, 1994, 4(3) : 297-316.
- [58] Kuramochi M, Karypis G. Finding frequent patterns in a large sparse graph [J]. Data mining and knowledge discovery, 2005, 11(3) : 243-271.
- [59] Babu N, John A. A distributed approach to weighted frequent Subgraph mining [C]. Emerging Technological Trends (ICETT), International Conference on. IEEE, 2016: 1-7.
- [60] Elseidy M, Abdelhamid E, Skiadopoulos S, et al. Grami: Frequent subgraph and pattern mining in a single large graph[J]. VLDB Endowment, 2014, 7(7) : 517-528.
- [61] Moussaoui M, Zaghdoud M, Akaichi J. Posgrami: Possibilistic frequent subgraph mining in a single large graph [C]. International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Springer, Cham, 2016: 549-561.
- [62] Abdelhamid E, Canim M, Sadoghi M, et al. Incremental Frequent Subgraph Mining on Large Evolving Graphs[J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2017, 29(12) : 2710-2723.
- [63] Meng J, Tu Y. Flexible and Feasible Support Measures for Mining Frequent Patterns in Large Labeled Graphs[C]. 2017 ACM International Conference on Management of Data. ACM, 2017: 391-402.
- [64] Dhiman A, Jain S K. Optimizing Frequent Subgraph Mining for Single Large Graph ☆ [J]. Procedia Computer Science, 2016, 89 : 378-385.
- [65] Bhatia V, Rani R. Ap-FSM: A parallel algorithm for approximate frequent subgraph mining using Pregel [J]. Expert Systems with Applications, 2018, 106 : 217-232.

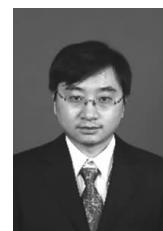
- [66] Babu N, John A. A distributed approach to weighted frequent Subgraph mining [C]. Emerging Technological Trends (ICETT) , International Conference on. IEEE, 2016: 1-7.
- [67] Ke X, Khan A, Cong G. Finding Seeds and Relevant Tags Jointly: For Targeted Influence Maximization in Social Networks [C]. 2018 International Conference on Management of Data. ACM, 2018: 1097-1111.
- [68] Borgs C, Brautbar M, Chayes J, et al. Maximizing social influence in nearly optimal time[C]. twenty-fifth annual ACM- SIAM symposium on Discrete algorithms. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014: 946-957.
- [69] Li J, Wang X, Deng K, et al. Most influential community search over large social networks[C]. Data Engineering (ICDE) , 2017 IEEE 33rd International Conference on. IEEE, 2017: 871-882.
- [70] Li Y, Fan J, Zhang D, et al. Discovering your selling points: Personalized social influential tags exploration[C]. 2017 ACM International Conference on Management of Data. ACM, 2017: 619-634.
- [71] Lin Y, Chen W, Lui J C S. Boosting information spread: An algorithmic approach[C]. Data Engineering (ICDE) , 2017 IEEE 33rd International Conference on. IEEE, 2017: 883-894.
- [72] Wang X, Zhang Y, Zhang W, et al. Distance-aware influence maximization in geo-social network[C]. ICDE. 2016: 1-12.
- [73] Tang J, Tang X, Xiao X, et al. Online processing algorithms for influence maximization [C]. 2018 International Conference on Management of Data. ACM, 2018: 991-1005.
- [74] Leslie G V. A Bridging Model for Parallel Computation [M], Comm. of the ACM, 1990, 33 (8): 103-111.
- [75] Qin L, Yu J X, Chang L, et al. Scalable big graph processing in mapreduce[C]. 2014 ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM, 2014: 827-838.
- [76] Zaharia M, Chowdhury M, Das T, et al. Resilient distributed datasets: A fault-tolerant abstraction for in-memory cluster computing [C]. 9th USENIX conference on Networked Systems Design and Implementation. USENIX Association, 2012: 15-28.
- [77] Malewicz G, Austern M H, Bik A J C, et al. Pregel: a system for large-scale graph processing[C]. 2010 ACM SIGMOD International Conference on Management of data. ACM, 2010: 135-146.
- [78] Shao B, Wang H, Li Y. Trinity: A distributed graph engine on a memory cloud [C]. 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2013: 505-516.
- [79] Gonzalez J E, Xin R S, Dave A, et al. GraphX: Graph Processing in a Distributed Dataflow Framework [C]. OSDI. 2014, 14: 599-613.
- [80] Han W S, Lee S, Park K, et al. TurboGraph: a fast parallel graph engine handling billion-scale graphs in a single PC[C]. 19th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2013: 77-85.
- [81] Ko S, Han W S. TurboGraph ++ : A Scalable and Fast Graph Analytics System[C]. 2018 International Conference on Management of Data. ACM, 2018: 395-410.
- [82] Yan D, Cheng J, Özsü M T, et al. A general-purpose query-centric framework for querying big graphs [J]. VLDB Endowment, 2016, 9(7) : 564-575.
- [83] Levin R, Kanza Y. Stratified-sampling over social networks using mapreduce[C]. 2014 ACM SIGMOD international conference on Management of data. ACM, 2014: 863-874.
- [84] Tanase G, Suzumura T, Lee J, et al. System G Distributed Graph Database[J]. arXiv preprint arXiv:

- 1802.03057, 2018.
- [85] Huang H, Song J, Lin X, et al. Tgraph: a temporal graph data management system [C]. 25th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. ACM, 2016; 2469-2472.
- [86] Karypis G, Kumar V. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1998, 20(1): 359-392.
- [87] Wang L, Xiao Y, Shao B, et al. How to partition a billion-node graph [C]. Data Engineering (ICDE), 2014 IEEE 30th International Conference on. IEEE, 2014: 568-579.
- [88] Meyerhenke H, Sanders P, Schulz C. Parallel graph partitioning for complex networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(9): 2625-2638.
- [89] Sanders P, Schulz C. Distributed evolutionary graph partitioning [C]. 2012 Fourteenth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX). Society for Industrial and Applied Mathematics, 2012: 16-29.
- [90] Zheng A, Labrinidis A, Pisciuneri P H, et al. PARAGON: Parallel Architecture-Aware Graph Partition Refinement Algorithm [C]. EDBT. 2016: 365-376.
- [91] Tsourakakis C, Gkantsidis C, Radunovic B, et al. Fennel: Streaming graph partitioning for massive scale graphs [C]. 7th ACM international conference on Web search and data mining. ACM, 2014: 333-342.
- [92] Margo D, Seltzer M. A scalable distributed graph partitioner [J]. VLDB Endowment, 2015, 8(12): 1478-1489.
- [93] Sajjad H P, Payberah A H, Rahimian F, et al. Boosting vertex-cut partitioning for streaming graphs [C]. Big Data (BigData Congress), 2016 IEEE International Congress on. IEEE, 2016: 1-8.
- [94] Huang J, Abadi D J. Leopard: Lightweight edge-oriented partitioning and replication for dynamic graphs [J]. VLDB Endowment, 2016, 9(7): 540-551.
- [95] Ghemawat S, Gobioff H, Leung S T. The Google file system [M]. ACM, 2003.
- [96] Shi X, Zheng Z, Zhou Y, et al. Graph processing on GPUs: A survey [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2018, 50(6): 81.
- [97] Kim M S, An K, Park H, et al. GTS: A fast and scalable graph processing method based on streaming topology to GPUs [C]. 2016 International Conference on Management of Data. ACM, 2016: 447-461.
- [98] Wang Y, Davidson A, Pan Y, et al. Gunrock: A high-performance graph processing library on the GPU [C]. ACM SIGPLAN Notices. ACM, 2016, 51(8): 11.
- [99] Sha M, Li Y, He B, et al. Accelerating dynamic graph analytics on GPUs [J]. VLDB Endowment, 2017, 11(1): 107-120.
- [100] Jia Z, Kwon Y, Shipman G, et al. A distributed multi-GPU system for fast graph processing [J]. VLDB Endowment, 2017, 11(3): 297-310.
- [101] Cheng Y, Yuan Y, Chen L, et al. Distr: a distributed method for the reachability query over large uncertain graphs [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(11): 3172-3185.
- [102] Ma S, Li J, Hu C, et al. Graph Pattern Matching for Dynamic Team Formation [J]. arXiv preprint arXiv:1801.01012, 2018.
- [103] Du R, Yang J, Cao Y, et al. Personalized graph pattern matching via limited simulation [J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 141: 31-43.
- [104] Milner R. A calculus of communicating systems [J]. LNCS, 1980, 92.

- [105] Yuan Y, Wang G, Chen L, et al. Efficient pattern matching on big uncertain graphs [J]. Information Sciences, 2016, 339 : 369-394.
- [106] Suo B, Li Z, Chen Q, et al. Towards scalable subgraph pattern matching over big graphs on mapreduce [C]. Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2016 IEEE 22nd International Conference on. IEEE, 2016 : 1118-1126.
- [107] Sun X, Tan Y, Wu Q, et al. Hasse diagram based algorithm for continuous temporal subgraph query in graph stream [C]. Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2017 6th International Conference on. IEEE, 2017 : 241-246.
- [108] Ma H, Shao B, Xiao Y, et al. G-SQL: fast query processing via graph exploration [J]. VLDB Endowment, 2016, 9(12) : 900-911.
- [109] Wen X, Chen W N, Lin Y, et al. A Maximal Clique Based Multiobjective Evolutionary Algorithm for Overlapping Community Detection[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2017, (99) : 1-1.
- [110] Bai L, Cheng X, Liang J, et al. Fast graph clustering with a new description model for community detection[J]. Information Sciences, 2017, 388(C) : 37-47.
- [111] Xu S, Su S, Li X, et al. Differentially Private Frequent Subgraph Mining[C]. IEEE, International Conference on Data Engineering. IEEE, 2016 : 229.
- [112] Zhao X, Chen Y, Xiao C, et al. Frequent subgraph mining based on pregel[J]. The Computer Journal, 2016, 59(8) : 1113-1128.
- [113] Wu D, Ren J, Sheng L. Uncertain maximal frequent subgraph mining algorithm based on adjacency matrix and weight[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2017 : 1-11.
- [114] Zhu X, Chen W, Zheng W, et al. Gemini: A Computation-Centric Distributed Graph Processing System [C]. OSDI. 2016: 301-316.
- [115] Ju W, Li J, Yu W, et al. iGraph: an incremental data processing system for dynamic graph [J]. Frontiers of Computer Science, 2016, 10(3) : 462-476. P.
- [116] Hao Y, Li G, Yuan P, et al. An Association-Oriented Partitioning Approach for Streaming Graph Query [J]. Scientific Programming, 2017, 2017.
- [117] Li C, Gu Y, Qi J, et al. A GPU Accelerated Update Efficient Index for kNN Queries in Road Networks [C]. IEEE, International Conference on Data Engineering. IEEE, 2018.

作者简介

袁野 东北大学计算机科学与工程学院教授，博士生导师。CCF 数据库专业委员会委员。主要研究方向为云计算、大数据管理（包括图数据管理、不确定数据管理、数据隐私保护）、P2P 计算等。



王一舒 东北大学计算机科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为图数据管理、不确定图数据管理等。



王国仁 北京理工大学计算机学院教授，博士生导师。CCF 数据库专业委员会副主任委员。主要研究方向为不确定数据管理、数据密集型计算、可视媒体数据管理与分析、非结构化数据管理、分布式查询处理与优化技术（主要包括传感器网络和 P2P 对等计算）、生物信息学等。



AI 与系统软件的深度融合研究进展与趋势

CCF 系统软件专业委员会

陈海波¹ 刘杰² 顾荣³ 张悠慧⁴ 陈恺⁵ 孟国柱⁵ 周喆⁶ 李武军³ 李睿⁷

¹上海交通大学，上海

²中国科学院软件研究所，北京

³南京大学，南京

⁴清华大学，北京

⁵中国科学院信息工程研究所，北京

⁶复旦大学，上海

⁷国防科技大学，长沙

摘要

随着算力的提升与数据集的增大，以深度学习为代表的 AI 技术在包括计算机视觉、语音识别与机器翻译等领域内得到广泛应用。这些应用与推广都离不开系统软件提供计算框架的支撑。例如，TensorFlow、MxNet、Caffe 等主流深度学习框架承载了很多 AI 任务。同时，系统软件研究人员继 20 世纪 90 年代利用机器学习来优化系统的浪潮之后，近年来又重新掀起 AI 在系统软件中应用的研究热潮。例如，近期 Google Senior Fellow Jeff Dean 等人的 Learned Index 展现了 AI 在降低经典数据结构存储空间开销与提升访问效率方面的潜力。本发展报告将试图对近期面向 AI 的系统（Systems for AI）与基于 AI 的智能系统（AI for Systems）两个方面研究的进展进行综述，总结分析当前的技术挑战，并展望未来的发展前景。

关键词：AI，系统软件，深度学习

Abstract

With the rapid increase of computation power and data sets, AI techniques, especially deep learning, have been widely used in various areas like computer vision, speech reorganization and statistic machine translation. Such applications and adoption cannot live alone without the computing infrastructures backed up by the underlying systems software. For example, several mainstream deep learning infrastructures (such as TensorFlow, MxNet and Caffe) are the main horse for many AI tasks nowadays. Meanwhile, systems researchers, by rejuvenating the research of using machine learning to optimize systems in 1990s, show renewed interests in applying AI techniques to systems software. For example, Jeff Dean's group in Google use AI techniques called Learned Index to improve the data structure efficiency, in terms of both space and performance. This report tries to present a detailed survey on how AI techniques interact with systems: building new systems for AI and using AI to

improve systems. Further, this report analyzes the current technical challenges and overlooks the future of such interleaved research.

Keywords: AI, Systems Software, Deep Learning

1 引言

人工智能是计算机科学中一个重要的领域，它关注如何让计算机拥有“认知”与“思考”的能力，像人一样智能地运行。作为人工智能研究的一部分，机器学习通过直接从历史数据与经验中学习，而非靠预先制定的规则，让计算机完成复杂的处理，智能地执行特定的任务。

近年来，随着大数据的到来、计算能力的提高以及算法上的突破，机器学习不仅在学术界产生突破性研究成果，同时在工业界被广泛应用。重新审视过去在简单神经网络上的研究，受到神经科学的启发，研究人员将人工神经网络拓展到数百层，这种称为深度学习的方法让计算机拥有了复杂的处理能力。2012年，Alex Krizhevsky、Ilya Sutskever与Geoffrey Hinton等人在ImageNet图像识别竞赛上基于深度学习算法取得了冠军，引领了深度学习的研究热潮。最近，来自谷歌DeepMind的AlphaGo系统击败世界排名第一的人类围棋选手；谷歌、百度等团队的无人驾驶汽车也纷纷开始进行路测。与此同时，机器学习技术快速地在工业界落地——基于图像识别系统能快速找出照片中用户的好友，自然语言处理技术让语音助手更好地理解用户的意图，推荐系统为用户提供全面的使用体验信息……机器学习正在给各个领域带来巨大的变更。在这样的背景下，人工智能与系统软件融合发展成为研究人员需要探索的问题。

一方面，人工智能，特别是机器学习与深度学习的发展，要求强大的系统软件支撑。当前的机器学习方法需要依靠强大的计算能力来处理大量的数据，还需要设计良好的机器学习系统将机器学习成果高效投入应用。研究人员不仅需要提高单台计算机的计算能力，还需要利用分布式计算来完成大规模的机器学习任务。研究人员需要从软件层面优化机器学习系统，还需要将不断涌现的新硬件与机器学习系统融合。研究人员需要考虑机器学习应用的安全性与可靠性，还需要使得系统有效地保护数据与隐私信息。此外，机器学习技术的普及对云计算、虚拟化与物联网等领域也产生了许多影响。

另一方面，系统软件也能利用人工智能获得更好的表现。系统软件中使用大量的人工制定的规则与启发式算法来保证系统在短时间内能够做出较优的决策。如资源调度与分配任务，在时间序列中如何分配有限的资源来保证资源的利用率与对资源需求方的公平性；如故障判断任务，在有限的信息下如何判断系统组件是发生故障无法工作还是暂时性无响应；如恶意攻击防御任务，如何判断各方请求里是否存在恶意攻击以及如何处理攻击。随着处理能力与处理速度的提高，研究人员试图利用机器学习方法，从性能、安全性与稳定性等方面提高系统软件的表现。机器学习方法正在系统软件中展现出巨大

的研究前景与应用潜力。

本发展报告提议对近期面向 AI 的系统与基于 AI 的智能系统两个方面研究的进展进行综述，总结分析当前的技术挑战，并展望未来的发展前景。

2 面向 AI 的系统：机器学习系统的支撑、拓展与优化技术

机器学习系统为机器学习模型训练、推断以及部署等任务提供支持。本节将分别介绍当前主流的通用机器学习系统、主流深度学习框架系统及机器学习系统的流式实时扩展技术、针对特定任务定制的机器学习系统、机器学习系统自动化构建技术、新兴机器学习系统以及机器学习系统优化技术等。

2.1 主流机器学习系统的分类与介绍

为了提供有效的大数据机器学习和数据分析手段，近几年来，业界和学术界尝试了多种途径和方法，在不同的并行计算模型和平台中，处理实际的数据分析和挖掘问题。

较早出现以及现有的一些大数据机器学习算法和系统大多采用的是较为底层的紧耦合、定制化构建方法。这些算法和系统大都针对特定的应用，选择特定的平台和模型，针对特定的机器学习模型和特定的计算模式，从串行到分布并行化的算法和原型，自底层向上进行紧耦合和定制化的开发与优化。尽管这样可以最大化利用系统资源达到最佳的性能，但是这种底层的紧耦合定制化实现方法，将学习和系统混杂在一起，实现难度大、算法和系统也难以调试和维护^[1-2]。

从大数据机器学习系统特征来看，一个良好设计的大数据机器学习系统应当考虑高层的系统层抽象，向上为程序员提供易于使用的高层机器学习算法编程接口，向下基于现有的通用化大数据处理平台提供大规模数据的分布和并行化计算能力。近年来，已经开始出现面向各种高层编程计算和系统抽象来设计大数据机器学习系统的研究工作。

目前的大数据机器学习系统在高层编程计算和系统抽象上大致可分为三种主要的编程计算和系统抽象方法，分别是基于矩阵/数据框模型的抽象、基于图模型的抽象，以及基于参数模型的抽象。

实际的系统也可能会是一种兼有上述多种类型的混合系统。此外，也有不少系统可以从并行模式角度来区分，分为数据并行和模型并行两种方式，且一些系统只提供数据并行方式，另一些系统会同时提供数据并行和模型并行两种方式。

本文选取了具有代表性的分布式机器学习系统进行对比分析，表 1 对几个系统的并行模式和易用性进行了对比，后面会按系统分别介绍。

表 1 主流机器学习系统对比

编程计算和系统抽象方法	系统名称	并行模式	易用性
基于矩阵/数据框模型的抽象	Spark MLlib	基于 Spark RDD 的同步并行模式	提供多种优化方法、分类算法、回归算法、推荐算法、聚类算法；用户难以对内部算法进行深层定制优化
	SystemML	SystemML 自动编译转化为 MapReduce 或 Spark，在作业集群上运行	提供了一个类似于 R 语言和 Python 的高层声明式语言
基于图模型的抽象	GraphLab	基于异步的分布式共享内存机制，实现并提供大规模稀疏图迭代式计算能力	适合可以采用图模型建模的机器学习问题，比如社会网络分析类；由原来的免费项目变成了一个付费试用的项目
	PowerGraph	将算法的运行过程抽象成 Gather、Apply、Scatter 三个步骤，其并行的核心思想是对顶点的切分；采用点切分策略，来保证整个集群的均衡性，该策略对大量密率图分区是非常高效的	目前集成到 GraphLab 项目中作为底层执行框架
	GraphX	GraphX 基于 Spark 实现，核心抽象是 Resilient Distributed Property Graph，一种点和边都带属性的有向多重图，实现基于同步模型粗粒度并行的 Pregel 模型	提供了一套图算法工具包，方便用户对图进行分析。目前最新版本已支持 PageRank、数三角形、最大连通图和最短路径等经典的图算法
基于参数模型的抽象	Parameter Server	基于异步更新机制的分布式模型训练	缺少对大规模机器学习用的数据及编程计算模型的高层抽象，使用较为繁琐，比较适合机器学习算法研究者或者需要通过调整参数深度优化机器学习算法的数据分析师使用
	Petuum	使用 SSP (Stale Synchronous Parallel) 一致性模型分布式训练；其底层数据存储和并行计算框架与上层的学习算法层以紧耦合的方式全部自己实现	实现了比较完善的算法库，需要算法设计者对分布式系统概念和系统有一定了解，其易用性仍有一定的限制
	Angel	采用了 SSP、异步分布式 (SGD)、多线程参数共享模式 HogWild、网络带宽流量调度算法、计算和网络请求流水化、参数更新索引和训练数据预处理方案等技术对系统性能进行优化	提供丰富的机器学习算法库及高度抽象的编程接口、数据计算和模型划分的自动方案及参数自适应配置。同时，用户能像使用 MR、Spark 一样在 Angel 上编程。另外，Angel 还支持业界主流的深度学习框架，为其提供计算加速

2.1.1 基于矩阵模型的抽象

基于矩阵模型的抽象通常基于这样一个事实：大多数机器学习和数据分析算法都可

以表示为矩阵或向量代数计算。因此，系统研究人员可以构建一个基于矩阵计算模型的机器学习系统，允许程序员直接基于矩阵计算快速编写机器学习和数据分析算法。

UC Berkeley AMP Lab 推出的 Spark Mllib^[3]是一个试图基于矩阵计算模型构建上层各种机器学习算法的系统。最近 Spark 系统提出了一个基于 DataFrame 的数据抽象机制，允许基于矩阵和数据框等数据结构，设计各种机器学习和数据分析算法。IBM 推出的 SystemML^[4-5]系统也是一种基于矩阵模型的大数据机器学习系统。此外，国内由南京大学 PASA 大数据实验室研究开发的 Octopus（大章鱼）系统^[6-7]也是一个以大规模矩阵模型为中心的跨平台大数据机器学习系统。

(1) Spark MLLib

Spark MLLib 是一个基本的机器学习系统，与 Spark 环境整合起来后可完整解决大数据的分布式存储、并行化计算，以及上层的机器学习算法设计和使用。除了提供基本的矩阵操作接口之外，Spark MLLib 基于该接口向上层提供多种优化方法、分类算法、回归算法、推荐算法、聚类算法。但 Spark MLLib 算法数目和接口有限，难以完全满足用户各种各样的需求，且作为一个算法库，用户难以对内部算法进行深层定制优化。因此，其在灵活性方面仍然存在不足。

(2) SystemML

SystemML 是由 IBM Watson Research Center 和 IBM Almaden Research Center 联合研发的一款大数据学习系统，目前其为 Apache 的顶级项目。SystemML 支持声明式机器学习 (Declarative Machine Learning, DML)，使表达 ML 算法更容易和更自然。算法可以用类似 R 的语法或类 Python 语法来表示。DML 通过提供表达自定义分析的完全灵活性以及与底层输入格式和物理数据表示形式的数据独立性，显著提高了数据科学家的生产力。其次，Apache SystemML 根据数据和集群特性提供自动优化，以确保效率和可扩展性。Apache SystemML 为使用大数据的机器学习提供了最佳性能。它可以在 MapReduce 或 Spark 环境中运行，可以自动优化并实现性能扩展，自动确定算法是在单机还是在集群上运行。

2.1.2 基于图模型的抽象

虽然矩阵可以表示大多数机器学习和数据分析算法，但是对于一些基于图模型的社会网络分析问题，并非基于矩阵模型进行计算就是最有效的方法（虽然图和矩阵表示具有理论上的等价性）。矩阵模型对于图数据的表达不如图模型，且通常会面对稀疏性的问题。因此，一些社会网络分析类的实际应用需要基于更为高效的图模型的学习和分析方法，为此出现了相应的基于图模型的大数据机器学习系统。最典型的基于图模型的系统是卡内基 - 梅隆大学推出的 GraphLab^[8] 系统，以及基于 Spark 之上构建的 GraphX^[9] 系统。

(1) GraphLab 与 PowerGraph

GraphLab 是 CMU (卡内基 - 梅隆大学) 研制的一个大规模分布式图数据处理系统。它基于异步的分布式共享内存机制，实现并提供大规模稀疏图迭代式计算能力，主要可用于处理复杂的机器学习任务以及其他图计算任务。

GraphLab 包括三个主要的组成部分：数据图、更新函数，以及同步操作。数据图用于定义用户的图数据以及稀疏计算依赖关系，更新函数定义用户对顶点的操作，而同步操作用于完成全局图的汇聚整理。与 MapReduce、BSP 等大多数基于同步粗粒度并行化模型的计算模式相比，GraphLab 提供了一种异步细粒度的并行化计算模式，这使得其可以获得更高的并行度，最终获得很高的计算性能。

GraphLab 对具有幂律（Power-law）分布特性（即少部分顶点连接到图中大部分的顶点上）的自然图处理存在扩展性不足的缺陷，为此，从 GraphLab 衍生出了 PowerGraph。

PowerGraph 将 GraphLab 完成图顶点计算的更新函数分解为 gather/apply/scatter 三个细粒度的操作原语，这三个操作原语反映了同步计算的过程，但在实现上允许细粒度高效地异步实现。同时，由于图划分策略对最终的图计算性能具有很大的影响，为此，针对自然图的幂律分布特性，PowerGraph 提出了一种均衡图划分方案，可根据图的整体分布概率进行 p -路顶点切割，在减少计算中通信量的同时保证负载均衡。上海交通大学并行与分布式系统研究所提出的 PowerLyra 系统^[195]通过差异化图划分，显著减低了图计算过程中的数据交互，已被广泛应用于包括微信大规模异常检测等场景。

(2) GraphX

Berkeley AMPLab 的 GraphX 是一个在 Spark 环境下实现的图数据处理系统。GraphX 提供了丰富的图计算原语，在 Spark 的 RDD（Resilient Distributed Dataset）内存数据对象基础上扩展出面向图计算的 RDG（Resilient Distributed Graph）对象，并进一步实现了 Pregel 计算模型。由于 Spark 提供了强大的迭代计算能力，GraphX 可实现复杂的迭代式图数据挖掘计算。由于是基于 Spark 的 RDD 内存计算机制，GraphX 可获得很高的计算性能以及自动的分布式容错。但由于 GraphX 实现的还是一种基于同步模型粗粒度并行的 Pregel 模型，所以也受限于 JVM 的执行开销，其在性能上与基于异步模型细粒度并行的 PowerGraph 还有一定差距。

2.1.3 基于参数模型的抽象

基于矩阵和图模型的系统主要是从数据表示模型的角度来构建系统。这两种方法的特点是更接近于实际学习问题中自然化的数据表示和计算模型，因此，这两种方法对于数据分析人员方便快速地构建机器学习和数据分析算法比较自然与直观。

但是大数据机器学习常常还需要涉及大规模模型。例如，近几年发展迅猛的深度神经网络算法，常常需要通过对大量模型参数的调优来提高学习精度。在这种情况下，上述两种方法会缺少灵活性，难以让算法设计者通过控制模型参数进行算法优化。

为此，有研究者提出了一种基于模型参数的抽象方法，即把所有机器学习算法抽象为对学习过程中一组模型参数的管理和控制，并提供对大规模场景下大量模型参数的有效管理和访问方法。目前参数模型最典型的方法是最初由卡内基 - 梅隆大学的 Li Mu 等人提出、后在很多系统中得到进一步应用的 Parameter Server^[10-11]，卡内基 - 梅隆大学机器学习系 Eric Xing 教授团队提出的 Petuum^[12-13] 系统，以及腾讯大数据与香港科技大学、北京大学联合研发的 Angel^[14] 系统。

(1) Parameter Server

卡内基 - 梅隆大学 Li Mu 等人开发了一套基于 Parameter Server 框架的分布式机器学习系统。

该系统由一个 server group 和多个 worker group 构成。server group 包括一个 server manager 节点和多个 server 节点。每个 server 节点存储部分全局共享参数；server manager 节点用来存储 server 节点的元信息，并通过心跳机制管理所有 server。每个 worker group 包含一个 task scheduler 和多个 worker 节点，worker 节点只与 server 节点通信，以获取全局参数以及推送局部更新，不同的 worker group 可以同时运行不同的应用。

Parameter Server 的优点是为大规模机器学习提供了非常灵活的模型参数调优和控制机制，缺点是缺少对大规模机器学习时的数据及编程计算模型的高层抽象，使用较为烦琐，通常比较适合于机器学习算法研究者或者需要通过调整参数深度优化机器学习算法的数据分析程序员使用。

(2) Petuum

面对大规模机器学习存在的很多新挑战，近几年来卡内基 - 梅隆大学机器学习系 Eric Xing 教授领导其 SAILING 实验室研究实现了大数据学习系统 Petuum。

Petuum 也是一个基于 Parameter Server 框架的系统，它的关键组件包括 Parameter Server 和调度器。Petuum 的 Parameter Server 中使用 SSP 一致性模型，允许计算速度慢的节点从本机 Cache 中读陈旧的参数值，以此大大节省网络开销和网络等待时间，使得慢机器的大部分时间用在计算而不是等待上。围绕 Petuum，该团队开展了一系列优化工作，部分工作在 2.7 节进一步介绍。

Petuum 在使用上需要算法设计者对分布式系统概念和系统有一定了解，其易用性仍有一定的限制，且其底层数据存储和并行计算框架与上层的学习算法层以紧耦合的方式全部自己实现，系统实现复杂性和代价较大。

(3) Angel

Angel 是腾讯大数据部门发布的第三代计算平台，是由腾讯大数据与香港科技大学、北京大学联合使用 Java 和 Scala 语言开发的面向机器学习的高性能分布式计算框架，能在 YARN 上直接调度运行。

Angel 的核心设计理念围绕参数模型。它将高维度的大模型合理切分到多个参数服务器节点，并通过高效的模型更新接口和运算函数，以及灵活的同步协议，轻松实现各种高效的机器学习算法。Angel 采用了 SSP、异步分布式（SGD）、多线程参数共享模式 HogWild、网络带宽流量调度算法、计算和网络请求流水化、参数更新索引和训练数据预处理方案等技术对系统性能进行了多方面优化。

在系统易用性上，Angel 提供丰富的机器学习算法库及高度抽象的编程接口、数据计算和模型划分的自动方案及参数自适应配置。同时，用户能像使用 MR、Spark 一样在 Angel 上编程。另外，Angel 还支持深度学习，它支持 Caffe、TensorFlow 和 Torch 等业界主流的深度学习框架，为其提供计算加速。

总的来说，Angel 是一个基于 Parameter Server 理念开发的高性能分布式机器学习平

台，它基于腾讯内部的海量数据进行了反复的调优，并具有广泛的适用性和稳定性。

2.2 主流深度学习框架系统介绍

主流的机器学习系统并不能为深度神经网络模型的构建和训练提供很好的支持，因此随着深度学习技术的发展和流行，涌现了一批流行的深度学习框架软件系统。很多研究者^[192]都对这些框架进行了对比分析，本文只选取有代表性的几个框架进行对比分析。

Caffe 是经典的深度学习框架，为单机版系统。Caffe 采用 C++/CUDA 架构，支持命令行、Python 和 MATLAB 接口，可以在 CPU 和 GPU 之间直接无缝切换。Caffe 是一个深度卷积神经网络的学习框架，使用 Caffe 可以比较方便地进行 CNN 模型的训练和测试，而不适合其他类型模型。Caffe 提供了 prototxt 语法支持构造神经网络，官方提供了大量可供参考的样例。Caffe 作为 C++ 语言以及配合了 CUDA 开发的框架，具有较高的训练效率。目前开发者已经对 Caffe 进行了大规模重构，新版本 Caffe 2 则支持分布式训练及很多新的特性。

TensorFlow 是谷歌基于 DistBelief 进行研发的第二代人工智能学习系统，其命名来源于本身的运行原理，Tensor（张量）意味着 N 维数组，Flow（流）意味着基于数据流图的计算，TensorFlow 为张量从流图的一端流动到另一端的计算过程。TensorFlow 是将复杂的数据结构传输至人工智能神经网络中进行分析和处理的系统。TensorFlow 的一大亮点是支持异构设备分布式计算，它能够在各个平台上自动运行模型，从手机、单个 CPU/GPU 到由成百上千 GPU 卡组成的分布式系统。TensorFlow 支持 CNN、RNN 和 LSTM 等多种算法。TensorFlow 提供的 TensorBoard 可视化工具对训练模型十分有帮助。TensorFlow 具有 Google 的强大技术支持，也具有广泛的社区，目前是工业和学术研究最常用的框架。

MXNet 是一个新型的深度学习框架，综合了其他几个框架的优点，是亚马逊主推的深度学习框架。现有的系统大部分采用声明式或命令式两种编程模式的一种，MXNet 尝试将两种模式无缝地结合起来。在命令式编程上 MXNet 提供张量运算，而声明式编程中 MXNet 支持符号表达式。用户可以自由地混合它们来快速实现自己的想法。MXNet 对资源和计算的调度、内存分配资源管理、数据的表示、计算优化等都做了优化设计，原生支持分布式训练。

Keras 和 Pytorch 是在易用性上十分出色的框架。Keras 提供了简单易用的 API 接口，特别适合初学者入门。其后端采用 TensorFlow、CNTK，以及 Theano，Keras 几乎已经成了 Python 神经网络的接口标准。Pytorch 提供了基于 Python 的动态深度学习库，语法类似于 numpy，非常高效；基于 Pytorch 开发深度学习算法，方便快速，适合 CPU 和 GPU 计算。Pytorch 支持动态构建神经网络结构，易于调试和推导，也受到了广泛关注。

深度学习框架流行的主要因素包括：易用性，是否提供简单易用的开发接口；高性能，是否支持可扩展分布式训练，是否可以达到更快的性能；社区支持，是否具有大规模用户和社区贡献者，包括知名企业的支持。目前深度学习框架在这些方面还都有很大

的改进空间，并没有形成一个类似 Hadoop 系统的事实上的标准系统。对于系统软件研究者，也存在大量开放性的问题。

2.3 机器学习系统的流式实时扩展技术

很多应用机器学习的场景，如物联网、欺诈检测等，产生的数据是流形式的，有“高速”“动态”“无穷”的特点。这些数据规模十分庞大，数据分布与时间相关。流式数据的特点对现有的机器学习模型提出了挑战。一方面，数据是连续并且无穷的，导致其无法在内存中一次性处理；另一方面，数据的分布和样本特征随着时间的变化使得模型需要实时更新，旧数据对新模型的影响随时间衰减。算法的实时性、模型的训练精度以及执行的效率越高，训练得到的模型的价值越大。同时，由于在流式场景中，数据流式到达，也导致了流式环境下的机器学习算法会在分布式训练上遇到挑战。

传统的机器学习系统使用批处理的离线学习方式，针对全部训练数据进行并行计算。在流数据的场景中，新数据不断到达，这些传统的批处理系统的处理方式一般是通过固定的时间窗口将无穷数据划分为有穷数据，一批一批地进行计算。新的数据到达时，需要将包括新数据和旧数据在内的全部训练数据重新做一次计算以更新模型。

流式机器学习算法的实现需要流处理系统来降低延迟。现有的分布式流式计算系统有很多，但主要是用于实时统计分析处理。StreamDM 基于 Spark Streaming 实现了一些算法，但是 Spark Streaming 依赖于底层 Spark 框架的批处理机制，算法是微批式而不是严格意义的流式，实时性不佳。SAMOA 是流式机器学习框架，但是其只实现少部分的流式算法并已经停止更新。Flink 是面向分布式数据流处理和批量数据处理的开源计算平台，Flink 运行时（Flink Runtime）同时提供流处理和批处理 API，其中批处理为特殊的流处理。但是 Flink ML 中只基于批处理 API 实现了支持向量机（Support Vector Machine, SVM）、K-近邻（K-Nearest Neighbor, KNN）、交替最小二乘（Alternating Least Square, ALS）、多元线性回归（Multiple Linear Regression, MLR）等批式机器学习算法，未实现流式机器学习算法。

（1）FlinkML

Flink 是一个开源的大数据处理引擎^[17]，同时支持流处理和批处理。Flink 的主要处理场景是流数据，批处理是流处理的特例。Flink 可以定制内存管理，但没有完全把内存交给应用层。FlinkML 是由 Flink 提供的机器学习库。由于它仍在开发中，对分布式机器学习算法的支持相当有限。FlinkML 中的机器学习算法都是基于 Flink 的批处理开发的，现在还没有流式机器学习算法的实现。Flink 中开发了一个流式机器学习的计算骨架，但是其实现方式是单机形式，不支持分布式。

（2）StreamDM

StreamDM 是华为诺亚方舟实验室在 Apache Spark Streaming 之上构建的流式挖掘库^[18]。SAMOA 和 StreamDM 之间的主要区别在于 StreamDM 与 Spark Streaming 平台相结合。StreamDM 结合了流处理算法的在线增量更新和批处理算法的高并发性，实现了基

于流处理的分类（如 Naïve Bayes、Hoeffding Tree）、聚类（如 CluStream、StreamKM++）和组合型算法（如 bagging）等。

2.4 针对特定任务的机器学习系统

通用的机器学习系统在面临超大规模数据量时无法满足线上系统需求，因此互联网企业针对一些常见机器学习任务，一般会定制研发专门的机器学习系统，实现可扩展的性能。这里介绍两个有代表性的系统。

(1) LightLDA

LDA 是一种十分常用的主题模型，能否在海量文本（如搜索公司的查询日志）中快速进行主题模型学习，直接影响到主题模型是否可以在工业界中应用。

CMU 大学 Eric Xing 教授团队与微软研究院合作，通过改进 LDA 模型的采样方法，提出了新的模型调度架构、模型存储的数据结构，实现了 LightLDA 系统，使得复杂的 LDA 模型和海量数据可以在有限的小机器集群上得到训练^[19]。

(2) Peacock

Peacock^[15]是腾讯公司研发的一个大规模 LDA 主题模型训练系统。Peacock 是一个专为 LDA 并行化计算而定制的大规模训练系统，它不是一个通用化的大数据机器学习系统。

该系统通过并行计算可对 $10 \text{ 亿} \times 1 \text{ 亿}$ 级别的大规模矩阵进行分解，从而从海量文档样本数据中学习 10 万到 100 万量级的隐含语义。为了完成大规模处理，Peacock 基于吉布斯采样的 LDA 训练算法进行了并行化设计，并设计实现了一个完整的具有大规模样本数据处理能力的训练系统。

Peacock 已广泛应用在腾讯的文本语义理解、QQ 群的推荐、用户商业兴趣挖掘、相似用户扩展、广告点击率转化率预估等多个业务数据中。

2.5 机器学习系统自动化构建技术

机器学习涉及大量理论知识，学习门槛较高，同时机器学习模型包含大量参数，需要有丰富的经验才能设计一个高效的模型。为了促进机器学习技术更广泛的应用，自动化机器学习（Automatic Machine Learning, AutoML）技术应运而生。

自动化机器学习通过对机器学习各环节提供自动化技术，让初学者也可以开展机器学习模型训练和应用。自动化机器学习的主要思想是通过一些自动化的方法将机器学习过程自动化。这些方法主要包括：自动特征清洗、特征转换、特征选择等特征工程操作，以及自动模型选择、调参等模型工作。自动化机器学习的目标使得整个机器学习过程完全自动化，大大降低了机器学习应用对机器学习算法专家的依赖。

目前主流的自动化机器学习系统主要是为特定机器学习系统提供特征或超参数自动选择的功能，包括：MLbase^[28]实现了 Grid Search 算法，支持 Spark MLlib 的超参数优化，

将原始训练数据集分成多份，在每份数据上分别训练一个模型，然后找到其中评价最好的模型，最后在整个数据集上训练这个效果最好的模型，从而得到最佳模型。这种方法的效率比较低，也得不到最优模型；Auto-Weka^[20]系统是基于数据挖掘工具 Weka 实现了串行的贝叶斯优化自动化超参数选择算法；Auto-Sklearn^[21]为 Python Scikit-learn 实现了贝叶斯优化自动化超参数选择算法，Auto-Sklearn 通过对自动化调参结果进行模型融合，从而可以获得一个更加鲁棒的模型结果，通过引入 Meta-learning 技术解决了贝叶斯优化自动化调参的冷启动问题。上述技术的结合，使得 Auto-Sklearn 相比 Auto-Weka 调参效率更高，同时调参结果的鲁棒性更好。目前贝叶斯优化算法因为其串行特性，无法适应具有大规模参数的模型，因此目前研究的重点是如何实现异步高效的贝叶斯优化方法或者寻找新型的超参数选择方法。

已有的自动化超参数选择算法很难应用到深度学习模型调参问题中，因为深度学习模型超参数更加复杂。因此研究的重点是如何自动化构建一个高效的神经网络。Google 提出了 NASNet^[22]，使用神经网络搜索技术（Neural Architecture Search），基于强化学习（Reinforcement Learning）训练循环神经网络（RNN）控制器来生成网络结构。所生成的网络最近在一个图像分类任务中实现了破纪录的 82% 的正确率。在另一个难度更大的在图像中标记多个对象位置的任务中，自动生成的网络达到了 43% 的正确率，而人类构建的最优系统的正确率只有 39%。但该方法对算力要求极高，Google 是在 800GPU 的集群上进行试验的，因此还不适合普通开发用户。目前 Google 已经发布了 AutoML 云服务，提供了相应工具，使得可采用上述技术面向客户场景自动定制构建神经网络模型，从而使众多开发人员也能通过 AutoML 设计神经网络。目前该服务已经支持计算机视觉模型和自然语言处理模型，其最终目标是使神经网络本身可以设计出新的神经网络。因为深度学习的自动化学习方法还处于初步阶段，但是随着深度学习的广泛应用，深度学习模型构建对于开发者来说仍然十分困难，迫切需求自动化方法支持。

2.6 新兴机器学习系统

随着 AI 技术的发展，在很多场景下已有的系统平台无法满足系统性能和易于开发的需要，比如在动态环境下对增强学习的支持，对高吞吐量端到端学习的支持，对机器学习服务高吞吐量的支持，对云环境下机器学习的支持等。因此学术界和企业界最近也推出了一些新型机器学习框架，开拓了机器学习系统新的发展方向。

(1) Ray

机器学习应用需要更多地在动态环境下运行，响应环境中的变化，并且采用一系列的动作来完成既定目标。这些要求自然地建立在增强学习（Reinforcement Learning, RL）范式中，即在不确定的环境中连续学习。因此，需要一个能支持异质和动态计算图，同时以毫秒级延迟每秒处理数以百万计任务的计算框架。而目前的计算框架或是无法达到普通 RL 应用的延迟要求（MapReduce、Apache Spark、CIEL），或是使用静态计算图（TensorFlow、Naiad、MPI、Canary）。

为了在支持动态计算图的同时满足严格的性能要求，UC Berkeley RISELab 提出 Ray 系统。Ray 采取一种新的可横向扩展的分布式结构，其结构由两部分组成：Application 层和 System 层。Application 层实现 API 和计算模型，执行分布式计算任务。System 层负责任务调度和数据管理，来满足性能和容错方面的要求^[23]。

(2) KeystoneML

现代的高级分析应用程序利用机器学习技术，包含领域特定和通用处理的多个步骤，并且具有高的资源需求。UC Berkeley AMPLab 在 Apache Spark 上建立的开源软件 KeystoneML，旨在简化大规模、端到端、机器学习管道的建设。它捕获并优化端到端大型机器学习应用程序，以便在具有高级 API 的分布式环境中进行高吞吐量培训。与现有系统相比，这种方法具有更高的易用性和更高的性能，可用于大规模学习^[24]。

(3) Clipper

机器学习正在越来越多的应用程序中进行部署，这些应用程序需要在大量查询负载下进行实时、准确和可靠的预测。但是，大多数机器学习框架和系统仅针对模型训练而非部署。

2017 年 UC Berkeley AMPLab 提出了 Clipper，这是第一个通用的低延迟预测服务系统。Clipper 介绍了最终用户应用程序和各种机器学习框架，它引入了模块化架构，以简化跨框架的模型部署。此外，通过引入缓存、批处理和自适应模型选择技术，Clipper 可以减少预测延迟并提高预测吞吐量、准确性和健壮性，而无须修改底层机器学习框架^[25]。

(4) 珠算（生成模型软件库）

珠算是一个生成模型的 Python 库^[196]，构建于 TensorFlow 之上，由清华大学朱军团队发布。珠算不像现有的主要是为监督学习设计的深度学习库，它是一种扎根于贝叶斯推断并支持多种生成模型的软件库。珠算区别于其他平台的一个很大的特点是，可以深度地做贝叶斯推断，因此，可以很有效地支持深度生成模型。珠算平台可以在 GPU 上训练神经网络，同时也可以在其上做概率建模和概率推断，带来好处有：可以利用无监督数据、可以做小样本学习、可以做不确定性的推理和决策、可以生成新的样本等。

(5) Visual Studio Tools for AI（微软 Visual Studio IDE 的扩展）

微软已经发布了其 Visual Studio Tools for AI 的测试版本，这是微软 Visual Studio 2017 IDE 的扩展，可以让开发人员和数据科学家将深度学习模型嵌入到应用程序中。Visual Studio Tools for AI 工具同时支持 Microsoft 的 Cognitive Toolkit 和 Google 的 TensorFlow 等深度学习框架。微软还通过一个称为 Visual Studio Code Tools for AI 的跨平台扩展为其 Visual Studio 代码编辑器提供 AI 支持。此外，微软同时为物联网设备、苹果 CoreML 以及 Azure SQL 提供全新的深度学习工具。

(6) TensorFlow Probability（概率编程工具）

今年谷歌发布了 TensorFlow Probability，一个概率编程工具箱，使机器学习研究人员及相关从业人员可以快速可靠地利用最先进的硬件构建复杂模型。该工具支持建立一个数据生成模型，推理其隐藏的过程。支持量化预测数据中的不确定性，而不是预测单个

值。TensorFlow Probability 继承了 TensorFlow 的优势，例如自动微分，以及通过多种平台（CPU、GPU 和 TPU）扩展性能的能力。

(7) Azure Machine Learning（云机器学习开发环境）

基于微软 Azure 云平台的 Azure Machine Learning 为数据科学家提供了一个流线型的体验：从只用一个网页浏览器设置，到使用拖放手势和简单的数据流图来设置实验^[26]。Machine Learning Studio 提供了一个库，其中包括省时省力的样本实验，R 和 Python 包以及像 Xbox 和 Bing 等微软业务中的一流算法。Azure 的机器学习还支持 R 和 Python 的自定义代码，并且支持机器学习应用的分析。

(8) Amazon Machine Learning（云机器学习开发环境）

亚马逊 Amazon Web Services 推出 Amazon Machine Learning（亚马逊机器学习），这是一项全面的托管服务，让任何开发者都能够轻松使用历史数据开发并部署预测模型^[27]。这些模型的用途广泛，包括检测欺诈、防止用户流失并改进用户支持。Amazon Machine Learning 的 API 和向导能够为开发者提供关于机器学习模型的创建和调试流程的指导，而且 Amazon Machine Learning 能够与 Amazon S3、Amazon Redshift 和 Amazon RDS 进行集成。

2.7 机器学习系统优化技术

AI 系统作为一个系统软件，其性能与存储、网络、调度和模型优化等方面都密切相关。研究者针对 AI 系统中模型训练的特殊性，提出了大量原创的技术，对 AI 系统性能进行不断优化。这些技术与具体的 AI 平台无关，可以结合不同平台的架构进行集成实现。

(1) 存储层次优化

一方面，深度学习框架仅可与部分现有存储系统集成，可能无法获取某个存储系统上的数据进行训练，导致训练效率和效果降低。另一方面，分布式存储系统（如 HDFS，Ceph）和云存储（如 AWS S3、Azure Blob Store、Google 云存储）为用户提供多种存储方式的同时，也增加了机器学习系统正确配置和使用不同存储系统的困难性。除此之外，计算资源与存储资源分离导致需要使用远程数据时，额外的网络传输会提高系统成本并增加处理数据的时间。

Alluxio^[16]可以解决机器学习系统的数据访问问题。Alluxio 最简单的形式是一个虚拟文件系统，它透明地连接到现有的存储系统，并将它们作为一个单一的系统呈现给用户。使用 Alluxio 的统一命名空间，可以将许多存储系统挂载到 Alluxio 中，包括 S3、Azure 和 GCS 等云存储系统。由于 Alluxio 已经与存储系统集成了，所以深度学习框架只需与 Alluxio 进行交互即可访问所有存储中的数据。这为从任何数据源获得数据并进行训练打开了大门，从而可以提高深度学习学得的模型的性能。

Alluxio 还包括一个便利的 FUSE 界面。使用 Alluxio FUSE，可以将 Alluxio 实例挂载到本地文件系统，因此与 Alluxio 的交互就跟与本地文件或者目录的交互一样简单。这使用户能够继续使用熟悉的工具和范例与其数据进行交互。Alluxio 可以连接到多个不同的

存储系统，这意味着来自任何存储的任何数据看起来都跟本地文件或目录一样。

Alluxio 还提供常用数据的本地缓存。当数据远离计算时，例如存储环境中的计算分离，该缓存技术非常有用。由于 Alluxio 可以在本地缓存数据，所以不需要通过网络 IO 来访问数据，从而使得深度学习训练的成本会更低，并且花费的时间会更少。

(2) 网络层次优化

随着数据量增多，模型增多，大规模分布式处理成为必需途径。服务器之间传输数据造成的资源消耗问题也随之产生。服务器之间如何互联、参数在各个节点之间如何高效传输也是热门研究方向。

香港科技大学陈凯教授团队在此方向发表了一系列成果，并发布了分布式机器学习系统星云 Clustar。该系统基于 RDMA 的新型数据中心网络技术，还利用了智能网络计算平台（smart in-network computing）技术，并且在应用感知的路由和调度的算法上做了优化^[29]。

卡内基 - 梅隆大学（CMU）和 Petuum 推出了新一代高效的分布式深度学习通信架构 Poseidon^[195]。Poseidon 是一个易于使用，并能提升深度学习程序在 GPU 上的集群性能的通信架构。Poseidon 利用深度程序中的层级模型结构叠加通信与计算，这样可以减少突发性网络通信。此外，Poseidon 使用混合通信方案，并根据层级属性和机器数量优化每一层同步所要求的字节数。已存的深度学习程序不需要更改代码就能通过 Poseidon 在多个机器上自动最优地实现并行化，加速效果和机器数量呈线性增长关系。

(3) 模型训练任务调度优化

整体同步并行计算模型 BSP 是一种异步 MIMD-DM 模型（Distributed Memory, DM）。BSP 模型能够保证模型的收敛性，但各节点之间的等待会造成大量的计算资源浪费。

为缓解这一问题，Eric Xing 提出延迟同步并行计算模型 SSP^[31]，它是利用机器学习算法的容错性构建的一种并行计算模型。机器学习的容错性是指在误差容许的范围内，算法迭代计算过程中可以存在一定的误差。给定一个时间窗口，并保证两个线程维持在这个时间窗口内，这样可使得误差保持在一定的范围内，并且有理论收敛性的保证。该方法既能减轻慢节点拖慢整个系统运行速度的程度，又能保证模型参数的最终收敛。

然而参数可能是相互依赖的，因此随机的并发更新可能会导致收敛速度缓慢甚至算法失败。同时模型参数以不同的速率收敛，收敛慢的参数子集会限制 ML 算法的完成。因此 CMU Eric Xing 教授团队提出了调度式的模型并行性（Schedule Model Parallelism, SchMP），该编程方法考虑了参数依赖和不均匀收敛，通过有效地调度参数更新，提高了 ML 算法的收敛速度。为了在规模上支持 SchMP，他们开发了一个分布式框架 STRADS^[32]，它优化了 SchMP 程序的吞吐量，并将四个通用的 ML 应用程序编写为 SchMP 程序。

(4) 模型分布式求解

机器学习问题通常会转换成一个目标函数去求解，优化算法是求解目标函数中参数的重要工具。目前，机器学习常用的优化算法主要包括梯度下降算法。

在标准 SGD 算法的基础上，Martin 等人开创性地提出了基于 MapReduce 计算模型的分布式 SGD 算法 Mini-Batch SGD^[33]。该算法利用节点的本地数据进行参数计算，对 I/O

延迟不敏感，最后在主节点进行模型的合并。这些特点使其非常适合分布式大规模机器学习。实验结果表明：相比单机串行算法，分布式 SGD 算法可以大大缩短运行时间。

以该算法作为分布式 SGD 算法的基础，Meng 等人基于 Spark 平台实现了分布式机器学习算法库 MLlib^[34]，其实现的标准 Mini-Batch SGD 经常作为分布式机器学习优化算法性能测试的基准。

为了提高标准 SGD 算法的准确度和效率，Zhang 等人提出了 Splash^[35]。其核心思想是：首先，将集群中的计算单元分成 k 组；然后，每个计算单元使用本地数据计算本地模型，每个组分别合并组内的模型，通过交叉验证选择 k 组中结果最好的模型。相比 Spark 上的 Mini-Batch SGD，该算法一般可实现 10~20 倍的加速。

在实际应用中，Spark 平台上主要采用牛顿法变种——限制内存 BFGS 法（L-BFGS）^[36]，来解决逻辑回归问题。通过 5 步迭代——利用 m 个历史向量对（权重之差、梯度之差）计算梯度下降方向、搜索选择步长、更新权重、计算当前向量对（权重之差、梯度之差）、保存最近 m 个历史向量对，从而解决 Hesse 矩阵计算和存储问题。对于大、中规模数据，随着存储历史向量对个数 m 的增加，迭代次数减少，运行加快。实验结果表明，L-BFGS 的收敛率要大于 Spark 平台上的 SGD 算法。

南京大学李武军研究组提出了 SCOPE 分布式机器学习算法^[193]。相比于传统的基于 Mini-Batch SGD 的分布式算法，理论上可以证明 SCOPE 在光滑的凸问题上具有更快的收敛率，同时避免了频繁的通信开销。实验证明，SCOPE 算法取得了比基于 Mini-Batch SGD 和 L-BFGS 的分布式算法更快的学习速度。SCOPE 算法可以基于 Spark 实现，也可以基于参数服务器实现，不同的实现版本集成在李武军研究组研发的开源大数据机器学习平台 LIBBLE 中。

目前深度学习模型训练普遍依赖于 SGD 算法及其变种，如何针对深度神经网络这种非凸模型进行高效训练求解，仍然是研究的难点。

此外针对广泛应用在模型训练中的机器学习采样算法，比如马尔可夫链蒙特卡罗（Markov Chain Monte Carlo， MCMC）等，也有很多人在研究如何进行分布式的采样算法设计与执行优化，在 Petuum 和珠算系统中也都进行了 MCMC 算法的分布式实现。本文不再展开介绍。

3 面向 AI 的系统：类脑神经网络计算系统软件

类脑计算指借鉴人脑信息处理模式和生物生理结构的计算理论、体系结构乃至硬件设计的总称（见图 1）。近年来，众多国家纷纷提出脑科学的研究和类脑计算相关的大型研究计划。2013 年，美国提出了“基于先进创新神经科技的大脑研究（Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies， BRAIN）”计划，同年，欧盟也提出了“人类大脑工程（Human Brain Project， HBP）”计划。中国也将脑科学与类脑研究列入《“十三五”国家基础研究专项规划》，并开展了为期 15 年的“脑科学与类脑科学研究”

计划。理解大脑的结构与功能是 21 世纪最具挑战性的前沿科学问题，类脑计算则是实现这一目标的重要手段与主要成果之一。

类脑计算目前采用的主要计算模型是脉冲神经网络（Spiking Neural Network，SNN）。SNN 又被称为第三代神经网络，在符合生物学特性的神经元和突触模型的基础上，在执行模型中引入了脉冲信号和时序信息。与现有的深度神经网络（Deep Neural Network，DNN）相比，SNN 提供了更好的生物真实性，具有达到更高的计算能力与能效的潜力，相应地，构建基于神经形态体系结构的新型计算系统也吸引了越来越多的人研究。已经有一系列试图利用 SNN 计算潜力的研究工作，其中的代表是神经形态芯片研究，例如 TrueNorth、BrainScaleS、SpiNNaker 以及国内的天机芯片等。

SNN 代表了一类计算模型，其主要计算特征包括异步、事件触发、细粒度并发处理等，因此从计算机系统软件角度来看，需要有相应的 SNN 描述语言、语言编译/解释器、后端的运行时系统等。具体地，运行时系统可以是软件（比如在传统通用处理器（包括通用图形处理器）上的运行时系统，一般就是 SNN 模拟器），也可以是定制化硬件（神经形态芯片）。而针对后者，因为其会引入硬件特定的约束条件（如计算精度、数据表示精度等），需要将上层的与具体硬件无关的神经网络转换为符合底层约束的（基本）等价网络。这一转换过程称为类脑神经网络编译（区别于上面提到的语言编译）——因其在系统中的位置与作用类似于传统编译器。

本文针对类脑神经网络计算系统，从系统软件角度（包括语言、工具链、运行时系统以及优化等）介绍、比较国内外相关工作，并给出一些趋势分析。同时，基于新型神经形态器件（如忆阻器）的类脑芯片也正成为研究热点，它们对于相关软件会有怎样不同的要求也会在本章相关部分介绍。

3.1 类脑神经网络模拟软件与建模语言

3.1.1 类脑神经网络模拟软件

模拟大规模神经网络（特别是大规模 SNN）的开发工具和计算基础框架是进行大脑逆向工程的最重要的方法之一。近年来，随着认知计算理论和并行计算算法的发展，涌现了众多使用 SNN 构建的大规模认知计算模型的研究工作^[37-38]。SNN 模拟器（通常提供了内置的开发接口或者语言）是研究人员进行 SNN 模型构建和模拟的主要工具^[39]。

从神经网络执行过程来看，SNN 模拟器软件可以划分为两个类别：解释执行模拟器（例如 CARLSim^[40]、NEST^[41]、PCSIM^[42] 与 NEURON^[43]）和代码生成模拟器（例如



图 1 类脑神经网络计算系统结构图

GeNN^[44]、NeMo^[45] 和 Brian2^[46]）。其中代码生成模拟器因为可以更好地优化网络结构和计算模型，具有更大的优化空间和执行效率。

不失一般性，代码生成模拟器通常采用如下所述的工作流程。首先，模拟器框架通常提供了用于描述神经元模型和网络结构的代码模板，用户基于这些（预定义的或者自定义的）模板完成整个 SNN 的描述。其次，整个 SNN 相关的描述与计算被转换为对应的代码，并被编译生成最终的可执行文件。例如 Brian2^[46] 使用 Python 的 SciPy 包将用户基于 Python 的数学表达式子转换为对应的 C++ 代码（如果是 GPU 平台，则是使用 PyCUDA 包生成 CUDA 代码）。通常情况下，这一类转换仅在数学表达式或者函数的层面进行，因此无法进行基于网络全局理解的优化策略（例如跨集群/映射并行执行）。

部分现有实现（例如 GeNN^[44]）可以并行地进行多个集群的计算。但是 SNN 本身仍然采用基于集群和映射的存储方式，因此更进一步的优化，例如细粒度并行和内存访问联合，仍然会受到限制。

Nengo^[47] 是另一个被广泛使用的 SNN 计算平台，但是 Nengo 与上述的几种模拟器有很大的不同。Nengo 是建立在支持语义指针体系结构（the semantic pointer architecture）这一认知计算体系结构理论框架下的模拟器实现。在 Nengo 实现中，神经元集群之间的连接通常用于描述这两个神经元集群对应的语义指针之间的具体数学操作，而不是像通常的神经网络描述那样直接描述两个神经元集群之间的连接关系和具体权重。

3.1.2 PyNN 语言及其他

SNN 模拟器是类脑系统模拟的主要组成部分，其提供编程接口或语言以便于用户开发模型。为了提高应用可移植性，独立于模拟器的 SNN 建模语言（如 PyNN^[48]、SpineML^[49] 等）已有多种。其中，PyNN 已经被相当多的 SNN 模拟器支持，包括 nemo、PCSIM、brian2 等，以及一些神经形态芯片（如 BrainScales^[50] 与 spinnaker^[51]）和 FPGA 系统（如 neuroflow^[52]）。

通常，一个 PyNN 网络程序是一个高层次的神经网络抽象描述（神经元集群和它们之间的连接）。PyNN 提供了一个标准的神经元/突触模型库，以及一套常用的连接算法。其包括神经元模型、突触模型、神经元集群、突触集群（projection）、集群连接方式等多种预置的核心语言类型：

- 1) 任何神经元模型都以 basecelltype 类为基类，神经元参数可配置。PyNN 提供了一个标准的细胞类型库，其在不同模拟器上的计算模型是一样的。
- 2) 一个集群（population）表示相同类型的神经元的集合，要创建这样一个集合，需要指定神经元的数目、类型以及一些可选参数。
- 3) 任何突触模型都以 basesynapsetype 类为基类，突触参数可配置。PyNN 提供了一个标准的突触类型库，其在不同模拟器上的计算模型是一样的。
- 4) 神经元集群之间的连接方式（如 all-to-all、one-to-one 等）被封装为一个独立的 Connector 类。
- 5) Projection 语言类型表示两个神经元集群之间属于某类突触的所有突触连接的总

和，以及设置这些连接参数的方法。

在 SNN 模拟运行层面，需要针对运行平台（如 CPU/GPU 等）进行运行时优化，主要原则包括：①强化访存连续性；②降低 warp divergence（针对 GPU 的 SIMD 模式）；③各个计算节点间的负载均衡。

3.2 类脑计算芯片与软件工具链系统

到目前为止，已经有很多使用超大规模集成电路技术实现 SNN 模拟的芯片。

TrueNorth^[53] 是一款由 IBM 提出的数字神经形态芯片，包括 4096 个核心和 540 万个晶体管，功耗 70mW，模拟了一百万个神经元和 2.56 亿个突触。IBM 为其设计了专用的编程开发系统 Corelet^[54]。Corelet 是一种基于神经形态硬件抽象的语言，其对应的编译器直接将语言描述的神经网络映射到具体硬件上。研究^[55] 使用 TrueNorth 专用的训练方法构建整个深度神经网络（简称 DNN），之后通过 Corelet 将训练后的网络直接映射到硬件上进行执行。

BrainScaleS^[50] 提出了一款用于 SNN 的集成电路系统 wafer-scale。PyNN^[48] 就是其一项研究成果，该硬件系统提供了专门的硬件后端实现以支持 PyNN 对应的接口和函数库。因此，这一神经形态硬件可以和基于 PyNN 的软件模拟器共享同样的设计接口。

SpiNNaker^[51] 是一款基于 ARM 核和自定义片上网络（Network on Chip, NoC）的片上多处理器系统（Chip Multi-Processors, CMP）。SpiNNaker 同样支持 PyNN 语言，但是其支持方式和上述芯片完全不同。SpiNNaker 芯片上的神经网络计算通过软件实现，即可以直接运行 PyNN 相关的接口和函数库。这种做法方便简洁。问题在于，相比专用的硬件设计，该种实现的效率较低。

Neurogrid^[56] 是一个使用自定义网络结构^[57] 的模拟/数字电路混合的类脑计算系统。其支持 Nengo^[47] 并使用神经工程框架（Neural Engineering Framework, NEF）^[58] 来实现具体的函数运算。

2017 年英特尔推出的 Loihi^[59] 众核神经形态芯片也支持片上 SNN 的高效执行，由 128 个计算核心构成，每个核心集成了 1024 个人工神经元，整个芯片拥有超过 13 万个神经元与 1.3 亿个突触连接。其软件工具链 Seamont^[60] 提供了一套基于 Python 的开发接口以描述复杂的 SNN 拓扑结构（类似于 PyNN），同时支持定制化的 SNN 学习算法，并提供了编译器与运行时库，为芯片高效地构建 SNN 可执行模型并部署到目标硬件上。

3.3 类脑计算芯片与软件工具链

构建大规模的神经形态网络芯片，首先需要研究神经形态基元，竭力寻求神经形态基元特性的物理高相似度模拟方案，主要包括传统的硅技术方案和新型忆阻器方案。

上述的“类脑计算芯片”都是以数字芯片来模拟神经元，需要付出较大的能效代价。目前，比较优异的方案是采用专门定制的 CMOS 电路来模拟生物神经元。

而某些基于连续阻变效应的新型纳米器件，通过对器件电阻大小的连续调节可以较好地模拟突触的可塑性。比如，斯坦福大学采用阻变忆阻器模拟单个突触的可塑性，最大能耗仅为 6pJ，并初步演示了 STDP 学习规则^[61]；IBM 于 2013 年提出了一种基于相变忆阻器的单个突触可塑规则编程方案，单个突触触发事件能耗低至 2.74 pJ^[62]；法国微电子研发机构 CEA-LETI 采用特殊的双忆阻器模拟单个突触的功能，实现了简化的 STDP 学习规则，并基于此演示了高速公路车道识别的功能^[63]。但这些是以忆阻器为基础的，真正在全芯片级别实现类脑芯片的研究还非常少见。

近几年来，我国在神经形态器件研究方面，取得了可喜的成果。特别是基于固态存储器的突触模拟及开发，与国外差距在逐渐缩小。在各种类型的固态存储器上或电子层晶体管器件上，都成功实现了对各种生物学习法则的模拟，包括 STDP、SRDP、LTP、LTD、STP 等。

清华大学类脑计算研究中心在 2015 年就推出了首款类脑芯片“天机芯”^[79]，该芯片首次将人工神经网络（Artificial Neural Network，ANN）和脉冲神经网络（Spiking Neural Network，SNN）进行异构融合，同时兼顾技术成熟并被广泛应用的深度学习模型与未来具有巨大前景的计算神经科学模型。2017 年推出了基于 TSMC 28nm 工艺的第二代天机芯片，峰值性能为 650 GSyOPS/W (synaptic operations per second)，是 TrueNorth 的 1.6 倍。

清华大学研究团队针对该芯片还开发了软件工具链，包括以下几个方面^[80-81]：

- 1) 针对 PyNN 语言的扩展（包括对于天机芯神经元/突触的支持，以及对于 Deep SNN 的特性支持）；
- 2) 在编译层面，能够将现有的深度学习开发框架训练生成的 DNN（不带任何约束条件的，包括数值计算精度、参数精度、计算规模、非线性函数种类等方面约束）转换为符合底层约束的（基本）等价网络。
- 3) 网络映射，将编译生成的等价网络高效地映射到芯片上，以便快速运行。

2017 年清华大学微电子所的“运用电子突触进行人脸分类”研究成果^[82]，将氧化物忆阻器的集成规模提高了一个数量级，首次实现了基于 1024 个氧化物忆阻器阵列的类脑计算。

3.4 类脑计算模型与应用

3.4.1 仿生感知

受生物视网膜中神经元传输信息方式的启发，美国加州理工学院在 20 世纪 90 年代初提出了一种称为 AER (Address Event Representation) 的异步信号传输方式^[64]：当像素阵列中某个像素发生“事件”时，将此像素的位置与“事件”输出。基于这一原理，瑞士苏黎世大学研发了动态视觉传感器（Dynamic Vision Sensor，DVS）^[65]，基于事件驱动原理来检测图像中像素的亮度变化。这种类脑摄像头的时间分辨率可达微秒级，能实现高速移动物体的跟踪，而其所需码流带宽比传统的高速摄像头低很多。很直观的一个思

路是采用 SNN 来实现后端处理算法。DVS 研究团队已经与 IBM TrueNorth 团队展开合作，将 TrueNorth 芯片用于 DVS 的后端处理。

新加坡南洋理工大学研制出了时间灵敏度达到 25ns 的异步传感芯片^[66]。Garrick Orchard 等介绍了一种用于对象识别的脉冲层级模型^[67]，利用 AER 视觉传感器的输出中所蕴含的精准时域信息进行对象识别。类脑耳蜗^[67-68]是基于类似原理的类脑听觉传感器，可以用于声音识别与定位。

3.4.2 基于脉冲时间的视觉识别等

尽管脉冲神经网络已经被成功应用于模式识别问题，神经系统是如何从感觉编码到突触学习利用脉冲时间进行运算的问题仍值得研究。文献 [69] 提出了一个基于脉冲时间的模式识别模型，主要由编码和学习网络两个部分组成。由时滞编码（latency code）和相位编码（phase code）结合的编码方法被用来将图像信息转化成由神经脉冲序列组成的时空斑图（spatiotemporal pattern）。随后，一个单层脉冲神经网络被用来学习识别不同的输入。

类似的基于脉冲时间的模式识别模型被成功地应用于基于 AER（Address Event Representation）传感器的分类系统^[70]，实现了对手写数字 0~9 的识别^[71]。

3.5 类脑神经网络与深度学习

3.5.1 类脑神经网络学习与训练

由于神经元之间的可塑性使得生物神经系统具有强大的学习和适应环境的能力，所以在建模中考虑由外界环境变化和神经过程引起的神经突触的变化的调整能力是极为重要的。突触权重（synaptic weight）定义了两个神经元之间连接的强弱。赫布（Hebb）提出了第一个关于神经突触权重修改的假设。基于此假设的学习算法可被总结为“同时激发的神经元连接在一起”。它被认为是学习跟记忆的根本机制并作为线性相关器被广泛应用于不同的神经网络模型中。

随着精确脉冲定时（precise spike timing）和突触前激发和突触后激发之间的时间间隔被发现，毫秒级精度学习受到了热切关注。在过去的几十年里，科研人员从生物实验现象和结论中汲取灵感来探索神经突触可塑性（即学习）理论。通过引入突触前后脉冲之间的时间相关性（temporal correlation），毕国强和蒲慕明提出了脉冲时间依赖的可塑性（Spike-Timing Dependent Plasticity，STDP）机制并被推广到不同的脉冲学习机制中^[72-73]。

由于 STDP 原本是无监督学习机制，为了解决 SNN 的监督学习问题，人们将 STDP 机制与其他权值调整方法结合，其中主要包含梯度下降和 Widrow-Hoff 规则，以此推导出不同的监督学习算法。目前脉冲神经元的主要学习算法包括 ReSuMe、SPAN、Chronotron，但依然有很大的局限性，虽然可以实现多脉冲（multi-spike）输入 - 输出映射，但只适用于单层的 SNN。

Bohte 等人仿照 ANN 的误差反传 (error backpropagation) 机制, 首先提出了基于梯度下降的多层 SNN 学习算法 SpikeProp, 但是限制所有神经元只能发放一个脉冲, 即只适用于单脉冲信息编码的问题。SpikeProp 的改进和扩展算法如 Multi-SpikeProp^[75] 等放开了对神经元发放脉冲的限制, 但是仍限制输出层神经元只能发放一个脉冲。

3.5.2 深度 SNN

由于 SNN 的训练算法不太成熟, 一些研究者提出了将传统的 ANN 转化为 SNN 的算法, 利用较为成熟的 ANN 训练算法来训练一个基于 ANN 的深度神经网络^[76], 然后通过发放频率编码 (firing rate encoding) 将其转化为 SNN, 从而避免了直接训练 SNN 的困难。这些工作目前局限于前馈神经网络。基于这种转换机制, HRL Labs 研究者^[77] 将卷积神经网 (Convolutional Neural Network, CNN) 转换为 Spiking CNN, 在常用的物体识别测试集 Neovision2 与 CIFAR-10 上的识别准确率接近 CNN; 瑞士研究者将深度信念网 (Deep Belief Network, DBN) 转换为 Spiking DBN, 在手写数字识别测试集 MNIST 上的识别准确率接近 DBN。

滑铁卢大学的 Chris 等^[78] 已将应用于图像物体识别测试集 ImageNet 的 CNN (AlexNet) 转换为 SNN, 取得了接近目前最优神经网络的精度。

3.6 类脑计算模型与应用：脑认知与类脑计算

从 2015 年 7 月起, 北京市科学技术委员会一年内在“脑认知与类脑计算”方向已经分三批支持了十八个研究项目, 涵盖了大脑解析仿真、类脑处理器、认知计算、神经形态器件等各个方面。以北京大学牵头的《大脑初级视觉系统解析仿真平台研究和应用验证》项目为例, 在北京大学内部实现了信息科学和生命科学的深度交叉: 视觉损伤与修复教育部重点实验室负责测量视网膜各类神经节细胞在多种视觉刺激下的发放模型, 数字视频编解码技术国家工程实验室负责开发高逼真视网膜仿真软件, 生物医学中心采用双光子成像研究灵长类初级视皮层神经机制, 定量生物中心则从神经网络仿真和动力学分析方面进行软件模拟, 通过生物实验和计算机仿真进行交叉验证, 实现对生物视觉系统视觉信息处理和加工过程的精确重构。预计这项研究不仅能深化对生物视觉系统信息处理过程的认识, 还有望启发新的高效视频编码方法和对象检测识别算法, 并通过新一代视觉芯片支持智能机器人和无人机等产业发展。

3.7 类脑神经网络建模语言与软件模拟

这方面的国内研究虽然规模有限, 但是具有一定特色。比如清华大学设计了通用 SNN 描述语言 E-PyNN 及其针对通用图形处理器 (General-Purpose Graphics Processing Unit, GPGPU) 的优化编译器。E-PyNN 在现有 SNN 描述语言 PyNN 的基础上, 从神经元和突触模型、网络连接模式、信息传输模式以及训练算法四方面扩展了对 DNN 特性的支

持。E-PyNN 编译器采用了细粒度的 SNN 中间表示、程序综合等优化技术，生成的可执行文件在运行时消耗的显存大小比其他常用的模拟器小 7% ~ 56%。E-PyNN 运行时系统（称为 BSIM[⊖]）的模拟速度相比目前可以获得的最快 SNN 模拟器 GeNN，在不同的网络规模和脉冲发放频率下，取得了 1.10 ~ 5.80 倍的加速比。E-PyNN 还被用作清华大学天机类脑芯片的开发语言。

北京大学开发了 CoreNEURON[⊖]，即将常用的 SNN 模拟器 NEURON 扩展为支持 GPU 的版本，加速比接近 4 倍，且运行时所需的内存容量仅为 NEURON 版本的 1/5 ~ 1/7。

4 基于 AI 的智能系统：机器学习安全及其在系统安全中的应用

总体而已，AI 安全包含两大类研究方向：AI 系统本身的安全问题、基于 AI 的安全技术。前者关心 AI 系统的脆弱性，如寻找对抗样本使 AI 系统运行出现异常；后者利用 AI 技术辅助解决现有的安全问题，如漏洞检测等。

4.1 面向 AI 系统安全的对抗学习技术

随着各种各样机器学习新技术的提出，机器学习新平台的流行，越来越多的开发人员开始通过机器学习拥抱人工智能，随之而来的是人工智能应用的爆发和广大用户受益于人工智能。人工智能特别是机器学习甚至开始被应用在了和安全密切相关的场景，例如人脸识别认证、自动驾驶、大数据风控等。机器学习在这些场景下能提供比人工更加好的识别精准度，节省人工成本，为人类带来便利。但可以想到的是，这些利用了机器学习的应用一旦被攻破，所带来的后果也非常严重。

不巧的是，研究人员发现，只要在机器学习模型的输入上加载一点点噪声，机器学习模型的输出就会被改变。这种噪声可以小到人根本无法察觉，并且这种错误的输出并不是因为模型的准度不够高，因为即使识别准确度达到百分之九十九点几的机器学习模型，攻击者也可以百分之一百地生成这种噪声从而任意控制其输出。

不少研究人员对机器学习技术广泛应用的信心因此受到打击，因为大家担心机器学习会为黑客提供广阔的攻击面，带来严重的后果。例如，掌握对抗样本技术的攻击者可能在未来支持无人驾驶车的道路上涂画噪声，误导无人驾驶车的决策模型，从而导致车毁人亡的事故。又如，攻击者可能误导银行的风险控制模型，使得大量不良贷款获批，最终导致大量坏账，造成国家金融系统紊乱。

对抗样本攻击的本质是解一个优化问题，即如何最小化噪声 r 的模，保证机器学习模型的输出 $F(x + r)$ 为攻击者的目标 t ，并且加上噪声的样本 $x + r$ 不溢出值域范围。这

[⊖] <https://github.com/yhx/BSim>。
[⊖] <https://github.com/nrnhines/>。

个问题并没有直接的解析解，然而研究人员普遍利用梯度下降优化的方法得到了很好的较优数值解。

对抗样本攻击的研究现状 对深度学习模型的最新对抗样本攻击已经可以做到，针对不同的模型，应对不同的噪声衡量指标，以百分之一百的成功率发动攻击。来自美国加州大学伯克利分校的研究人员在 2017 年的安全顶级会议 IEEE Oakland 上发表文章，展示了他们的一组全新的对抗样本解法^[101]。他们将上述优化问题的两个限制条件全部转化成优化目标项，使得优化器可以不用考虑限制条件而直接优化目标函数，得到最优解。在他们的工作中，输出限制条件被转换成了损失函数，而值域限制被转换成了平滑截断函数包裹的变量。这样一来，当优化器将优化目标项降低到门限值以下时，目标输出限制就自然而然满足了，而值域限制条件因为平滑截断函数的存在而天然满足。这样巧妙构造的目标函数直接导致了公认的检验分类问题 MNIST 和 CIFAR 被百分之一百成功率攻破。

对抗样本的防御方案 研究者看到了对抗样本攻击的灾难性后果，并提出了许多防御方案，但大多被证明并不有效。最早的防御包括对抗训练、防御蒸馏；最新的防御方案之一为美国加州大学戴维斯分校和上海科技大学的陈浩教授课题组提出的 MagNet。对抗学习的思想为主动构建一个识别输入样本是否为对抗样本的分类器^[102]。然而，研究表明攻击者同时误导两个分类器并不比只误导一个难^[103]，进而证明基于对抗训练是完全无效的。防御蒸馏思想为抹掉分类器内的梯度，导致攻击者无法利用梯度下降优化器求解对抗样本^[104]。然而，美国加州大学伯克利分校的研究人员表明，即使在有防御蒸馏保护的前提下，攻击者照样可以通过转移学习生成有效的对抗样本^[101]。陈浩教授提出的 MagNet 表明对抗样本和正常样本在被先压缩再还原过程中产生的误差有显著区别^[105]。据此，陈教授设计了一个基于正常样本训练的自动编码器来分离这种误差，若一个样本通过自动编码器产生的误差超过一定门限，则可被判定为不来自和训练样本一样的分布，进而被判定为对抗样本。此外，就算误差没有超过这一门限，分离了误差之后的样本若导致分类器输出发生了变化，也可表征输入样本为对抗样本。

实际的对抗样本攻击 对抗样本攻击并不只停留在论文阶段。最新的研究已经用对抗样本来攻击实际的系统，并且证明攻击成功率非常高，后果非常严重。来自卡内基 - 梅隆大学的研究者发现，对抗样本可以被打印在眼镜框上，用来误导人脸识别系统^[106]。这种攻击手段一旦被不法分子掌握，即可用来攻击出入境、银行、监控等许多基于人脸识别和追踪的安保系统。复旦大学的研究者发现，对于人脸识别系统的攻击甚至可以发动于无形，只要攻击者利用人感知不到的红外光作为对抗样本的载体来发动攻击^[107]。中国科学院信息工程研究所的研究人员发现，可以在音乐上进行小幅度修改，达到实际攻击基于深度学习的语音识别算法（例如科大讯飞等），实现人耳听起来是音乐但是语音识别系统在其中识别出了命令的效果^[108]。

4.2 基于 AI 的安全技术

自 21 世纪以来，计算机的计算能力大幅提升，信息数据的爆炸式增长，以及基础理

论的发展，使人工智能得到广泛的应用和发展。依靠人工智能发展的红利，计算机安全也得到了快速的提升和发展。人工智能中的技术和工具被广泛应用在解决安全问题中，包括：漏洞检测、恶意代码检测和代码加固。

软件漏洞是在开发软件过程中由于开发者的疏忽或编程语言的自身局限性被植入的安全缺陷。这些缺陷往往能够被攻击者利用，从而削弱了软件系统的安全性，并可能给企业和个人带来巨大的经济损失^[109-110]。2017 年 5 月爆发的勒索攻击“WannaCry”通过利用微软系统中的若干漏洞攻克了 150 多个国家的 20 多万台计算机设备，最终造成了接近 40 亿美元的经济损失^[111]。因此，及早地检测出软件存在的安全漏洞对软件安全有着极其重要的意义。

恶意代码，即恶意软件，是指未经用户许可或在用户未察觉时，安装在目标计算机或终端上，并用于侵犯用户权益的软件。根据不同的攻击目标，恶意软件可以分为广告程序、间谍软件、木马程序、病毒、蠕虫、Rootkit 等。相较于软件漏洞，恶意代码往往是由攻击者主动设计和编写的特定程序，通过钓鱼或通信渠道进行恶意传播。

代码加固指针对有安全隐患且在特定场合下可被攻击者利用的代码的修复过程。针对存在安全漏洞的软件进行代码变换和修复，或对二进制代码打补丁，使攻击者无法通过这些漏洞发动攻击。根据不同的漏洞类型、代码环境以及安全等级需求，存在多种代码加固技术。例如针对缓冲区溢出漏洞，开发人员可以在编译中添加随机字符和加入边界检查的代码，也可以对程序输入进行检查和过滤^[114]。

4.2.1 针对漏洞检测的 AI：人工智能如何辅助挖掘软件中存在的安全漏洞

主流的漏洞检测技术可以分为三类，分别为静态检测方法、动态测试和基于机器学习的方法。

目前主流的静态检测方法主要关注已知漏洞的分析，通过自主或半自主学习的方式抽取相应的漏洞模式。Shankar 等人^[115]开发出一种基于约束的类型推理系统 cqual，对 C 程序中的字符串的格式化漏洞进行检测。他们对十个流行的软件系统进行扫描，并能以很低的误报率检测出字符串的格式化漏洞。代码属性图^[116-117]是一种描述软件漏洞代码的模型，并支持快速的查询和检索功能。Yamaguchi 等人利用代码属性图在 Linux 内核代码中发现了 18 个未知的漏洞。类似地，VulHunter 对 Android 应用构建应用属性图，并通过对该图进行查询和索引，找到 Android 代码中存在的安全漏洞^[118]。discovRE^[119]是一种利用二进制代码匹配来对二进制代码进行跨平台检测的方法。基于人工智能的思想，该方法首先提取现有漏洞函数的数值特征（如指令数）和结构特征（如执行流图），通过计算不同二进制函数的相似度来判定程序是否存在安全隐患。该方法支持 x86、x64、ARM 和 MIPS 四种指令集。同样，BinGo^[120]通过对已有漏洞进行学习和总结，提取相应的特征，进行快速的二进制代码匹配，从而发现了多个零日漏洞。SPAIN^[121]通过对软件的代码修改日志进行自主学习，发现其中的安全补丁，并抽取它们的特征，利用这些特征对现有的软件系统进行检测，并成功发现了 3 个零日漏洞。

目前动态检测方法主要基于模糊测试方法，通过测试中的代码覆盖率等度量指标来

迭代地优化整个测试过程。Steelix^[122]是一种基于程序状态进行二进制代码模糊测试的方法。该方法结合程序分析和二进制代码插桩，向模糊测试工具提供覆盖率信息和字符串比较进度。该方法能够提升模糊测试工具的穿透深度，发掘更深的软件漏洞，通过对若干流行软件的测试，成功发现了一个零日漏洞和 9 个新的安全问题。Skyfire 利用搜集到的大量样本数据，建立一种概率的上下文有关文法来描述这些样本数据的语法特性和语义规则^[123]。对该概率的上下文有关文法生成测试种子。这些测试种子作为工具 AFL 的输入，对开源的 XSLT 和 XML 解析引擎进行模糊测试。Skyfire 能够大幅提升代码覆盖率（20%），进而增强发现系统漏洞的能力。Skyfire 总共发现 51 个 IE 浏览器的漏洞。Alexandru 提出一种利用模糊测试对 Android 系统组件进行漏洞挖掘的方法^[124]。他详细阐述了要对 Android 系统组件进行模糊测试的步骤，如测试种子的生成、测试用例的执行、代码的插桩和记录等。最后提供一些用户模糊测试的工具和技术。

受到软件缺陷预测研究的启发，安全研究人员基于机器学习方法（例如朴素贝叶斯、Logistic 回归、随机森林等），构建高质量漏洞预测模型，可以提前预测出可能含有漏洞的程序模块，从而有助于优化测试资源的分配并减少后期漏洞修复的代价。但与软件缺陷相比，被测项目内含有的漏洞数量更少。例如：Shin 等人^[125]从代码修改量、开发人员的代码修改信息等角度，通过分析 Firefox 浏览器项目发现，21% 的文件含有缺陷，但仅有 3% 的文件含有漏洞。因此 Zimmerman 等人^[126]将漏洞预测类比为“searching for a needle in a haystack”，如何精准预测出漏洞模块是漏洞预测研究关注的重点。VCCFinder 是一种利用大量开源项目来检测代码漏洞并辅助代码审查的方法^[127]。该方法将 CVE 和 GitHub 提交日志建立对应关系，并利用 SVM 技术对漏洞代码进行标记，预测结果的误报率比 Flawfinder 减少 99%。Shin 等人利用人工神经网络识别二进制代码中的函数^[128]，他们将二进制代码根据字节码进行划分，对采集到的 2200 个二进制代码进行训练和实验。实验结果证明采用递归神经网络能够更高效、更准确地识别出二进制代码中的函数。Gemini 是一种利用神经网络进行跨平台二进制代码克隆检测的方法^[129]。Gemini 利用神经网络对二进制代码中的结构流图构建特征向量，并以此计算两个函数的相似度。通过实验数据表明，Gemini 可以提升工具 3~4 个数量级的执行效率，并且相比这些工具可在系统固件中找到更多的安全漏洞。HSOMiner 是一种基于机器学习的程序分析技术，能够快速和高效地发现移动应用中隐藏的敏感行为^[130]。HSOMiner 首先对已有的敏感行为抽取程序特征，如执行条件、执行路径等。实验数据表明，HSOMiner 能够精确地检测出隐藏的敏感信息，准确率达到 98%，并且代码覆盖率可以达到 94%，相关研究人员尝试识别出引入漏洞的因素并对程序模块进行度量。Neuhaus 等人^[131]首次对该问题展开研究，他们发现含有漏洞的模块一般会具有相似的 import 语句或 function 调用语句。Chowdhury 和 Zulkernine^[132]从代码复杂度、耦合度和内聚度等角度对程序模块进行度量。Walden 等人^[133-134]借助文本挖掘，分析了 3 个基于 PHP 的 Web 应用程序，并对搜集的数据集进行了共享。基于 Walden 等人共享的数据集^[133]，Stuckman 等人^[135]借助特征选择等方法来尝试提高漏洞预测模型的性能。

国内研究人员基于 Walden 等人^[133]共享的数据集做了一些拓展工作。夏鑫等人^[136]

借助集成学习方法来提高漏洞预测模型的性能。周毓明等人^[137]基于代价感知的评测指标，发现在基于代价感知的排序场景中，基于文本挖掘的方法略好于基于传统度量指标的方法，而在基于代价感知的分类场景中，基于文本挖掘的方法的性能与基于传统度量指标的方法相似。刘吉强等人^[138]利用三种深度神经网络：卷积神经网络、长短期记忆神经网络和两者结合的模型，将 9872 个函数的调用顺序作为特征进行训练和测试，实验的结果达到 83.6% 的准确率。魏胜军等人^[139]对软件组件的黏合度和耦合度进行度量，基于软件网络图构建缺陷预测模型，通过对 Firefox 3.6 的实验测试，该缺陷预测模型在查准率和查全率等指标上取得了更好的结果。在动态测试技术上，国内研究人员做出了显著贡献。张超团队提出了语义敏感的覆盖率模糊测试方法^[140-141]，他们通过解决路径冲突来最优化插桩策略，并利用覆盖率信息提出了三种模糊测试优化策略。这三种模糊测试策略能够有效地发现新的代码路径和漏洞。陈恺团队提出一种文本信息辅助模糊测试的方法。其开发的 SemFuzz 首先搜集 CVE 安全报告和 Linux 的提交日志。这些报告和日志往往包含对安全漏洞的描述，如有漏洞的函数。SemFuzz 通过自然语言处理，将漏洞代码的特征抽取出来，以指导安全漏洞利用的生成和模糊测试。针对 112 个 Linux 内核漏洞，SemFuzz 自动生成相应的利用，并能成功地触发其中的 18 个安全漏洞，同时发现一个零日漏洞和一个未披露的漏洞^[142]。上海科技大学的陈浩团队^[143]在模糊测试漏洞挖掘中也做出了显著贡献。他们开发了一种基于规则的模糊优化策略 Angora，提供了针对字节码的污点跟踪、上下文相关的分支计数、基于搜索的梯度下降以及输入长度探索策略。该方法在实验中比国际先进模糊测试工具的执行效率更高，发现的漏洞数目更多。

对比国内外工作，我们发现国外主流的漏洞检测手段由早期的代码度量特征来进行诊断，发展到通过对代码进行形式化建模和结构网络的构建，利用图的推理能力来预测和检测软件漏洞，比较典型的工作是 Yamaguchi 提出的语义化代码属性图（semantic code property graph）^[116-117]。他们将代码进行深度分析，将抽象语法树、控制流图和数据流图等结构化信息融合形成代码属性图。根据图中的节点之间蕴含的丰富信息进行推理，以此来检测漏洞。该项技术已经在商业领域有较为成熟的系统 ShiftLeft。国内的漏洞检测工作大部分采用的是传统缺陷预测研究考虑的度量特征，需要研究人员借助安全领域知识来设计个性化度量特征。不过国内的学者对多种预测算法（如深度学习）进行了初步探索，并取得了比较好的检测效果。另外，在动态测试方法上，国内外均涌现了比较优秀的方法以及工具。国外如 AFLFast^[144]、Driller^[145]、Skyfire^[123]、Steelix^[122]、T-Fuzz^[146]等，国内的相关工具有 SemFuzz^[142]、Angora^[143]、CollAFL^[140]等。在动态测试方面，国内外的科研团队针对漏洞检测这一共同问题，广泛应用和扩展了 AFL 模糊测试平台，并检测出了现有软件中的大量漏洞信息。可以说国内外在动态模糊测试领域所投入的科研力量和取得的成果旗鼓相当。

4.2.2 针对恶意代码检测的 AI：人工智能如何辅助检测软件中的恶意代码

传统的恶意代码检测技术和方法已经相对系统化，工业体系也比较成熟。

传统的机器学习被广泛应用在恶意代码检测中。Ahmed 等人^[112]从 Windows API 调用

参数和序列中提取出基于空间和时序方面的统计特征，如地址指针和参数的均值、方差、信息熵。他们利用一系列机器学习方法（如决策树、朴素贝叶斯、归纳规则学习和支持向量机）进行恶意代码检测。OPEM^[147]同样考虑了一系列机器学习算法（如决策树、贝叶斯分类器、支持向量机和 K 最近邻）。他们提取的特征包括静态特征和动态特征，静态特征主要包括恶意软件中执行代码的时序频率，动态特征主要包括从动态执行序列中提取的二元向量（表征特定系统调用是否执行）。Gascon 等人^[148]提取函数调用图，构建其结构嵌入向量，并进一步提取其中的特征值。Arp 等人^[149]提出一种轻量级的恶意代码检测技术，通过对 Android 应用程序提出 8 种静态特征，如硬件信息、权限信息、组件信息等，利用支持向量机检测恶意代码。SMART^[150]是一种通过提取已有恶意软件特征，采用程序分析和机器学习结合的方法来检测恶意软件。通过对已有恶意应用的分析，构建恶意代码的语义化模型，并利用其包含的 API 信息基于随机森林算法对恶意代码进行分类，实验对 20 多万个移动应用进行检测，并发现 4000 多个恶意软件。Karampatziakis 等人^[151]基于文件关系建立关系图，并采用回归分类器进行恶意代码检测。在考虑到文件关系后，恶意代码的检测精确度得到显著提升。

随着深度学习理论的发展和工具的成熟，近几年，学者开始利用深度学习来检测恶意代码。Saxe 和 Berlin 利用深度神经网络进行恶意代码检测。针对真实的部署环境，他们提出一种无参化方法来调整分类器的分数以代表预期准确度。该方法在四十万个软件可执行代码上获得了 95% 的准确度和 0.1% 的误报率^[152]。Hardy 等人^[153]采用堆栈式自动编码模型对 Windows 的 API 进行学习，并提出一种深度学习框架。该框架采用一种分层的训练模式来进行无监督学习，并采用监督学习方法来调整算法中的参数。

在国内研究方面，许智武等人^[154]提出一种有效的恶意代码检测技术，不仅考虑可执行代码的行为信息，而且还包括数据信息，如字节码、数据类型、依赖的软件库。利用随机森林算法，该方法在恶意软件数据集上获得了 97.88% 的准确度。基于机器学习算法的恶意代码检测往往受到概念漂移攻击（concept drift attack），王志等人^[155]提出了一种主动和动态的学习方法，来抵御僵尸网络中的概念漂移攻击。跟被动的等待伪阳性策略不同，该方法能够主动嗅探出隐藏概念的漂移，并能够相应地做出权值调整和重新训练。杨珉团队^[156-157]利用自然语言处理获取程序中的隐私数据位置，并利用基于学习的程序结构分析来精确定位这些隐私数据的流向。通过对 44 万多个 Android 应用进行分析，发现了存在的大量隐私泄露问题。陈恺等人提出了 MassVet 系统^[158]，首先构建移动应用恶意代码数据库，然后设计了一种高效创新的代码匹配算法来实现高效的恶意代码检测的技术。针对应用中的相似 GUI，MassVet 采用一种高效的代码相似度计算方法确定代码是否一致。通过这种方法，MassVet 对来自 33 个应用市场的 120 万个应用进行检测，平均检测时间仅为 10s，并且挖掘出成千上万个恶意软件，包括 20 个零日恶意软件。孟国柱等人^[159]构建出 Android 中恶意软件的行为模型，并充分考虑了 Android 系统提供的通信和数据交换方法，结合静态程序分析判断 Android 应用是否存在恶意行为。跟 Hardy 等人的工作相似^[153]，Yang Wang 等人^[160]利用堆栈式自动编码模型在 JavaScript 代码领域中，对 27 000 个训练数据做测试，其检测方法的准确度能达到 95%。

对比国内外工作，我们发现传统的方法和技术已经渐渐地失去了研究人员的关注。传统的机器学习算法，如决策树^[147,161]、朴素贝叶斯^[161]、支持向量机^[147-148]和随机森林^[150,154]等，都有着广泛的应用。各个研究团队都将关注点集中在抽取恶意代码的特征值和构建更加语文化的行为模型上，最后将恶意代码检测问题转化为分类问题，然后采用一些比较成熟的机器学习算法和框架来做分类。值得注意的是，国内在大数据分析、移动领域和物联网领域的恶意代码检测水平已达到国际领先水平。例如 MassVet^[158] 提供的恶意代码检测平台能够利用百万级 Android 应用库进行高效的搜索，其检测的效率和准确率都处于国际领先水平。为了克服恶意软件的隐蔽性和多样性等挑战，国内外都尝试在该领域内引入更加先进和高效的技术和方法。近几年，安全人员更多使用深度学习来检测恶意代码。整体来讲，国内外利用深度学习进行恶意代码检测的研究都处于初步探索阶段，大部分只是简单地利用图像识别等领域的成熟算法和框架进行有监督的分类。

4.2.3 针对代码加固的 AI：人工智能如何辅助修复和加固代码

代码加固技术是指通过对软件代码进行改写、包装和加壳等减小系统可攻击面。按照加固方式可分为静态的代码加固和动态的代码审查与加固。

静态代码加固往往利用已有知识的学习和总结来修复代码，提升代码安全度。多数工作依赖于对已有漏洞知识的总结和对安全修复模式的提取：Prophet 是一种安全补丁的自动生成技术^[162]。它通过从开源软件库获取成功的安全补丁，构建一个应用独立的概率模型，并根据这个模型对可能的安全补丁进行排序直至找到合适的安全补丁。实验结果证明，Prophet 对 8 个开源软件项目中的 69 个安全漏洞提出了更精确的修补建议。随后作者又开发出另外一个系统 Genesis^[163]，可以处理用户编写的安全补丁，从中推断代码的可能修改操作并确定候选补丁的搜索空间。近年来，研究人员开始利用神经网络对有缺陷的代码进行自动安全加固：DeepFix 基于多层的序列对序列的神经网络，对 C 语言代码中的错误语句进行定位，并提供相应的正确写法^[164]。通过对 6971 个含错程序进行分析，DeepFix 能够对其中 27% 的程序进行完全修改，对 19% 的程序进行部分修改。另外，对关键代码的混淆^[165-166]、加密^[166]和加壳^[167]都可以降低代码被攻击的风险，提高软件的安全性。

对于动态代码审查和加固，Mourad 等人提出一种面向开发的代码安全加固方法^[168]。当软件架构师在软件设计中，首先提出高层次的安全加固策略，并且定义这些安全加固策略的具体内容，如在何处何时插入何种安全检查代码，通过这些策略能够帮助开发人员实现更加安全的代码。Pidgin^[169]是一种通过程序依赖图增强软件安全的技术。它利用程序依赖图来建模整个应用程序，并提供一种查询语言，能够对程序依赖图快速查询相关的程序信息流。在程序员做开发的过程中，Pidgin 可以实时提供安全规约和违背规约的安全反例，最后提高软件的安全性。FireDroid 针对 Android 系统内的恶意行为，提供实时的代码执行监控^[170]。它通过对应用交互信息、调用系统功能等进行安全检测，及时发现可疑的危险行为，提高 Android 系统的安全性。KARMA 是一种针对 Android 内核进行自动无重启的安全修复的方法^[171]。它提供一个多层适配的内核修复模型，针对不同

类型的 Android 设备和内核版本，提供多维度的安全保护，使恶意行为无法影响到整个系统。KARMA 在 520 个测试设备上仅产生了额外 1% 的负载。此外，安全化代码的执行环境也能间接提高代码安全性，如虚拟空间布局随机化^[172]、沙盒安全策略^[173]、控制流完整性（CFI）检查^[174]、代码可执行保护（DEP）^[175]、利用 Intel SGX^[176] 和 TrustZone^[177] 来防止代码被恶意执行。

国内研究人员也在代码加固方面取得不错进展。张超等人提出了一种基于二进制代码的加固方案^[178]，通过静态分析在没有源代码的前提下，对二进制代码进行加固，可有效防止虚表劫持与虚表注入攻击。Chen Ping 等人提出了一种针对 JIT 喷射攻击的防御机制^[179]，通过对 JIT 编译器源代码的修改，引入随机数生成器，使得动态生成代码难以预测，从而令攻击者难以使用动态生成代码构造攻击链。王铁磊等人提出了一种利用竞态条件的方法，对 JIT 编译器进行攻击^[180]。当前 JIT 编译器（JavaScript、ActionScript）大多支持多线程编程。利用多线程之间存在的竞态条件，攻击者可以修改动态生成代码并实施攻击。在此基础上，王铁磊提出了一种类沙盒架构，使得不可信任代码运行在分离的进程中，并造成攻击者难以对竞态条件进行利用。中科院王文浩等人提出 Intel SGX 中的侧信道攻击^[181-182]。这种攻击能够窃取到内存中的隐私数据。随后他们提出一种基于 LLVM 的 SGX 插桩程序 HyperRace^[183]，能够有效地消除侧信道攻击带来的威胁。

对比国内外工作，近年来国外研究工作大多是基于源代码对某一类漏洞类型或者某一类攻击方法进行代码加固，通常是使用 LLVM 对源代码进行预处理并生成 IR 中间代码，再在此基础上加入各种加固规则来实现代码加固的目标。TypeSan^[184] 是比较典型的针对一特定漏洞类型（类型混淆）来进行代码加固。TypeSan 在 IR 的基础上通过对 C++ 中类的继承关系进行分析，并在代码生成阶段插入检测指令，从而达到在运行过程中阻止类型混淆发生的目的。控制流完整性检测是针对控制流劫持这一类攻击方法产生的加固手段。IFCC^[185] 同样是基于 LLVM 的代码加固。在生成了目标代码 IR 之后，通过程序分析生成控制流图。在程序中可能会发生控制流劫持的点插入检测代码，通过对转跳的目标地址与控制流图中的有效地址来进行判断。在经过了多年的改进与研究之后，基于 LLVM 的控制流完整性检测已被集成入最新的 Android P 的编译器中^[186]。国内的代码加固工作则主要是针对某一类攻击行为的加固。如前所述，文献 [178-180, 187] 中的工作都是通过对某一类特定的攻击行为进行研究，掌握其攻击原理或者提取出其攻击特征，并在此基础上针对这一类特定的攻击行为在源代码层面或二进制代码层面进行修改加固。另外，现有国内外的研究工作更倾向于基于规则的代码加固，人工智能并未得到广泛的使用。因此，如何利用人工智能技术来进一步提升代码加固的效率和效果成为广大研究人员所面临的巨大机遇和挑战。

5 基于 AI 的智能系统：基于 AI 的系统软件优化与缺陷检测

系统软件往往存在大量的人为设定规则，如 CPU 缓存加载与清除机制，以及基于启

发的算法部件，如基于优先级的任务调度器。与此同时，AI 算法多能对复杂的功能进行近似模拟。自然地，研究人员尝试将 AI 的研究成果应用到系统软件中，以提升系统软件的性能表现、可靠性、可用性等指标。

5.1 基于日志挖掘的系统故障检测与诊断

在很多数据中心和云计算平台中，部署着大规模的软件系统。由于大规模软件系统具有规模大、逻辑复杂、并发性高、错误难以定位等特点，如何检测和诊断系统故障对系统开发者和维护者构成了极大的挑战。得益于软件系统开发的规范性要求，软件系统运行过程的很多状态信息都会被输出到日志文件中，日志文件对于理解系统状态和发现潜在的性能问题很有帮助。因此，如何从日志文件中挖掘出有价值的信息以辅助系统故障的检测和诊断，引发了很多工作的探索。

已有的基于日志挖掘的方法可以分为五类，分别为基于规则的方法^[83]、基于日志统计特征的主成分分析方法^[84-86]、基于贝叶斯网络的故障定位^[87]、基于不变性挖掘的共现模式匹配方法^[88-89]、基于深度学习的方法^[90]。

基于规则的方法^[83]首先人为给定规则集，然后根据规则集对日志进行匹配和规则推理，从而达到检测和诊断异常事件的目的。该类方法的缺点在于，领域知识的缺乏和事件之间复杂的关系导致规则集很难编写。另外，规则推理这一过程非常耗时，使得基于规则的方法不适用于大规模的日志。基于日志统计特征的主成分分析方法^[84-86]结合日志和源代码，能够将非结构化数据转化成结构化数据，并构造得到日志的统计特征，然后利用主成分分析方法在线检测与诊断系统故障。基于贝叶斯网络的故障定位^[87]通过构建故障推理贝叶斯网络，来推理得到每个模块包含故障的概率。基于不变性挖掘的共现模式匹配方法^[88-89]根据程序执行流存在的不变性先验，挖掘不同事件共同出现的模式，然后通过检验共现模式是否满足条件来判断异常事件的发生。这种方法只能捕获事件之间的线性关系。基于深度学习的方法^[90]利用日志中事件类型的信息和事件变量的信息，包括时间戳、事件变量值等，通过长短期记忆网络学习事件的非线性关系，并输出事件变量值，然后比较预测值跟输入值是否匹配来判断是否发生异常事件。该方法能实时接收用户的反馈，从而修正模型，并能够在线更新模型。

5.2 基于机器学习的分布式资源分配

对于分布式计算任务，人们总是希望能够找到高效的计算资源分配（调度）的方式，使得计算任务在尽量快速完成的同时，计算资源能够得到充分利用。

传统的方法采用硬编码策略或者启发式策略来进行计算资源分配。近年来，研究人员提出了基于机器学习（尤其是强化学习）的方法来进行计算资源分配，让机器自己通过自我学习获得更好的资源分配策略。

Hongzi Mao 等人提出 DeepRM^[90]，实现对集群中多任务和多种资源（例如内存、

I/O、CPU 等资源) 进行调度。DeepRM 使用基于 Policy Gradient 的强化学习算法^[91], 采用神经网络作为决策器, 以当前资源分配图和任务等待序列作为神经网络的输入。DeepRM 取得了比非机器学习调度算法(例如 SJF 和 Tetris^[92])更好的性能。

在神经网络的训练中, 人们也使用深度强化学习方法对神经网络中各个节点进行计算资源(CPU 和多 GPU)的分配, 从而最大限度地减少神经网络的运行时间。Mirhoseini 等人^[93]提出了基于序列对序列的深度强化学习模型来对网络中的节点进行人工分类, 然后分配采样, 最后通过最小化网络运行时间来更新分配模型。实验结果显示深度强化学习模型在一些著名的深度学习模型(例如 Inception-V3、RNNLM、Neural Turing Machine)上进行计算资源分配的效果比人工专家的分配方法、传统图节点分割分配方法和 TensorFlow^[94]内置的分配机制要好。该方法的缺点在于网络中的节点分类是人工分类。之后 Mirhoseini 提出一种改进方案^[95], 将节点的人工分类过程用一个神经网络来代替, 效果比之前的人工分类方法有明显提升, 但同时也带来资源分配模型训练时间增长的缺点。Spotlight^[96]将问题使用 MDP 形式化, 并且使用了 PPO (Proximal Policy Optimization)^[97]算法, 显著缩短了分配网络的训练时长, 同时对深度学习模型的计算分配结果也更为合理。

目前已有的方法主要还在实验模拟中, 如何将其真正投入实际应用还需要进一步探索。

5.3 基于机器学习的索引构建

传统的索引构建方法, 如 B 树、哈希表、布隆过滤器, 目标都是将关键字映射到对应的位置, 但都没有考虑具体的数据分布。基于机器学习的索引构建方法旨在利用实际的数据分布, 将机器学习的方法引入到索引构建中, 以提高索引性能。

已有基于机器学习的索引构建围绕三类索引任务展开, 包括: 基于 B 树的索引、基于哈希表的索引和基于布隆过滤器的索引。

基于 B 树的索引构建方法, 其特点是记录位置的条目是排好序的。传统的 B 树可以看作基于决策树的模型, 该模型可以很好地利用 Cache 来加速。文献 [98] 使用简单的神经网络模型和决策树模型来构造循环索引模型, 相较于传统模型, 循环索引模型能达到更好的索引效果。

文献 [98] 中还提出了基于机器学习的哈希表索引结构, 它使用了循环索引模型学习哈希函数, 相较于传统的哈希函数, 基于机器学习的哈希表索引结构可以达到更低的冲突率和更低的存储要求, 但查询速度不如传统的哈希函数。

基于布隆过滤器的索引模型的主要目标是判定查询关键字是否存在。文献 [98] 提出了可学习的布隆过滤器模型, 可以达到更低的假正例率和更低的存储要求。文献 [99] 分析了可学习的布隆过滤器的性能与数据分布间的联系, 指出了文献 [98] 中可学习的布隆过滤器的局限性。文献 [100] 改进了之前文献 [98] 中的可学习布隆过滤器, 提出了一种夹心结构的布隆过滤器, 提高了布隆过滤器的性能。

6 发展趋势与展望

分析当前 AI 与系统软件融合协同发展的挑战，并根据软硬件与 AI 技术演化进展分析可能的趋势，分析未来系统 + AI 的可能研究方向与研究问题。

6.1 面向 AI 的系统：AI 系统的扩展与优化技术

通过对关于 AI 系统扩展与优化技术的国内外现状的分析，该领域存在以下技术趋势：更高效的 AI 系统、自动化 AI 系统、云端化 AI 系统、定制化 AI 系统和自主化 AI 系统。

更高效的 AI 系统 AI 系统性能和扩展性还有很大提升空间，针对大规模数据的复杂深度学习网络的训练需要的计算资源成本和时间成本都还很高，虽然 TensorFlow 等平台的出现可以解决很多需求，对于单设备或多设备数据并行这种简单场景的支持已经非常优秀，但在模型更大或者神经网络拓扑更复杂时，通用框架的易用性和效率都大打折扣。TensorFlow 等平台都还处于高速的发展阶段，软硬件结合，存储、网络、芯片等多层次结合的优化都是值得探索的方向。

自动化 AI 系统 基于大数据的机器学习过程包含复杂的数据处理、分析、模式提取和知识发现过程，基于现有的 AI 平台，学习曲线高、开发代价大，需要为领域数据科学家提供简单易用的“拼装式”机器学习分析环境，研究 AutoML 技术支持机器学习模型的自动生成和自动调参，实现 AI 智能分析一体化支撑。

云端化 AI 系统 指 AI 软件系统逐渐转向在线使用的方式，通过浏览器进行代码编辑、执行、可视化展现，算法、数据源以在线 API 形式提供，不需要本地进行软件的安装和维护，同时提供数据的在线管理。这需要在保障数据安全和隐私的前提下，建立基于云模式的 AI 大数据挖掘分析工作环境。同时通过云平台强大的分布式计算引擎，支持大数据的高效分析处理。

定制化 AI 系统 指 AI 具有广泛应用领域，不同领域也都有各自的分析模式，一个通用的机器学习系统无法满足一个特定领域数据科学家的个性化分析需求。在数据层面，不同科学家面向的数据类型不同；在算法模型领域，不同领域需要非常多的通用算法库无法提供的领域算法；在可视化方面，不同领域需要不同的展示方式。因此一个理想的机器学习系统应该支持数据、模型和可视化视图多个方面的定制，支持每个领域数据科学家开发特有的组件。

自主化 AI 系统 从本文的调研看，绝大多数广泛使用的 AI 系统均为国外开发者发布，因为其开源特性，国内的开发者可以应用这些系统开展 AI 的研究。AI 系统是十分关键的系统软件，目前国家十分重视核心关键软件的自主可控，因此亟待国内的研究团队和企业界研制具有自主知识产权的 AI 系统，并将优秀 AI 系统开源共享给社区，通过

社区力量使其不断完善强大。

6.2 面向 AI 的系统：类脑神经网络计算系统

在摩尔定律已接近尾声这一趋势下，需要融合材料、物理、微电子、生物（计算神经学）与计算机等多学科前沿进展，以新的计算器件、新的存储/存算器件和新的通信器件为基础，以新的计算原理、计算模型与应用为牵引，研发突破“冯·诺依曼”瓶颈的颠覆性计算机体系结构以及相应的软硬件系统，包括类脑计算（brain-inspired）等。

类脑计算经过几十年的发展，已取得令人欣喜的成果，但是仍受限于人对复杂神经系统的认知。随着实验技术的进步与解剖学、生物学和生理学等相关领域研究的发展，人类必将对大脑的计算模式有更深、更多的了解。类脑计算将是未来很长一段时间内科学技术研究的热点和前沿。

首先，从系统软件角度来看，为了在硬件层次提高芯片的性能，需要首先在软件层次进行仿真。因此需要开发一定的软件平台进行算法或模型的类脑计算仿真和模拟。如果能够在软件仿真方面发现算法或模型取得突破性进展，加上硬件的加速，就可以促进芯片性能的提升。同时，软硬件协同设计方法将会推动类脑计算快速发展。再者，在计算模型方面 SNN 训练算法的理论发展还不够成熟，研究具有高效信息处理能力的基于完全时间编码的多层 SNN，将为 SNN 在类脑计算领域中的应用提供有效的计算模型和理论基础。最后，类脑计算技术的发展将推动图像识别、语音识别、自然语言处理等前沿技术的突破，机器人视听感知和自主学习是很有希望的应用方向。

6.3 基于 AI 的智能系统：基于 AI 的系统安全技术

进入 21 世纪，随着软件系统和网络基础设施的快速发展，其中的安全问题层出不穷，并有愈演愈烈的趋势，这导致网络空间的安全形势越来越严峻。攻击者和防御者都在各自擅长的领域继续成长，并在多个技术领域展开竞争。此外，随着信息时代的继续发展，人工智能成为解决安全问题强有力的助推器。随着新兴领域的不断出现，如移动平台、物联网和工控系统，人工智能的发展和应用也面临着极大的挑战和机遇。本节将从解决这些安全问题的技术上的缺点和壁垒，结合当前大数据和人工智能领域的发展，提出以下几点发展趋势和展望，为未来的相关安全研究工作提供方向和方法指导。

领域内强智能的漏洞和恶意代码检测 虽然研究人员在漏洞检测和恶意代码检测中开展了诸多工作，并取得丰厚的成果。然而大部分的工作仍然面临着两方面的问题：第一，基于规则和漏洞签名的检测方法不具有通用性，只能对特定的漏洞类型有较好的检测效果，并且这样的方法无法对轻微的代码更动进行很好的漏洞检测；第二，目前的基于特征提取和机器学习进行漏洞检测和加固的技术往往受制于训练数据集的优劣，并且不恰当的特征提取容易造成过度拟合，弱化对新的软件漏洞的检测能力。因此如何构建一种特定领域的强智能是未来的发展趋势，如让机器能够识别恶意软件的变种，检测出

零日漏洞和恶意代码等。

系统化和通用化的代码加固策略 目前的代码加固技术主要关注在安全补丁的生成，而忽视了动态修改的重要性；或者只关注某一特定漏洞和攻击的加固，而失去了通用性。在十几年的发展中，安全人员已经对成千上万的代码进行了修改和修复，但对这些有价值的数据进行系统化学习和利用仍未有比较成熟的系统和方法。随着人工智能在知识获取和知识表达上的发展，相信未来会有大量的工作通过学习已有的代码加固实例来总结和提取加固策略，并能够自动化地针对不同的软件系统、平台、运行环境等信息进行静态或动态的加固。

新兴领域带来的挑战和机遇 经过几十年的发展，安全社区已经衍生和发展出多种高效和精准的安全检测技术，用以检测漏洞、恶意代码和进行代码加固，并催生了众多相关的安全软件公司，推动先进技术的实施和商业部署。然而，近几年移动设备、物联网和工控系统得到急速扩张和发展，不法分子已经开始将目标转移到这些领域来牟取利益。跟传统的软件系统相比，这几类领域采用许多新的硬件设备、体系架构和编程语言，软件系统处在不同的网络或主机环境中。因此，在进行相关安全检测和加固活动中，安全人员需要提出新的检测和加固技术来适应不同的应用领域。

人工智能鲁棒性的要求提升 随着人工智能在安全领域内的大量应用和良性发展，基于人工智能的安全产品持续为大家提供一个较为安全的网络环境。但是，过度依赖人工智能就会放大人工智能自身的缺陷和弱点。例如基于机器学习的恶意代码检测技术存在被攻破的风险^[190]，这几类攻击除了能够极度降低检测准确率之外，还能够窃取训练数据，导致安全系统的数据泄露。因此，人工智能的安全性也将伴随着安全需求的增加而得到进一步发展。

大数据挖掘技术将进一步提升 在未来的漏洞、恶意代码检测和加固方面，不可避免地要用到大数据和大数据挖掘技术。因此在数据挖掘过程中就会面临诸多挑战，如研究人员搜集的数据集中存在严重的类不平衡问题，从而导致基于机器学习的模型的预测性能降低。安全数据抽象和表达方面的不足，使目前产生的数据无法有效和快速地利用到安全防护中。因此，如何构建安全知识系统以辅助安全防护任务，甚至在该知识系统中进行推理获取更多未知的安全知识，具有美好的发展和应用前景。

机器学习与边缘计算 在5G与物联网时代，将机器学习应用于边缘计算的设备中具有众多意义。首先，机器学习技术可以用来识别持续升级改进的网络威胁。机器学习在边缘应用的另一种方式是用于环境和野生动物领域的管理。例如，在森林管理行业已看到机器学习应用于预测和优化再造林目的树种选择。此外，在油井或加油站等场景中，边缘机器学习正在应用于远程监控和预测性维护等。相比于将数据发送到云端进行计算，在边缘设备上进行机器学习不仅能够更好地保护数据隐私性，而且能够避免数据传输带来的额外延时。

6.4 AI 和系统：面向AI系统安全的对抗学习技术

即使机器学习应用存在被对抗样本攻击的风险，其在精准度、实现难度方面都有无

可比拟的优势。毫无疑问，即使在安全相关领域，机器学习也将继续并且长期发挥重要作用。考虑到对抗样本攻击带来的严重后果，可以预见的是，对抗样本的检测将会成为一个持续的研究方向和热点。

现阶段对抗样本检测手段大多基于黑盒假设，即寻找一种攻击者不知道的检测指标，用样本是否超标来判定其是否为对抗样本。而显然这种模型并不能在真实场景中取得好的防御效果，因为攻击者比防御者往往更了解防御技术。对有经验的攻击者来说，绕过这些防御技术并不是件难事。

基于白盒假设的对抗样本防御 下一阶段的对抗样本防御工作将会集中在白盒假设上，即提出一种检测指标，使得攻击者即使知道指标算法的情况也无法利用被干扰的检测指标，从而达到较好的防御效果。白盒假设下的检测方法是非常具有挑战性的，但只有白盒假设下的防御方法才能提供有效的安全性保障，从根本上减少对抗样本被生成的概率。

云平台上面向大数据的对抗样本防御 机器学习，特别是深度学习不可避免地会接收大数据和云平台的洗礼。如何结合云平台提供的海量计算能力，结合攻击者获取不到的海量数据设计对抗样本检测方案可能成为下一个热点。现在的对抗样本检测方法并没有利用到海量样本数据，所以很有可能在云平台上检验大量数据之后，得到攻击者不可绕过的检测指标。

7 结束语

AI 当前方兴未艾，与系统软件的深入融合为 AI 提供了强大的算力与开发、调试、维护框架，推动了 AI 的发展。另外，如何将 AI 应用到系统软件从而提升性能与安全等也存在很大的潜力。本文对 AI 与系统软件的相互融合与促进的研究进展进行了分析，探索了二者融合的发展趋势，以期对这两个领域的研究者与实践者提供参考。

致谢

本文是在 CCF 系统专委会的组织与指导下完成的。专委李宣东主任、王林章秘书长统筹了整个组稿过程，申富饶老师也对本文提供了宝贵的材料与意见。CCF 评审专家对本文提出了很多宝贵意见，对本文结构优化、调研方向与范围具有很大的帮助。

参考文献

- [1] Joseph E. Gonzalez. Emerging Systems for Large-Scale Machine Learning[J]. Tutorial on ICML, 2014.

- [2] 中国计算机学会大数据专家委员会. 2014 年中国大数据技术与产业发展白皮书[R]. 2014.
- [3] Apache Spark MLlib[OL]. <https://spark.apache.org/docs/1.2.0/mllib-guide.html>.
- [4] Ghoting A, Krishnamurthy R, Pednault E, et al. SystemML: Declarative machine learning on MapReduce [C]. International Conference on Data Engineering (ICDE), 2011: 231-242.
- [5] Matthias Boehm S T, Berthold Reinwald P S, Yuanyuan Tian D R, et al. Hybrid parallelization strategies for large-scale machine learning in SystemML[C]. the VLDB Endowment, 2014. 7(7).
- [6] Rong Gu, Yun Tang, Chen Tian, Hucheng Zhou, Guanru Li, Xudong Zheng, Yihua Huang. Improving Execution Concurrency of Large-Scale Matrix Multiplication on Distributed Data-Parallel Platforms[C]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2017, 28(9): 2539-2552.
- [7] Octopus[OL]. <http://pasa-bigdata.nju.edu.cn/octopus/>.
- [8] Low Y, Bickson D, Gonzalez J, et al. Distributed GraphLab: a framework for machine learning and data mining in the cloud[J]. the VLDB Endowment, 2012, 5(8): 716-727.
- [9] GraphX[OL]. <https://spark.apache.org/graphx/>.
- [10] Li, Mu, et al. Scaling distributed machine learning with the parameter server[C]. Operating Systems Design and Implementation (OSDI), 2014: 583-598.
- [11] Parameter Server[OL]. <http://www.parameterserver.org/>.
- [12] Petuum: A Framework for Iterative-Convergent Distributed ML[OL]. <http://petuum.github.io/>.
- [13] Ho Q, Cipar J, Cui H, et al. More effective distributed ml via a stale synchronous parallel parameter server[C]. Advances in neural information processing systems(NIPS), 2013: 1223-1231.
- [14] Jie Jiang, Lele Yu, Jiawei Jiang, Yuhong Liu, Bin Cui. Angel: a new large-scale machine learning system[C]. National Science Review (NSR), 2017.
- [15] Yi Wang, Xuemin Zhao, Zhenlong Sun, et al. Peacock: Learning Long-Tail Topic Features for Industrial Applications[C]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2015.
- [16] Alluxio[OL]. <http://www.alluxio.org/>.
- [17] Carbone P, Katsifodimos A, Ewen S, et al. Apache flink: Stream and batch processing in a single engine [J]. Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering, 2015, 36(4).
- [18] Bifet A, Maniu S, Qian J, et al. StreamDM: Advanced data mining in Spark streaming[C]. Data Mining Workshop (ICDMW), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 1608-1611.
- [19] Yuan J, Gao F, Ho Q, et al. Lightlda: Big topic models on modest computer clusters[C]. the 24th International Conference on World Wide Web, International World Wide Web Conferences Steering Committee, 2015: 1351-1361.
- [20] Thornton C. Auto-WEKA: combined selection and hyperparameter optimization of supervised machine learning algorithms[R]. 2014.
- [21] Feurer M, Klein A, Eggensperger K, et al. Efficient and robust automate machine learning [J]. Ecological Informatics, 2015, 30: 49-59.
- [22] Zoph B, Vasudevan V, Shlens J, et al. Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition[R]. 2017.
- [23] Moritz P, Nishihara R, Wang S, et al. Ray: A Distributed Framework for Emerging AI Applications[J]. arXiv preprint arXiv: 1712.05889, 2017.
- [24] Sparks E R, Venkataraman S, Kaftan T, et al. Keystoneml: Optimizing pipelines for large-scale advanced analytics[C]. Data Engineering (ICDE), 2017 IEEE 33rd International Conference on. IEEE, 2017:

535-546.

- [25] Crankshaw D, Wang X, Zhou G, et al. Clipper: A Low-Latency Online Prediction Serving System[C]. NSDI, 2017: 613-627.
- [26] Barnes J. Azure Machine Learning[J]. Microsoft Azure Essentials. 1st ed, Microsoft, 2015.
- [27] AWS 上的机器学习[OL]. <https://aws.amazon.com/cn/machine-learning/>.
- [28] Kraska T, Talwalkar A, Duchi J, et al. MLbase: A Distributed Machine- learning System [J]. Cidr, 2013.
- [29] 星云 Clustar[OL]. <http://36kr.com/p/5126024.html>.
- [30] Gerbessiotis A V, Valiant L G. Direct bulk-synchronous parallel algorithms[J]. Journal of parallel and distributed computing, 1994, 22(2) : 251-267.
- [31] Eric X, Qirong H, Xie PT, Wei D. Strategies and principles of distributed machine learning on big data [J]. Engineering, 2016, 2(2) : 179-195.
- [32] Kim J K, Ho Q, Lee S, et al. STRADS: a distributed framework for scheduled model parallel machine learning[C]. Proceedings of the Eleventh European Conference on Computer Systems, ACM, 2016: 5.
- [33] Martin AZ, Markus W, Alexander S, Li LH. Parallelized stochastic gradient descent[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2010: 2595-2603.
- [34] Meng X R, Joseph B, Burak Y, Evan S, Shivaram V, Davies L, Jeremy F, DB T, Manish M, Sean O, Doris X, Reynold X, Michael J F, Reza Z, Matei Z, Ameet T. MLLib: Machine learning in apache spark [J]. The Journal of Machine Learning Research, 2016, 17(1) : 1235-1241.
- [35] Zhang Y C, Michael I J. Splash: User- Friendly programming interface for parallelizing stochastic algorithms[J]. arXiv: 1506.07552 , 2015.
- [36] Liu D C, Nocedal J. On the limited memory BFGS for large scale optimization [J]. Mathematical Programming, 1989, 45(1) : 503-528.
- [37] Eliasmith C, Stewart T C, Choo X, et al. A large- scale model of the functioning brain[J]. science, 2012, 338(6111) : 1202-1205.
- [38] Reimann M W, Anastassiou C A, Perin R, et al. A biophysically detailed model of neocortical local field potentials predicts the critical role of active membrane currents[J]. Neuron, 2013, 79(2) : 375-390.
- [39] Brette R, Rudolph M, Carnevale T, et al. Simulation of networks of spiking neurons: a review of tools and strategies[J]. Journal of computational neuroscience, 2007, 23(3) : 349-398.
- [40] Beyeler M, Carlson K D, Chou T S, et al. CARLsim 3: A user-friendly and highly optimized library for the creation of neurobiologically detailed spiking neural networks[C]. 2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). [S. l.]: IEEE, 2015: 1-8.
- [41] Gewaltig M O, Diesmann M. NEST (neural simulation tool)[J]. Scholarpedia, 2007, 2(4) : 1430.
- [42] Pecevski D, Natschläger T, Schuch K. PCSIM: a parallel simulation environment for neural circuits fully integrated with python[J/OL]. Frontiers in Neuroinformatics, 2009, 3: 11. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/neuro.11.011.2009>.
- [43] Hines, Michael L, Carnevale Nicholas T. The NEURON simulation environment [J]. NEURON, 2006 (9).
- [44] Yavuz E, Turner J, Nowotny T. GeNN: a code generation framework for accelerated brain simulations [J]. Scientific reports: 10.1038/srep18854 , 2016, 6.
- [45] Fidjeland A K, Roesch E B, Shanahan M P, et al. NeMo: a platform for neural modelling of spiking

- neurons using gpus [C]. 20th IEEE International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors, 2009. ASAP 2009. [S. l.] : IEEE, 2009 : 137-144.
- [46] Goodman D, Brette R. Brian: a simulator for spiking neural networks in Python[J]. Front. Neuroinform. doi: 10.3389/neuro.11.005.2008.
- [47] Bekolay T, Bergstra J, Hunsberger E, et al. Nengo: a python tool for building large-scale functional brain models[J/OL]. Frontiers in Neuroinformatics, 2014, 7: 48. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fninf.2013.00048>.
- [48] A Davison, D Brereton, J Eppler, J Kremkow, E Muller, D Pecevski, L Perrinet, P Yger. PyNN: a common interface for neuronal network simulators[J]. Frontiers in Neuroinformatics, 2009(2) : 11.
- [49] Cope A, Richmond P, James S S, et al. SpineCreator: a Graphical User Interface for the Creation of Layered Neural Models[J]. Neuroinformatics (2016). doi:10.1007/s12021-016-9311-z.
- [50] Schemmel J, Grubl A, Hartmann S, et al. Live demonstration: A scaled-down version of the brainscales wafer-scale neuromorphic system [C]. 2012 IEEE international symposium on Circuits and systems (ISCAS). [S. l.] : IEEE, 2012 : 702-702.
- [51] Furber S B, Lester D R, Plana L A, et al. Overview of the spinnaker system architecture[J]. IEEE Transactions on Computers, 2013, 62(12) : 2454-2467.
- [52] Cheung K, Schultz S R, Luk W. NeuroFlow: A general purpose spiking neural network simulation platform using customizable processors[J/OL]. Frontiers in Neuroscience, 2016, 9: 516. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnins.2015.00516>.
- [53] Merolla P A, Arthur J V, Alvarez-Icaza R, et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface[J]. Science, 2014, 345(6197) : 668-673.
- [54] Amir A, Datta P, Risk W P, et al. Cognitive computing programming paradigm: a corelet language for composing networks of neurosynaptic cores [C]. The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). [S. l.] : IEEE, 2013 : 1-10.
- [55] Esser S K, Merolla P A, Arthur J V, et al. Convolutional networks for fast, energy-efficient neuromorphic computing [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016: 113(41), 11441-11446.
- [56] Benjamin B V, Gao P, McQuinn E, et al. Neurogrid: A mixed-analog-digital multichip system for large-scale neural simulations[J]. the IEEE, 2014, 102(5) : 699-716.
- [57] Merolla P, Arthur J, Alvarez R, et al. A multicast tree router for multichip neuromorphic systems[C]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(3) : 820-833.
- [58] Eliasmith C, Anderson C H. Neural engineering: Computation, representation, and dynamics in neurobiological systems[M]. Cambridge: MIT press, 2004.
- [59] Davies, Mike, et al. Loihi: A Neuromorphic Manycore Processor with On-Chip Learning[C]. IEEE Micro, 2018.
- [60] C Lin, et al. Programming Spiking Neural Networks on Intel's Loihi[J]. Computer, 2018, 51(3) : 52-61.
- [61] S Yu, et al. An electronic synapse device based on metal oxide resistive switching memory for neuromorphic computation[C]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58: 2729.
- [62] B Jackson, et al. Nanoscale electronic synapses using phase change devices [C]. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems, 2013, 9: 12.
- [63] O Bichler, et al. Visual pattern extraction using energy-efficient ‘2-PCM Synapse’ neuromorphic architecture[C]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59: 2206.

- [64] Mahoward M A, Mead C A. The silicon retina[J]. *Scientific American*, 1991, 264(5) : 76-82.
- [65] Liu S C, Delbruck T. Neuromorphic sensory systems[J]. *Current opinion in neurobiology*, 2010, 20(3) : 288-295.
- [66] Yifei Liu, Xiaoyu Yu, Shoushun Chen, Wei Tang. Object Localization and Size Measurement Using Networked Address Event Representation Imagers [C]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16 (9) : 2894-2895.
- [67] Garrick Orchard, Cedric Meyer, Ralph Etienne-Cummings, Christoph Posch, Nitish Thakor, Ryad Benosman. HFirst: A Temporal Approach to Object Recognition [C]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2015, 37(10) : 2028-2040. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2392947.
- [68] Li Cheng-Han, Tobi Delbruck, Shih-Chii Liu. Real-time speaker identification using the AEREAR2 event-based silicon cochlea [C]. *Circuits and Systems (ISCAS)*, IEEE International Symposium on. IEEE, 2012.
- [69] J Hu, H Tang, K C Tan, H Li, L Shi. A Spike-Timing Based Integrated Model for Pattern Recognition [J]. *Neural Computation*, 2013, 25(2) : 450-472.
- [70] Q Yu, H Tang, K C Tan, H Li. Rapid Feedforward Computation by Temporal Encoding and Learning with Spiking Neurons [J]. *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems*, 2013, 24 (10) : 1539-1552.
- [71] B Zhao, R Ding, S Chen, B. Linares-Barranco, H Tang. Feedforward Categorization on AER Motion Events using Cortex-like Features in a Spiking Neural Network[J]. *IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems*. DOI: 10.1109/TNNLS.2014.2362542, 2015.
- [72] G Bi, M Poo. Distributed synaptic modification in neural networks induced by patterned stimulation[J]. *Nature*, 1999, 401(6755) : 792-796.
- [73] J Gjorgjieva, C Clopath, J Audet, J-P Pfister. A triplet spike-timing-dependent plasticity model generalizes the Bienenstock-Cooper-Munro rule to higher-order spatiotemporal correlations[C]. *the National Academy of Sciences*, 2011, 108(48) : 19383-19388.
- [74] S McKennoch, T Voeglin, L Bushnell. Spike timing error backpropagation in theta neuron networks[J]. *Neural Computation*, 2009, 21(1) : 9-45.
- [75] S Ghosh-Dastidar, H Adeli. A new supervised learning algorithm for multiple spiking neural networks with application in epilepsy and seizure detection[J]. *Neural Networks*, 2009, 22(10) : 1419-1431.
- [76] Diehl P U, Neil D, Binas J, et al. Fast-Classifying, High-Accuracy Spiking Deep Networks Through Weight and Threshold Balancing[R]. 2015
- [77] Cao Y, Chen Y, Khosla D. Spiking Deep Convolutional Neural Networks for Energy-Efficient Object Recognition[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2014: 1-13.
- [78] Eric Hunsberger, Chris Eliasmith. Training Spiking Deep Networks for Neuromorphic Hardware [J]. arXiv: 1611.05141.
- [79] L P Shi, Jing Pei, Ning Deng, Dong Wang, Lei Deng, Yu Wang, Youhui Zhang, et al. Development of a Neuromorphic Computing System[C]. *IEDM*, 2015.
- [80] Yu Ji, Youhui Zhang, Wenguang Chen, Yuan Xie. Bridge the Gap between Neural Networks and Neuromorphic Hardware with a Neural Network Compiler[C]. *the Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, ASPLOS 2018, Williamsburg, VA, USA, March 24-28, 2018.

- [81] Ji, Yu, YouHui Zhang, ShuangChen Li, Ping Chi, CiHang Jiang, Peng Qu, Yuan Xie, WenGuang Chen. NEUTRAMS: Neural network transformation and co-design under neuromorphic hardware constraints[C]. 49th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO), 2016: 1-13. doi: 10.1109/MICRO.2016.7783724.
- [82] Peng Yao, Huaqiang Wu, Bin Gao, et al. Face Classification using Electronic Synapses[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15199.
- [83] Kenji Yamanishi, Yuko Maruyama. Dynamic Syslog Mining for Network Failure Monitoring[C]. ACM SIGKDD, 2005.
- [84] Wei Xu, Ling Huang, Armando Fox, David Patterson, Michael I Jordan. Detecting Large-Scale System Problems by Mining Console Logs[C]. SOSP, 2009.
- [85] Wei Xu, Ling Huang, Armando Fox, David Patterson, Michael I Jordan. Online system problem detection by mining patterns of console logs[C]. ICDM, 2009.
- [86] Wei Xu, Ling Huang, Armando Fox, David Patterson, Michael I Jordan. Detecting Large-Scale System Problems by Mining Console Logs (Invited Applications Paper)[C]. ICML, 2010.
- [87] 柳永坡,吴际,金茂忠,杨海燕,贾晓霞,刘雪梅. 基于贝叶斯统计推理的故障定位实验研究[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(4) : 707-715.
- [88] Jian-Guang Lou, Qiang Fu, Sheng-Qi Yang, Ye Xu, Jiang Li. Mining Invariants from Console Logs for System Problem Detection[C]. USENIX ATC, 2010.
- [89] Shi-Lin He, Jie-Ming Zhu, Pin-Jia He, Michael R Lyu. Experience Report: System Log Analysis for Anomaly Detection[C]. ISSRE, 2016.
- [90] Min Du, Fei-Fei Li, Gui-Neng Zheng, Vivek Srikumar. DeepLog: Anomaly Detection and Diagnosis from System Logs through Deep Learning[C]. CCS, 2017.
- [91] Hongzi Mao, Mohammad Alizadeh, Ishai Menache, Srikanth Kandula. Resource management with deep reinforcement learning[C]. ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 2016: 50-56.
- [92] Richard S Sutton. Policy gradient methods for reinforcement learning with function approximation[C]. Neural Information Processing Systems, 1999, 12: 1057.
- [93] Robert Grandl, Ganesh Ananthanarayanan, Srikanth Kandula, Sriram Rao, Aditya Akella. Multi-resource packing for cluster schedulers[C]. SIGCOMM, 2014: 455-466.
- [94] Azalia Mirhoseini, Hieu Pham, Quoc V Le, Benoit Steiner, Rasmus Larsen, Yuefeng Zhou, Naveen Kumar, Mohammad Norouzi, Samy Bengio, Jeff Dean. Device placement optimization with reinforcement learning[C]. International Conference on Machine Learning, 2017: 2430-2439.
- [95] Martín Abadi, Paul Barham, Jianmin Chen, Zhifeng Chen, Andy Davis, Jeff Dean, Matthieu Devin, Sanjay Ghemawat, Geoffrey Irving, Michael Isard, et al. TensorFlow: A system for large-scale machine learning[C]. Operating Systems Design and Implementation, 2016(16) : 265-283.
- [96] Azalia Mirhoseini, Anna Goldie, Hieu Pham, Benoit Steiner, Quoc V Le, Jeff Dean. A hierarchical model for device placement[C]. International Conference on Learning Representations, 2018.
- [97] Yuanxiang Gao, Li Chen, Baochun Li. Spotlight: Optimizing device placement for training deep neural networks[C]. International Conference on Machine Learning, 2018.
- [98] John Schulman, Filip Wolski, Prafulla Dhariwal, Alec Radford, Oleg Klimov. Proximal policy optimization algorithms[J]. arXiv preprint arXiv: 1707.06347, 2017.
- [99] Tim Kraska, Alex Beutel, Ed H Chi, Jeff Dean, Neoklis Polyzotis. The case for learned index structures

- [C]. the International Conference on Management of Data (SIGMOD) , 2018.
- [100] Michael Mitzenmacher. A model for learned Bloom filters and related structures [J]. arXiv preprint arXiv: 1802. 00884 , 2018.
- [101] Michael Mitzenmacher. Optimizing learned Bloom filters by sandwiching [J]. arXiv preprint arXiv: 1803. 01474 , 2018.
- [102] Carlini, Nicholas, David Wagner. Towards Evaluating the Robustness of Neural Networks [C]. 38th IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). IEEE , 2017.
- [103] Gong, Zhitao, Wenlu Wang, Wei-Shinn Ku. Adversarial and clean data are not twins [J]. arXiv preprint arXiv: 1704. 04960(2017) .
- [104] Carlini, Nicholas, David Wagner. Adversarial examples are not easily detected: Bypassing ten detection methods[C]. the 10th ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security , 2017.
- [105] Papernot, Nicolas, et al. Distillation as a Defense to Adversarial Perturbations Against Deep Neural Networks[C]. 2016 IEEE Symposium on Security and Privacy, SP 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. , 2016.
- [106] Meng, Dongyu, Hao Chen. Magnet: a two-pronged defense against adversarial examples[C]. the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. ACM , 2017.
- [107] Sharif, Mahmood, et al. Accessorize to a crime: Real and stealthy attacks on state-of-the-art face recognition [C]. the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. ACM , 2016.
- [108] Zhou, Zhe, et al. Invisible Mask: Practical Attacks on Face Recognition with Infrared [J]. arXiv preprint arXiv: 1803. 04683(2018) .
- [109] 刘剑,苏璞睿,杨珉,和亮,张源,朱雪阳,林惠民. 软件与网络安全研究综述[J]. 软件学报,2018, 29(1) : 42-68.
- [110] 国家互联网应急中心. CNCERT 互联网安全威胁报告[R]. 2017.
- [111] " WannaCry" ransomware attack losses could reach \$4 billion[OL]. <https://www.cbsnews.com/news/wannacry-ransomware-attacks-wannacry-virus-losses/>.
- [112] Harer J A, Kim L Y, Russell R L, et al. Automated software vulnerability detection with machine learning[J]. arXiv: 1803. 04497. 2018.
- [113] Ye Y, Li T, Adjeroh D, et al. A survey on malware detection using data mining techniques[J]. ACM Computing Surveys (CSUR) , 2017, 50(3) : 41.
- [114] Charpentier R, Debbabi M. Security Hardening of Open Source Software[C]. the 2006 International Conference on Privacy, Security and Trust. 2006: Article No. 43.
- [115] Shankar U, Talwar K, Foster J S, et al. Detecting Format String Vulnerabilities with Type Qualifiers [C]. the 10th conference on USENIX Security Symposium. 2001 , 10: Article No. 16.
- [116] Yamaguchi F, Golde N, Arp D. Modeling and Discovering Vulnerabilities with Code Property Graphs [C]. the 2014 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP 14). 2014: 590-604.
- [117] Yamaguchi F, Maier A, Gascon H, et al. Automatic Inference of Search Patterns for Taint- Style Vulnerabilities[C]. the 2015 IEEE Symposium on Security and Privacy. 2015: 797-812.
- [118] Qian C, Luo X, Le Y, et al. VulHunter: Toward Discovering Vulnerabilities in Android Applications [J]. IEEE Micro. 2015 , 35(1) : 44-53.
- [119] Eschweiler S, Yakdan K, Gerhards-Padilla E. discovRE: Efficient Cross-Architecture Identification of Bugs in Binary Code[C]. the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS) , 2016.

- [120] Chandramohan M, Xue Y, Xu Z, et al. BinGo: cross-architecture cross-OS binary search[C]. the 2016 24th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering. 2016: 678-689.
- [121] Xu Z, Chen B, Chandramohan M, et al. SPAIN: security patch analysis for binaries towards understanding the pain and pills [C]. the 39th International Conference on Software Engineering (ICSE). 2017: 462-472.
- [122] Li Y, Chen B, Chandramohan M, et al. Steelix: Program-state based binary fuzzing[C]. the 2017 11th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering. 2017: 627-637.
- [123] Wang J, Chen B, Wei L, et al. Skyfire: Data- Driven Seed Generation for Fuzzing [C]. IEEE Symposium on Security and Privacy. 2017: 579-594.
- [124] Blanda A. Fuzzing Android: a recipe for uncovering vulnerabilities inside system components in Android [C]. Black Hat Europe, 2015.
- [125] Shin Y, Meneely A, Williams L, et al. Evaluating complexity, code churn, and developer activity metrics as indicators of software vulnerabilities[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2011, 37(6) : 772-787.
- [126] Zimmermann T, Nagappan N, Williams L. Searching for a needle in a haystack: Predicting security vulnerabilities for windows vista[C]. Third International Conference on Software Testing, Verification and Validation (ICST) , 2010: 421-428.
- [127] Perl H, Dechand S, Smith M, et al. VCCFinder: Finding Potential Vulnerabilities in Open- Source Projects to Assist Code Audits [C]. the 22nd ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS 15) , 2015: 426-437.
- [128] Shin Y, Williams L. Can traditional fault prediction models be used for vulnerability prediction? [J]. Empirical Software Engineering, 2013, 18(1) : 25-59.
- [129] Xu X, Liu C, Feng Q, et al. Neural Network-based Graph Embedding for Cross-Platform Binary Code Similarity Detection [C]. the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 2017: 363-376.
- [130] Pan X, Wang X, Duan Y, et al. Dark Hazard: Learning-based, Large-scale Discovery of Hidden Sensitive Operations in Android Apps[C]. the Network and Distributed System Security Symposium, 2017.
- [131] Neuhaus S, Zimmermann T, Holler C, et al. Predicting vulnerable software components[C]. the 14th ACM conference on Computer and communications security, 2007: 529-540.
- [132] Chowdhury I, Zulkernine M. Using complexity, coupling, and cohesion metrics as early indicators of vulnerabilities[J]. Journal of Systems Architecture, 2011, 57(3) : 294-313.
- [133] Walden J, Stuckman J, Scandariato R. Predicting vulnerable components: Software metrics vs text mining[C]. 2014 IEEE 25th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE), 2014; 23-33.
- [134] Scandariato R, Walden J, Hovsepyan A, et al. Predicting vulnerable software components via text mining[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2014, 40(10) : 993-1006.
- [135] Stuckman J, Walden J, Scandariato R. The Effect of Dimensionality Reduction on Software Vulnerability Prediction Models[J]. IEEE Trans. Reliability, 2017, 66(1) : 17-37.
- [136] Zhang Y, Lo D, Xia X, et al. Combining software metrics and text features for vulnerable file prediction [C]. 20th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS), 2015: 40-49.

- [137] Tang Y, Zhao F, Yang Y, et al. Predicting vulnerable components via text mining or software metrics? an effort-aware perspective[C]. 2015 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS), 2015: 27-36.
- [138] Wu F, Wang J, Liu J, et al. Vulnerability Detection with Deep Learning [C]. 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications, 2017: 1298-1302.
- [139] Wei S, Du X, Hu C, et al. Predicting Vulnerable Software Components Using Software Network Graph [C]. International Symposium on Cyberspace Safety and Security , 2017: 280-290.
- [140] Gan S, Zhang C, Qin X, et al. CollAFL: Path Sensitive Fuzzing[C]. 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), 2018: 660-677.
- [141] LI JUN, ZHANG C. Semantic Sensitive Coverage-based Fuzzing[J]. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering , 2017 .
- [142] You W, Zong P, Chen K, et al. SemFuzz: Semantics-based Automatic Generation of Proof-of- Concept Exploits [C]. the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS 2017) ,2017: 2139-2154.
- [143] Chen P, Chen H. Angora: Efficient Fuzzing by Principled Search [J]. 39th IEEE Symposium on Security and Privacy(S&P) , 2018.
- [144] Böhme M, Pham V T, Roychoudhury A. Coverage-based greybox fuzzing as markov chain[C]. the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security(CCS). ACM, 2016: 1032-1043.
- [145] Stephens N, Grosen J, Salls C, et al. Driller: Augmenting Fuzzing Through Selective Symbolic Execution[C]. Annual Network & Distributed System Security Symposium(NDSS) , 2016, 16: 1-16.
- [146] Hui Peng, Yan Shoshitaishvili, Mathias Payer. T- Fuzz: fuzzing by program transformation[C]. IEEE Symposium on Security and Privacy , 2018.
- [147] Santos I, Devesa J, Brezo F, et al. OPEM: A Static- Dynamic Approach for Machine- learning- based Malware Detection[C]. International Joint Conference CISIS' 12-ICEUTE'12-SOCO'12 Special Sessions , 2012: 271-280.
- [148] Gascon H, Yamaguchi F, Arp D, et al. Structural Detection of Android Malware using Embedded Call Graphs[C]. the 2013 ACM workshop on Artificial Intelligence and Secutirty , 2013: 45-54.
- [149] Arp D, Spreitzenbarth M, Hubner M, et al. Drebin: Effective and Explainable Detection of Android Malware in Your Pocket[C]. the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS) , 2014, 14: 23-26.
- [150] Meng G, Xue Y, Xu Z, Liu, et al. Semantic Modelling of Android Malware for Effective Malware Comprehension, Detection, and Classification [C]. the 25th International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA) ,2016: 306-317.
- [151] Karampatziakis N, Stokes J W, Thomas A, et al. Using file relationships in malware classification[C]. International Conference on Detection of Intrusions and Malware , and Vulnerability Assessment , 2012: 1-20.
- [152] Saxe J, Berlin K. Deep neural network based malware detection using two dimensional binary program features[C]. 2015 10th International Conference on Malicious and Unwanted Software (MALWARE) , 2015: 11-20.
- [153] Hardy W, Chen L, Hou S, et al. DL4MD: A deep learning framework for intelligent malware detection [C]. the International Conference on Data Mining (DMIN) , 2016: 61.

- [154] Xu Z, Wen C, Qin S, et al. Effective malware detection based on behaviour and data features[C]. International Conference on Smart Computing and Communication , 2017: 53-66.
- [155] Wang Z, Tian M, Jia C. An Active and Dynamic Botnet Detection Approach to Track Hidden Concept Drift[C]. International Conference on Information and Communications Security , 2017: 646-660.
- [156] Zhemin Yang, Min Yang, Yuan Zhang, Guofei Gu, Peng Ning, X Sean Wang. AppIntent: Analyzing Sensitive Data Transmission in Android for Privacy Leakage Detection [C]. the 2013 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security , 2013: 1043-1054.
- [157] Nan Y, Yang Z, Wang X, et al. Finding Clues for Your Secrets: Semantics-Driven, Learning-Based Privacy Discovery in Mobile Apps[J]. Network and Distributed Systems Security (NDSS) Symposium, 2018.
- [158] Chen K, Wang P, Lee Y, et al. Finding Unknown Malice in 10 Seconds: Mass Vetting for New Threats at the Google-Play Scale[C]. the 24th USENIX Conference on Security Symposium , 2015: 659-674.
- [159] Meng G, Feng R, Bai G, et al. DroidEcho: an in-depth dissection of malicious behaviors in Android applications[J]. Cybersecurity , 2018, 1(1) : 4.
- [160] Wang Y, Cai W, Wei P. A deep learning approach for detecting malicious JavaScript code[J]. Security and Communication Networks , 2016, 9(11) : 1520-1534.
- [161] Ahmed F, Hameed H, Shafiq M Z, et al. Using Spatio-Temporal Information in API Calls with Machine Learning Algorithms for Malware Detection [C]. the 2nd ACM workshop on Security and artificial intelligence , 2009: 55-62.
- [162] Long F, Rinard M. Automatic patch generation by learning correct code[C]. the 43rd Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL) , 2016: 298-312.
- [163] Long F, Amidon P, Rinard M. Automatic inference of code transforms for patch generation[C]. the 2017 11th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering , 2017: 727-739.
- [164] Gupta R, Pal S, Kanade A, et al. DeepFix: Fixing Common C Language Errors by Deep Learning[C]. AAAI Conference on Artificial Intelligence Thirty- First AAAI Conference on Artificial Intelligence , 2017: 1345-1351.
- [165] Faruki P, Fereidooni H, Laxmi V, et al. Android Code Protection via Obfuscation Techniques: Past, Present and Future Directions[C]. arXiv preprint arXiv: 1611.10231. 2016.
- [166] Rastogi V, Chen Y, Jiang X. DroidChameleon: evaluating Android anti-malware against transformation attacks[C]. the 8th ACM SIGSAC symposium on Information, computer and communications security (ASIA CCS 13) , 2013: 329-334.
- [167] Xue L, Luo X, Yu L, et al. Adaptive unpacking of Android apps[C]. the 39th International Conference on Software Engineering (ICSE 17) , 2017: 358-369.
- [168] Mourad A, Laverdiere M A, Debbabi M. Towards an Aspect Oriented Approach for the Security Hardening of Code[C]. International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops , 2007: 595-600.
- [169] Johnson A, Waye L, Moore S, et al. Exploring and enforcing security guarantees via program dependence graphs[C]. the 36th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation , 2015: 291-302.
- [170] Russello G, Jimenez A B, Naderi H, et al. FireDroid: hardening security in almost-stock Android[C]. the 29th Annual Computer Security Applications Conference , 2013: 319-328.
- [171] Chen Y, Zhang Y, Wang Z, et al. Adaptive Android Kernel Live Patching [C]. the 26th USENIX

- Security Symposium, 2017: 1253-1270.
- [172] Wikipedia, Address Space Layout Randomization[OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Address_space_layout_randomization.
- [173] Backes M, Bugiel S, Hammer C, et al. Boxify: Full-fledged App Sandboxing for Stock Android[C]. the 24th USENIX Conference on Security Symposium, 2015: 691-706.
- [174] Abadi M, Budiu M, Erlingsson U, et al. Control-flow integrity[C]. the 12th ACM conference on Computer and communications security, 2005: 340-353.
- [175] Andersen S, Abella V. Data Execution Prevention[J]. Changes to Functionality in Microsoft Windows XP Service Pack 2, Part 3: Memory Protection Technologies, 2004.
- [176] Frassetto T, Gens D, Liebchen C, et al. JITGuard: Hardening Just-in-time Compilers with SGX[C]. the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 2017: 2405-2419.
- [177] Tian C, Wang Y, Liu P, et al. IM-Visor: A Pre-IME Guard to Prevent IME Apps from Stealing Sensitive Keystrokes Using TrustZone[C]. 2017 47th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), 2017: 145-156.
- [178] Zhang C, Song C, Chen K Z, et al. VTint: Protecting Virtual Function Tables' Integrity[C]. Annual Network & Distributed System Security Symposium(NDSS) , 2015.
- [179] Chen P, Wu R, Mao B. JITSafe: a framework against Just-in-time spraying attacks[J]. IET Information Security, 2013, 7(4): 283-292.
- [180] Song C, Zhang C, Wang T, et al. Exploiting and Protecting Dynamic Code Generation[C]. Annual Network & Distributed System Security Symposium(NDSS) , 2015.
- [181] Wang W, Chen G, Pan X, et al. Leaky cauldron on the dark land: Understanding memory side-channel hazards in SGX[C]. the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 2017: 2421-2434.
- [182] Wang S, Wang W, Bao Q, et al. Binary code retrofitting and hardening using SGX[C]. the 2017 Workshop on Forming an Ecosystem Around Software Transformation, 2017: 43-49.
- [183] Chen G, Wang W, Chen T, et al. Racing in hyperspace: closing hyper-threading side channels on SGX with contrived data races[C]. Racing in Hyperspace: Closing Hyper-Threading Side Channels on SGX with Contrived Data Races, 2018: 388-404.
- [184] Haller I, Jeon Y, Peng H, et al. TypeSan: Practical type confusion detection[C]. Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 2016: 517-528.
- [185] Tice C, Roeder T, Collingbourne P, et al. Enforcing Forward-Edge Control-Flow Integrity in GCC & LLVM[C]. USENIX Security Symposium. 2014: 941-955.
- [186] Compiler-based security mitigations in Android P[OL]. <https://android-developers.googleblog.com/2018/06/compiler-based-security-mitigations-in.html>.
- [187] Yang W, Li J, Zhang Y, et al. APKLancet: tumor payload diagnosis and purification for android applications[C]. the 9th ACM symposium on Information, computer and communications security, 2014: 483-494.
- [188] Rosenberg I, Shabtai A, Rokach L, et al. Generic black-box end-to-end attack against rmns and other api calls based malware classifiers[J]. International Symposium on Research in Attacks, Intrusions and Defenses, 2017.
- [189] Hu W, Tan Y. Generating adversarial malware examples for black-box attacks based on GAN[J]. arXiv

- preprint arXiv: 1702.05983, 2017.
- [190] Anderson H S, Kharkar A, Filar B, et al. Learning to Evade Static PE Machine Learning Malware Models via Reinforcement Learning[J]. arXiv preprint arXiv: 1801.08917, 2018.
- [191] Xuejing Yuan, Yuxuan Chen, Yue Zhao, Yunhui Long, Xiaokang Liu, Kai Chen, Shengzhi Zhang, Heqing Huang, Xiaofeng Wang, Carl A Gunter. CommanderSong: A Systematic Approach for Practical Adversarial Voice Recognition[C]. USENIX Security, 2018.
- [192] Soheil Bahrampour, Naveen Ramakrishnan, Lukas Schott, Mohak Shah. Comparative Study of Deep Learning Software Frameworks[J]. arXiv preprint arXiv: 1511.06435, 2016.
- [193] Shen-Yi Zhao, Ru Xiang, Ying-Hao Shi, Peng Gao, Wu-Jun Li. SCOPE: Scalable Composite Optimization for Learning on Spark[C]. the 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), 2017.
- [194] Hao Zhang, Zeyu Zheng, Shizhen Xu, et al. Poseidon: An Efficient Communication Architecture for Distributed Deep Learning on GPU Clusters[C]. USENIX Annual Technical Conference(ATC), 2017.
- [195] Rong Chen, Jiaxin Shi, Yanzhe Chen, Haibo Chen. PowerLyra: Differentiated Graph Computation and Partitioning on Skewed Graphs[J]. the 10th European Conference on Computer Systems (Best Paper Award), Bordeaux, France, April 2015.
- [196] Jiaxin Shi, Jianfei Chen, Jun Zhu, Shengyang Sun, Yucen Luo, Yihong Gu, Yuhao Zhou. ZhuSuan: A Library for Bayesian Deep Learning[J]. arXiv: 1709.05870, 2017.

作者简介

陈海波 上海交通大学教授，博士生导师。主要研究方向为操作系统、并行与分布式系统等。CCF 杰出会员。



刘杰 中国科学院软件研究所副研究员，硕士生导师。主要研究方向为大数据、机器学习、知识图谱。CCF 会员。



顾荣 南京大学计算机科学与技术系助理研究员。主要研究方向为大数据分布式并行处理系统。CCF 会员。



张悠慧 清华大学计算机科学与技术系教授，博士生导师。主要研究方向为计算机系统结构、类脑计算等。CCF 高级会员，普及工作委员会委员。



陈 恺 中国科学院信息工程研究所研究员，博士生导师。信息安全国家重点实验室副主任，《Cybersecurity》编辑部主任。主要研究领域包括软件与系统安全、人工智能对抗等。CCF 系统软件专委会委员。



孟国柱 中国科学院信息工程研究所副研究员。主要研究方向为移动安全、大数据分析、漏洞检测和代码加固等。CCF 会员。



周 喆 现为复旦大学计算机科学技术学院青年副研究员，2017 年博士毕业于香港中文大学信息工程系。主要研究方向为人工智能系统安全、移动安全。



李武军 南京大学计算机科学与技术系副教授，博士生导师。主要研究方向为人工智能、机器学习与大数据。CCF 高级会员。



李 睿 国防科技大学计算机学院讲师，主要研究方向为操作系统。



知识图谱的系统工程观

CCF 信息系统专业委员会

陈华钧¹ 王昊奋² 漆桂林³ 王 鑫⁴ 顾进广⁵

¹浙江大学，杭州

²上海乐言信息科技有限公司，上海

³东南大学，南京

⁴天津大学，天津

⁵武汉科技大学，武汉

摘要

知识图谱的早期理念来自于 Web 之父 Tim Berners Lee 于 1998 年提出的 Semantic Web，他的最初理想是把基于文本链接的万维网转化成基于实体链接的语义网。从本质上而言，知识图谱是一种语义网络，旨在从数据中识别、发现和推断事物、概念之间的复杂关系，是事物关系的可计算模型（computational model of world relation）。知识图谱的构建涉及知识建模、关系抽取、图存储、关系推理、实体融合等多方面的技术，而知识图谱的应用则涉及语义搜索、智能问答、语言理解、决策分析等多个领域。本文尝试从信息系统工程的观点总结知识图谱的内涵和外延、核心的技术要素及技术流程，并在智能问答、语言理解、智能推理、数据库、推荐系统、区块链等多个相关领域进行发展趋势总结与分析。

关键词：语义网，知识图谱，知识表示，关系抽取，关系推理，语义搜索，智能问答，描述性数据分析，图数据库

Abstract

The early idea of the Knowledge Graph came from the Semantic Web, introduced by the father of the Web, Tim Berners Lee, in 1998. In essence, the Knowledge Graph aims to identify, discover and infer the complex relationships between things and concepts from the data, and is the computable model of the relationship of things. The construction of knowledge graph involves knowledge modeling, relation extraction, graph database, relational inference, entity fusion and other technologies, and the application of knowledge graph involves many fields such as semantic search, intelligent question answering, language understanding and decision making. This paper attempts to summarize the knowledge graph from the viewpoints of system engineering, the core technical elements and the technical process, and the development trend from the aspects of intelligent question answering, language understanding, database systems, recommendation system, block chain and other related fields.

Keywords: Semantic Web, Knowledge Graph, Knowledge Representation, Relation Extraction, Relational Reasoning, Semantic Search, Knowledge-based Question Answering, Declarative Data Analytics, Graph database

1 引言

知识图谱是由节点和边组成的语义网络^[1]。节点可以是实体，如：一个人、一本书等或抽象的概念，如：人工智能、知识图谱等。边可以是实体的属性，如：姓名、书名或实体之间的关系，如：朋友、配偶。知识图谱的早期理念来自于 Web 之父 Tim Berners Lee 于 1998 年提出的 Semantic Web^[2-3]，其最初理想是把基于文本链接的万维网转化成基于实体链接的语义网。

1989 年，万维网之父、图灵奖获得者 Tim Berners Lee 提出构建一个全球化的以“链接”为中心的信息系统（linked information system）。任何人都可以通过添加链接把自己的文档链入其中。他认为以链接为中心和基于图的组织方式，比起基于树的层次化组织方式，更加适合于互联网这种开放的系统。这一思想逐步被人们实现，并演化发展成为今天的 World Wide Web。

1994 年，Tim Berners Lee 又提出，Web 不应该只是网页之间的互相链接。实际上，网页中所描述的都是现实世界中的实体和人脑中的概念。网页之间的链接实际包含有语义，即这些实体或概念之间的关系，然而机器却无法有效地从网页中识别出其中蕴含的语义。他于 1998 年提出了 Semantic Web 的概念^[4]。Semantic Web 仍然基于图和链接的组织方式，只是图中的节点代表的不只是网页，而是客观世界中的实体（如：人、机构、地点等），而超链接也被增加了语义描述，具体标明实体之间的关系（如：出生地是、创办人是等）。相对于传统的网页互联网，Semantic Web 的本质是知识的互联网或事物的互联网（Web of thing）。

在 Semantic Web 被提出之后，出现了一大批新兴的语义知识库。如作为谷歌知识图谱后端的 Freebase^[5]，作为 IBM Watson 后端的 DBpedia^[6] 和 Yago^[7]，作为 Amazon Alexa 后端的 True Knowledge，作为苹果 Siri 后端的 Wolfram Alpha，以及 Schema.ORG^[8]，目标成为世界最大开放知识库的 Wikidata^[9] 等。尤其值得一提的是，2010 年谷歌收购了早期语义网公司 MetaWeb，并以其开发的 Freebase 为数据基础之一，于 2012 年正式推出了称为知识图谱的搜索引擎服务。随后，知识图谱逐步在语义搜索^[10-11]、智能问答^[12-14]、辅助语言理解^[15-16]、辅助大数据分析^[17-19]、增强机器学习的可解释性^[20]、结合图卷积辅助图像分类^[21-22]等很多领域发挥出越来越重要的作用。

如图 1 所示，本质而言，知识图谱旨在从数据中识别、发现和推断事物、概念之间的复杂关系，是事物关系的可计算模型。知识图谱的构建涉及知识建模、关系抽取、图存储、关系推理、实体融合等多方面的技术，而知识图谱的应用则涉及语义搜索、智能问答、语言理解、决策分析等多个领域。构建并利用好知识图谱需要系统性地利用好涉及知识表示、数据库、自然语言处理、机器学习等多个方面的技术。本文尝试从信息系统工程的观点总结知识图谱的内涵和外延、核心的技术要素及技术流程，并从智能问答、语言理解、智能推理、数据库、推荐系统、区块链等多个相关领域进行了发展趋势总结与分析。

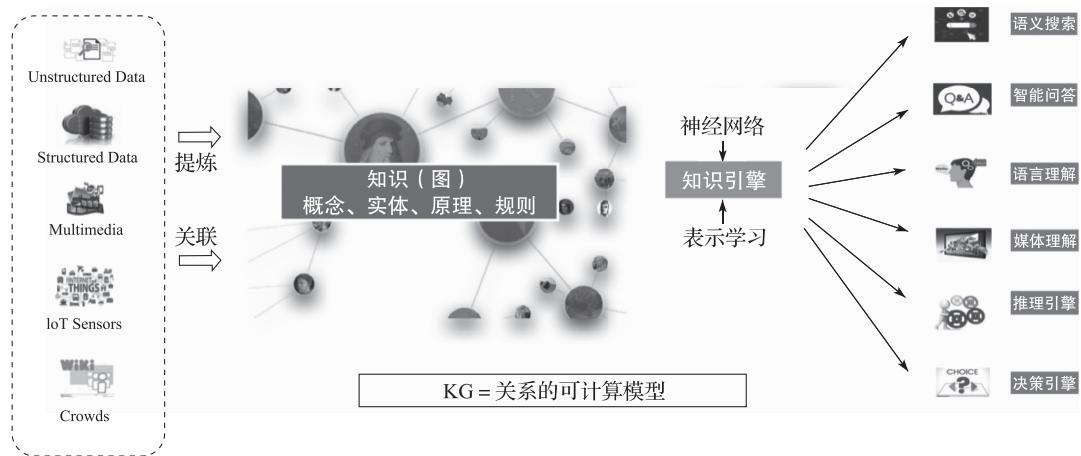


图 1 知识图谱：事物关系的可计算模型

2 从信息系统工程的观点看知识图谱

2.1 知识图谱的规模化发展

如图 2 所示，知识图谱并非突然出现的新技术，而是历史上很多相关技术相互影响和继承发展的结果，这包括语义网络、知识表示、本体论、Semantic Web、自然语言处理等，有着来自 Web、人工智能和自然语言处理等多方面的技术基因。从早期的人工智能发展历史来看，Semantic Web 是传统人工智能与 Web 融合发展的结果，是知识表示与推理在 Web 中的应用；RDF/OWL 都是面向 Web 设计实现的知识表示语言；而知识图谱则可以看作 Semantic Web 的一种简化后的商业实现。

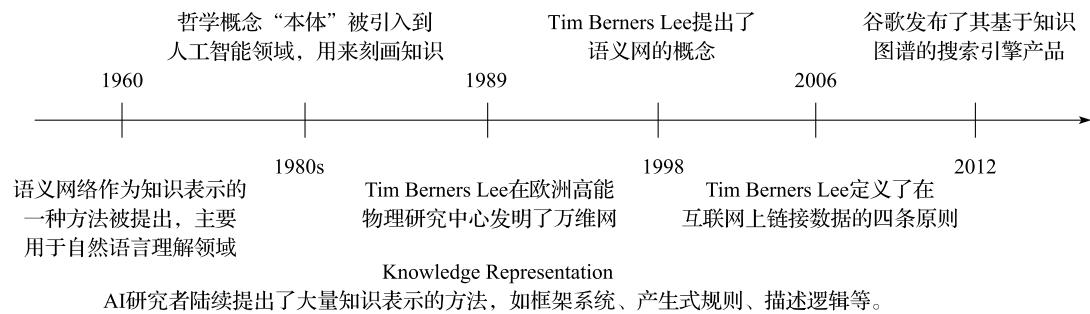


图 2 从语义网络到知识图谱

在人工智能的早期发展流派中，符号派（symbolism）侧重于模拟人的心智，研究怎样用计算机符号来表示人脑中的知识和模拟心智的推理过程；连接派（connectionism）

侧重于模拟人脑的生理结构，即人工神经网络。符号派一直以来都处于人工智能研究的核心位置。近年来，随着数据的大量积累和计算能力大幅提升，深度学习在视觉、听觉等感知处理中取得突破性进展，进而又在围棋等博弈类游戏、机器翻译等领域获得成功，使得人工神经网络和机器学习获得了人工智能研究的核心地位。深度学习在处理感知、识别和判断等方面表现突出，能帮助构建聪明的 AI，但在模拟人的思考过程、处理常识知识和推理，以及理解人的语言方面仍然举步维艰。

符号派关注的核心是知识的表示和推理（Knowledge Representation and Reasoning, KRR）。早在 1960 年，认知科学家 Allan M. Collins 提出用语义网络（semantic network）来研究人脑的语义记忆。WordNet^[23] 是典型的语义网络，它定义了名词、动词、形容词和副词之间的语义关系，例如动词之间的蕴含关系（如：“打鼾”蕴含着“睡眠”）等。WordNet 被广泛应用于语义消歧等自然语言处理领域。

1970 年，随着专家系统的提出和商业化发展，知识库构建和知识表示更加得到重视。专家系统的基本想法是：专家基于大脑中的知识来进行决策，因此，人工智能的核心应该是用计算机符号来表示这些知识，并通过推理机模仿人脑对知识进行处理的过程。依据专家系统的观点，计算机系统应该由知识库和推理机两部分组成，而不是由函数等过程性代码组成。早期专家系统最常用的知识表示方法包括基于框架的语言（frame-based languages）和产生式规则（production rule）等。框架语言主要用于描述客观世界的类别、个体、属性及关系等，较多地应用于辅助自然语言理解。产生式规则主要用于描述类似于 IF-THEN 的逻辑结构，适合于刻画过程性知识。

如图 3 所示，知识图谱与传统专家系统时代的知识工程有显著的不同。与传统专家系统时代主要依靠专家手工获取知识不同，现代知识图谱的显著特点是规模巨大，无法单一依靠人工和专家构建。传统的知识库，如由 Douglas Lenat 从 1984 年开始创建的常识知识库 Cyc 仅包含 700 万条^①的事实描述（assertion）。Wordnet 主要依靠语言学专家定义名词、动词、形容词和副词之间的语义关系，目前包含大约 20 万条的语义关系。由著名人工智能专家 Marvin Minsky 于 1999 年起开始构建的 ConceptNet^[24] 常识知识库依靠了互联网众包、专家创建和游戏三种方法，但早期 ConceptNet 的规模为百万级别，最新的 ConceptNet 5.0 也仅包含 2800 万 RDF 三元组关系描述。现代知识图谱（如谷歌和百度的知识图谱）都已经包含超过千亿级别的三元组，阿里巴巴于 2017 年 8 月份发布的仅包含核心商品数据的知识图谱已经达到百亿级别。DBpedia 已经包含约 30 亿 RDF 三元组，多语种的大百科语义网络 BabelNet 包含 19 亿的 RDF 三元组^[25]，Yago3.0 包含 1.3 亿元组，Wikidata 已经包含 4 265 万条数据条目，元组数目也已经达到数十亿级别。截至目前，开放链接数据项目 Linked Open Data^② 统计了其中有效的 2 973 个数据集，总计包含大约 1 494 亿三元组。

现代知识图谱对知识规模的要求源于“知识完备性”难题。冯·诺依曼曾估计单个

① 下文有关知识图谱规模的描述都以三元组（Triple）为计算单元，一个元组对应一条事实描述（Fact or Assertion）。

② <http://lod-cloud.net>。

个体的大脑中的全量知识需要 $2.4 * 10^{20}$ 个比特来存储^[26]。客观世界拥有不计其数的实体，人的主观世界还包含无法统计的概念，这些实体和概念之间又具有更多数量的复杂关系，导致大多数知识图谱都面临知识不完全的困境。在实际的领域应用场景中，知识不完全也是困扰大多数语义搜索、智能问答、知识辅助的决策分析系统的首要难题。

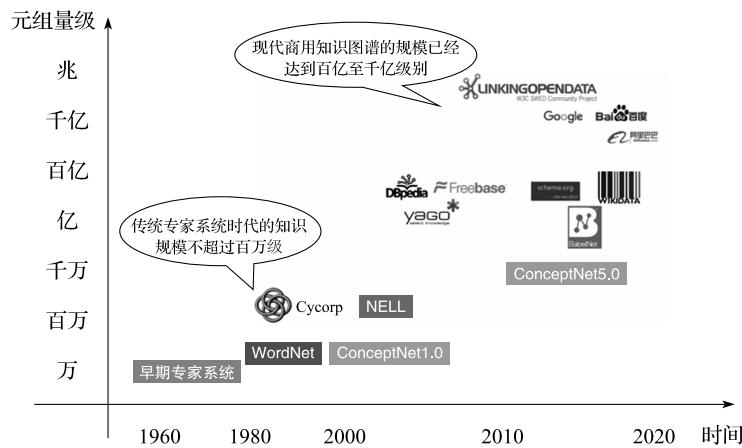


图 3 现代知识图谱的规模化发展

2.2 规模化的知识图谱系统工程

规模化的知识图谱工程要求系统地综合多方面的技术手段。如图 4 所示，知识图谱工程的核心流程包括：知识表示、知识抽取、知识融合、知识推理、知识检索、知识分析等核心环节。一般的技术流程包括：首先确定知识表示模型，然后根据数据来源选择不同的知识获取手段导入知识，接下来需要综合利用知识推理、知识融合、知识挖掘等技术对所构建的知识图谱进行质量提升，最后根据场景需求设计不同的知识访问与呈现方法，如：语义搜索、问答交互、图谱可视化分析等。下面简要概述这些技术流程的核心技术要素。

(1) 知识来源

可以从多种来源来获取知识图谱数据，这包括：文本、结构化数据库、多媒体数据、传感器数据和人工众包等。每一种数据源的知识化都需要综合各种不同的技术手段。例如，对于文本数据源就需要综合各种自然语言处理技术（实体识别、实体链接、关系抽取、事件抽取等）来实现从文本中抽取知识。

结构化数据库如各种关系型数据库，也是最常使用的数据来源之一。通常已有的结构化数据库不能直接作为知识图谱使用，而需要通过定义结构化数据到本体模型之间的语义映射，再通过编写语义翻译工具来实现结构化数据到知识图谱的转化。此外，还需要综合采用实体消歧、数据融合、知识链接等技术提升数据的规范化水平和增强数据之间的关联。

语义技术也被用来对传感器所产生的数据进行语义化。这包括对物联设备进行抽象，

定义符合语义标准的数据接口；对传感数据进行语义封装和对传感数据增加上下文语义描述等。

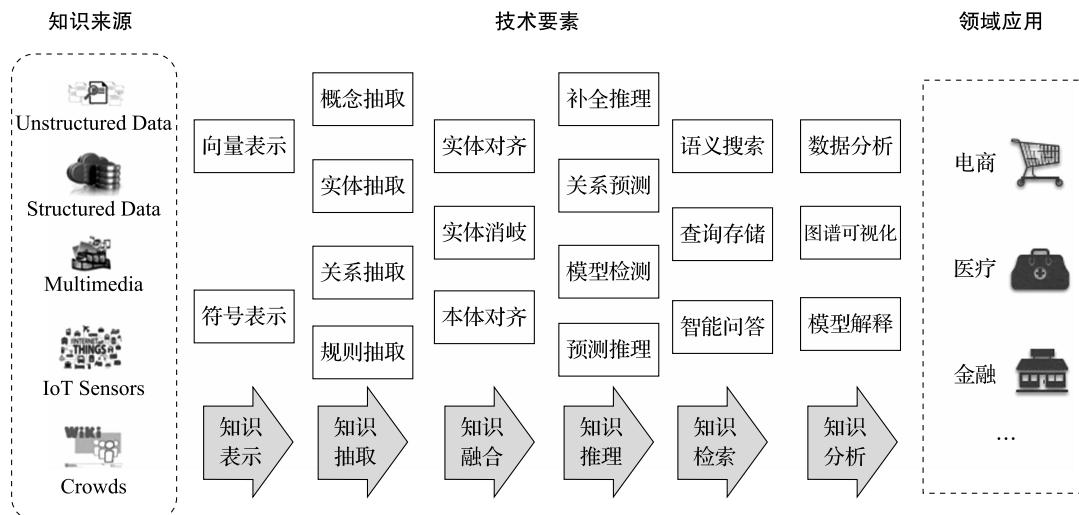


图 4 规模化的知识图谱系统工程

人工众包是获取高质量知识图谱的重要手段。例如：WikiData 和 Schema.org 都是较为典型的知识众包技术手段。此外，还可以开发针对文本、图像等多种媒体数据的语义标注工具辅助人工进行知识获取。

(2) 知识表示与 Schema 工程

知识表示（knowledge representation）是指用计算机符号描述和表示人脑中的知识，以支持机器模拟人的心智进行推理的方法与技术。知识表示决定了图谱构建的产出目标，即知识图谱的语义描述框架（description framework）、Schema 与本体（Ontology）、知识交换语法（Syntax）和实体命名及 ID 体系。

基本描述框架定义知识图谱的基本数据模型（data model）和逻辑结构（structure），如 W3C 的 RDF（resource description framework）。Schema 与本体定义知识图谱的类集、属性集、关系集和词汇集。交换语法定义知识实际存在的物理格式，如 Turtle、JSON 等。实体命名及 ID 体系定义实体的命名原则及唯一标示规范等。

从知识图谱的知识类型来分，包括：词（vocabulary）、实体（entity）、关系（relation）、事件（event）、术语体系（taxonomy）、规则（rule）等。词一级的知识以词为中心，并定义词之间的关系，如 WordNet、ConceptNet 等。实体一级的知识以实体为中心，并定义实体之间的关系、描述实体的术语体系等。事件是一种复合的实体。

W3C 的 RDF 把三元组（triple）作为基本的数据模型，其基本的逻辑结构包含主语（subject）、谓词（predicate）、宾语（object）三个部分。虽然不同知识库的描述框架的表述有所不同，但本质上都包含实体、实体的属性和实体之间的关系几个方面的要素。

(3) 知识抽取

知识抽取按任务可以分为概念抽取、实体识别、关系抽取、事件抽取和规则抽取等

类别。传统专家系统时代的知识主要依靠专家手工录入，难以扩大规模。现代知识图谱的构建通常依靠已有的结构化数据资源进行转化以形成基础数据集，再依靠自动化知识抽取和知识图谱补全技术从多种数据来源进一步扩展知识图谱，并通过人工众包来进一步提升知识图谱的质量。

结构化数据和文本数据是目前最主要的知识来源。从结构化数据库中获取知识一般使用现有的 D2R 工具^[27]，如 Triplify、D2RServer、OpenLink、SparqlMap、Ontop 等。从文本中获取知识主要包括实体识别和关系抽取。以关系抽取为例，典型的关系抽取方法可以分为：基于特征模板的方法^[28-30]，基于核函数的监督学习方法^[31-39]，基于远程监督的方法^[40,47]，基于深度学习的监督或远程监督方法，如简单 CNN、MP-CNN、MWK-CNN、PCNN、PCNN + Att 和 MIMLCNN 等^[42-46]。远程监督的思想是，利用一个大型的语义数据库来自动获取关系类型标签。这些标签可能是含有噪声的，但是大量的训练数据在一定程度上可以抵消这些噪声。另外一些工作通过多任务学习等方法将实体和关系做联合抽取^[47-48]。最新的一些研究则利用强化学习来减少人工标注和自动降低噪声^[49]。

(4) 知识融合

在构建知识图谱时，可以从第三方知识库产品或已有结构化数据获取知识输入。例如，关联开放数据项目（linked open data）会定期发布其经过积累和整理的语义知识数据，其中既包括前文介绍过的通用知识库 DBpedia 和 Yago，也包括面向特定领域的知识库产品，如 MusicBrainz 和 DrugBank 等。当多个知识图谱进行融合，或者将外部关系数据库合并到本体知识库时需要处理两个层面的问题：①通过模式层的融合，将新得到的本体融入已有的本体库中，以及新旧本体的融合；②数据层的融合，包括实体的指称、属性、关系以及所属类别等，主要的问题是如何避免实例以及关系的冲突问题，造成不必要的冗余。

数据层的融合是指实体和关系（包括属性）元组的融合，主要是实体匹配（或者对齐），由于知识库中有些实体含义相同但是具有不同的标识符，因此需要对这些实体进行合并处理^[91-92]。此外，还需要对新增实体和关系进行验证和评估，以确保知识图谱的内容一致性和准确性，通常采用的方法是在评估过程中为新加入的知识赋予可信度值，据此进行知识的过滤和融合。实体对齐的任务包括实体消歧和共指消解，即判断知识库中的同名实体是否代表不同的含义以及知识库中是否存在其他命名实体与之表示相同的含义。实体消歧（entity disambiguation）专门用于解决同名实体产生的歧义问题，通常采用聚类法，其关键问题是如何定义实体对象与指称项之间的相似度，常用方法有：空间向量模型（词袋模型）^[56]、语义模型^[57]、社会网络模型^[58]、百科知识模型^[59]和增量证据模型^[60]。一些最新的工作利用知识图谱嵌入方法进行实体对齐，并引入人机协作方式提升实体对齐的质量^[61-62]。

本体是针对特定领域中 Schema 定义、概念模型和公理定义而言的，目的是弥合词汇异构性和语义歧义的间隙，使沟通达成共识。这种共识往往通过一个反复的过程达到，每次迭代都是一次共识的修改。因此，本体对齐通常带来的是共识模式的演化和变化，本体对齐的主要问题之一也可以转化为怎样管理这种演化和变化^[63]。常见的本体演化管

理框架有 KAON^[64]、Conto-diff^[65]、OntoView 等。

(5) 知识图谱补全

常用的知识图谱补全方法包括：基于本体推理的补全方法，如基于描述逻辑的推理^[66-68]，以及相关的推理机实现如：RDFox、Pellet、RACER、HermiT、TrOWL 等。这类推理主要针对 TBox，即概念层进行推理，也可以用来对实体级的关系进行补全。

另外一类的知识补全算法实现基于图结构和关系路径特征的方法，如基于随机游走获取路径特征的 PRA 算法^[69]，基于子图结构的 SFE 算法^[70]，基于层次化随机游走模型的 PRA 算法^[71]。这类算法的共同特点是通过两个实体节点之间的路径，以及节点周围的图的结构提取特征，并通过随机游走等算法降低特征抽取的复杂度，然后通过叠加线性的学习模型来进行关系的预测。此类算法依赖于图结构和路径的丰富程度。

更为常见的补全实现是基于表示学习和知识图谱嵌入的链接预测^[73-80]，简单的如前面所介绍的最基本的翻译模型、组合模型和神经元模型等。这类简单的嵌入模型一般只能实现单步的推理。更为复杂一些的模型，如向量空间中引入随机游走模型的方法，在同一个向量空间中将路径与实体和关系一起表示出来再进行补全的模型^[81-82]。

文本信息也被用来辅助实现知识图谱的补全^[50-55]。例如 Jointly (w)、Jointly (z)、DKRL、TEKE、SSP 等方法将文本中的实体和结构化图谱中的实体对齐，然后利用双方的语义信息来辅助实现关系预测或抽取。这类模型一般包含 3 个部分：三元组解码器、文本解码器和联合解码器。三元组解码器将知识图谱中的实体和关系转化为低维向量；文本解码器则是要从文本语料库中学习实体（词）的向量表示；联合解码器的目的是要保证实体/关系和词的嵌入向量位于相同的空间中并且集成实体向量和词向量。

(6) 知识检索与知识分析

基于知识图谱的知识检索的实现形式主要包括语义检索和智能问答。传统搜索引擎依靠网页之间的超链接来实现网页的搜索，而语义搜索是直接对事物进行搜索，如人物、机构、地点等。这些事物可能是来自于文本、图片、视频、音频、IoT 设备等各种信息资源。而知识图谱和语义技术提供了关于这些事物的分类、属性和关系的描述，使得搜索引擎可以直接对事物进行索引和搜索。

知识图谱和语义技术也被用来辅助做数据分析与决策。例如，大数据公司 Plantir 基于本体融合和集成多种来源的数据，通过知识图谱和语义技术增强数据之间的关联，使得用户可以用更加直观的图谱方式对数据进行关联挖掘与分析。近年来，描述性数据分析（declarative data analysis）受到越来越多的重视^[83]。描述性数据分析是指依赖数据本身的语义描述来实现数据分析的方法。不同于计算性数据分析主要以建立各种数据分析模型，如深度神经网络，描述性数据分析突出预先抽取数据的语义，建立数据之间的逻辑，并依靠逻辑推理的方法（如 DataLog）来实现数据分析^[84]。

3 国内外研究现状与进展

下面首先对国内外典型的知识图谱项目展开介绍，然后选择与知识图谱密切相关的

若干领域对知识图谱的最新研究现状和进展展开深入介绍，这包括：基于知识图谱的智能问答、知识图谱中的推理技术、图数据库系统、基于知识图谱的推荐系统、知识图谱与区块链等。

3.1 国内外典型的知识图谱项目

3.1.1 开放域知识图谱

自从人工智能的概念被提出开始，构建大规模的知识库一直都是人工智能、自然语言理解等领域的核心任务之一。下面分别介绍早期的知识库项目和以互联网为基础构建的新一代知识库项目。

(1) 早期的知识库项目

Cyc 是持续时间最久，影响范围较广，争议也较多的知识库项目。Cyc 是在 1984 年由 Douglas Lenat 开始创建的。最初的目标是要建立人类最大的常识知识库。典型的常识知识如 “Every tree is a plant” “Plants die eventually” 等。Cyc 知识库主要由术语 Terms 和断言 Assertions 组成。Terms 包含概念、关系和实体的定义。Assertions 用来建立 Terms 之间的关系，这既包括事实 Fact 的描述，也包含规则 Rule 的描述。最新的 Cyc 知识库已经包含有 50 万条 Terms 和 700 万条 Assertions。Cyc 的主要特点是基于形式化的知识表示方法来刻画知识。形式化的优势是可以支持复杂的推理。但过于形式化也导致知识库的扩展性和应用的灵活性不够。

WordNet 是最著名的词典知识库，主要用于词义消歧。WordNet 由普林斯顿大学认识科学实验室从 1985 年开始开发。WordNet 主要定义了名词、动词、形容词和副词之间的语义关系。例如名词之间的上下位关系（如：“猫科动物”是“猫”的上位词），动词之间的蕴含关系（如：“打鼾”蕴含着“睡眠”）等。WordNet3.0 已经包含了超过 15 万个词和 20 万个语义关系。

ConceptNet 是常识知识库。最早源于 MIT 媒体实验室的 Open Mind Common Sense (OMCS) 项目。OMCS 项目是由著名人工智能专家 Marvin Minsky 于 1999 年建议创立的。ConceptNet 主要依靠互联网众包、专家创建和游戏三种方法来构建。ConceptNet 知识库由三元组形式的关系型知识构成。ConceptNet5 版本已经包含有 2800 万条关系描述。与 Cyc 相比，ConceptNet 采用了非形式化、更加接近自然语言的描述，而不是像 Cyc 那样采用形式化的谓词逻辑。与链接数据和谷歌知识图谱相比，ConceptNet 比较侧重于词与词之间的关系。从这个角度看，ConceptNet 更加接近于 WordNet，但是又比 WordNet 包含的关系类型多。

(2) 互联网时代的知识图谱

互联网的发展为知识工程提供了新的机遇。在一定程度上，是互联网的出现帮助突破了传统知识工程在知识获取方面的瓶颈。从 1998 年 Tim Berners Lee 提出语义网至今，涌现出大量以互联网资源为基础的新一代知识库。这类知识库的构建方法可以分为三类：

互联网众包、专家协作和互联网挖掘。

Freebase 是一个开放共享的、协同构建的大规模链接数据库。Freebase 是由硅谷创业公司 MetaWeb 于 2005 年启动的一个语义网项目。2010 年，谷歌收购了 Freebase 作为其知识图谱数据来源之一。Freebase 主要采用社区成员协作方式构建。其主要数据来源包括维基百科 Wikipedia、世界名人数据库 NNDB、开放音乐数据库 MusicBrainz，以及社区用户的贡献等。Freebase 基于 RDF 三元组模型，底层采用图数据库进行存储。Freebase 的一个特点是不对顶层本体做非常严格的控制，用户可以创建和编辑类和关系的定义。2016 年，谷歌宣布将 Freebase 的数据和 API 服务都迁移至 Wikidata，并正式关闭了 Freebase。

DBpedia 是早期的语义网项目。DBpedia 意指数据库版本的 Wikipedia，是从 Wikipedia 抽取出来的链接数据集。DBpedia 采用了一个较为严格的本体，包含人、地点、音乐、电影、组织机构、物种、疾病等类定义。此外，DBpedia 还与 Freebase、OpenCYC、Bio2RDF 等多个数据集建立了数据链接。DBpedia 采用 RDF 语义数据模型，总共包含 30 亿 RDF 三元组。

Schema.org 是 2011 年起，由 Bing、Google、Yahoo 和 Yandex 等搜索引擎公司共同支持的语义网项目。Schema.org 支持各个网站采用语义标签（semantic markup）的方式将语义化的链接数据嵌入到网页中。搜索引擎自动搜集和归集这些，快速的从网页中抽取语义化的数据。Schema.org 提供了一个词汇本体用于描述这些语义标签。截止目前，这个词汇本体已经包含了 600 多个类和 900 多个关系，覆盖范围包括：个人、组织机构、地点、时间、医疗、商品等。谷歌于 2015 年推出的定制化知识图谱支持个人和企业在其网页中增加包括企业联系方法、个人社交信息等在内的语义标签，并通过这种方式快速的汇集高质量的知识图谱数据。截至 2016 年，谷歌的一份统计数据显示，超过 31% 的网页和 1200 万的网站已经使用了 Schema.org 发布语义化的链接数据。其他采用了部分 Schema.org 功能的还包括微软 Cortana、Yandex、Pinterest、苹果的 Siri 等。Schema.org 的本质是采用互联网众包的方式生成和收集高质量的知识图谱数据。

WikiData 的目标是构建一个免费开放、多语言、任何人或机器都可以编辑修改的大规模链接知识库。WikiData 由维基百科于 2012 年启动，早期得到微软联合创始人 Paul Allen、Gordon Betty Moore 基金会以及 Google 的联合资助。WikiData 继承了 Wikipedia 的众包协作的机制，但与 Wikipedia 不同的是，WikiData 支持的是以三元组为基础的知识条目（item）的自由编辑。一个三元组代表一个关于该条目的陈述（statement）。例如可以给“地球”的条目增加“<地球，地表面积是，五亿平方公里>”的三元组陈述。截至 2018 年，WikiData 已经包含了超过 5000 万个知识条目。

BabelNet 是类似于 WordNet 的多语言词典知识库。BabelNet 的目标是解决 WordNet 在非英语语种中数据缺乏的问题。BabelNet 采用的方法是将 WordNet 词典与 Wikipedia 百科集成。首先建立 WordNet 中的词与 Wikipedia 的页面标题的映射，然后利用 Wikipedia 中的多语言链接，再辅以机器翻译技术，来给 WordNet 增加多种语言的词汇。BabelNet3.7 包含了 271 种语言，1400 万同义词组，36.4 万词语关系和 3.8 亿从 Wikipedia 中抽取的链接关系，总计超过 19 亿 RDF 三元组。BabelNet 集成了 WordNet 在词语关系上的优势和

Wikipedia 在多语言语料方面的优势，构建成功了目前最大规模的多语言词典知识库。

NELL (Never-Ending Language Learner) 是卡内基·梅隆大学开发的知识库。NELL 主要采用互联网挖掘的方法从 Web 自动抽取三元组知识。NELL 的基本理念是：给定一个初始的本体（少量类和关系的定义）和少量样本，让机器能够通过自学习的方式不断的从 Web 中学习和抽取新的知识。目前 NELL 已经抽取了 300 多万条三元组知识。

YAGO 是由德国马普研究所研制的链接数据库。YAGO 主要集成了 Wikipedia、WordNet 和 GeoNames 三个来源的数据。YAGO 将 WordNet 的词汇定义与 Wikipedia 的分类体系进行了融合集成，使得 YAGO 具有更加丰富的实体分类体系。YAGO 还考虑了时间和空间知识，为很多知识条目增加了时间和空间维度的属性描述。目前，YAGO 包含 1.2 亿条三元组知识。YAGO 是 IBM Watson 的后端知识库之一。

Microsoft ConceptGraph 是以概念层次体系为中心的知识图谱。与 Freebase 等知识图谱不同，ConceptGraph 以概念定义和概念之间的 IsA 关系为主。给定一个概念如“Microsoft”，ConceptGraph 返回一组与“微软”有 IsA 关系的概念组，如：“Company”“Software Company”“Largest OS Vender”等。这被称为概念化“Conceptualization”。ConceptGraph 可以用于短文本理解和语义消歧中。例如，给定一个短文本“the engineer is eating the apple”，可以利用 ConceptGraph 来正确理解其中“apple”的含义是“吃的苹果”还是“苹果公司”。微软发布的第一版包含超过 540 万的概念，1255 万的实体，和 8760 万的关系。ConceptGraph 主要通过从互联网和网络日志中挖掘来构建。

LOD-Linked Open Data (LOD) 的初衷是实现 Tim Berners Lee 在 2006 年发表的有关链接数据 (linked data) 作为语义网的一种实现的设想。LOD 遵循了 Tim 提出的进行数据链接的四个规则，即：①使用 URI 标识万物；②使用 HTTP URI，以便用户可以（像访问网页一样）查看事物的描述；③使用 RDF 和 SPARQL 标准；④为事物添加与其他事物的 URI 链接，建立数据关联。截至目前，LOD 已经有 1 143 个链接数据集，其中社交媒体、政府、出版和生命科学四个领域的数据占比超过 90%。56% 的数据集对外至少与一个数据集建立了链接。被链接最多的是 dbpedia 的数据。LOD 鼓励各个数据集使用公共的开放词汇和术语，但也允许使用各自的私有词汇和术语。在使用的术语中，有 41% 是公共的开放术语。

在国内，中文开放域的知识图谱的主要工作是 OpenKG[⊖]。OpenKG 主要工作包括中文领域的开放知识图谱资源库 OpenKG.CN、中文开放知识图谱的 Schema——cnSchema[⊖]，以及中文开放知识图谱的众包平台 Openbase。例如，cnSchema 主要面向中文信息处理，为开放中文知识图谱的建模、生产、推理、学习、交互以及应用落地提供可解释、可迭代、可复用的数据接口标准。cnSchema 是 OpenKG 的核心规范，支持中文领域知识图谱的构建以及相应 AI 技术的应用。cnSchema 提供了实体关系图模型，帮助领域专家梳理领域知识体系，明确概念定义并且阐述概念之间的关系。例如，领域专家可以利用 cnSchema 定

[⊖] 中文开放知识图谱：<http://OpenKG.CN>

[⊖] 中文开放知识图谱 Schema：<http://cnSchema.ORG>

义核心实体分类，形成实体分类的词典，通过实例和场景说明实体相互的层级与关联。cnSchema 通过实体属性模版支持知识图谱的生命周期。知识的分享、互联以及复用是知识经济的核心价值。cnSchema 支持联邦式知识图谱体系，每个领域知识图谱可以被独立的贡献者自主开发，进而由知识图谱工程师逐步优化：①利用属性继承与映射关系，形成属性同义词体系便于对比实体，例如北方说姥姥和南方说外婆，语义相同。②利用属性值的类型定义，说明如何利用 NLP 技术解析属性值，例如注册资本只需要文本格式显示，但需要解析出数字才可以排序。③通过映射的实体属性和上下文，链接不同领域知识图谱之间的实体，例如一个行政许可中提到的企业实体与工商注册信息中的某个公司实体具有相同的地址和电话。

3.1.2 垂直领域知识图谱

领域知识图谱是相对于通用知识图谱（如 DBpedia、Yago、Wikidata、百度和谷歌等搜索引擎在使用的知识图谱等）而言的，面向特定领域的知识图谱，如电商、金融、医疗等。相比较而言，领域知识图谱知识来源更多、规模化扩展要求更迅速、知识结构更加复杂、知识质量要求更高、知识的应用形式也更加广泛。表 1 从多个不同的方面对通用知识图谱和领域知识图谱进行了比较分析。下面以电商、医疗、金融领域知识图谱为例，介绍领域知识图谱的主要特点及技术难点。

（1）电商领域知识图谱

以阿里电商知识图谱为例^[86]，最新发布的知识图谱规模已达到百亿级别。其知识图谱数据主要以阿里已有的结构化商品数据为基础，并与行业合作伙伴数据、政府工商管理数据、外部开放数据进行融合扩展。在知识表示方面，除简单的三元组外，还包含层次结构更加复杂的电商本体和面向业务管控的大量规则型知识。在知识的质量方面，对知识的覆盖面和准确性都有较高的要求。在应用形式方面，广泛的支持商品搜索、商品导购、天猫精灵等 AI 产品的智能问答、平台的治理和管控、销售趋势的预测分析等多个应用场景。电商知识也具有较高的动态性特征，例如，交易型知识和与销售趋势有关的知识都具有较强的时效性和时间性。

表 1 通用知识图谱与领域知识图谱的比较

	通用知识图谱	领域知识图谱
知识来源及规模化	以互联网开放数据，如维基百科，或社区众包为主要来源，逐步扩大规模	以领域或企业内部的数据为主要来源，通常要求快速的扩大规模
对知识表示的要求	主要以三元组事实型知识为主	知识结构更加复杂，通常包含较为复杂的本体工程和规则型知识
对知识质量的要求	较多的采用面向开放域的 Web 抽取，对知识抽取质量有一定容忍度	知识抽取的质量要求更高，较多的依靠从企业内部的结构化、非结构化数据进行联合抽取，并依靠人工进行审核校验，保障质量
对知识融合的要求	融合主要起到提升质量的作用	融合多来源的领域数据是扩大构建规模的有效手段

(续)

	通用知识图谱	领域知识图谱
知识的应用形式	一般主要以搜索和问答为主要应用形式，对推理要求较低	应用形式更加全面，除搜索问答外，还通常包括决策分析、业务管理等，并对推理的要求更高，并有较强的可解释性要求
举例	DBpedia、Yago、百度、谷歌等	电商、医疗、金融、农业、安全等

(2) 医疗领域知识图谱

医疗领域构建有大量的规模巨大的领域知识库。例如，仅 Linked Life Data 项目所包含的 RDF 三元组规模就达到 102 亿的规模[⊖]，包含从基因、蛋白质、疾病、化学、神经科学、药物等多个领域的知识。再比如国内构建的中医药知识图谱^[86]，通常需要融合各类基础医学、文献、医院临床等多种来源的数据，规模也达到 20 多亿三元组。医学领域的知识结构更加复杂^[87-90]，如医学语义网络 UMLS 包含大量复杂的语义关系，GeneOnto^[87]则包含复杂的类层次结构。在知识质量方面，特别涉及临床辅助决策的知识库通常要求完全避免错误知识。

(3) 金融领域知识图谱

金融领域比较典型的例子如 Kensho 采用知识图谱辅助投资顾问和投资研究，国内以恒生电子为代表的金融科技机构以及不少银行、证券机构等也都在开展金融领域的知识图谱构建工作。金融知识图谱构建主要来源于机构已有的结构化数据和公开的公报、研报及新闻的联合抽取等。在知识表示方面，金融概念也具有较高的复杂性和层次性，并较多的依赖规则型知识进行投资因素的关联分析。在应用形式方面，则主要以金融问答和投顾投研类决策分析型应用为主。金融知识图谱的一个显著特点是高度的动态性，且需要考虑知识的时效性，对金融知识的时间维度进行建模。

由上面的例子可以看出，领域知识图谱具有规模巨大、知识结构更加复杂、来源更加多样、知识更加异构且很多都具有高度的动态性和时效性、更深层次的推理需求等显著特点。

(4) 更加复杂的知识结构

领域知识图谱通常具有更为复杂的知识结构。单一的三元组表示通常无法满足领域知识的表示需求。这种复杂性一方面体现在图的结构复杂性上，如低连通图结构与高连通图结构等。另外一方面更加体现在知识的逻辑结构上，如对规则型知识的表示需求等。此外，在向量空间表示这些知识结构的复杂性上则更具挑战性，要求既有类似于符号表示的表达能力，同时又不能显著增加向量表示学习的训练成本。

(5) 需要较好的平衡规模化与高质量要求

领域知识图谱通常对规模化和高质量有同等重要的要求。人工众包质量较高，但规模不易扩展，机器自动抽取满足了规模化扩展要求，但质量较低，因此通常需要平衡人工众包的质量优势和机器自动化抽取的规模化优势。另外一方面很多领域知识图谱的构

⊖ <http://linkedlifedata.com/sources.html>

建也会综合利用结构化数据抽取的质量优势和自由文本抽取的规模化优势，以平衡高质量和规模化的双重要求。

(6) 更多类型的异构知识来源

领域知识图谱通常要求综合利用多种来源的知识资源，如企业内部的结构化数据、文档；企业外部的开放图谱、社交媒体、政府数据等。这些知识来源通常具有很高的异构性，充分利用知识融合技术快速集成和融合这些异构知识，扩大构建规模也是领域知识图谱构建的常用技术手段。

(7) 更高的动态性

很多领域知识图谱还具有较为突出的动态性特征。典型的例如电商销售趋势相关的知识，金融股票预测相关的知识，新闻事件相关的知识等。如何表示和处理这种动态性和高时效性的知识，并在动态高时效的知识图谱上实现问答、推理和分析等也是领域知识图谱需要解决的重要技术难题。

(8) 更深层次的推理需求

很多领域知识图谱对推理有更深的需求。一方面，推理技术在知识图谱的补全、关系发现和一致性检测等方面具有重要作用，另外一方面，对于上层的智能问答、语言理解、决策分析等也具有重要的增强作用。

3.2 知识图谱与智能问答研究现状分析

基于知识图谱的问答（Knowledge-Based Question Answering, KBQA，下称“知识问答”）是智能问答系统的核心功能，是一种人机交互的自然方式。知识问答依托于一个大型知识库（知识图谱，结构化数据库等），将用户的自然语言问题转化成结构化查询语句（如SPARQL, SQL等），直接从知识库中导出用户所寻求的答案。

近几年，知识问答聚焦于解决事实型问答——问题的答案是一个实义词或实义短语。如：“中国的首都是哪个城市？——北京”或“菠菜是什么颜色的？——绿色”。事实型问题按问题类型分，可分为单知识点问题（single-hop question）和多知识点问题（multi-hop question）；按问题的领域分，可分为垂直领域问题和通用领域问题。相对于通用领域或开放领域，垂直领域下的知识图谱规模更小，精度更高，知识问答的质量更容易提升。

知识问答技术的成熟与落地，不仅能提高人们检索信息的精度和效率，还能提升用户的产品体验。无论依托的知识库规模如何，用户总能像“跟人打交道一样”，使用自然语言向机器提问并得到反馈，便利性与实用性俱存。

攻克知识问答的关键在于理解并解析用户提出的自然语言问句。这涉及自然语言处理、信息检索和推理（reasoning）等多个领域的不同技术。相关研究工作在近五年来受到越来越多国内外学者的关注。研究方法主要可分为三大类：基于语义解析（semantic parsing）的方法，基于信息检索（information retrieval）的方法，基于概率模型（probabilistic model）的方法。

大部分先进的知识问答方法是基于语义解析的。目的是将自然语言问句解析成结构

化查询语句，进而在知识库上执行查询以得到答案。通常而言，自然语言问句经过语义解析后，所得的语义结构能够解释答案的产生。实际工程应用中，这一点优势不仅能帮助用户理解答案的产生，还能在产生错误答案时，帮助开发者定位错误的可能来源。

微软在利用语义解析技术解决单知识点问答（single-hop question answering）中有突出贡献。2014年，叶等人^[93]指出：解决单知识点问答的关键在于将原任务分解为两个子任务：话题词识别和关系检测。如回答“姚明的妻子是谁？”，可先通过计算语义相似性，将问句解析成形如“（姚明，妻子，？）”的查询。其中话题词是“姚明”，问题中包含的关系为“妻子”（或“配偶”），再在知识库中执行查询，得到答案。2015年，叶等人^[94]强调：直接从大型知识库中寻找与问句含义匹配的关系是比较困难的。论文中首先采用实体链接（entity linking）定位话题词，再从与话题词相关的关系子集中，寻找与问句含义匹配的关系，从而将问句解析成一个结构化的查询。2016年，叶等人^[95]继承了斯坦福自然语言处理组开源的WebQuestions数据集，并在此基础上，标注了问题的语义解析结果（SPARQL查询），贡献了WebQuestionsSP数据集。

基于语义解析的方法在训练过程中，问答模型隐式地学习了标注数据中蕴含的语法解析规律。这使得模型能具有更好的可解释性。但是，数据标注需要花费大量的人力财力，不切实际。而基于信息检索的方法回避了这个问题。基于信息检索的知识问答，大致可分为两步：①通过粗粒度信息检索，在知识库中直接筛选出候选答案；②根据问句中抽取出来的特征，对候选答案进行排序。这就要求，模型对问句的语义有充分的理解。而在自然语言中，词语同义替换等语言现象提升了理解问题的难度。^[94]

为了实现有效的信息检索式知识问答，学者们聚焦于如何让机器理解用户的问题，以及掌握问题与知识库之间的匹配规律。可行的方法包括：

- 1) 集成额外的文本信息^[96]，如：维基百科或搜索引擎结果；
- 2) 提出更多、更复杂的网络结构，如：多列卷积神经网络^[97]（Multi-Column Convolutional Neural Network, MCCNN），深度残差双向长短时记忆网络^[6]（deep residual bidirectional long short-term memory network）和注意式最大池化层^[98]（attentive max pooling layer）；
- 3) 联合训练^[99]实体链接和关系检测两个模块。

除上述两大流派外，有部分学者将知识问答问题看作是一个条件概率问题^[100-101]，即是要求在给定问句Q时，答案为 α 的概率 $P(A = \alpha | Q)$ ，进而引入概率分解^[9]或变分推理^[102]的技巧，将目标概率分而治之。

大部分已有的知识问答解决方案都停留在回答单知识点事实型问题上。在这类问题中，基于语义解析的方法和基于信息检索的方法并不是完全割裂，对立的关系^[1]。二者几乎都把知识问答看作是话题词识别和关系检测两个子任务的串行。在一些论文中，学者们声称单知识点问答已接近人类水平^[103]。

未来，学者们必然将更多的精力投入到解决复杂的多知识点事实型问答上。在这类问题中，涉及的自然语言现象更丰富。如：关系词的词汇组合性^[104]（Sub-lexical Compositionality），多关系词间语序等。另外一种思路是：研究如何将多知识点问题转化

为单知识点问题。因此，先进的单知识点问答模型直接被复用。

除此之外，在理解问题，回答问题的过程中，模型应具备更强的推理能力和更好的可解释性。更强的推理能力能满足用户的复杂提问需求。更好的可解释性使用户“知其然”的同时，“知其所以然”。

3.3 知识图谱与智能推理的发展动态

推理是指基于已知的事实或知识推断得出未知的事实或知识的过程。典型的推理包括：演绎推理（deductive reasoning）、归纳推理（inductive reasoning）、溯因推理（abductive reasoning）、类比推理（analogical reasoning）等。在知识图谱中，推理主要用于对知识图谱进行补全（Knowledge Base Completion, KBC）和知识图谱质量的校验。

知识图谱中的知识可分为两层：概念层和实体层。知识图谱推理的任务是根据知识图谱中已有的知识推理出新的知识或识别出错误的知识。其中概念层的推理主要包括概念之间的包含关系推理，实体层的推理主要包括链接预测与冲突检测，实体层与概念层之间的推理主要包括实例检测。推理的方法主要包含基于规则的推理，基于分布式表示学习的推理、基于神经网络的推理以及混合推理。

（1）基于规则的推理

基于规则的推理通过定义或学习知识中存在的规则进行推理。根据规则的真值类型，可分为硬逻辑规则和软逻辑规则。硬逻辑规则中每条规则的真值都为 1，即绝对正确，人工编写的规则多为硬逻辑规则。软逻辑规则即每条规则的真值为区间在 0 到 1 之间的概率，规则挖掘系统的结果多为软逻辑规则，其学习过程一般是基于规则中结论与条件的共现特征，典型方法有 AMIE^[105] 等。软逻辑规则可通过真值重写转化为硬逻辑规则。硬逻辑规则可写成知识图谱本体中的 SWRL 规则，然后通过本体推理机如 Pellet、Hermit 等进行推理。规则推理在大型知识图谱上的效率受限于它的离散性，Cohen 提出了一个可微的规则推理机 TensorLog^[106]。

基于规则的推理方法最主要的优点是通常情况下规则比较接近人思考问题时的推理过程，其推理结论可解释，所以对人比较友好。已经在知识图谱中沉淀的规则具有较好的演绎能力。

（2）基于分布式表示学习的推理

分布式表示学习的核心是将知识图谱映射到连续的向量空间中，并为知识图谱中的元素学习分布式表示，可表示为低维稠密的向量或矩阵。分布式表示学习通过各元素的分布式表示之间的计算完成隐式的推理。多数表示学习方法以单步关系即单个三元组为输入和学习目标，不同的分布式表示学习方法对三元组的建模基于不同的空间假设，例如以 TransE^[107] 为代表的 Trans 系列模型基于的是关系向量表示在空间中的平移不变性，故将关系向量看作是头实体向量到尾实体向量的翻译并采用向量加法模拟；以 DistMult^[108] 为代表的线性转换模型将关系表示为矩阵，头实体的向量可经过关系矩阵的线性变换转换为尾实体的向量；以 RESCAL^[120] 为代表的模型将知识图谱表示为高维稀疏

的三维张量，通过张量分解得到实体和关系的表示。考虑到知识图谱中的多步推理的表示学习方法有 PTransE^[109]、CVSM^[110]等。

(3) 基于神经网络的推理

基于神经网络的推理通过神经网络的设计来模拟知识图谱推理，其中 NTN^[111]用一个双线性张量层判断头实体和尾实体的关系，ConvE^[112]等在实体和关系的表示向量排布出的二维矩阵上采用卷机神经网络来进行链接预测，R-GCN^[113]通过图卷积网络来捕捉实体的相邻实体的信息，IRN^[114]采用了记忆矩阵以及以递归神经网络为结构的控制单元来模拟多步推理的过程。基于神经网络的知识图谱推理表达能力强，在链接预测等任务上取得了不错的效果。网络结构的设计多样，能够满足不同的推理需求。

(4) 混合推理

混合推理一般结合了规则、表示学习和神经网络。例如 NeuralLP^[115]是一种可微的知识图谱推理方法，融合了关系的表示学习、规则学习以及循环神经网络，由 LSTM 生成多步推理中的隐变量，并通过隐变量生成在多步推理过程中对每种关系的注意力。DeepPath^[116]和 MINERVA^[117]用强化学习方法来学习知识图谱多步推理过程中的路径选择策略。RUGE^[118]将已有的推理规则输入到知识图谱的表示学习过程中，约束和影响表示学习结果并取得更好的推理效果。^[119]使用了对抗生成网络 GAN 来提升知识图谱表示学习过程中的负样本的生成效率。混合推理能够结合规则推理、表示学习推理以及神经网络推理的能力并实现优势互补，能够同时提升推理结果的精确性和可解释性。

基于规则的知识图谱推理的研究主要分为两个部分：一是自动规则挖掘系统，二是基于规则的推理系统。两者目前的主要发展趋势是提升规则挖掘的效率和准确度，用神经网络结构的设计代替在知识图谱上的离散搜索和随机游走是比较值得关注的方向。

基于表示学习的知识图谱推理研究的主要研究趋势是，一方面提高表示学习结果对知识图谱中含有的语义信息的捕捉能力，目前的研究多集中在链接预测任务上，其他推理任务有待跟进研究。另一方面是利用分布式表示作为桥梁将知识图谱与异质信息如文本、图像等结合，实现信息互补以及更多样化的综合推理。

基于神经网络的知识表示推理的主要发展趋势是设计更加有效和有意义的神经网络结构来实现更加高效且精确的推理，通过对神经网络中间结果的解析来实现对推理结果的部分解释时比较值得关注的方向。

3.4 知识图谱与数据库系统

随着知识图谱规模的日益增长，其数据管理问题愈加重要。一方面，以文件形式保存的知识图谱显然无法满足用户的查询、检索、推理、分析及各种应用需求；另一方面，传统数据库的关系模型与知识图谱的图模型之间存在显著差异，使得关系数据库无法有效地管理大规模知识图谱数据。近年来，知识图谱和数据库领域均已认识到大规模知识图谱数据管理任务需求的紧迫性。知识图谱领域发展出专门存储 RDF 数据的三元组库 (triplestore)；数据库领域也发展出用于管理属性图的图数据库 (graph database)。

知识图谱的主要数据模型有 RDF 图（RDF graph）和属性图（property graph）两种；查询语言可分为声明式（declarative）和导航式（navigational）两类。声明式查询语言与 SQL 类似，即用户只需要声明“查什么”，而无须关心“怎么查”；而导航式语言则需要明确“怎么做”。

RDF 三元组库主要是由语义万维网领域推动开发的数据库管理系统，其数据模型 RDF 图和查询语言 SPARQL 均遵守万维网联盟（W3C）标准。查询语言 SPARQL 从语法上借鉴了 SQL，同样属于声明式查询语言。最新的 SPARQL 1.1 版本^[121]为有效查询 RDF 三元组集合而设计了三元组模式（triple pattern）、基本图模式（basic graph pattern）、属性路径（property path）等多种查询机制。

图数据库主要是为数据库领域更好地存储和管理图模型数据而开发的数据库管理系统，其数据模型目前采用最多的是属性图，其上的声明式查询语言有：Cypher^[122]、PGQL^[123] 和 G-Core^[124]。Cypher 是目前最著名的开源图数据库 Neo4j 中实现的图查询语言。虽说 Cypher 是由 Neo4j 公司开发的，该公司正致力于将 Cypher 标准化，开源项目 openCypher 是 Cypher 标准化工作的管理社区。PGQL 是 Oracle 公司开发的图查询语言，该语言更多地借鉴了 SQL 语法。G-Core 是由 LDBC（Linked Data Benchmarks Council）组织设计的图查询语言，其从 Cypher 中借鉴了 ASCII 艺术表示法，从 PGQL 中借鉴了路径模式，并加入了更多的高级功能，该语言目前还处于研究阶段，尚无实现版本。考虑到关系数据库采用统一的查询语言 SQL，目前学术和工业界关于开发统一图数据库语言的呼声越来越高。图数据库上的导航式语言以 Gremlin 为代表，其执行机制就好比是一个人置身于图中沿着有向边，从一个节点到另一个节点，进行导航式地游走。这类语言的优点是在查询过程中用户可以时刻知道自己在图中所处的位置，以及是如何到达的该位置；缺点是用户需要对数据图的模式和实例数据有相当的了解，才能写出所需查询。

目前，基于三元组库和图数据库能够提供的知识图谱数据存储方案可分为三类：

3.4.1 基于关系的存储方案。包括：三元组表、水平表、属性表、垂直划分、六重索引和 DB2RDF 等

三元组表是将知识图谱存储到关系数据库的最简单最直接的办法，就是在关系数据库中建立一张具有 3 列的表，该表的模式为：三元组表（主语，谓语，宾语）。将知识图谱中的每条三元组存储为三元组表中的一行记录。三元组表存储方案虽然简单明了，但三元组表的行数与知识图谱的边数一样，其最大问题在于将知识图谱查询翻译为 SQL 查询后的三元组表自连接。实现三元组表方案的代表系统是 3store^[125]。

水平表存储方案与三元组表不同，水平表的每行记录存储一个知识图谱中一个主语的所有谓语和宾语。实际上，水平表相当于知识图谱的邻接表。水平表存储方案的缺点在于：所需列的数目等于知识图谱中不同谓语的数量，在真实知识图谱中数据集中，不同谓语数量可能为几千个到上万个，很可能超出关系数据库所允许的表中列数目的上限；对于一行来说，仅在极少数列上具有值，表中存在大量空值，空值过多会影响表的存储、索引和查询性能；在知识图谱中，同一主语和谓语可能具有多个不同宾语，即一对多联

系或多值属性，而水平表的一行一列上只能存储一个值，无法应对这种情况（可以将多个值用分隔符连接存储为一个值，但这违反关系数据库设计的第一范式）；知识图谱的更新往往会引起谓语的增加、修改或删除，即水平表中列的增加、修改或删除，这是对于表结构的改变，成本很高。实现水平表方案的代表系统是 DLDB^[126]。

属性表（property table）存储方案是对水平表的细化，将同类主语分到一个表中，不同类主语分到不同表中。属性表既克服了三元组表的自连接问题，又解决了水平表中列数目过多的问题。实际上，水平表是属性表的一种极端情况，即水平表是将所有主语划归为一类，因此属性表中的空值问题与水平表相比会大为缓解。但属性表方案仍有缺点：对于规模稍大的真实知识图谱数据，主语的类别可能有几千到上万个，按照属性表方案，需要建立几千到上万个表，这往往超过了关系数据库的限制；对于知识图谱上稍复杂的查询，属性表方案仍然会进行多个表之间的连接操作，从而影响查询效率；即使在同一类型中，不同主语具有的谓语集合也可能差异较大，这样会造成与水平表中类似的空值问题；水平表方案中存在的一对多联系或多值属性存储问题仍然存在。实现属性表方案的代表系统是 Jena^[127]。

垂直划分（vertical partitioning）存储方案以三元组的谓语作为划分维度，将 RDF 知识图谱划分为若干张只包含（主语，宾语）这两列的表，表的总数量即知识图谱中不同谓语的数量；也就是说，为每种谓语建立一张表，表中存放知识图谱中由该谓语连接的主语和宾语值。由于谓语表中的行都是按照主语列进行排序的，可以快速执行这种以“主语 - 主语”作为连接条件的查询操作，而这种连接操作又是常用的。与之前基于关系数据库的知识图谱存储方案相比，垂直划分有一些突出的优点：谓语表仅存储出现在知识图谱中的三元组，解决了空值问题；一个主语的一对多联系或多值属性存储在谓语表的多行中，解决了多值问题；每个谓语表都按主语列的值进行排序，能够使用归并排序连接（merge-sort join）快速执行不同谓语表的连接查询操作。不过，垂直划分存储方案依然存在着几个缺点：需要创建的表的数目与知识图谱中不同的谓语的数目相等，而大规模的真实知识图谱中谓语数目可能超过几千个，在关系数据库中维护如此规模的表需要花费很大开销；越是复杂的知识图谱查询操作，需要执行的表连接操作数量越多，而对于未指定谓语的三元组查询，将发生需要连接全部谓语表进行查询的极端情况；谓语表的数量越多，数据更新维护的代价越大，对于一个主语的更新将涉及多张表，产生很高的更新时 I/O 开销。实现垂直划分方案的代表系统是 SW-Store^[128]。

六重索引（sextuple indexing）存储方案是对三元组表的扩展，是一种典型的“空间换时间”策略，其将三元组全部 6 种排列对应地建立为 6 张表，即 spo（主语，谓语，宾语）、pos（谓语，宾语，主语）、osp（宾语，主语，谓语）、sop（主语，宾语，谓语）、pso（谓语，主语，宾语）和 ops（宾语，谓语，主语）。不难看出，其中 spo 表就是原来的三元组表。六重索引通过 6 张表的连接操作不仅缓解了三元组表的单表自连接问题，而且加速了某些典型知识图谱查询的效率。六重索引存储方案存在的问题包括：虽然部分缓解了三元组表的单表自连接问题，但需要花费 6 倍的存储空间开销、索引维护代价和数据更新时的一致性维护代价，随着知识图谱规模的增大，该问题会愈加突出；当知

识图谱查询变得复杂时，会产生大量的连接索引表查询操作，依然不可避免索引表的自连接。实现六重索引方案的代表系统是 RDF-3X^[129]。

DB2RDF 方案^[130]是以往 RDF 关系存储方案的一种权衡折中，既具备了三元组表、属性表和垂直划分方案的部分优点，又克服了这些方案的部分缺点。三元组表的优势在于“行维度”上的灵活性，即存储模式不会随行的增加而变化，DB2RDF 方案将这种灵活性扩展到“列维度”上，即将表的列作为谓语和宾语的存储位置，而不将列与谓语进行绑定。插入数据时，将谓语动态映射存储到某列，方案能够确保将相同谓语映射到同一组列上。

3.4.2 面向 RDF 的三元组库

主要的开源 RDF 三元组数据库包括：Apache 旗下的 Jena、Eclipse 旗下的 RDF4J 以及源自学术界的 RDF-3X 和 gStore^[131]；主要的商业 RDF 三元组数据库包括：Virtuoso、AllegroGraph、GraphDB 和 BlazeGraph。

RDF4J 目前是 Eclipse 基金会旗下的开源孵化项目，其功能包括：RDF 数据的解析、存储、推理和查询等。RDF4J 本身提供内存和磁盘两种 RDF 存储机制，支持全部的 SPARQL 1.1 查询和更新语言，可以使用与访问本地 RDF 库相同的 API 来访问远程 RDF 库，支持所有主流 RDF 数据格式，包括：RDF/XML、Turtle、N-Triples、N-Quads、JSON-LD、TriG 和 TriX。RDF4J 框架的重要特点是其模块化的软件架构设计。

RDF-3X 是由德国马克斯 - 普朗克计算机科学研究所研发的 RDF 三元组数据库系统，后经功能扩展和完善。RDF-3X 的最大特点在于其为 RDF 数据精心打造的压缩物理存储方案、查询处理和查询优化技术。在逻辑存储上，虽然以简单的三元组表为基础，但首次提出全索引方案。

gStore 是由北京大学、加拿大滑铁卢大学和香港科技大学联合研究项目开发的基于图的 RDF 三元组数据库。gStore 的底层存储使用 RDF 图对应的标签图（signature graph）并建立“VS 树”索引结构以加速查找。gStore 系统提出建立“VS 树”索引，其基本思想实际上是为标签图 G * 建立不同详细程度的摘要图（summary graph）；利用“VS”树索引提供的摘要图，gStore 系统提出可以大幅削减 SPARQL 查询的搜索空间，以加快查询速度。

Virtuoso 是由 OpenLink 公司开发的商业混合数据库产品，支持关系数据、对象 - 关系数据、RDF 数据、XML 数据和文本数据的统一管理。因为 Virtuoso 可以较为完善地支持 W3C 的 Linked Data 系列协议，包括 DBpedia 在内的很多开放 RDF 知识图谱选择将其作为后台存储系统。

AllegroGraph 是美国 Franz 公司开发的 RDF 三元组数据库。AllegroGraph 遵循对 W3C 语义 Web 相关标准的严格支持，包括：RDF、RDFS、OWL 和 SPARQL 等。AllegroGraph 对语义推理功能具有较为完善的支持。AllegroGraph 除了具有三元组数据库的基本功能外，还支持动态物化的 RDFS++ 推理机、OWL2 RL 推理机、Prolog 规则推理系统、时空推理机制、社会网络分析库、可视化 RDF 图浏览器等。

GraphDB 是由保加利亚的 Ontotext 软件公司开发的 RDF 三元组数据库。GraphDB 实

现了 RDF4J 框架的 SAIL 层，与 RDF4J API 无缝对接，也就是说，可以使用 RDF4J 的 RDF 模型、解析器和查询引擎直接访问 GraphDB。GraphDB 的特色是对于 RDF 推理功能的良好支持，其使用内置的基于规则的“前向链”（forward-chaining）推理机，由显式（explicit）知识经过推理得到导出（inferred）知识，对这些导出知识进行优化存储；导出知识会在知识库更新后相应地同步更新。

Blazegraph 是一个基于 RDF 三元组库的图数据库管理系统，在用户接口层同时支持 RDF 三元组和属性图模型，既实现了 SPARQL 语言也实现了 Blueprints 标准及 Gremlin 语言。Blazegraph 通过分布式动态分片 B+树和服务总线技术支持真正意义上的集群分布式存储和查询处理。正是缘于此点，Blazegraph 在与 Neo4j 和 Titan 的竞争中脱颖而出，被 Wikidata 选为其查询服务的后台图数据库系统。

Stardog 是由美国 Stardog Union 公司开发的 RDF 三元组数据库，其支持 RDF 图数据模型、SPARQL 查询语言、属性图模型、Gremlin 图遍历语言、OWL2 标准、用户自定义的推理与数据分析规则、虚拟图、地理空间查询、以及多用编程语言与网络接口支持。Stardog 虽然发布较晚，但其对 OWL2 推理机制具有良好的支持，同时具备全文搜索、GraphQL 查询、路径查询、融合机器学习任务等功能，能够支持多种不同编程语言和 Web 访问接口，使得 Stardog 成为了一个知识图谱数据存储和查询平台。

3.4.3 原生图数据库

Neo4j 是用 Java 实现的开源图数据库。可以说 Neo4j 是目前流行程度最高的图数据库产品。Neo4j 的不足之处在于其社区版是单机系统，虽然 Neo4j 企业版支持高可用性（high availability）集群，但其与分布式图存储系统的最大区别在于每个节点上存储图数据库的完整副本（类似于关系数据库镜像的副本集群），而不是将图数据划分为子图进行分布式存储，并非真正意义上的分布式数据库系统。如果图数据超过一定规模，系统性能就会因为磁盘、内存等限制而大幅降低。

JanusGraph 是在原有 Titan 系统基础上继续开发的开源分布式图数据库，目前是 Linux 基金会旗下一个开源项目。JanusGraph 的存储后端与查询引擎是分离的，由于其可使用分布式 Bigtable 存储库 Cassandra 或 HBase 作为存储后端，因此 JanusGraph 自然就成为了分布式图数据库。JanusGraph 的主要缺点是分布式查询功能仅限于基于 Cassandra 或 HBase 提供的分布式读写实现的简单导航查询，对于很多稍复杂的查询类型目前还不支持真正意义上的分布式查询处理，比如，子图匹配查询、正则路径查询等。

OrientDB 最初是由 OrientDB 公司开发的多模型数据库管理系统。OrientDB 虽然支持图、文档、键值、对象、关系等多种数据模型，但其底层实现主要是面向图和文档数据存储管理的需求设计。其存储层中数据记录之间的关联并不是像关系数据库那样通过主外键的引用，而是通过记录之前直接的物理指针。

Cayley 是由 Google 公司工程师开发的一款轻量级开源图数据库，于 2014 年 6 月在 GitHub 上发布。Cayley 的开发受到了 Freebase 知识图谱和 Google 知识图谱背后的图数据存储的影响，目标是成为开发者管理 Linked Data 和图模型数据（语义 Web、社会网络

等) 的有效工具之一。

知识图谱数据库在表 2 中进行了特点比较。总体来讲, 基于关系的存储系统继承了关系数据库的优势, 成熟度较高, 在硬件性能和存储容量满足的前提下, 通常能够适应千万到十亿三元组规模的管理。官方测评显示, 关系数据库 Oracle 12c 配上空间和图数据扩展组件 (spatial and graph) 可以管理的三元组数量高达 1.08 万亿条^[132]。对于一般在百万到上亿三元组的管理, 使用稍高配置的单机系统和主流 RDF 三元组数据库 (如 Jena、RDF4J、Virtuoso 等) 完全可以胜任。如果需要管理几亿到十几亿以上大规模的 RDF 三元组, 则可尝试部署具备分布式存储与查询能力的数据库系统 (如商业版的 GraphDB 和 BlazeGraph、开源的 JanusGraph 等)。近年来, 以 Neo4j 为代表的图数据库系统发展迅猛, 使用图数据库管理 RDF 三元组也是一种很好的选择, 但目前大部分图数据库还不能直接支持 RDF 三元组存储, 对于这种情况, 可采用数据转换方式先将 RDF 预处理为图数据库支持的数据格式 (如属性图模型) 再进行后续管理操作。

目前还没有一种数据库系统被公认为是具有主导地位的知识图谱数据库, 但可以预见, 随着三元组库和图数据库的相互融合发展, 知识图谱的存储和数据管理手段将愈加丰富和强大。

表 2 主要知识图谱数据库的比较

类型	名称	许可证	存储方案	开发语言	特点描述
基于关系	3store	开源	三元组表	C	早期系统, 三元组存储代表
	DLDB	研究原型	水平表	Java	早期系统, 水平表存储代表
	Jena	开源	属性表	Java	主流语义 Web 框架与数据库
	SW-Store	研究原型	垂直划分	C	科研原型系统, 垂直划分代表
	IBM DB2	商业	DB2RDF	Java	支持 RDF 的主流商业数据库
	Oracle 12c	商业	关系存储	Java	支持 RDF 的主流商业数据库
RDF 三元组库	RDF4J	开源	SAIL API	Java	主流语义 Web 框架与数据库
	RDF-3X	开源	六重索引	C++	科研原型系统, 六重索引代表
	gStore	开源	VS 树	C++	科研原型系统, 原生图存储
	Virtuoso	商业	多模型混合	C/C++	语义 Web 项目常用 RDF 数据库
	AllegroGraph	商业	三元组索引	Common Lisp	擅长语义推理功能
	GraphDB	商业	三元组索引	Java	支持 SAIL 层推理功能
	BlazeGraph	商业	三元组索引	Java	基于 RDF 三元组库的图数据库
	StarDog	商业	三元组索引	Java	支持 OWL2 推理机制
图数据库	Neo4j	开源/商业	原生图存储	Java	最流行的图数据库
	JanusGraph	开源	分布式存储	Java	分布式图数据库
	OrientDB	商业	原生图存储	Java	支持多模型数据管理
	Cayley	开源	外部存储	Go	轻量级开源图数据库

3.5 知识图谱与推荐系统

随着互联网技术的飞速发展, 各种信息在互联网上汇集, 信息成指数增长, 人们面

临着信息过载（information overload）的问题，推荐系统的提出是解决这一问题的有力途径。但是，推荐系统在启动阶段往往效果不佳，存在冷启动问题，而且用户历史记录数据往往较为稀疏，使得推荐算法性能很难达到用户满意的程度。知识图谱作为先验知识，可以为推荐算法提供语义特征，引入它们可以有效地缓解数据稀疏问题，提高模型的性能。

基于知识图谱的推荐模型大部分是以现有的推荐模型为基础，如基于协同过滤和基于内容的推荐模型，将知识图谱中关于商品、用户等实体的结构化知识加入到推荐模型中，通过引入额外的知识改善早期推荐模型中数据稀疏的问题。文献〔134〕提出了利用 DBpedia 知识图谱中的层次类别信息应用于推荐任务中，他们通过传播激活算法在知识图谱中寻找推荐实体。文献〔135〕通过计算知识图谱中蕴含的语义距离建立音乐推荐模型。下面分别介绍 3 类近年来利用知识图谱的推荐模型，分别为：①基于知识图谱中元路径的推荐模型；②基于概率逻辑程序的推荐模型；③基于知识图谱表示学习技术的推荐模型。

考虑到知识图谱是一个表示不同实体之间关系的图，研究人员利用图上路径的连通信息计算物品之间的相似度^{〔136〕}。研究人员通过元路径的概念利用图的信息^{〔137-138〕}，元路径是图中不同类型实体和关系构成的路径。文献〔139〕利用元路径在图上传播用户偏好，并结合传统的协同过滤模型，最终实现了个性化的推荐模型。其具体方法如下：首先，沿着不同元路径利用路径相似度计算用户对不同物品的偏好，最终学得在元路径 P 下的偏好矩阵。针对每条元路径学得的偏好矩阵，通过潜在因子模型对每个偏好矩阵进行分解，最终可获得每条路径下用户和物品的潜在因子矩阵，最终通过对每条路径下推荐结果的求和获得最终的全局推荐模型。其工作有效地利用了知识图谱中不同类型实体间路径的语义信息传递用户的偏好，但是，路径需要人工选择。

文献〔140〕提出了基于概率逻辑程序的推荐模型，他们使用文献〔141〕将推荐问题形式化为逻辑程序，该逻辑程序对目标用户按查询得分高低输出推荐物品的结果，最终寻找到目标用户的推荐物品。他们提出了 3 种不同的推荐方法，分别为 EntitySim、TypeSim 和 GraphLF，性能超过了以前的最佳方法^{〔139〕}。这 3 种方法都是基于通用目的的概率逻辑系统：ProPPR。其中 EntitySim 方法只使用图上的连接信息；TypeSim 方法使用了实体的 type 信息；GraphLF 提出了一个结合概率逻辑程序和用户物品潜在因子模型的方法。他们的基本思路类似于文献〔139〕的工作，通过规则在知识图谱中传递用户的偏好，这解决了路径人工选择的问题，但是他们将推荐的流程分为寻找用户偏好实体和通过偏好实体寻找物品两个步骤，导致无法有效利用物品与物品之间的关系和用户与用户之间的关系，例如在电影推荐的例子中，谍影重重 4 是谍影重重 3 的续集，但是谍影重重 4 换了主演，而如果通过他们方法中的规则，观看谍影重重 3 的用户无法通过主演马特·达蒙寻找到谍影重重 4 的路径。

通过知识图谱表示学习技术，可以获得知识图谱中实体和关系的低维稠密向量，其可以在低维的向量空间中计算实体间的关联性，与传统的基于符号逻辑在图上查询和推理的方法相比，其大大地降低了计算的复杂度。文献〔142〕提出使用知识图谱表示学习

技术提取知识图谱中的特征，以该特征向量使用 K 近邻的方法寻找用户最相近的物品，但是该模型与推荐模型结合得较为松散，仅使用知识图谱表示学习作为特征提取的一种方法。

文献 [143] 在王灏等人^[144]工作的基础上进行扩展，通过表示学习的方法将知识图谱中的信息加入推荐模型中，提出了协同知识图谱表示学习的推荐模型（collaborative knowledge base embedding recommender system），他们方法的具体的思路如下：首先，通过知识表示学习获得知识图谱中和推荐物品相关的结构化信息，通过去噪编码器网络学习从物品相关的文本中学习编码层的文本表示向量，并通过和文本建模相似的去噪编码器网络从图像中学习视觉表示向量，并将这些表示向量引入物品的潜在因子向量中，结合矩阵分解算法完成推荐。该工作通过贝叶斯理论的角度解释并联合了不同算法的优化目标。但是，在推荐领域的知识图谱中，实体之间的关系非常稠密，且关系类型较少。以 TransE 为代表的模型不适合处理一对多，多对多的关系，尽管 TransR 针对该问题进行了一定的改进，但应对相同类型关系的一对多，多对一和多对多关系时，算法实际退化为 TransE。因此，本文在协同过滤算法上引入一类新的知识图谱表示学习的技术^[145-146]提取知识图谱中的结构化信息，最终提出了一个基于知识图谱表示学习的协同过滤推荐系统。

3.6 知识图谱与 IoT

人机对话的主要挑战是语义理解，即让机器理解人类语言的语义。另外一个问题是机器之间的对话，这也需要技术手段来表示和处理机器语言的语义。语义技术也可被用来辅助设备之间的语义互联。OneM2M 是 2012 年成立的全球最大的物联网国际标准化组织，其主要目的是为物联设备之间的互联提供“标准化黏合剂”^[146]。OneM2M 关注了语义技术在封装设备数据的语义，并基于语义技术解决设备之间的语义互操作的问题^[147]。此外，OneM2M 还关注设备数据的语义和人类语言的语义怎样适配的问题。如图 5 所示，一个设备所产生的原始数据在封装了语义描述之后，可以更加容易地与其他设备的数据进行融合、交换和互操作，并可以进一步链接进知识图谱中，以便支持搜索、推理和分析等任务。

4 发展趋势与展望

4.1 知识图谱的系统工程思维

知识图谱本身可以看作一种新型的信息系统基础设施。在数据维度上，知识图谱要求用更加规范的语义来提升企业数据的质量，用链接数据（linked data）的思想提升企业

数据之间的关联度，终极目标是将非结构、无显示关联的粗糙数据逐步萃取提炼为结构化、高度关联的高质量知识。每个企业都应该将知识图谱作为一种面向数据的信息系统基础设施进行持续性建设。

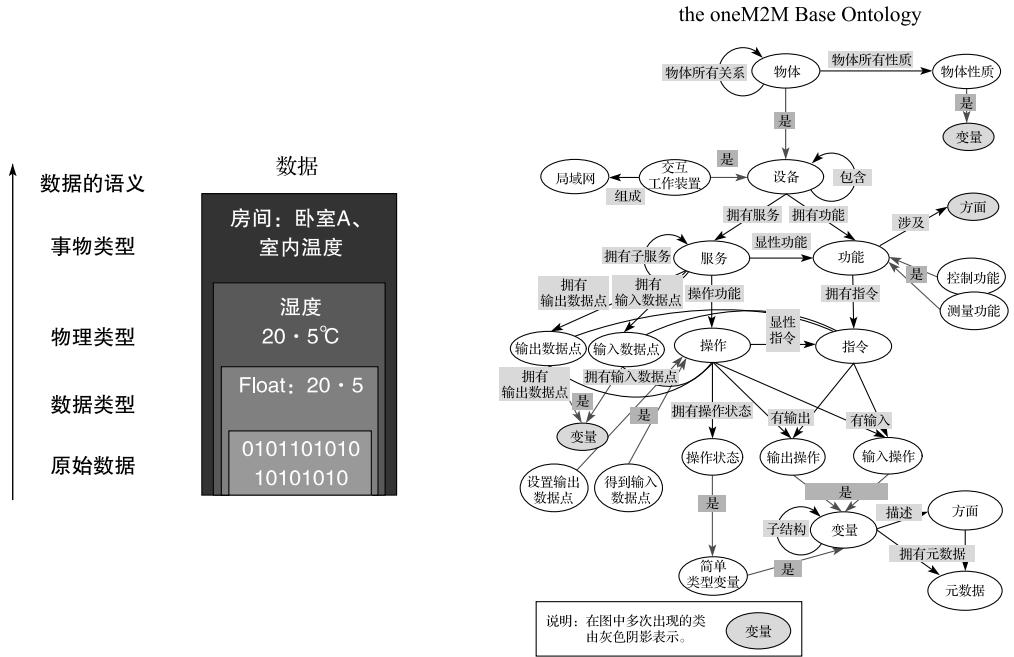


图 5 设备语义的封装

在技术维度上，知识图谱的构建涉及知识表示、关系抽取、图数据存储、数据融合、推理补全等多方面的技术，而知识图谱的利用涉及语义搜索、知识问答、自动推理、知识驱动的语言及视觉理解、描述性数据分析等多个方面。要构建并利用好知识图谱也要求系统性的综合利用好来自于知识表示、自然语言处理、机器学习、图数据库、多媒体处理等多个相关领域的技术，而非单个领域的单一技术。因此，未来的一个发展趋势是，知识图谱的构建和利用都应注重系统思维。

4.2 大规模的知识图谱嵌入与基于表示学习的可微分推理

知识图谱对规模的扩展需求使得知识表示技术逐渐发生了多方面的变化：①从以强逻辑为中心向以按需增强语义表达能力的变化；②从较为注重 TBox 概念型知识转化为更加注重 ABox 事实型知识的变化；③从以离散的符号逻辑表示向以连续的向量空间表示方向发展。

尽管以连续向量表示为基础的知识图谱嵌入日益得到重视，但其在实际应用过程中却仍然面临着较大的困难。这包括：①极大规模的知识图谱嵌入的训练及向量化知识图谱的存储计算问题；②嵌入过程带来的信息丢失问题及少样本数据训练不充分的问题。对于问题①，要求更多地考虑结合数据库技术及大数据存储技术来解决大规模知识图谱

带来的性能问题，而非单一的考虑参数的规模。对于问题②，则需要考虑更多的叠加逻辑规则和先验知识来引导知识图谱嵌入的训练过程。

另外一个发展趋势是基于学习的可微分推理。可微分推理通过统计学习将推理所依赖的元素参数化，从而使得推理的过程可微。可微分推理通常需要同时对结构和参数进行学习，因而复杂度和难度都很高。但一旦实现，其意义是可以实现从大量数据中归纳总结推理的目的，且这些通过大数据总结归纳出的推理过程可以用来产生新的知识。

4.3 少样本、无监督的知识获取

知识图谱的规模化构建需求对知识获取带来如下几个方面的变化：①从单一人工获取到更多地依靠大数据和机器学习来实现自动化知识抽取；②从单一来源变化为综合从结构化、半结构化、文本、传感器等多个来源，通过多任务相融合实现联合知识获取；③从依靠少数专家到依靠互联网群体众包协同获取。

大规模对自动化知识获取提出了更高的要求。未来主要发展趋势包括：①融合深度学习与远程监督，降低自动化抽取对特征工程和监督数据的依赖；②通过强化学习降低抽取的噪声，减少对标注数据的依赖；③融合多种类型的数据通过多任务学习进行联合知识抽取；④有机的结合人工众包提高知识抽取的质量和加强监督信号。较好的平衡人工和自动化抽取，尽可能降低机器对标注数据和特征工程的依赖，并综合多种来源的知识进行联合抽取，特别是发展少样本、无监督和自监督的方法，是未来实现大规模知识获取的关键因素。

4.4 区块链与去中心化的知识图谱

语义网的早期理念实际上包含三个方面：知识的互联、去中心化的架构和知识的可信。知识图谱在一定程度上实现了“知识互联”的理念，然而在去中心化的架构和知识可信两个方面都仍然没有较好的解决方案出现。

对于去中心化，相比起现有的多为集中存储的知识图谱，语义网强调知识是以分散的方式互联和相互链接的，知识的发布者拥有完整的控制权。近年来，国内外已经有研究机构和企业开始探索将区块链技术用于实现去中心化的知识互联。这包括去中心化的实体ID管理、基于分布式账本的术语及实体命名管理、基于分布式账本的知识溯源、知识签名和权限管理等。

知识的可信与鉴真也是当前很多知识图谱项目所面临的挑战和问题。由于很多知识图谱数据来源广泛，且知识的可信度需要作用到实体和事实级别，怎样有效地对知识图谱中的海量事实进行管理、追踪和鉴真，也成为区块链技术在知识图谱领域的一个重要应用方向。

此外，将知识图谱引入到智能合约（Smart Contract）中，可以帮助解决目前智能合约内生知识不足的问题。例如Pchain^[148]引入知识图谱（Knowledge Graph）Oracle机制，解

决传统智能合约数据不闭环的问题。

5 结束语

互联网促成了大数据的集聚，大数据进而促进了人工智能算法的进步。新数据和新算法为规模化知识图谱构建提供了新的技术基础和发展条件，使得知识图谱构建的来源、方法和技术手段都发生极大的变化。知识图谱作为知识的一种形式，已经在语义搜索、智能问答、数据分析、自然语言理解、视觉理解、物联网设备互联等多个方面发挥出越来越大的价值。AI 波潮愈演愈烈，而作为底层支撑的知识图谱赛道也从鲜有问津到缓慢升温，虽然还谈不上拥挤，但作为通往未来的必经之路，注定会走上风口。

参考文献

- [1] Singhal, Amit. Introducing the Knowledge Graph: Things, Not Strings[OL]. <https://www.blog.google/products/search/introducing-knowledge-graph-things-not/>.
- [2] Berners-Lee Tim, James Hendler, Ora Lassila. The Semantic Web[J]. Scientific American, 2001.
- [3] Shadbolt Nigel, Wendy Hall, Tim Berners- Lee. The Semantic Web Revisited [J]. IEEE Intelligent Systems, 2006.
- [4] Tim Berners- Lee. Semantic Web Road Map[OL]. <https://www.w3.org/DesignIssues/Semantic.html>
- [5] Bollacker K, Cook R, Tufts P. Freebase: A shared database of structured general human knowledge[J]. AAAI, 2007: 1962-1963.
- [6] Lehmann J, Isele R, Jakob M, et al. DBpedia-a large-scale, multilingual knowledge base extracted from Wikipedia[J]. Semantic Web, 2015,6(2) : 167-195.
- [7] Farzaneh Mahdisoltani, Joanna Biega, Fabian M. et al. YAGO3: A Knowledge Base from Multilingual Wikipedias[C]. In Proc. of Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR 2015).
- [8] Guha R V, Brickley D, MacBeth S. Schema.org: Evolution of Structured Data on the Web[J/OL]. Queue, 2015,13(9) : 10-37. <http://doi.org/10.1145/2857274.2857276>.
- [9] Vrandečić D, Krötzsch M. Wikidata: A Free Collaborative Knowledgebase[C/OL]. Communications of the ACM, 2014,57(10) : 78-85. <http://doi.org/10.1145/2629489>.
- [10] Guha R, McCool R, Miller E. Semantic search. In Proceedings of the 12th international conference on World Wide Web[C]. ACM, 2003: 700-709.
- [11] Dong X, Gabrilovich E, Heitz G, et al. Knowledge vault: A web- scale approach to probabilistic knowledge fusion[C]. In Proceedings of the 20th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2014: 601-610.
- [12] Cui W, Xiao Y, Wang H, et al. KBQA: learning question answering over QA corpora and knowledge bases[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2017,10(5) : 565-576.
- [13] Yao X, Van Durme B. Information Extraction over Structured Data: Question Answering with Freebase

- [C]. ACL (1), 2014: 956-966.
- [14] Hao Y, Zhang Y, Liu K, et al. An End-to-End Model for Question Answering over Knowledge Base with Cross- Attention Combining Global Knowledge [C]. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers), 2017, 1: 221-231.
- [15] Yang B, Mitchell T. Leveraging Knowledge Bases in LSTMs for Improving Machine Reading [C]. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2017, 1: 1436-1446.
- [16] Wang J, Wang Z, Zhang D, et al. Combining Knowledge with Deep Convolutional Neural Networks for Short Text Classification[C]. Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2017: 2915-2921.
- [17] Kaminski M, Grau B C, Kostylev E V, et al. Foundations of Declarative Data Analysis Using Limit Datalog Programs[OL]. <http://arxiv.org/abs/1705.06927>.
- [18] Bellomarini L, Gottlob G, Pieris A, et al. Swift Logic for Big Data and Knowledge Graphs[J]. IJCAI, 2017; 2-10.
- [19] Jiaoyan Chen, Freddy Lécué, Jeff Z Pan, et al. Learning from Ontology Streams with Semantic Concept Drift[J]. IJCAI, 2017: 957-963
- [20] Jiaoyan Chen, Freddy Lécué, Jeff Z Pan, et al. Transfer Learning Explanation with Ontologies [C]. International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR2018.
- [21] Wang X, Ye Y, Gupta A. Zero-shot Recognition via Semantic Embeddings and Knowledge Graphs[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 6857-6866.
- [22] Lee C W, Fang W, Yeh C K, et al. Multi-Label Zero-Shot Learning with Structured Knowledge Graphs [J]. arXiv preprint arXiv: 1711.06526.
- [23] George A Miller. WordNet: A Lexical Database for English[J]. Communications of the ACM, 1995, 38 (11): 39-41.
- [24] Speer R, Havasi C. Representing General Relational Knowledge in ConceptNet 5[C]. Proceedings of the Eight International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC '12), 2012: 3679-3686.
- [25] Navigli R, Ponzetto S. BabelNet: The Automatic Construction, Evaluation and Application of a Wide-Coverage Multilingual Semantic Network[J]. Artificial Intelligence, 2012: 217-250.
- [26] Erik T Mueller. Commonsense Reasoning An Event Calculus Based Approach[J]. Morgan Kaufmann, 2016.
- [27] S Sahoo, W Halb, S Hellmann, et al. A survey of current approaches for mapping of relational databases to RDF[J]. W3C RDB2RDF Incubator Group Report, 2009, 1: 113-130.
- [28] Kambhatla N. Combining lexical, syntactic, and semantic features with maximum entropy models for extracting relations[C]. Proceedings of the ACL 2004 on Interactive poster and demonstration sessions, Association for Computational Linguistics, 2004: 22.
- [29] GuoDong Z, Jian S, Jie Z, et al. Exploring various knowledge in relation extraction[C]. Proceedings of the 43rd annual meeting on association for computational linguistics. Association for Computational Linguistics, 2005: 427-434.
- [30] Nguyen D P T, Matsuo Y, Ishizuka M. Relation extraction from wikipedia using subtree mining[C]. Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, 1999, 2007, 22(2): 1414.
- [31] Mooney R J, Bunescu R C. Subsequence kernels for relation extraction [J]. Advances in neural information processing systems, 2006: 171-178.

- [32] Collins M, Duffy N. Convolution kernels for natural language [J]. Advances in neural information processing systems, 2002: 625-632.
- [33] Zhang M, Zhang J, Su J. Exploring syntactic features for relation extraction using a convolution tree kernel[C]. Association for Computational Linguistics, 2006: 288-295.
- [34] Zhu J, Nie Z, Liu X, et al. StatSnowball: a statistical approach to extracting entity relationships[C]. Proceedings of the 18th international conference on World wide web, ACM, 2009: 101-110.
- [35] Qian L, Zhou G, Kong F, et al. Exploiting constituent dependencies for tree kernel-based semantic relation extraction[C]. Association for Computational Linguistics, 2008: 697-704.
- [36] Sun L, Han X. A Feature-Enriched Tree Kernel for Relation Extraction[C]. Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2014, 2: 61-67.
- [37] Culotta A, Sorensen J. Dependency tree kernels for relation extraction [C]. Proceedings of the 42nd annual meeting on association for computational linguistics, Association for Computational Linguistics, 2004: 423.
- [38] Zelenko D, Aone C, Richardella A. Kernel methods for relation extraction [J]. Journal of machine learning research, 2003, 3: 1083-1106.
- [39] Zhang M, Zhang J, Su J, et al. A composite kernel to extract relations between entities with both flat and structured features[C]. Association for Computational Linguistics, 2006: 825-832.
- [40] Ce Zhang. DeepDive: A Data Management System for Automatic Knowledge Base Construction [D]. University of Wisconsin-Madison, 2015.
- [41] Liu C Y, Sun W B, Chao W H, et al. Convolution neural network for relation extraction [C]. International Conference on Advanced Data Mining and Applications, 2013: 231-242.
- [42] Zeng D, Liu K, Lai S, et al. Relation Classification via Convolutional Deep Neural Network [J]. COLING, 2014: 2335-2344.
- [43] Nguyen T H, Grishman R. Relation Extraction: Perspective from Convolutional Neural Networks[J]. VS @ HLT-NAACL, 2015: 39-48.
- [44] Zeng D, Liu K, Chen Y, et al. Distant Supervision for Relation Extraction via Piecewise Convolutional Neural Networks[J]. Emnlp, 2015: 1753-1762.
- [45] Lin Y, Shen S, Liu Z, et al. Neural Relation Extraction with Selective Attention over Instances [J]. ACL, 2016, (1): 2124-2133.
- [46] Jiang X, Wang Q, Li P, et al. Relation Extraction with Multi-instance Multi-label Convolutional Neural Networks[J]. COLING, 2016: 1471-1480.
- [47] Zheng S, Wang F, Bao H, et al. Joint Extraction of Entities and Relations Based on a Novel Tagging Scheme[OL]. <http://doi.org/10.18653/v1/P17-1113>.
- [48] Katiyar A, Cardie C. Going out on a limb: Joint Extraction of Entity Mentions and Relations without Dependency Trees [C]. Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2017(1): 917-928.
- [49] Feng J. Reinforcement Learning for Relation Extraction from Noisy Data[J]. AAAI, 2018.
- [50] Wang Z, Zhang J, Feng J, et al. Knowledge graph and text jointly embedding[C]. EMNLP, 2014: 1591-1601.
- [51] Zhong H, Zhang J, Wang Z, et al. Aligning knowledge and text embeddings by entity descriptions[C]. EMNLP, 2015: 267-272.

- [52] Xie R, Liu Z, Jia J H, et al. Representation learning of knowledge graphs with entity descriptions[C]. in Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence , 2016: 2659-2665.
- [53] Wang Z, Li J. Text-enhanced representation learning for knowledge graph[C]. IJCAI, 2016: 1293-1299.
- [54] Xiao H, Huang M, Meng L, et al. SSP: semantic space projection for knowledge graph embedding with text descriptions [C]. in Proceedings of the 31 AAAI Conference on Artificial Intelligence , 2017: 3104-3110.
- [55] Han X, Liu Z, Sun M. Neural Knowledge Acquisition via Mutual Attention between Knowledge Graph and Text[J]. AAAI, 2018.
- [56] Bagga A, Baldwin B. Entity-based cross-document coreferencing using the vector space model [C]. Proceedings of the 17th international conference on Computational linguistics- Volume 1 , Association for Computational Linguistics , 1998: 79-85.
- [57] Pedersen T, Purandare A, Kulkarni A. Name Discrimination by Clustering Similar Contexts[J]. Proc of the 6th Int Conf on Intelligent Text Processing and Computational Linguistics , 2005 , 3406: 226-237.
- [58] Malin B, Airolidi E, Carley K M. A network analysis model for disambiguation of names in lists[J]. Computational & Mathematical Organization Theory , 2005 , 11(2) : 119-139.
- [59] Han X, Zhao J. Named entity disambiguation by leveraging wikipedia semantic knowledge [C]. Proceedings of the 18th ACM conference on Information and knowledge management , ACM, 2009: 215-224.
- [60] Li Y, Wang C, Han F, et al. Mining evidences for named entity disambiguation[C]. Proceedings of the 19th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining , ACM, 2013: 1070-1078.
- [61] Zhuang Y, Li G, Zhong Z, et al. Hike: A Hybrid Human-Machine Method for Entity Alignment in Large-Scale Knowledge Bases[C]. Proceedings of the 2017 ACM on Conference on Information and Knowledge Management , CIKM , 2017: 1917-1926.
- [62] Zhu H, Xie R, Liu Z, et al. Iterative Entity Alignment via Joint Knowledge Embeddings [C]. Proceedings of the Twenty- Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence , IJCAI, 2017: 4258-4264.
- [63] Stojanovic N, Stojanovic L, Handschuh S. Evolution in the ontology-based knowledge management system [C]. in Proceedings of the European Conference on Information Systems-ECIS , 2002.
- [64] Klein M. Change management for distributed ontologies[J]. Universiteit Amsterdam, 2004.
- [65] Hartung M, Groß A, Rahm E. Conto- diff: generation of complex evolutionmappings for life science ontologies[J]. J. Biomed. Inform. 2013 , 46(1) : 15-32.
- [66] Baader F, Horrocks I, Lutz C, et al. An Introduction to Description Logic [M]. Cambridge University Press , 2017.
- [67] Boris Motik, Yavor Nenov, Robert Piro, et al. Incremental Update of Datalog Materialisation: The Backward/Forward Algorithm[C]. AAAI, 2015.
- [68] Pan J Z, Calvanese D, Eiter T, et al. Reasoning Web: Logical Foundation of Knowledge Graph Construction and Query Answering: 12th International Summer School 2016[J]. Aberdeen, UK, Tutorial Lectures , 2017.
- [69] Lao N, Mitchell T, Cohen W W. Random Walk Inference and Learning in A Large Scale Knowledge Base [C]. Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing , 2011,

- 529-539.
- [70] Matt Gardner, Tom Mitchell. Efficient and expressive knowledge base completion using subgraph feature extraction[J]. Association for Computational Linguistics, 2015.
- [71] Liu Q, Jiang L, Han M, et al. Hierarchical Random Walk Inference in Knowledge Graphs [C]. Proceedings of the 39th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval-SIGIR , 2016(16) : 445-454.
- [72] Antoine Bordes, Nicolas Usunier, Alberto Garca-Duran, et al. Translating embeddings for modeling multi-relational data [C]. In Advances in Neural Information Processing Systems 26: 27th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, 2013.
- [73] Zhen Wang, Jianwen Zhang, Jianlin Feng, et al. Knowledge graph embedding by translating on hyperplanes[C]. In Proceedings of the Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence, July 27-31, 2014.
- [74] Yankai Lin, Zhiyuan Liu, Maosong Sun, et al. Learning entity and relation embeddings for knowledge graph completion[C]. In Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence, Austin, Texas, 2015: 2181-2187.
- [75] Guoliang Ji, Shizhu He, Liheng Xu, et al. Knowledge graph embedding via dynamic mapping matrix [C]. ACL, 2015.
- [76] Guoliang Ji, Kang Liu, Shizhu He, et al. Knowledge graph completion with adaptive sparse transfer matrix[C]. In Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, Phoenix, Arizona, 2016: 985-991.
- [77] Maximilian Nickel, Volker Tresp, Hans-Peter Kriegel. A three-way model for collective learning on multi-relational data[C]. ICML, Bellevue, Washington, 2011: 809-816.
- [78] Rodolphe Jenatton, Nicolas Le Roux, Antoine Bordes, et al. A latent factor model for highly multi-relational data[C]. In Advances in Neural Information Processing Systems 25: 26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, 2012.
- [79] Maximilian Nickel, Lorenzo Rosasco, Tomaso A. et al. Holographic embeddings of knowledge graphs [C]. In Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence, Phoenix, Arizona, 2016: 1955-1961.
- [80] Richard Socher, Danqi Chen, Christopher D Manning, et al. Reasoning with neural tensor networks for knowledge base completion[C]. In Advances in Neural Information Processing Systems 26: 27th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, 2013.
- [81] Yankai Lin, Zhiyuan Liu, Huan-Bo Luan, et al. Modeling relation paths for representation learning of knowledge bases[C]. In Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP, Lisbon, Portugal, 2015: 705-714.
- [82] Kelvin Guu, John Miller, Percy Liang. Traversing knowledge graphs in vector space[C]. In Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP, Lisbon, Portugal, 2015: 318-327.
- [83] Kaminski M, Grau B C, Kostylev E V, et al. Foundations of declarative data analysis using limit datalog programs[J]. International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2017.
- [84] Boris Motik, Yavor Nenov, Robert Piro, et al. Incremental Update of Datalog Materialisation: The Backward/Forward Algorithm[C]. AAAI, 2015.

- [85] 阿里技术:阿里知识图谱:每天千万级拦截量,亿级别全量智能审核[OL]http://www.sohu.com/a/168239286_629652.
- [86] 于彤、陈华钧、姜晓红. 中医药知识工程[J]. 科学出版社, 2017. 2.
- [87] Ashburner M, Ball C A, Blake J A, et al. Gene Ontology: tool for the unification of biology[J]. Nature genetics, 2000, 25(1): 25-29.
- [88] Belleau F, Nolin M, Tourigny N, et al, Bio2rdf: Towards a mashup to build bioinformatics knowledge systems[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2008, 41(5): 706-716.
- [89] Ruttenberg A, Rees A, Samwald M, et al, Life sciences on the semantic web: the neurocommons and beyond[J]. Briefings in Bioinformatics, 2009, 10: 193-204。
- [90] Momtchev V, Peychev D, Primov T, et al, Expanding the pathway and interaction knowledge in linked life data[J]. in Proc. of International Semantic Web Challenge, 2012: 1247-1250.
- [91] 孟小峰. 大数据管理概论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [92] 孟小峰, 杜治娟. 大数据融合研究: 问题与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(02): 231-246.
- [93] Yih W-t, He X, Meek C. Semantic parsing for single-relation question answering[C]. In Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2014, 2: 643-648.
- [94] Yih W-t, Chang M-W, He X. Semantic parsing via staged query graph generation: Question answering with knowledge base[C]. In Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing, 2015, 1: 1321-1331.
- [95] Yih W-t, Richardson M, Meek C, et al. The value of semantic parse labeling for knowledge base question answering [C]. Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2016.
- [96] Savenkov D, Agichtein E. When a knowledge base is not enough: Question answering over knowledge bases with external text data[J]. ACM, 2016: 235-244.
- [97] Dong L, Wei F, Zhou M, et al. Question answering over freebase with multi-column convolutional neural networks[C]. In Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing, 2015, 1: 260-269.
- [98] Yu Y, Hasan K S, Yu M. Knowledge base relation detection via multi-view matching[J]. arXiv preprint arXiv: 1803.00612. 2018.
- [99] Yin W, Yu M, Xiang B, et al. Simple question answering by attentive convolutional neural network [C]. In Proceedings of COLING 2016, the 26th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers, 2016: 1746-1756.
- [100] Dubey M, Banerjee D, Chaudhuri D, et al. Earl: Joint entity and relation linking for question answering over knowledge graphs[J]. arXiv preprint arXiv: 1801.03825. 2018.
- [101] Dai Z, Li L, Xu W. Cfo: Conditional focused neural question answering with large-scale knowledge bases[J]. arXiv preprint arXiv: 1606.01994. 2016.
- [102] Zhang Y, Dai H, Kozareva Z, et al. Variational reasoning for question answering with knowledge graph [J]. AAAI, 2018.
- [103] Petrochuk M, Zettlemoyer L. Simplequestions nearly solved: A new upperbound and baseline approach [J]. arXiv preprint arXiv: 1804.08798. 2018.

- [104] Wang Y, Berant J, Liang P. Building a semantic parser overnight[C]. In Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing, 2015, 1: 1332-1342.
- [105] Luis Antonio Galarraga, Christina Teflioudi, Katja Hose, et al. AMIE: association rule mining under incomplete evidence in ontological knowledge bases[C]. WWW 2013, 2013: 413-422.
- [106] William W Cohen, Fan Yang, Kathryn Mazaitis: TensorLog: Deep Learning Meets Probabilistic DBs [J]. CoRR abs/1707.05390 (2017).
- [107] Antoine Bordes, Nicolas Usunier, Alberto García-Durán, et al. Oksana Yakhnenko: Translating Embeddings for Modeling Multi-relational Data[J]. NIPS 2013: 2787-2795.
- [108] Bishan Yang, Wen-tau Yih, Xiaodong He, et al. Li Deng: Embedding Entities and Relations for Learning and Inference in Knowledge Bases[C]. ICLR, 2015.
- [109] Lin Y, Liu Z, Sun M. Modeling Relation Paths for Representation Learning of Knowledge Bases[J]. EMNLP, 2015: 705-714.
- [110] Neelakantan A, Roth B, McCallum A. Compositional Vector Space Models for Knowledge Base Completion[C]. AAAI, 2015.
- [111] Socher R, Chen D, Manning C D, et al. Reasoning With Neural Tensor Networks for Knowledge Base Completion[C]. NIPS, 2013: 926-934.
- [112] Tim Dettmers, Pasquale Minervini, Pontus Stenetorp, Sebastian Riedel: Convolutional 2D Knowledge Graph Embeddings[C]. AAAI, 2018.
- [113] Michael Sejr Schlichtkrull, Thomas N Kipf, Peter Bloem, et al. Max Welling: Modeling Relational Data with Graph Convolutional Networks[C]. ESWC, 2018: 593-607.
- [114] Yelong Shen, Po-Sen Huang, Ming-Wei Chang, et al. Modeling Large-Scale Structured Relationships with Shared Memory for Knowledge Base Completion[C]. Rep4NLP@ACL, 2017: 57-68.
- [115] Fan Yang, Zhilin Yang, William W. Cohen: Differentiable Learning of Logical Rules for Knowledge Base Reasoning[C]. NIPS, 2017: 2316-2325
- [116] Rajarshi Das, Shehzaad Dhuliawala, Manzil Zaheer, et al. Go for a Walk and Arrive at the Answer: Reasoning Over Paths in Knowledge Bases using Reinforcement Learning[C]. ICLR, 2018.
- [117] Shu Guo, Quan Wang, Lihong Wang, et al. Knowledge Graph Embedding With Iterative Guidance From Soft Rules[C]. AAAI, 2018.
- [118] PeiFeng Wang, Shuangyin Li, Rong Pan. Incorporating GAN for Negative Sampling in Knowledge Representation Learning[C]. AAAI, 2018.
- [119] Wenhan Xiong, Thien Hoang, William Yang Wang. DeepPath: A Reinforcement Learning Method for Knowledge Graph Reasoning[C]. EMNLP, 2017: 564-573.
- [120] Maximilian Nickel, Volker Tresp, Hans-Peter Kriegel. A Three-Way Model for Collective Learning on Multi-Relational Data[C]. ICML, 2011: 809-816.
- [121] Harris S, Seaborne A, Prud'hommeaux E. SPARQL 1.1 query language[C]. W3C recommendation, 2013.
- [122] Nadime Francis, Alastair Green, Paolo Guagliardo, et al. Cypher: An Evolving Query Language for Property Graphs[C]. SIGMOD, 2018.
- [123] Oskar van Rest, Sungpack Hong, Jinha Kim, et al. PGQL: a Property Graph Query Language[C]. GRADES, 2016.
- [124] Renzo Angles, Marcelo Arenas, Pablo Barceló, et al. G-CORE A Core for Future Graph Query

- Languages[C]. SIGMOD, 2018.
- [125] Harris S, Gibbins N. 3store: Efficient bulk RDF storage[J]. International Workshop on Practical and Scalable Semantic Systems (PSSS'03), 2003: 1-15.
- [126] Pan Z, Heflin J. Dldb: Extending relational databases to support semantic web queries[R]. LEHIGH UNIV BETHLEHEM PA DEPT OF COMPUTER SCIENCE AND ELECTRICAL ENGINEERING, 2004.
- [127] Wilkinson K, Wilkinson K. Jena property table implementation [OL]. <http://www.hpl.hp.com/techreports/2006/HPL-2006-140.html>.
- [128] Abadi D J, Marcus A, Madden S R, et al. SW-Store: a vertically partitioned DBMS for Semantic Web data management[J]. Vldb Journal, 2009, 18(2): 385-406.
- [129] Neumann T, Weikum G. RDF-3X: a RISC-style engine for RDF[C]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2008, 1(1): 647-659.
- [130] Bornea M A, Dolby J, Kementsietsidis A, et al. Building an efficient RDF store over a relational database[C]. Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2013: 121-132.
- [131] Zou L, Özsü M T, Chen L, et al. gStore: a graph-based SPARQL query engine[J]. The VLDB journal, 2014, 23(4): 565-590.
- [132] LargeTripleStores[OL]. <https://www.w3.org/wiki/LargeTripleStores>.
- [133] CheekulaSK, KapanipathiP, DoranD, et al. Entity Recommendations Using Hierarchical Knowledge Bases[C]. In: Proceedings of the 4th Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining Meets Linked Open Data co-located with 12th Extended Semantic Web Conference, 2015.
- [134] Passant A. dbrec-Music Recommendations Using DBpedia[C]. In: Proceedings of The 9th International Semantic Web Conference, 2010: 209-224.
- [135] Yang D, He J, Qin H, et al. A Graph-based Recommendation across Heterogeneous Domains[C]. In: Proceedings of the 24th ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2015: 463-472.
- [136] de Campos L M, Fernández-Luna J M, Huete J F, et al. Combining content-based and collaborative recommendations: A hybrid approach based on Bayesian networks[J]. Int. J. Approx. Reasoning, 2010, 51(7): 785-799.
- [137] Sun Y, Han J, Yan X, et al. PathSim: Meta Path-Based Top-K Similarity Search in Heterogeneous Information Networks[J]. PVLDB, 2011, 4(11): 992-1003.
- [138] Yu X, Ren X, Sun Y, et al. Personalized entity recommendation: a heterogeneous information network approach[C]. In: Proceedings of the 7th ACM International Conference on Web Search and Data Mining, 2014: 283-292.
- [139] Catherine R, Cohen W W. Personalized Recommendations using Knowledge Graphs: A Probabilistic Logic Programming Approach[C]. Proceedings of the 10th ACM Conference on Recommender Systems, 2016: 325-332.
- [140] Wang W Y, Mazaitis K, Cohen W W. Programming with personalized pagerank: a locally groundable first-order probabilistic logic[C]. Proceedings of 22nd ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2013: 2129-2138.
- [141] Ristoski P, Paulheim H. RDF2Vec: RDF Graph Embeddings for Data Mining[C]. Proceedings of The 15th International Semantic Web Conference, 2016: 498-514.

- [142] Zhang F, Yuan N J, Lian D, et al. Collaborative Knowledge Base Embedding for Recommender Systems[C]. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016: 353-362.
- [143] Wang H, Wang N, Yeung D. Collaborative Deep Learning for Recommender Systems [C]. In: Proceedings of the 21th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2015: 1235-1244.
- [144] Grover A, Leskovec J. node2vec: Scalable Feature Learning for Networks[C]. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2016: 855-864.
- [145] Palumbo E, Rizzo G, Troncy R. entity2rec: Learning User-Item Relatedness from Knowledge Graphs for Top- N Item Recommendation [C]. Proceedings of the 7th ACM Conference on Recommender Systems, 2017: 32-36.
- [146] Swetina J, Lu G, Jacobs P, et al. Toward a standardized common M2M service layer platform: Introduction to oneM2M[C]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(3) : 20-26.
- [147] Alaya M B, Medjiah S, Monteil T, et al. Toward semantic interoperability in oneM2M architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(12) : 35-41.
- [148] PCHAINPosition Paper[OL]. <https://pchain.org/js/generic/web/viewer.html>.

作者简介

陈华钧 浙江大学计算机科学与技术学院教授，主要研究方向为知识图谱、自然语言处理、大数据与人工智能。中国中文信息学会语言与知识计算专业委员会副主任、中国人工智能学会知识工程与分布智能专业委员会副主任、CCF 术语工委会执行委员、CCF 信息系统专业委员会委员等。



王昊奋 上海乐言信息科技有限公司 CTO，主要研究方向为知识图谱与聊天机器人，CCF 理事，CCF 术语审定工作委员会主任，CCF 信息系统专业委员会委员，CCF 中文技术专委委员



漆桂林 东南大学教授，主要研究方向人工智能、知识工程、语义网，中国中文信息学会语言与知识计算专业委员会副主任，CCF 会员



王 鑫 天津大学、副教授、研究方向：知识图谱数据管理与机器学习、图数据库、大数据分布式处理、CCF 高级会员、计算机术语审定工作委员会执行委员、信息系统专委会委员、数据库专委会委员，中国中文信息学会语言与知识计算专委会委员。



顾进广 武汉科技大学，教授，主要研究方向为语义网，分布式计算，CCF 高级会员



生成对抗网络的研究进展与趋势

CCF 人工智能与模式识别专业委员会

霍 静¹ 兰艳艳² 高 阳¹

¹南京大学，南京

²中科院计算所，北京

摘要

自 2014 年提出生成对抗网络以来，对生成对抗网络的研究已经成为机器学习领域的一个热点。生成对抗网络可以被广泛地应用到多种视觉任务以及很多其他任务中，如图像生成、图像超分辨率、图像去噪、图像语义分割、模仿学习等。然而，由于生成对抗网络是一个刚起步的研究领域，其在理论研究上仍然存在很多可研究的地方。本文致力于将近几年国内外的相关研究进展进行梳理，从生成对抗网络的理论及应用方面出发，给相关人员提供一个系统的技术参考体系，并指出其后续的发展方向。

关键词：生成对抗网络，深度学习，产生式模型，数据生成

Abstract

Since the generative adversarial network is proposed on the year 2014, it rapidly becomes a hot research topic in machine learning. Generative adversarial network can be widely used in many computer vision tasks and many other tasks, such as image generation, image super resolution, image denoising, image semantic segmentation, imitation learning, etc. However, since generative adversarial network is just a new topic, there are still many theoretical things to study. This article is aimed to provide a general view of the international and domestic's related work in both the theory and application of generative adversarial network, so that relevant researchers can have a systematic technical reference of related work. Future directions are also discussed.

Keywords: Generative Adversarial Network, Deep Learning, Generative Model, Data Generation

1 引言

1.1 生成对抗网络的产生背景

生成对抗网络（Generative Adversarial Net, GAN）^[1]是生成式模型的一种，生成式（generative）模型是机器学习方法中的一大类，与之相对应的是判别式（discriminative）

模型。假设 x 是观测特征, y 是对应的类标, 判别式模型的目标是对 $p(y|x)$ 建模, 这样的算法学习的是从输入特征到类标之间的映射关系。与判别式模型不同, 生成式模型对 $p(x|y)$ 建模, 即给定类别以后, 建模对应的特征分布。在生成对抗网络产生以前, 深度生成式模型的影响力相较于判别式模型要小很多, 主要原因是在通过最大似然估计等方法学习生成模型的过程中, 在很多近似棘手的概率计算方面存在的很多困难。此外, 在生成上下文场景中, 很难利用上分段线性单元的优势^[1-4]。由于现有的深度生成式模型的上述缺陷, Goodfellow 等人提出了生成对抗网络。

生成对抗网络包括一个生成器及一个判别器。生成器负责捕捉真实样本的数据分布, 可以生成新的样本。判别器通常是一个二分类器, 作用是判别输入给判别器的样本是生成样本还是真实样本。整个生成对抗网络的优化过程是一个极小极大的博弈问题, 训练过程中, 对判别器的训练目标是最小化判别器的分类损失。生成器的优化与判别器的优化是一个极小极大的博弈问题, 当达到纳什均衡时, 生成器可以捕捉到数据样本的分布, 从而生成样本。在 Goodfellow 等人 2014 年的论文 [1] 中, 他们证明了上述的博弈问题等价于优化数据分布与生成模型分布的 Jensen-Shannon 散度。

由于生成对抗网络的一系列良好特性, 自生成对抗网络产生后就被应用到了各个应用领域。其中最受关注的当属计算机视觉领域, 包括图像生成、图像分割、风格迁移等。此外, 在其他的一些领域, 如信息检索、文本生成等也受到了非常大的关注。生成对抗网络迅速成了近几年来最受关注的生成式模型, 开辟了一系列的研究工作。

本文将对生成对抗网络近几年的工作进行综述, 主要从以下两个方面进行详细介绍。第一个方面是生成对抗网络的理论研究, 其中将重点介绍生成对抗网络在训练方法理论上及生成多样性上的进展。第二个方面介绍生成对抗网络在各个应用领域的进展, 尽可能全面地围绕目前生成对抗网络的应用领域介绍生成对抗网络的各个工作, 侧重于分析各个工作的区别及适用范围。

1.2 生成对抗网络结构介绍

生成对抗网络最核心的思想是让生成器与判别器对抗学习, 两者进行博弈。判别器的目的是正确判别输入数据是真实数据还是生成器生成的数据。生成器的目的是尽可能地学习真实的数据分布, 生成可以欺骗判别器的数据。在该博弈过程中, 生成器和判别器作为博弈的两个参与者会得到不断优化, 生成器的生成能力会得到不断的提升, 可以越来越好地欺骗判别器, 判别器的判别能力也会不断提升, 可以越来越好地分辨真实或虚假的样本。Goodfellow 等人 2014 年的论文 [1] 中提出的生成对抗网络结构如图 1 所示。

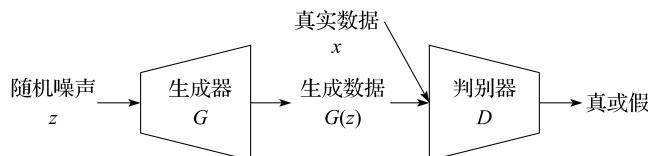


图 1 生成对抗网络结构

在上述的生成对抗网络中，假设用符号 G 表示生成器，符号 D 表示判别器，其中 G 与 D 可以是任意形式的对输入及参数可微的函数，生成器 G 以噪声向量 z 为输入，假设其参数为 $\theta^{(G)}$ ，判别器 D 以观察向量 x 为输入，假设其参数为 $\theta^{(D)}$ 。

生成器 G 的功能是当给定一个服从一定分布的噪声向量 z 以后， $G(z)$ 生成一个服从模型分布 p_{model} 的样本 x 。判别器 D 的输入 x 可以是真实的样本也可以是生成器生成的样本，其功能是对输入的样本进行二分类，即分为真实样本或虚假样本，得到尽量高的分类准确率。因此，整个方法设计中，判别器的损失函数如下：

$$J^{(D)}(\theta^{(D)}, \theta^{(G)}) = -\frac{1}{2} \mathbb{E}_{x \sim p_{\text{data}}} \log(D(x)) - \frac{1}{2} \mathbb{E}_z \log(1 - D(G(z)))$$

该损失函数是一个二分类的交叉熵损失，训练过程中的数据包括两部分，一部分是真实的样本，另一部分是生成器生成的样本。生成器与判别器进行博弈，最经典的博弈是零和博弈，在零和博弈中，两个参与者的损失加和为零。假设生成器的损失为 $J^{(G)}$ ，则在零和博弈中，存在下面的公式：

$$J^{(G)} = -J^{(D)}$$

实际上，生成对抗网络中 $J^{(G)}$ 与 $J^{(D)}$ 是联系在一起的，因此，最后的博弈问题变成了如下形式：

$$\min_{\theta^{(G)}} \max_{\theta^{(D)}} V(\theta^{(D)}, \theta^{(G)})$$

其中， $V(\theta^{(D)}, \theta^{(G)}) = -J^{(D)}(\theta^{(D)}, \theta^{(G)})$ ，上述的博弈问题也叫最小最大博弈问题。一方面判别器的目标是优化损失函数使真实样本与虚假样本可以分开，另一方面生成器的目标又是优化损失函数使虚假样本会被判别器错误分类。在 Goodfellow 等人 2014 年的论文中，他们证明了上述的博弈问题等价于优化数据分布与生成模型分布的 Jensen-Shannon 散度。

在上述生成对抗网络结构的基础上，研究者又为解决不同的问题提出了不同的生成对抗网络结构。例如，为了解决控制生成结果类别的问题，Mirza 等人^[5]提出了条件生成对抗网络（Conditional Generative Adversarial Net，CGAN）；为了解决无监督的样本生成，Zhu 等人^[6]提出了循环连续对抗网络（Cycle-Consistent Adversarial Network，CycleGAN），Liu 等人^[7]提出了耦合生成对抗网络。随着生成对抗网络被不断应用于各个应用领域，为适应不同的应用问题，生成对抗网络的结构仍在不断更新。

1.3 与其他生成模型的差别

自编码器（Auto-Encoder，AE）是一种反向回传的无监督神经网络算法，其主要原理是通过神经网络输出与输入数据相似的输出数据。因此，神经网络的作用等价于一个恒等函数。尽管恒等函数的功能很简单，但在自编码网络中，通常会限制隐变量的数目大小。例如，将一个较大多数目的输入首先编码为一个较少数目的隐变量，再将该较少数目的隐变量解码为一个与输入数据相似的输出。由于隐变量的维度通常小于输入，因此，自编码器通常可以用于特征降维。在自编码器中设置较小的隐变量参数，包含的基础假

设是，假设特征与特征之间存在相关性，则算法可以从这里面找到这些相关性，从而通过更小维度的隐变量对数据进行表示。

此外，为了解决复杂的概率推断问题，Kingma 等人^[8]提出了一种随机梯度变分贝叶斯方法，将该模型应用到神经网络中，就得到了变分自编码器。变分自编码器的主要目的是对隐变量后验进行推断，采用的做法是首先建立一个变分的下界表示，该下界可以通过随机梯度方法直接优化。然后，在作者给出的独立同分布数据上，后验估计可以通过所提出的下界估计来拟合一个近似推理模型。

自编码器与生成对抗网络的一个重要区别在于自编码器的损失函数通常使用一个简单的度量，例如欧式距离。简单度量通常导致自编码器生成的图像比较模糊，而生成对抗网络的度量函数更加适合高维数据。

生成对抗网络与变分自编码器的不同在于变分自编码器有一个变分下界，与真实的样本分布之间存在偏差。生成对抗网络没有变分下界，因此，假设训练数据足够好，它可以更好地拟合数据的分布。

像素循环神经网络模型（Pixel Recurrent Neural Network，PixelRNN）模型^[9]是由 Van Den Oord 等人于 2016 年提出的一种生成式模型，该模型的主要原理是利用循环神经网络一个像素一个像素地进行样本生成。相比于 PixelRNN 模型，生成对抗网络一次产生一个完整的样本，PixelRNN 模型则是一个像素一个像素地去生成样本。因此，生成对抗网络的时间性能更优。

1.4 本文的组织安排

由于生成对抗网络相较于已有的生成模型在诸多方面都存在优势，自 2014 年生成对抗网络被提出以后，已经在各种应用领域被广泛使用。本文的第 2 节将介绍生成对抗网络的国际研究现状，2.1 节将介绍生成对抗网络的理论研究进展，2.2 节将介绍生成对抗网络在各个领域的应用进展，2.3 节将介绍生成对抗网络的评价指标；第 3 节将介绍国内在生成对抗网络方面的相关工作；第 4 节、第 5 节给出未来发展趋势和总结。

2 国际研究现状

2.1 生成对抗网络的理论研究进展

2.1.1 训练方法理论研究

生成对抗网络（Generative Adversarial Net，GAN）通过生成器与判别器之间的相互

对抗进行训练。判别器的优化目标为分辨图像的真假，而生成器的优化目标则为生成能够骗过判别器的图像。从而在对抗过程中，判别器和生成器的能力都得到提高。而在对抗训练中，需要保持判别器和生成器能力的相对平衡，这样才能使二者同时得到提高。否则一方能力过强，会导致另一方无法从对抗中获取有用的信息，从而无法提高自身能力。这一原因导致 GAN 在训练中存在困难和不稳定，国际上的研究人员针对这一问题进行了大量研究工作。

为了提高 GAN 训练的稳定性，目前国际上相关的工作主要从分布距离度量、网络结构与训练技巧以及模型正则化三个方面改进 GAN 的训练方法，从而提高其训练稳定性。

针对 GAN 训练中需要保持判别器与生成器平衡的难点，通过使用一种新的分布距离度量方式，降低训练过程中对模型平衡性的要求，提高模型的训练稳定性，降低训练难度。其中，沃瑟斯坦生成对抗网络（Wasserstein Generative Adversarial Network，WGAN）^[10]的优化目标是最小化对沃瑟斯坦 -1 距离（wasserstein-1/earth-mover distance）的近似。这种距离度量在优化中不需要严格保持生成器和判别器能力的平衡，因此，训练更加容易、稳定。用于训练 GAN 距离度量的另一种方式是神经网络度量（neural net distance）^[11]，使用这种度量能够使训练的 GAN 具有更好的泛化能力，生成的图像更逼真。

稳定 GAN 训练的另一类方法是通过设计不同的网络和训练技巧来实现的。其中，生成多对抗网络（generative multi-adversarial network）^[12]通过在模型中应用多个不同严格程度的判别器来对生成器的训练进行联合指导，从而使判别器能够获得更全面的反馈信息，使模型训练更加稳定。OpenAI 的研究人员^[13]提出了一系列提高 GAN 训练效果的技巧。特征匹配（feature matching）通过优化生成器使其生成的图像与真实图像在判别器中具有相同的特征，而不是相同的分类，以防止生成器对某一阶段的判别器过拟合。批量判别（minibatch discrimination）对判别器进行特别设计，使其在判断某一样本真假时也参考其他样本，从而防止模式坍塌。历史平均（historical averaging）在优化函数中加入历史参数的均值，从而使模型能够在低维、连续非凸游戏中达到平衡点。单边标记平滑（one-sided label smoothing）通过在优化目标的正样本项前引入一个平滑参数，从而提高模型的鲁棒性。虚拟批量归一化（virtual batch normalization）通过将批量归一化（batch normalization）中的批量统计信息更换为累计统计信息，从而提高模型的泛化能力。

稳定 GAN 训练也可以通过对模型添加正则化项来实现。比如，研究人员通过对 GAN 的训练过程进行数值分析，并添加正则化项鼓励生成器和判别器能够达成一致，进而提出一致优化方法（concensus optimization）^[14]。另外，也可以通过对判别器模型参数添加谱正则化项（spectral normalization）^[15]来实现提高 GAN 训练稳定性效果。

2.1.2 生成多样性/模式坍塌

GAN 训练的另一个问题是模式坍塌（mode collapse），从而生成缺乏多样性的单一样本。图 2 中的 2 到 4 列给出了模式坍塌问题的一个示意图，体现为生成图片在外观上表现单一，没有多样性。在 GAN 模型的对抗训练中，由于生成器常常陷入局部最优值，或

者对判别器状态过拟合，从而只能生成某一种特定的样本，而无法生成多样性的样本，这种情况称为模式坍塌。目前研究人员对这一问题也进行了大量的研究。

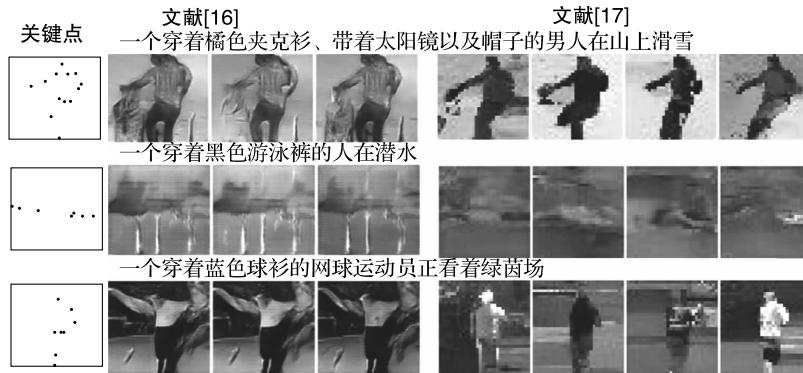


图2 模式坍塌示意图

注：图中2到4列给出了文献[16]的生成效果，呈现出了比较明显的模式坍塌问题，即生成样本在外观上单一，缺乏多样性。图中的最后4列给出了文献[17]的生成效果，没有模式坍塌问题^[17]

模式坍塌的原因之一是GAN训练的不稳定性，从而导致其陷入局部最优值或者对某一状态的判别器产生了过拟合。因此，一部分工作通过提出稳定性更好、更易于训练的GAN模型来解决模式坍塌问题，例如WGAN^[10]等。而展开生成对抗网络（Unrolled Generative Adversarial Network, Unrolled GAN）^[18]主要针对训练过程中判别器不是最优状态的问题，通过对梯度更新进行展开操作，以获得更优的判别器状态，并用其指导生成器参数的更新，从而防止生成器过拟合于一个较差的判别器，进而防止模式坍塌。

另外一部分工作从更加直接的角度解决模式坍塌问题。数据有限下的多样性生成对抗网络（Generative Adversarial Network for Diverse and Limited Data, DeLiGAN）^[19]用参数化的高斯混合模型替换原始生成对抗网络中的随机向量输入，利用输入的多样性促进生成样本的多样性。自提高生成对抗网络（Boosting Generative Model, AdaGAN）^[20]使用自提高的训练机制，通过融合多个生成模型，达到更好的拟合数据分布的目的，从而应对模式坍塌问题。流形指导生成对抗网络（Manifold Guided Generative Adversarial Network, MGGAN）^[21]引入了额外的编码器和判别器，分别用来将图像编码到流形空间和判别流形空间中点的真假，来引导生成器的训练，使生成器能够拟合数据的高维流形分布；该方法能够在保持图像生成质量的前提下，提高生成图像的多样性。

2.2 生成对抗网络的应用进展

2.2.1 图像生成/合成

生成对抗网络最直接的应用场景便是图像生成，图3给出了Goodfellow等人2014年的论文中的方法的图像生成效果。图像生成这类工作主要关注三个方面：提高生成图像的质量，根据指定条件生成图像，图像编辑以及其他图像生成的应用场景。

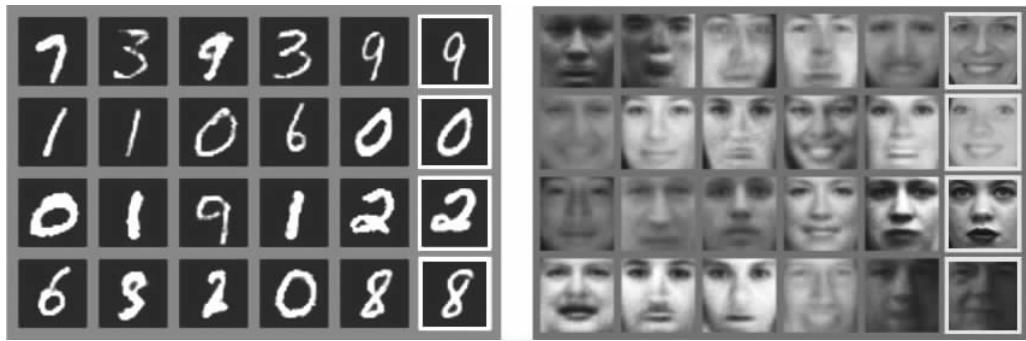


图3 文献[1]中的生成对抗网络结构的图像生成效果

注：其中黄色框中是与生成样本最相近的真实训练样本^[1]

最初的生成对抗网络^[1]虽然能够生成相对比较逼真的图像，不过依然存在一些问题，例如生成的图像比较简单、分辨率低、边缘模糊等。为了生成更复杂、更清晰的图像，拉普拉斯金字塔生成对抗网络（Laplacian Pyramid Generative Adversarial Network, LapGAN）^[22]采取了从粗糙到细致的生成机制，在拉普拉斯金字塔框架中将串联的卷积神经网络作为生成器，从而能够生成更复杂、更清晰的图像。深度卷积生成对抗网络（deep convolutional generative adversarial network）^[23]提出了一系列用卷积神经网络设计生成对抗网络的指导准则，该类网络同样提高了生成图像的质量。

另一方面，最初的生成对抗网络只能从随机编码中生成图像，无法控制生成图像的类别、内容、风格等。条件生成对抗网络（conditional generative adversarial net）^[5]通过在生成器和判别器中加入类别标签信息，实现了指定类别的图像生成，图4给出了条件生成对抗网络的网络结构。此外，堆叠生成对抗网络（Stacked Generative Adversarial Networks, SGAN）^[24]利用判别器不同层次的中间特征训练一系列堆叠的生成器，从而实现了指定内容的图像生成，且提高了图像生成的质量。信息最大化生成对抗网络（Information Maximization Generative Adversarial Network, InfoGAN）^[25]将GAN中的随机编码分解为一个不可压缩的部分和一个隐变量部分，后者编码类别等信息，前者编码其他信息，并通过最大化隐变量与生成器输出之间的互信息的方式进行训练，从而可以通过调整隐变量编码和不可压缩编码来实现对生成图像内容和风格的控制。生成对抗内容位置网络（Generative Adversarial What-Where Network, GAWWN）^[16]实现了通过文字控制内容，通过标记指定位置的图像生成。

在利用生成对抗网络合成图片方面，一些其他的应用场景还包括：利用GAN实现根据文字生成指定的图像^[26]；通过交互式GAN对图像进行编辑^[27]；利用空间转换器生成对抗网络（spatial transformer generative adversarial network）^[28]实现将前景物体合成到背景场景图像中的功能；以及利用GAN生成三维人脸的UV map，从而实现跨姿态人脸识别^[29]等。

2.2.2 跨域生成/合成

生成对抗网络的另一个重要的应用领域是图像的跨域生成，即给定源域图像生成与

之对应的目标域图像，如给定素描生成照片等。图 5 给出了一系列图像跨域生成的例子。这方面的工作主要关注监督式跨域图像生成、无监督式跨域图像生成以及多模态的跨域图像生成这三个方面的问题。

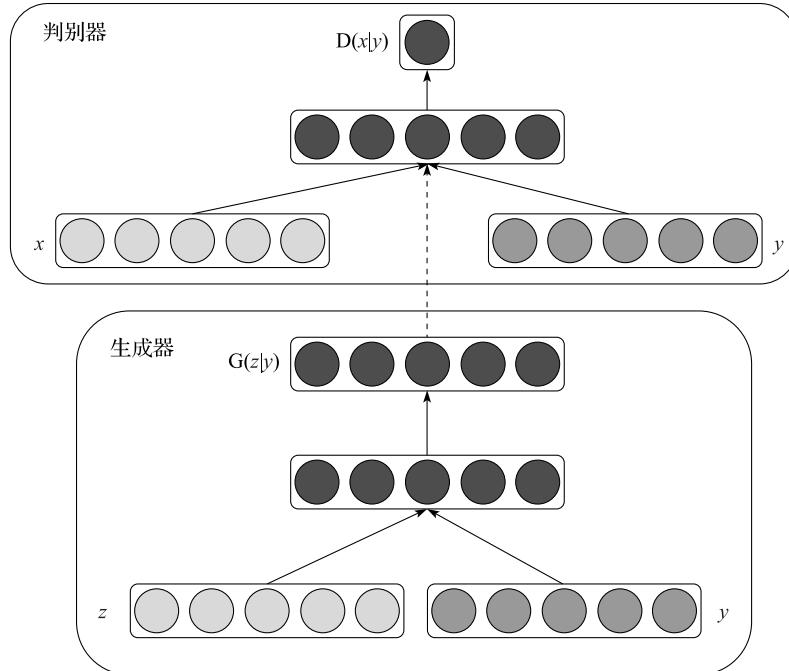


图 4 条件生成对抗网络结构

注：图中 z 为噪声， y 是条件输入，生成器以 y 为条件进行样本生成，判别器同时接收 y 以及 x （对应真实或生成样本）作为输入进行判别。对比于图 1 中的网络结构，条件生成对抗网络实现了指定类别的图片生成^[5]



图 5 图像跨域生成的一系列例子

注：整体来说，图像跨域生成是根据给定的一个域下的图像生成其在另一个域下的图像表示^[30]

监督式跨域图像生成任务需要成对的图像作为训练集。这方面的典型工作包括利用条件生成对抗网络完成图像跨域生成任务^[30]以及马尔可夫生成对抗网络 (markovian generative adversarial network)^[31]。其中，前者将源域图像作为条件输入到生成器中，判

别器判断在给定源域图像的条件下目标域图像的真假；然后通过对抗训练，使生成器能够根据源域图像生成目标域图像。后者则在生成器和判别器中引入了神经网络提取特征作为编码器，从而提高模型性能。

由于现实应用中成对数据难以获取，因此，研究人员开始关注半监督和无监督的跨域图像生成任务。三角生成对抗网络（triangle generative adversarial network）^[32]结合了条件生成对抗网络和双向生成对抗网络，实现了半监督的跨域图像生成。域转换网络（domain transfer net）^[33]利用预训练的分类器从源域图像中提取特征作为生成器的输入，并用对抗训练使生成器能够生成保持特征一致的目标域图像；另外一部分工作设计成对的生成对抗网络，并使两个网络共享部分参数生成无监督的双向跨域图像^[7,34]。对偶生成对抗网络（dual generative adversarial network）^[35]和循环生成对抗网络（cycle generative adversarial network）^[6]则通过引入循环一致性损失，同样生成了无监督的双向跨域图像实现。深度注意力生成对抗网络（deep attention generative adversarial network）^[36]在模型中进一步引入了注意力机制，提高了模型生成图像的质量。

由于现实应用中的跨域图像大多不是一一对应的关系，而是多对多的关系，因此，研究人员对多模态跨域图像转换任务进行了进一步研究。双向循环生成对抗网络（bicycle generative adversarial network）^[37]结合条件自编码器生成对抗网络和条件隐回归生成对抗网络，实现了监督式的多模态跨域图像转换。增强循环生成对抗网络（augmented cycle generative adversarial network）^[38]在循环生成对抗网络的基础上引入了表达风格信息的随机编码，并将循环一致性扩展为风格编码增强的循环一致性，从而实现了无监督式的多模态跨域图像生成。多模态无监督图像转换网络^[39]通过将图像编码为风格编码和内容编码，输入不同的风格编码，同样实现了无监督式的多模态跨域图像的生成任务。

2.2.3 图像超分辨率

图像超分辨率是生成对抗网络的又一个应用领域。图像超分辨率，顾名思义就是将低分辨率的图像转换为高分辨率的图像。基于生成对抗网络的图像超分辨率方法通常由一个以低分辨率图像为输入、高分辨率图像为输出的生成器和一个对真实高分辨率图像和生成的超分辨率图像进行分辨的判别器组成。而在损失函数方面，除了生成对抗网络基本的对抗损失之外，通常还包括真实超分辨率图像与生成的超分辨率图像之间的 l_1 距离^[40]或 l_2 距离^[41]以及基于预训练的 VGG 模型的特征距离组成的内容损失。另外，研究人员通过实验证明，在基于最大后验概率分布的图像超分辨率方法中，基于生成对抗网络的优化方法能够在真实图像数据上取得最好的效果^[42]。在具体应用场景方面，研究人员将生成对抗网络用于人脸图像超分辨率和人脸关键点对齐，并取得了最好的效果^[43]，如图 6 所示。

2.2.4 图像去噪

图像去噪是图像处理中的一个重要课题，它的主要任务是在保留原有图像的基础上去除图像上的噪声。常见的图像去噪算法，如文献 [44] 中块匹配与三维滤波的方法（Block-

Matching and 3D filtering, BM3D), 该方法是基于噪声的先验信息达到去噪的目的。而对于噪声先验信息未知的情况, 近年来很多工作则利用卷积网络端到端的学习的特点来进行盲去噪, 如去噪卷积神经网络 (Denoising Convolutional Neural Network, DnCNN)^[45]。



图 6 文献 [43] 中利用生成对抗网络进行图像超分辨率的效果

注: 其中第一行是输入的低分辨率图像, 中间一行是 SRGAN^[41]的生成效果, 最后一行是文献 [43] 中的方法的生成效果^[43]

生成对抗网络在图像去噪中的应用主要分为两类。第一类是通过对抗训练的方式直接生成高质量的去噪图像^[46-48]。这种情况下的生成器通常是一个去噪网络, 而判别器则用于区分真实的清晰图像与经过去噪的图像, 如图 7 所示。文献 [46] 第一次将 GAN 引入图像去噪中, 并奠定了用 GAN 进行去噪的基本框架。文献 [47] 提到使用这种对抗训练进行去噪的方法还可以缓解重建损失带来的图像模糊问题。文献 [49] 则将结构相似性度量 (Structural Similarity, SSIM) 与 GAN 结合, 使压缩图像还原后能够保留更多的纹理和细节。第二类是用 GAN 直接对噪声进行建模^[50]。文献 [50] 中提到虽然深度卷积网络可以在噪声信息未知的情况下进行盲去噪, 但是需要成对的训练样本 (同一张图像的噪声版本和清晰版本), 而这样的图像对通常是很难获得的。该工作在噪声期望为零的假设下, 用 GAN 直接对噪声建模, 用生成器生成噪声, 然后将噪声叠加到清晰的图像上, 就获得了噪声图像, 这样就有了含噪声和不含噪声的一对样本, 基于这样的成对数据就可以训练出一个强大的去噪网络, 如图 8 所示。此外, 还有一些其他类型的方法, 如文献 [51] 表明反转生成器获得噪声图像的隐向量 (latent vector), 然后再基于此重建出该图像, 也可以达到去噪的效果。

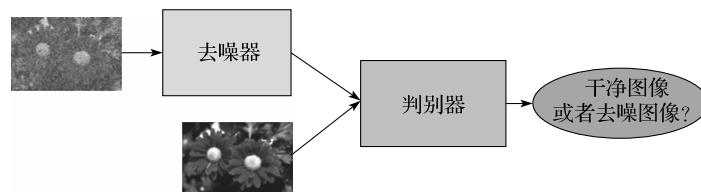


图 7 用生成对抗网络进行图像去噪的一般框架^[46]

2.2.5 图像语义分割

图像语义分割是计算机视觉领域中一个很有挑战性的问题。与一般图像分类不同的

是它不是给一个图像打标签，而是给图像的每一个像素打标签，图 9 给出了图像语义分割的一个示意图。目前已经有一些基于卷积神经网络（Convolutional Neural Net, CNN）的方法，但是该类方法是对各个像素独立预测，没有考虑像素的空间连续性。因此，需要有一些其他的方法如条件随机场（Conditional Random Field, CRF）来对空间连续性进行限制。

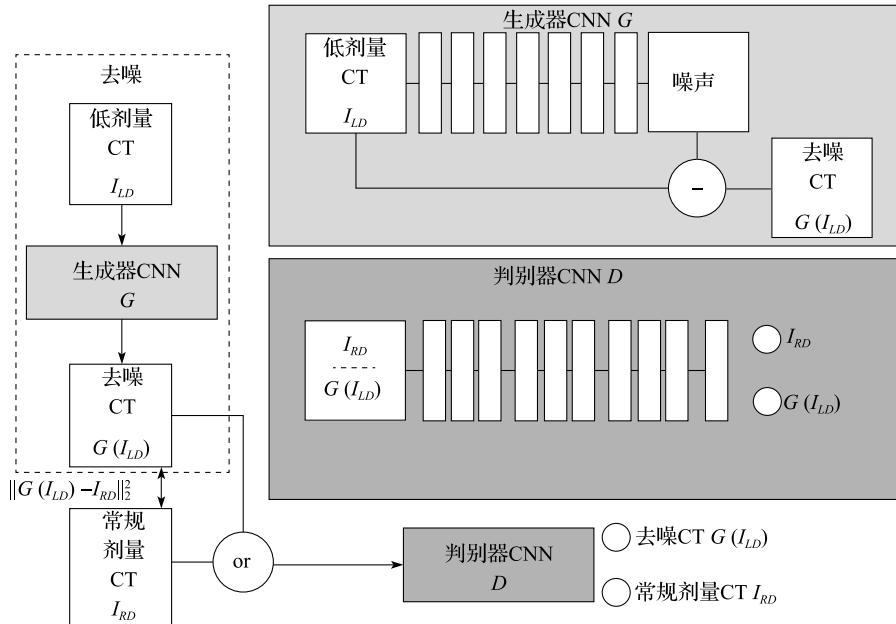


图 8 使用 GAN 对低剂量 CT 图像的噪声进行去除

注：整个网络由两部分组成，即生成器卷积网络和判别器卷积网络。生成器卷积网络直接对噪声进行学习，通过将含噪声的图像减去这个生成的噪声，得到生成的去噪图像。判别器则对真实的无噪声图像和生成的去噪图像进行判定^[50]



图 9 图像语义分割任务示意图

注：其中第一幅图片是输入，第二幅图片是像素的真实标注，第三幅、第四幅图片是参考文献 [51] 中的方法结果^[52]

生成对抗网络在语义分割中的应用主要有两类。

第一类是直接使用 GAN 生成逼真的分割结果^[52-53]。文献 [52] 中将分割网络作为生成器，判别器判别这样的样本，即，原始图像和由通过分割网络得到的分割图像组成的样本对，以及原始图像和正确的标注（ground truth）组成的样本对。通过拟合这两种样本对的分布，能够达到分割的目的，该工作的网络结构图如图 10 所示。文献 [53] 则是在传统分割损失的基础上再添加一个对抗损失来使分割结果和真实结果尽可能相似，

从而得到更加逼真的分割结果。

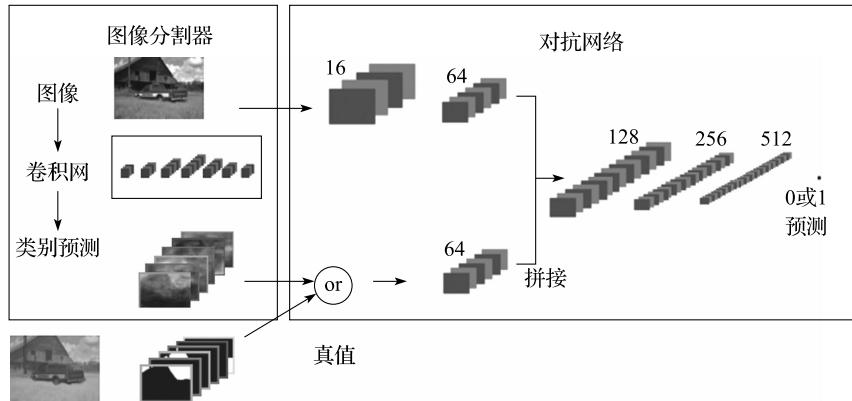


图 10 语义分割生成对抗网络

注：左边生成器预测每个像素产生的分割结果，右边的判别器判定图像对（原始图像和分割图像）是真实的还是生成的^[52]

第二类是针对标注数据缺乏的问题（尤其是医疗图像数据），使用 GAN 来训练分割器。第一类方法是基于半监督的方式进行数据扩充^[54]。文献 [54] 中使用三种数据训练 GAN，第一种是有正常标注的图像数据，第二种是弱标注图像数据（即只对图像进行了标注，而没有对像素进行标注），第三种是生成器生成的无标注样本。判别器是一个分割器，它判定每个像素的类别及真假。作者声称使用生成的数据可以拉近真实样本在特征空间中的距离，从而促使分割器更精准地分割。第二类方法是以无监督的形式训练分割器。这类方法又分为两种，第一种是基于域适应将一个域的图像生成另一个域的图像，同时生成相应的标签，利用生成的有标签数据训练一个分割器，如图 11 所示^[55-56]。另一种是通过无监督域适应的方式，只使用一个有标签的域的数据训练分割器，然后通过域适应将另一个域的图像和该域的图像映射到同一个特征空间或者直接将另一个域的图像转换为该域的图像，使分割器能够对转换后的特征或图像进行分割^[57-58]。

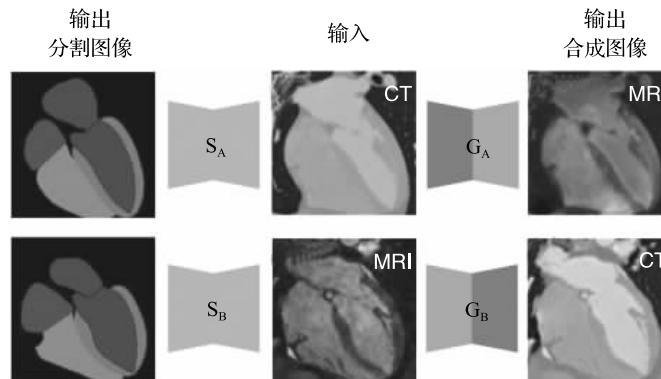


图 11 CT 和 MRI 图像的跨域生成

注：如果 CT 有标签而 MRI 无标签，则可以通过将 CT 图像生成对应的 MRI 图像，并将原来 CT 图像的标签作为生成的 MRI 图像的标签，这样就获得了有标签的 MRI 图像，可以训练一个 MRI 图像分割器^[55]

2.2.6 物体检测

图像的物体检测是计算机视觉领域中的主要问题之一。传统的目标检测算法主要分为三个阶段：区域选择、特征抽取和分类器分类。首先进行区域选择对目标位置进行定位，然后对选择的区域进行特征抽取，最后通过分类器分类来识别目标。目前比较出色的物体检测算法有 YOLO (You Only Look Once)^[59]、SSD (Single Shot MultiBox Detector)^[60]等。

虽然目前有很多成熟的物体检测算法，但对于一些场景，它们却不能很好地适用。在一些特定场景下，一些工作引入了GAN来进行建模。文献[61]中提到很多物体会有遮挡和形变的问题，常规的物体检测算法不能很好地适用于这样的物体检测。解决这样的问题，一个很自然的思路便是利用物体在各种遮挡和形变情况下的样本训练一个检测器，然而现实中这样的数据往往很难获得。于是，文献[61]提出使用GAN来生成遮挡和形变样本。生成器生成的遮挡和形变样本尽可能地使检测器检测错误，作者称之为难样本，而检测器则尽可能正确地检测这些样本。最终，在这种对抗训练的方式下得到一个对遮挡和形变鲁棒的检测器。文献[62]针对没有得到很好解决的小物体检测问题，提出使用生成对抗网络对物体进行高分辨率生成，获得该物体的高分辨率图像，并通过精炼网络使其具有逼真的纹理和细节，从而将小目标检测转化为常规目标检测问题。该工作在小人脸检测问题上取得了当时最先进的结果，如图12所示。



图12 通过对小人脸生成对应的高分辨率人脸，从而提升小物体检测精度

注：图a) 是原始小目标图像；图b) 是直接放缩到高分辨率图像的结果；图c) 和图d) 分别是使用高分辨率生成网络SRGAN^[41]和^[62]中提出的方法的生成结果^[62]

2.2.7 视频生成

尽管GAN在很多视觉任务上都有重大进展，但基本都是基于单张图片生成和修改。用于通用和可扩展的视频生成任务在很大程度上仍然没有得到解决。视频未来帧的预测是无监督视频特征学习的一个非常重要的研究方向。如何从一堆无标记的数据中学习并生成视频序列是一个非常具有挑战性的任务。同时，视频的预测生成在现实生活中也有

重要意义，例如，自动驾驶、准确预测驾驶场景的未来情况对驾驶安全而言至关重要。

视频帧基于视频中的外观和运动动态，根据之前的帧通过固有的像素流而自然生成。这不仅要求模型预测的未来视频序列的每一帧的外观内容真实清楚，还需要这些视频帧在一个时序方向上是连贯的。根据生成视频帧的目标的变化，目前基于 GAN 的视频生成主要分成三类，如何提高视频帧的质量、如何提高视频序列的流畅性、结合视频内容和时序动作。第一类视频序列生成的方法旨在生成高分辨率清晰的视频图像帧，这类方法通常包含两个分开的模型，第一个阶段为每一帧生成真实内容的图像，第二阶段开始改进第一阶段生成的视频帧，使之更接近真实物体的运动动态。Xiong 等人^[63]提出了一种多阶段的生成对抗网络（Multi-stage Dynamic Generative Adversarial Network，MD-GAN）用于生成动态高分辨率的视频序列。MD-GAN 包含两个阶段，每个阶段都有一对生成对抗网络。第一个阶段 Base-Net 类似一个 3D 的 U-net，用来生成清晰的内容细节和粗糙的运动动态。第二个阶段 Refine-Net 通过引入 Gram 矩阵来有效地模拟运动模式的对抗性排序损失，以提高运动质量。第二类生成方法旨在解决传统方法中出现的伪影问题。之前大多数方法都使用了生成式神经网络来直接合成未来视频帧的 RGB 像素值，无法明确建模固有的像素方面的运动轨迹，从而导致预测结果模糊。Liang 等人^[64]开发了一种对偶生成对抗网络架构，可以使用一种对偶对抗学习机制（dual adversarial learning mechanism）来学习如何明确地将未来帧中的合成像素值和像素上的运动轨迹保持连贯。作者在两个未来帧和未来流生成器以及两个帧和流判别器之间建立了一种对偶对抗训练机制，通过彼此审查，这种对偶学习机制将对未来像素的想象和流预测联系到了一起。

第三类方法注重图像内容和运动时序。视频中的视觉信号可以分为内容信号和运动信号，内容信号表述视频中具有哪些对象，运动信号描述这些对象的状态。Tulyakov 等人^[65]提出了一种分解内容信号和动作信号的视频生成方法（Motion and Content decomposed Generative Adversarial Network，MoCoGAN），作者将一张图片的隐空间分解为内容和运动两个字空间。分别对内容子空间中的一个点和运动子空间中的不同轨迹进行采样，模型会生成同一物体在不同运动状态下的视频。Ohnishi 等人^[66]提出了一种通过光流信息和纹理质地信息这两种分层信息学习生成视频的方法（Flow- and- Texture-Generative Adversarial Networks，FTGAN）。该模型包含两个子模型，FlowGAN 子模型产生光流，这些信息只包含边缘和运动。之后，第二个子模型 TextureGAN 专门为第一个子模型产生的光流提供纹理信息。这种分层的学习方法可以带来更加真实的视频序列，这些视频序列可以保证视频内容和动作的一致性。

当一张图片呈现在我们眼前时，我们会不由自主地联想到下一刻将要发生的事情；当暂停电影时，我们会对后面的剧情浮想联翩。以这样的事情训练一个人工智能模型同样可以完成，未来视频序列的生成任务是一个重要且困难的任务。不仅要求模型预测的未来视频序列的每一帧的外观内容是真实清楚的，还需要这些视频帧在一个时序方向上是连贯的。这种同时考虑内容信息和运动信息的方法是目前比较流行的方向。

2.2.8 文本生成

自 GAN 提出以后在以图像为代表的连续型数据生成任务上获得了广泛而成功的应

用，但在以文本为代表的离散型数据应用场景下遇到了较多的困难，其中最主要的是梯度传导问题。由于文本生成任务通常使用基于 LSTM 等循环神经网络的语言模型进行建模，生成样本时会包含一个采样操作，这个操作无法在反向传播的训练过程中传递梯度，从而导致原有的 GAN 生成器训练方法失效。这个问题阻碍了 GAN 在文本生成任务中的成功应用。近年来，很多研究者相继提出了不同的思路着力于解决这一问题。

一种解决方法是使用 Gumbel Softmax^[67] 代替原有的采样方法。设 \mathbf{p} 为一个词的概率分布向量 $\mathbf{p}_i = \mathbf{p}(w = y_i)$ ，其中 w 代表一个词， y_i 代表词表中的第 i 个词。原有的采样方法会从一个多项分布随机采样得到一个词，该多项式分布以 \mathbf{p} 为参数，即 $w = \text{Multinomial}(\mathbf{p})$ ，这种方法无法传递梯度。而 Gumbel Softmax 采用数学上的一种变换来解决这一问题。通常 \mathbf{p} 由另一个向量通过 Softmax 操作获得，即 $\mathbf{p} = \text{Softmax}(\mathbf{h})$ ，而使用 $\mathbf{y} = \text{one_hot}(\text{argmax}_i(\mathbf{h}_i + \mathbf{g}_i))$ 是一种在数学上等价的采样方法，其中 \mathbf{y} 是 w 对应的 one-hot 向量， \mathbf{g}_i 是服从于 Gumbel 分布的一个随机变量。实际使用时用下式进行近似：

$$\mathbf{y} = \text{Softmax}\left(\frac{\mathbf{h} + \mathbf{g}}{\tau}\right)$$

当 $\tau \rightarrow 0$ 时与原采样等价，因此较小的 τ 提供了一种较好的近似。至此，Gumbel Softmax 使用的计算是完全可导的，这就使生成器的训练得以正常进行。然而，这一方法在实际应用中的表现并不令人满意，因而未被广泛接纳使用。

另一种更为常见的解决思路是引入基于策略梯度 (policy gradient) 的强化学习方法。最早采用该思路的工作是 SeqGAN^[68]，它通过结合蒙特卡罗采样和预训练生成了较高质量的文本，如图 13 所示。

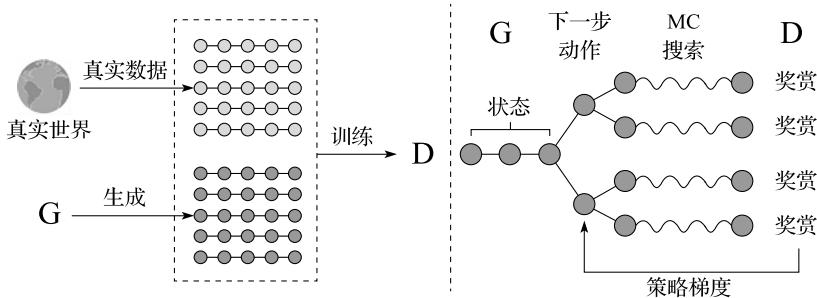


图 13 SeqGAN 示意图

注：左边是将真实文本和生成器 G 生成的文本输入到判别器。右边是判别器 D 通过奖赏，使用策略梯度对 G 进行更新^[68]

SeqGAN 将文本的词序列生成过程建模为每个时刻选择一个词的序列决策过程，并将判别器对生成样本的打分作为决策的奖励函数。这样的一个问题可以用强化学习中的策略梯度法进行求解，从而避免了梯度无法传递的问题。SeqGAN 的生成器优化目标为：

$$J(\theta) = \mathbb{E}_{Y_{1:t-1} \sim G_\theta} \left[\sum_{y_t \in Y} G_\theta(y_t | Y_{1:t-1}) \cdot Q_{D_\varphi}^{G_\theta}(Y_{1:t-1}, y_t) \right]$$

其中， $Y_{1:t-1}$ 代表文本序列的前 $t - 1$ 个词， y_t 代表文本序列的第 t 个词， G_θ 为生成器， $Q_{D_\varphi}^{G_\theta}$ 为奖励函数。其中，完整序列的奖励由判别网络 D_φ 的值直接给出，而在第 t 个词处

产生的奖励则由蒙特卡罗采样方法给出，具体做法是按照生成器的概率从该词的位置向后采样得到若干完整序列样本，然后将这些样本对应奖励值的平均作为第 t 个词处产生的奖励。结合基于传统极大似然估计（MLE）方法的预训练过程，SeqGAN 取得了比单纯使用 MLE 方法更高的文本生成质量。

由于 SeqGAN 的显著有效性，许多后续工作沿用了这种解决方案。Li 等人^[69] 将 SeqGAN 的框架推广到了带条件的文本生成任务即对话生成任务中，同样提升了生成质量。另一部分工作着力于继续改进 SeqGAN 的效果。Lin 等人^[70] 认为 SeqGAN 中判别器提供的二分类信息过少，因此，提出了 RankGAN，将判别器的功能改为对样本进行排序，目标是令真实数据的排名更高；而相对的生成器的优化目标改为让生成样本获得更高的排名，如图 14 所示。通过这一改动，RankGAN 获得了比 SeqGAN 更高的文本生成质量。

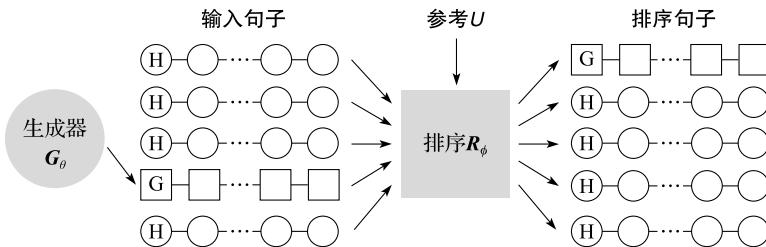


图 14 RankGAN 的模型结构^[69]

之后 Guo 等人^[71] 指出，SeqGAN 中判别器的内部信息可以泄露出来为生成器提供更好的训练指导。因此，提出了 LeakGAN 模型以实现这一目标，如图 15 所示。

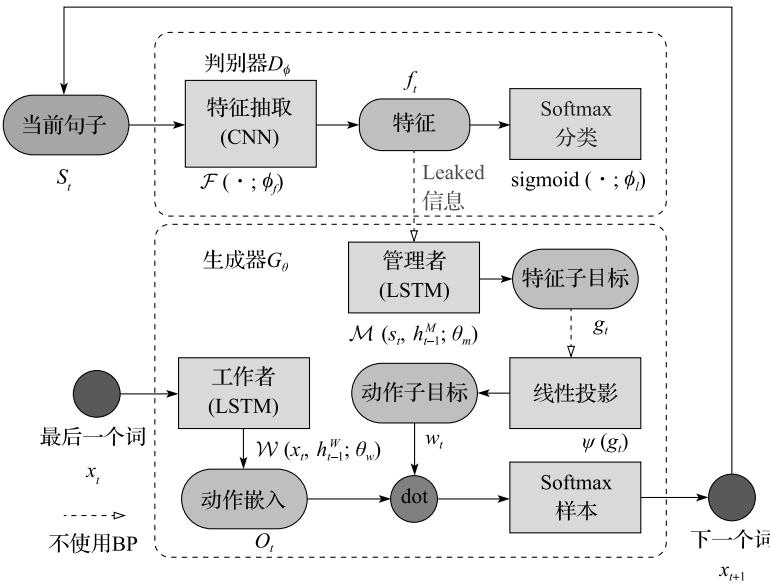


图 15 LeakGAN 的模型结构^[70]

LeakGAN 首先对生成器的结构进行了调整，采用了 Feudal Network 结构，由关注长期任务的 Manager 和负责执行生成的 Worker 两部分组成，同时将来自判别网络对不完整

序列的特征表达作为输入。另外，还采用了奖励函数伸缩调整、结合 MLE 交错训练及采样温度控制等方式增强了训练的稳定性。借助这些措施，LeakGAN 相对于 SeqGAN 获得了显著的生成质量提升，尤其是在长文本生成任务上。另一个工作 MaliGAN^[72] 使用了较为复杂的策略，其核心思想是在 SeqGAN 基础上将来自判别器的信号进行重新构造和归一化，并将长序列分成前后两段进行不同的处理，如图 16 所示。这些策略有助于降低生成器训练梯度的方差，从而实现更加稳定的训练，生成质量也有一定的提升。近期，Fedus 等^[67] 沿用强化学习的思路提出了一种差异较大的模型方案 MaskGAN，通过在句子的空缺位置填充词语来完成生成任务。具体做法是，使用序列到序列（Seq2seq）的自编码模型作为生成器学习句子的重构，输入端句子的每个位置都可能覆盖掩码，即真实词语未知，输出端要在信息不完全的情况下完成重构。判别器负责判断填充的词是否合适，以指导生成器的训练。

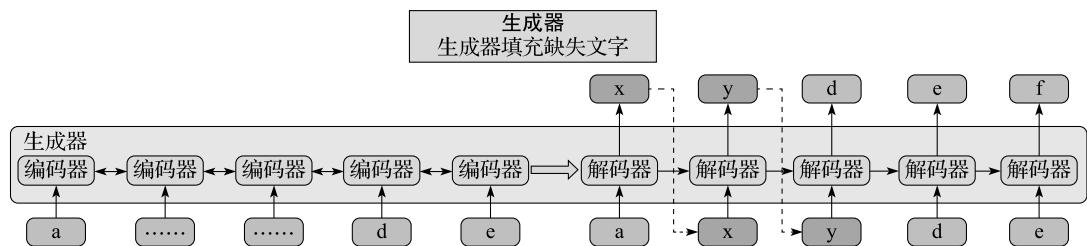


图 16 MaskGAN 的模型结构^[66]

训练完成后生成器可用于填空式的生成任务，或者将输入端全部覆盖掩码实现整个句子的生成，同样获得了比传统 MLE 更优的生成质量。

对于梯度传递问题，除以上两种解决思路以外，也有部分研究者选择直接将文本数据看作一种特殊的连续型数据，直接使用针对连续型数据的优化方法，从而绕开梯度传递问题。Gulrajani 等人^[73] 在 WGAN [10] 的基础上进行了改进，对生成器和判别器均使用 CNN 进行建模，完全将文本数据视为普通连续型数据。虽然这一模型并非是针对文本单独进行的设计，但在实验中也展示出了生成可读文本的能力。Rajeswar 等人^[74] 提出将 LSTM 结构生成器的输出视为连续型数据直接交给判别器进行判别，通过使用带 Peephole 的 LSTM 作为生成器和基于 CNN 的判别器实现了可行的训练，生成质量相对于 SeqGAN 等有一定的提升。Zhang 等^[75] 提出的 TextGAN 也基于类似的思路，但区别是在生成器的输出上添加了 soft-argmax 操作使输出更接近于真实数据的 one-hot 向量表达，即

$$\gamma = W \cdot \text{Softmax}(Vh \odot L)$$

类似于 Gumbel-softmax，这里的 W 、 V 、 L 均为可学习的参数。另外 TextGAN 使用特征匹配损失替代原来的对抗损失用于生成器的训练，使训练更加稳定，最终获得了比 SeqGAN 更优的生成质量，如图 17 所示。

Xu 等人^[76] 尝试将文本中的每个词表达成嵌入向量，而非通常使用的 one-hot 向量，判别器也相应地

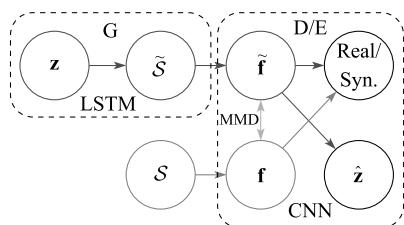


图 17 TextGAN 的模型结构^[74]

改为对嵌入向量进行判别。该工作提出了一种近似嵌入层结构以实现这一目标，即

$$y = \sum_{j=1}^V e_j \cdot \text{Softmax}(W(h + z) + b)_j$$

这里的 z 为输入噪声信号， W 、 b 为可学习的参数， e_j 为第 j 个词的嵌入向量。这相当于将总量为 1 的权重分配给每个词嵌入向量，然后将加权求和得到的向量作为生成词的向量表达。这一方法被应用在了对话生成任务中，获得了比 Li 等人^[77]更优的对话回复生成质量。

总结现有基于 GAN 的文本生成方法，围绕如何解决离散类型数据的生成器不可传递梯度的问题，主要有三种解决思路：

- 使用可传递梯度的 Gumbel Softmax 采样代替原有采样方法。
- 使用强化学习框架进行建模，并使用策略梯度法进行优化。
- 直接将文本视为连续型数据，可以表达为 one-hot 或者嵌入向量形式。

后两种思路都获得了较好的效果，在实际的文本生成任务中都能获得生成质量的提升。Lu 等^[78]对其中的大部分模型进行了整理并汇报了实际生成效果对比，如图 18 所示。

Image COCO 上的测试数据的 BLEU 值

模型	BLEU2	BLEU3	BLEU4	BLEU5
SeqGAN	0.745	0.498	0.294	0.180
MaliGAN	0.673	0.432	0.257	0.159
RankGAN	0.743	0.467	0.264	0.156
LeakGAN	0.744	0.517	0.327	0.205
MeskGAN	0.539	0.328	0.209	0.143
TextGAN	0.593	0.463	0.277	0.207
MLE	0.731	0.497	0.305	0.189

EMNLP 2017 WMT 上的测试数据的 BLEU 值

模型	BLEU2	BLEU3	BLEU4	BLEU5
SeqGAN	0.724	0.416	0.178	0.086
MaliGAN	0.755	0.436	0.168	0.077
RankGAN	0.686	0.387	0.178	0.086
LeakGAN	0.835	0.648	0.437	0.271
MeskGAN	0.265	0.165	0.094	0.057
TextGAN	0.205	0.173	0.153	0.133
MLE	0.771	0.481	0.249	0.133

图 18 不同 GAN 模型的文本生成效果

注：BLEU 指标指示生成质量，越高则质量越好^[77]

总结：在 GAN 应用于文本生成获得成功的同时，依然存在一些问题还未彻底解决。一是对抗训练的不稳定问题，经常会遇到梯度消失及收敛困难，必须依赖细致的调参才能缓解。二是对对抗训练能够获得质量提升的现象依然缺乏深刻地解释，研究者通常将其归因于 GAN 优化目标带来的全局一致性，然而尚未得到充分的证实。目前仍需相关研

究者对这些问题做进一步探讨。

2.2.9 在模仿学习中的应用

GAN 在图像、视频、文本生成方面有很多应用，这里介绍一个机器人学习的重要分支——模仿学习（Imitation Learning, IL）。我们知道，通过强化学习（Reinforcement Learning, RL）可以让机器人从 0 开始学习一个任务，但是我们人类学习新东西有一个重要方法叫作模仿学习，通过观察别人的动作从而完成学习。因此，模仿学习就是希望机器人也能通过观察模仿来实现学习。模仿学习的终极目标就是单样本模仿学习（One Shot Imitation Learning），能够让机器人仅需要少量的示范就能够学习，另一方面，模仿学习的挑战还包括根据具有很大差异的观察数据进行模仿。

IL 经过多年的发展，已经有了很多有效的工作，包括基于监督学习的模仿学习^[79]。基于监督学习的模仿学习通常不能很好地泛化到未见过的场景上。因而，后续又产生了一系列的算法。文献 [80] 中提出了一种前向训练的方法，在该方法中，每次都基于前面训练得到的策略，训练一个模仿当前最优策略的模仿策略。因此，在该方法中，需要多轮迭代以学习得到不同时间步的策略，但在一些实际问题中几乎不可行。文献 [80] 同时提出了另一种随机混合迭代学习（Stochastic Mixing Iterative Learning, SMILE），可适用于迭代轮数很大的场景。其他经典的方法包括基于搜索的结构预测（Search-based Structured Prediction, SEARN）^[81]、数据集聚合方法（Dataset Aggregation, DAgger），文献 [80] 中给出了已有的模仿学习的相关方法介绍并进行了比较。此外，逆强化学习（Inverse Reinforcement Learning, IRL）也是一种可以进行模仿学习的方法，由于没有显式的奖励函数，其主要的思路是根据人类已有的行为去反推奖励函数。

上面介绍的是模仿学习的一些经典做法。结合生成对抗网络，模仿学习也有相关研究，这里主要介绍 DeepMind 和 OpenAI 在这方面最新的几个工作。OpenAI^[82]首先把 GAN 引入到模仿学习当中，基本的思路就是构造一个 GAN，其中的生成器用于生成动作序列，而判别器则用于区分这个动作序列是否是专家动作。那么判别器的输出其实等价于奖赏，生成器因此可以使用一般的深度强化学习算法如信任域策略优化（Trust Region Policy Optimization, TPRO）^[83]来训练，通过这样的 GAN 的训练，希望生成器生成的动作和专家动作越来越接近。基于 GAN 的模仿学习这个做法非常的新颖，换了一种方式来获取奖赏。DeepMind^[84]的出发点和 OpenAI 的不一样，这篇文章是希望在原有深度强化学习算法训练的基础上，通过模仿人类的动作来调整策略，使得机器人的行为看起来更像人，而不会显得不自然。思路还是基于 GAN 的，通过动作捕捉（Motion Capture）获取人的行为，然后训练一个判别器作为奖赏函数，再使用 TPRO 算法进行深度强化学习。模仿学习经过一段时间的发展，越来越受到研究者的关注。从上面的方法看，构造更好的提取视频特征的方法非常重要，而 GAN 一定程度上解决了不知道怎么设计奖赏的问题。

2.2.10 其他应用

生成对抗网络在合成真实清晰的图片上有了很多令人惊喜的发展，但生成对抗网络本

身是一种生成模型。通用可扩展的生成模型不仅用于生成图片和文本，高效的生成模型应该可以合成与人类感官接触的一切物体，这样的生成模型才是可以为人类现实生活服务的。这里介绍两种生成对抗网络在其他领域的应用：音频的生成和药物发现及化学生成。

Donahue 等人^[84]首次提出了一种使用生成对抗网络生成原始音频的结构。从数据存储角度看，时域音频样本和图像中的像素是相似的，但是这两种信号在本质上是不同的。如图 19 所示，左边是自然图像不同的部分，右边是语音的不同切片。可以发现图像的主要成分可以捕获对比度、梯度、边缘特征等信息。而左边的音频信号却表现出比较强的周期性。针对这一特点，作者修改了 DC-GAN 的转置卷积操作，使其扩大了感受野（将 5×5 的二维滤波器换成了 25 维的一维滤波器）。对判别器进行了相同的操作。这种修改使最终生成的音频更加真实。

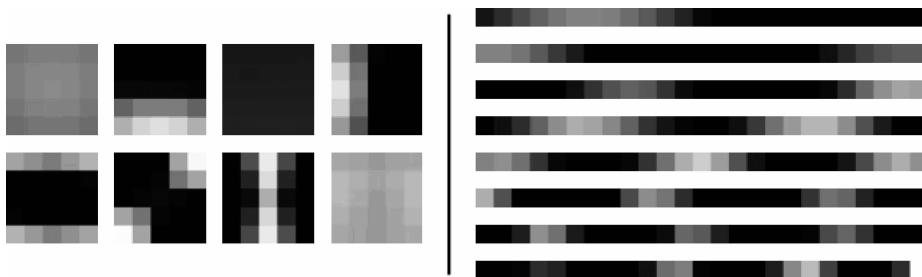


图 19 左边是自然图像不同的部分，右边是语音的不同切片^[68]

此外，人工智能也可以为医疗保健领域带来创新，寻找新的治疗方式或药物（而非取代医生，至少在短期内不会发生）已经是全世界的共识，例如训练机器看医学影像。计算机断层扫描（CT）、核磁共振（MRI）、X 光片等都吸引了 Google、许多初创公司投入大量资金。同时，另一个领域也被寄予厚望，那就是制药。在制药行业中，包括研发成本和时间成本在内，新药开发是一件投入成本非常高、成功率却偏低的苦差事。Insilico Medicine^[85]发表了一篇“*The cornucopia of meaningful leads: Applying deep adversarial autoencoders for new molecule development in oncology*”论文，他们使用美国癌症研究所（NCI）的 NCI-60 药物筛选数据库中针对乳癌细胞 MCF-7 的 6252 种化合物，以及分子指纹（molecular fingerprint）、分子浓度（concentration of the molecule）和生长抑制（growth Inhibition）百分比等数据来训练一个深度神经网络 AAE，经过与鉴别器的相互较劲，AAE 能根据想要的分子特征产生具有潜在抗癌特性的候选分子（candidate molecule），并从中预测了 69 种化合物，有些分子已经被用来治疗癌症，像白血病和乳腺癌。

2.3 生成对抗网络的评价指标

前面已经介绍了很多关于 GAN 的方法，那么如何去评价和比较这些方法呢^[86]？很显然，一个好的生成模型应该具备两个重要特点：生成的图片具有很高的质量和多样性。要去评价大量的关于 GAN 的方法，评价指标必须包含上述两个情况，并且可以将两者结

合起来。

目前大部分文章中使用的评价指标叫作 Inception Score^[13]。之所以被称为 Inception Score 是因为评价使用的网络是 Google Inception Net。整个公式如下所示：

$$\begin{aligned} \exp(\mathbb{E}_x \text{KL}(p(y|x) \| p(y))) &= \sum_x \sum_y p(y|x) \log \frac{P(y|x)}{P(y)} \\ &= \sum_x \sum_y p(y|x) \log P(y|x) - \sum_x \sum_y p(y|x) \log P(y) \end{aligned}$$

其中，最后两项代表生成图片的质量和多样性。下图是参考文献 [73] 中计算 Inception Score 的结果图。可以发现，Inception Score 展示了生成图像的质量和多样性之间的合理关联，它会鼓励模型学习清晰且多样化图像，这解释了其在实践中被广泛应用的原因。

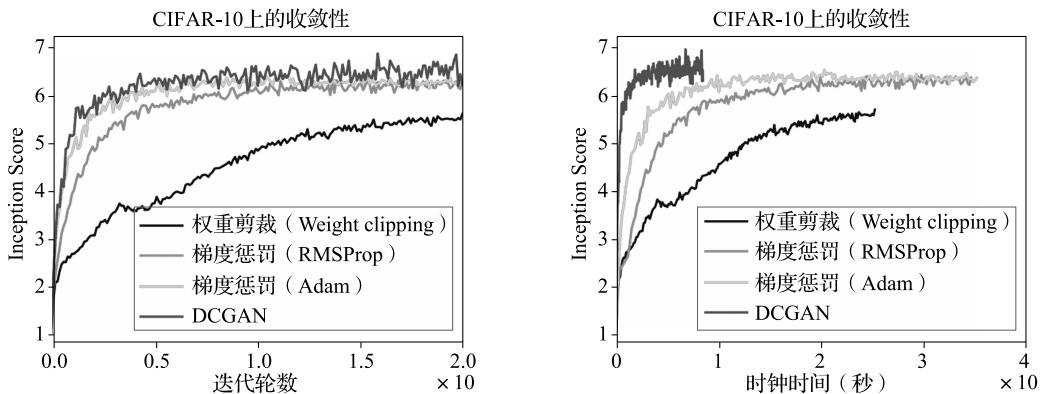


图 20 CIFAR-10 上不同生成器的 Inception Score

注：左图是随着不同迭代轮数，不同生成器的 Inception Score 变化。右图是随着时钟时间（Wallclock）变化，不同生成器的 Inception Score 变化^[73]

但 Inception Score 通常只能评价生成图像是否真实，质量是否高。对于 Mode Collapse 问题，文献 [87] 提出了一种 Mode Score 指标，该指标可以同时评价生成图像的质量及图像的多样性。文献 [88] 提出了一种 Geometry Score 指标，该指标通过度量真实数据与模型数据之间的几何（流形）差异来度量生成样本的质量及多样性。此外，针对 Inception Score 中的诸多问题，研究者还提出了一系列的改进指标，如 m-IS (Modified Inception Score)^[19]、AM Score^[89]、FID (Fréchet Inception Distance)^[90]。对已有的这些评价指标，文献 [91] 给出了综合优劣分析。

3 国内研究进展

3.1 生成对抗网络在国内的理论研究进展

相较生成对抗网络的应用而言，国内在生成对抗网络的理论研究方面的工作不是

很多。

在 GAN 的训练方面，香港城市大学提出了一种最小二乘损失函数^[92]来解决由原始 GAN 的损失函数导致的梯度消失问题。在原始 GAN 中，判别器采用 sigmoid 函数，而该函数非常容易饱和从而导致梯度消失。在文献 [92] 提出的最小二乘生成对抗网络 (Least Squares Generative Adversarial Network, LSGAN) 中，判别器采用了非饱和的 L2 损失函数，可以为网络提供持续稳定的梯度，从而使训练过程更加稳定，如图 21 所示。

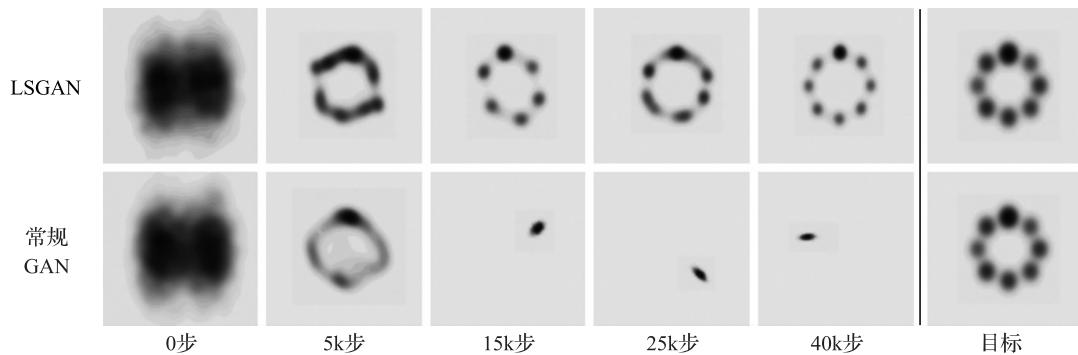


图 21 原始 GAN 和 LSGAN 的对分布的学习能力对比

注：LSGAN 更能学习到数据的真实分布，而原始 GAN 容易产生模式坍塌问题而很难学习到全局真实分布^[72]

在 GAN 的结构方面，清华大学提出了一种改进的结构生成对抗网络 (Structured Generative Adversarial Network, SGAN)^[93]，该网络具有可控性好和解耦性好等优点，且能够通过生成高质量的有标签数据来辅助半监督学习。SGAN 的主要思想是将输入向量分为类别向量和噪声向量，分别编码类别信息和其他类别无关的信息。通过将生成的图像嵌入到原始的类别向量和噪声向量中，达到解耦的目的。同时，SGAN 使用对抗损失来维持生成图像的真实性及类别与图像，噪声向量与图像的一一对应关系。此外，清华大学还在另一个工作中提出了三元生成对抗网络 (Triple Generative Adversarial Net, Triple-GAN)^[94]。Triple-GAN 为解决一般的 GAN 中存在的两个问题（即生成器和判别器可能不能同时达到最优及生成器无法控制生成图像的语义信息），在传统生成器和判别器的对抗框架中增加了一个分类器。生成器建模给定标签情况下图像的条件概率分布，分类器建模给定图像情况下标签的条件概率分布。由真实数据、生成器和分类器可以得到三种关于图像和标签的联合概率分布，判别器则专注于判定从这三种分布中采样的图像 - 标签对的真假。优化的最终目标是使三种联合概率分布趋于一致。此外，论文中还引入了标准监督损失来保证这种一致性。Triple-GAN 不仅在当时的生成模型中达到了最优的分类结果，而且能够解耦类别和风格信息并在类别限定的隐空间插值中实现平滑的转换。另外，上海交通大学针对文献 [13] 中的方法存在的问题，提出了一种改进的激活最大化生成对抗网络 (Activation Maximization Generative Adversarial Network, AMGAN)^[95]，性能超过了同类的条件对抗网络 LabelGAN^[13] 和 ACGAN^[95]。作者通过理论分析得出 LabelGAN 的判别损失是将生成样本朝着某个真实类别方向优化，而不是仅朝着真样本的方向优化。

但 LabelGAN 的生成器损失却是将生成样本朝着无指定类别的真实样本方向优化，导致生成器和判别器优化方向不一致。因此，作者提出将 LabelGAN 的生成器损失改为优化朝着某个真实类别方向优化，由此得到了 AMGAN。

在 GAN 的评价指标方面，上海交通大学在 AMGAN 的工作中提出了一种新的样本质量度量指标 AM Score，这是为了解决常用的评价指标 Inception Score 过度关注生成多样性而对样本的质量关注不足的问题。

3.2 生成对抗网络在国内的应用进展

生成对抗网络应用的研究在国内较为活跃。

在图像合成方面，中科大、中科院以及香港中文大学分别提出了条件变分自编码生成对抗网络（Conditional Variational Auto-encoder Generative Adversarial Network，CVAE-GAN）^[96]、两路生成对抗网络（Two- Pathway Generative Adversarial Network，TPGAN）^[97] 和 FaceID-GAN^[98]，用于身份/类别保持的人脸合成。其中一个重要的步骤就是用深度网络来提取身份/类别特征，从而保证生成图像的身份/类别，图 22 给出了 FaceID-GAN 的人脸图像生成效果。



图 22 FaceID-GAN 生成结果

注：可以生成一个人任意角度和表情的图像，同时保持这个人的身份^[98]

在图像的跨域生成方面，中科院在无监督域适应上提出了双重对抗生成网络（Duplex Generative Adversarial Network，DupGAN）^[99]。通过双路判别器来学习领域不变的特征，得到了最先进的无监督域适应结果。香港城市大学针对多域图像生成表现欠佳的问题，提出了正则化条件生成对抗网络（Regularized Conditional GAN，RegCGAN）^[100]，通过两个正则项指导模型学习不同域的语义信息。传统的域适应针对的是源域和目标域类别空间相同的情况，而现实中很多时候目标域的类别只是源域的一部分，中科院针对该问题提出了选择性对抗网络（Selective Adversarial Network，SAN）^[101]，实现了部分域适应，部分域适应问题的示意图如图 23 所示。此外，清华大学专门为真实照片的卡通化提出了 CartoonGAN^[102]。

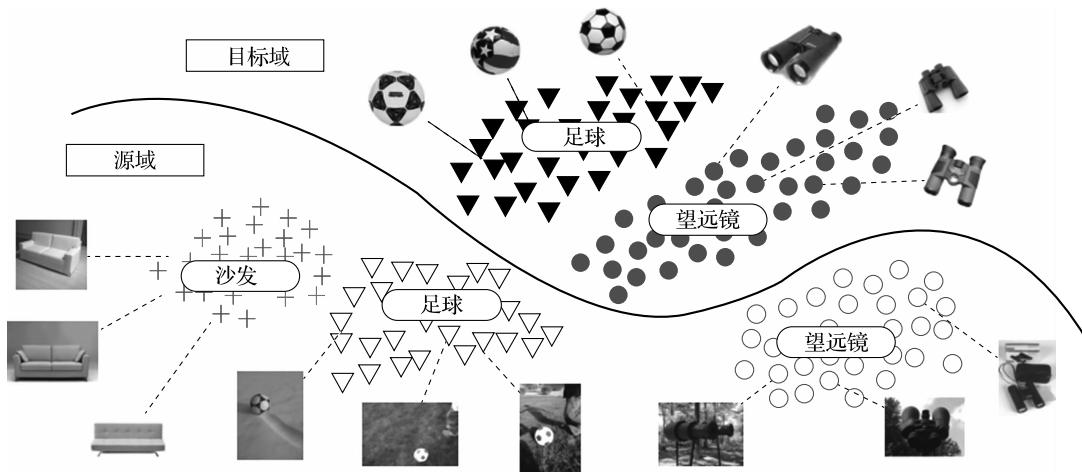


图 23 部分域适应问题

注：源域类别和目标域类别不相同^[101]

在文本生成方面，如前文 2.2.8 节已经介绍过的，上海交通大学率先提出序列生成对抗网络（Sequence Generative Adversarial Net, SeqGAN）^[68]，实现了用 GAN 进行离散序列生成从无到有的突破。SeqGAN 将序列生成问题看成序列决策问题，将生成器看成强化学习中的智能体（agent），使用判别器来提供奖赏，并使用策略梯度来进行参数更新。香港中文大学也使用 GAN 来生成文本，改进了生成句子的自然性和多样性^[103]。中国台湾的清华大学则探讨了文本序列的跨域生成^[104]。该工作使用两个判别器，一个判定文本来自哪个域，一个判定文本和图像是否匹配，成功实现了无监督的跨域生成。提出 SeqGAN 的上海交通大学团队又提出了针对长文本生成的方法^[71]，该模型的判别器会在中间时间步泄露一些提取的特征给生成器，生成器则利用这个额外信息指导序列生成。

此外，国内还有很多其他关于 GAN 的应用工作。比如有物体检测^[105-106]、行人重识别^[107-108]、图像的去噪去遮挡^[109-110-111-112-113]以及信息检索^[114-115-116-117-118]等。

4 发展趋势与展望

可以看到，围绕生成对抗网络的理论研究及应用研究在国内外都在快速开展。生成对抗网络目前主要存在的问题包括以下几个方面：①训练过程不稳定。当然随着 WGAN^[10]的提出，该问题在一定程度上已经得到了解决，但对生成样本稳定性的研究在不同的网络结构下同样需要不同的设计。因此，这一问题仍值得研究。②生成样本的量化评价指标。目前的 Inception Score^[13]尽管可以对生成图像质量进行评价，但仍无法在生成图像的多个方面都进行准确的评估，好的评价指标仍有待设计。③生成样本质量的问题。首先，目前大部分的生成对抗网络可以生成的图像分辨率有限。这一方面，英伟达提出了一种渐进生成的生成对抗网络结构^[119]，但该结构是非条件生成的。因此，生

成图像分辨率方法还有进一步值得研究的空间。此外，目前生成的样本的质量与真实样本仍存在一定差距。如何针对各个应用领域，进一步提升生成样本的质量仍需要研究者们进一步开拓思路，提出更有效的方法。

5 结束语

本文主要从生成对抗网络的产生背景、基础结构以及与其他生成模型的对比出发，介绍了生成对抗网络在理论研究及应用上的进展，并简单介绍了生成对抗网络的评价指标体系。在第3节给出了生成对抗网络在国内的研究工作。最后对生成对抗网络的后续发展趋势进行了展望。

整体来看，自2014年生成对抗网络提出以来，生成对抗网络取得了蓬勃的发展，理论研究上产生了使生成对抗网络训练更稳定的模型，各个应用领域的生成对抗网络研究也层出不穷，生成效果在不断提升。但目前生成对抗网络仍存在一些不足及缺陷，有赖于研究者们进一步解决。从长远来看，由于生成对抗网络的广泛应用，对生成对抗网络的研究有着非常重要的实际意义及广阔前景。

致谢

本报告的整理得到了国家自然科学基金委员会大数据重点项目群项目、军民共用重大研究计划“面向大数据的知识表示、推理、在线学习理论及应用研究”（编号：61432008，U1435214）的支持。李涛涛、马明林、侯昊迪同学参加了整理工作，在此一并致谢。

参考文献

- [1] I J Goodfellow, et al. Generative adversarial nets [C]. in Advances in neural information processing systems, 2014: 2672-2680.
- [2] I Goodfellow. NIPS 2016 tutorial: Generative adversarial networks [J]. arXiv Prepr. arXiv1701. 00160, 2016.
- [3] S Hitawala, D R Cheriton. Comparative Study on Generative Adversarial Networks [J]. arXiv Prepr. arXiv1801. 04271, 2018.
- [4] Z Hu, Z Yang, R Salakhutdinov, E P Xing. On unifying deep generative models [J]. arXiv Prepr. arXiv1706. 00550, 2017.
- [5] M Mirza, S Osindero. Conditional generative adversarial nets [J]. arXiv Prepr. arXiv1411. 1784, 2014.
- [6] JY Zhu, T Park, P Isola, A A Efros. Unpaired Image- to- Image Translation Using Cycle- Consistent

- Adversarial Networks [C]. in 2017 IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 2242-2251.
- [7] M Y Liu, O Tuzel. Coupled generative adversarial networks [C]. in Advances in neural information processing systems, 2016: 469-477.
- [8] D P Kingma, M Welling. Auto-encoding variational bayes [J]. arXiv Prepr. arXiv1312. 6114, 2013.
- [9] A Van Oord, N Kalchbrenner, K Kavukcuoglu. Pixel Recurrent Neural Networks [C]. in International Conference on Machine Learning, 2016: 1747-1756.
- [10] M Arjovsky, S Chintala, L Bottou. Wasserstein generative adversarial networks [C]. in International Conference on Machine Learning, 2017: 214-223.
- [11] S Arora, R Ge, Y Liang, T Ma, Y Zhang. Generalization and Equilibrium in Generative Adversarial Nets (GANs) [C]. in International Conference on Machine Learning, 2017: 224-232.
- [12] I Durugkar, I Gemp, S Mahadevan. Generative Multi- Adversarial Networks [C]. Int. Conf. Learn. Represent., 2017.
- [13] T Salimans, I Goodfellow, W Zaremba, V Cheung, A Radford, X Chen. Improved techniques for training gans [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2016: 2234-2242.
- [14] L Mescheder, S Nowozin, A Geiger. The numerics of gans [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2017: 1825-1835.
- [15] T Miyato, T Kataoka, M Koyama, Y Yoshida. Spectral Normalization for Generative Adversarial Networks [C]. in International Conference on Learning Representations, 2018.
- [16] S E Reed, Z Akata, S Mohan, S Tenka, B Schiele, H Lee. Learning What and Where to Draw [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems 29, D D Lee, M Sugiyama, U V Luxburg, I Guyon, R Garnett, Eds Curran Associates, Inc, 2016: 217-225.
- [17] S Reed, A van den Oord, N Kalchbrenner, V Bapst, M Botvinick, N de Freitas. Generating interpretable images with controllable structure [J]. 2016.
- [18] L Metz, B Poole, D Pfau, J Sohl-Dickstein. Unrolled Generative Adversarial Networks [J]. CoRR, vol. abs/1611.0, 2016.
- [19] S Gurumurthy, R Kiran Sarvadevabhatla, R Venkatesh Babu. DeLiGAN: Generative Adversarial Networks for Diverse and Limited Data [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017: 166-174.
- [20] I O Tolstikhin, S Gelly, O Bousquet, C J SIMON- GABRIEL, B Schölkopf. AdaGAN: Boosting Generative Models [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2017: 5424-5433.
- [21] D Bang, H Shim. {MGGAN:} Solving Mode Collapse using Manifold Guided Training [J]. CoRR, vol. abs/1804.0, 2018.
- [22] A Nagrani, S Albanie, A Zisserman. Seeing Voices and Hearing Faces: Cross-modal biometric matching [C]. in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 9.
- [23] A Radford, L Metz, S Chintala. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks [J]. arXiv Prepr. arXiv1511. 06434, 2015.
- [24] X Huang, Y Li, O Poursaeed, J Hopcroft, S Belongie. Stacked Generative Adversarial Networks [C]. in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017: 1866-1875.
- [25] X Chen, Y Duan, R Houthooft, J Schulman, I Sutskever, P Abbeel. InfoGAN: Interpretable Representation Learning by Information Maximizing Generative Adversarial Nets [C]. in Advances in

- Neural Information Processing Systems, 2016: 2172-2180.
- [26] S Reed, Z Akata, X Yan, L Logeswaran, B Schiele, H Lee. Generative Adversarial Text to Image Synthesis [C]. in Proceedings of the 33rd International Conference on International Conference on Machine Learning-Volume 48, 2016: 1060-1069.
- [27] J Y Zhu, P Krähenbühl, E Shechtman, A A Efros. Generative Visual Manipulation on the Natural Image Manifold [C]. in Computer Vision-ECCV 2016, 2016: 597-613.
- [28] C H Lin, E Yumer, O Wang, E Shechtman, S Lucey. ST- GAN: Spatial Transformer Generative Adversarial Networks for Image Compositing [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2018.
- [29] J Deng, S Cheng, N Xue, Y Zhou, S Zafeiriou. UV-GAN: Adversarial Facial UV Map Completion for Pose- Invariant Face Recognition [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2018.
- [30] P Isola, J Zhu, T Zhou, A A Efros. Image- to- Image Translation with Conditional Adversarial Networks [C]. in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2017: 5967-5976.
- [31] C Li, M Wand. Precomputed Real- Time Texture Synthesis with Markovian Generative Adversarial Networks [C]. in Computer Vision-ECCV 2016, 2016: 702-716.
- [32] Z Gan et al. Triangle Generative Adversarial Networks [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems , 2017: 5247-5256.
- [33] Y Taigman, A Polyak, L Wolf. Unsupervised Cross- Domain Image Generation [C]. in International Conference on Learning Representations , 2017.
- [34] M Y Liu, T Breuel, J Kautz. Unsupervised Image- to- Image Translation Networks [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems , 2017: 700-708.
- [35] Z Yi, H Zhang, P Tan, M Gong. DualGAN: Unsupervised Dual Learning for Image-to-Image Translation [C]. in 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) , 2018: 2868-2876.
- [36] S Ma, J Fu, C Wen Chen, T Mei. DA- GAN: Instance- Level Image Translation by Deep Attention Generative Adversarial Networks [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2018.
- [37] J Y Zhu et al. Toward Multimodal Image- to- Image Translation [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems , 2017: 465-476.
- [38] A Almahairi, S Rajeshwar, A Sordoni, P. Bachman, A Courville. Augmented { C } ycle { GAN } : Learning Many- to- Many Mappings from Unpaired Data [C]. in Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning , 2018: 195-204.
- [39] X Huang, M Y Liu, S J Belongie, J Kautz. Multimodal Unsupervised Image- to- Image Translation [J]. CoRR , vol. abs/1804.0 , 2018.
- [40] M Bosch, C M. Gifford, P A Rodriguez. Super- Resolution for Overhead Imagery Using DenseNets and Adversarial Learning [C]. in 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) , 2018: 1414-1422.
- [41] C Ledig et al. Photo- Realistic Single Image Super- Resolution Using a Generative Adversarial Network [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2017: 4681-4690.
- [42] C K Sønderby, J Caballero, L Theis, W Shi, F Huszár. Amortised { MAP } Inference for Image Super-resolution [J]. CoRR , vol. abs/1610.0 , 2016.

- [43] A Bulat, G Tzimiropoulos. Super-FAN: Integrated Facial Landmark Localization and Super-Resolution of Real-World Low Resolution Faces in Arbitrary Poses With GANs [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [44] K Dabov, A Foi, V Katkovnik, K Egiazarian. Image Denoising by Sparse 3- D Transform- Domain Collaborative Filtering[C]. IEEE Trans. Image Process , 2007: 2080-2095.
- [45] K Zhang, W Zuo, Y Chen, D Meng,L Zhang. Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising[C]. IEEE Trans. Image Process , 2017; 3142-3155.
- [46] N Divakar, R V Babu. Image Denoising via CNNs: An Adversarial Approach [C]. in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2017: 1076-1083.
- [47] X Yi, P Babyn. Sharpness- Aware Low- Dose CT Denoising Using Conditional Generative Adversarial Network[C]. J. Digit. Imaging , 2018.
- [48] L Galteri, L Seidenari, M Bertini, A Del Bimbo. Deep Generative Adversarial Compression Artifact Removal[C]. in The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) : 4826-4835.
- [49] E L Denton, S Chintala, arthur szlam, R Fergus. Deep Generative Image Models using a^{OBJ} Laplacian Pyramid of Adversarial Networks[C]. in Advances in Neural Information Processing Systems , 2015: 1486-1494.
- [50] J M Wolterink, T Leiner, M A Viergever, I Işgum. Generative Adversarial Networks for Noise Reduction in Low-Dose CT[C]. IEEE Trans. Med. Imaging , 2017: 2536-2545.
- [51] S Tripathi, Z C Lipton, T Q Nguyen. Correction by Projection: Denoising Images with Generative Adversarial Networks[J]. CoRR , vol. abs/1803.0 , 2018.
- [52] P Luc, C Couprie, S Chintala, J Verbeek. Semantic Segmentation using Adversarial Networks[C]. in NIPS Workshop on Adversarial Training , 2016.
- [53] D Yang et al. Automatic Liver Segmentation Using an Adversarial Image- to- Image Network [C]. in Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2017 , 2017: 507-515.
- [54] N Souly, C Spampinato, M Shah. Semi Supervised Semantic Segmentation Using Generative Adversarial Network[C]. in The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) , 2017.
- [55] Z Zhang, LYang, Y Zheng. Translating and Segmenting Multimodal Medical Volumes With Cycle- and Shape-Consistency Generative Adversarial Network[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2018.
- [56] C Fu et al. Three Dimensional Fluorescence Microscopy Image Synthesis and Segmentation[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops , 2018: 2221-2229.
- [57] S Sankaranarayanan, Y Balaji, A Jain, S Nam Lim, R Chellappa. Learning From Synthetic Data: Addressing Domain Shift for Semantic Segmentation[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2018.
- [58] K Kamnitsas et al. Unsupervised Domain Adaptation in Brain Lesion Segmentation with Adversarial Networks[C]. in Information Processing in Medical Imaging , 2017: 597-609.
- [59] J Redmon, S Divvala, R Girshick, A Farhadi. You Only Look Once: Unified, Real- Time Object Detection[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2016: 779-788.
- [60] W Liu et al. SSD: Single Shot MultiBox Detector[C]. in Computer Vision-ECCV 2016 , 2016: 21-37.
- [61] X Wang, A Shrivastava, A Gupta. A- Fast- RCNN: Hard Positive Generation via Adversary for Object

- Detection[C]. in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017, vol. 00: 3039-3048.
- [62] Y Bai, Y Zhang, M Ding, B Ghanem. Finding Tiny Faces in the Wild With Generative Adversarial Network[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [63] W Xiong, W Luo, L Ma, W Liu, J Luo. Learning to Generate Time- Lapse Videos Using Multi-Stage Dynamic Generative Adversarial Networks[J]. arXiv Prepr. arXiv1709.07592 , 2017.
- [64] X Liang, L Lee, W Dai, E P Xing. Dual motion GAN for future- flow embedded video prediction[J]. arXiv Prepr. , 2017.
- [65] S Tulyakov, M Y Liu, X Yang, J Kautz. Mocogan: Decomposing motion and content for video generation [J]. arXiv Prepr. arXiv1707.04993 , 2017.
- [66] K Ohnishi, S Yamamoto, Y Ushiku, T Harada. Hierarchical Video Generation from Orthogonal Information: Optical Flow and Texture[J]. arXiv Prepr. arXiv1711.09618 , 2017.
- [67] W Fedus, I Goodfellow, A M. Dai. Maskgan: Better text generation via filling [J]. arXiv Prepr. arXiv1801.07736 , 2018.
- [68] L Yu, W Zhang, J Wang, Y Yu. SeqGAN: Sequence Generative Adversarial Nets with Policy Gradient [C]. in AAAI, 2017: 2852-2858.
- [69] T Che, et al. Maximum-likelihood augmented discrete generative adversarial networks[J]. arXiv Prepr. arXiv1702.07983 , 2017.
- [70] K Lin, D Li, X He, Z Zhang, M T Sun. Adversarial ranking for language generation[C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2017: 3155-3165.
- [71] J Guo, S Lu, H Cai, W Zhang, Y Yu, J Wang. Long Text Generation via Adversarial Training with Leaked Information[J]. CoRR, vol. abs/1709.0 , 2017.
- [72] M J Kusner, J M Hernández- Lobato. Gans for sequences of discrete elements with the gumbel- softmax distribution[J]. arXiv Prepr. arXiv1611.04051 , 2016.
- [73] I Gulrajani, F Ahmed, M Arjovsky, V Dumoulin, A C Courville. Improved Training of Wasserstein GANs [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2017: 5767-5777.
- [74] S Rajeswar, S Subramanian, F Dutil, C Pal, A Courville. Adversarial Generation of Natural Language [C]. in Proceedings of the 2nd Workshop on Representation Learning for NLP, 2017: 241-251.
- [75] Y Zhang et al. Adversarial Feature Matching for Text Generation[C]. in International Conference on Machine Learning, 2017: 4006-4015.
- [76] Z Xu et al. Neural response generation via gan with an approximate embedding layer[C]. in Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2017: 617-626.
- [77] J Li, W Monroe, T Shi, S ebastie Jean, A Ritter, D Jurafsky. Adversarial Learning for Neural Dialogue Generation[C]. in Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2017: 2157-2169.
- [78] S Lu, Y Zhu, W Zhang, J Wang, Y Yu. Neural Text Generation: Past, Present and Beyond[J]. arXiv Prepr. arXiv1803.07133 , 2018.
- [79] A Attia, S Dayan. Global overview of Imitation Learning[J]. arXiv Prepr. arXiv1801.06503 , 2018.
- [80] S Ross, D Bagnell. Efficient reductions for imitation learning [C]. in Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics, 2010: 661-668.
- [81] H Daumé, J Langford, D Marcu. Search- based structured prediction [C]. Mach. Learn, 2009:

- 297-325.
- [82] J Ho, S Ermon. Generative adversarial imitation learning [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2016; 4565-4573.
 - [83] J Merel, et al. Learning human behaviors from motion capture by adversarial imitation [J]. arXiv Prepr. arXiv1707.02201 , 2017.
 - [84] C Donahue, J McAuley, M Puckette. Synthesizing Audio with Generative Adversarial Networks[J]. arXiv Prepr. arXiv1802.04208 , 2018.
 - [85] A Kadurin, et al. The cornucopia of meaningful leads: Applying deep adversarial autoencoders for new molecule development in oncology[C]. Oncotarget, 2017; 10883.
 - [86] L Theis, A van den Oord, M Bethge. A note on the evaluation of generative models[J]. arXiv Prepr. arXiv1511.01844 , 2015.
 - [87] T Che, Y Li, A P Jacob, Y Bengio, W Li. Mode regularized generative adversarial networks[J]. arXiv Prepr. arXiv1612.02136 , 2016.
 - [88] V Khrulkov, I Oseledets. Geometry Score: A Method For Comparing Generative Adversarial Networks [J]. arXiv Prepr. arXiv1802.02664 , 2018.
 - [89] Z Zhou, et al. Activation Maximization Generative Adversarial Nets [J]. arXiv Prepr. arXiv1703.02000 , 2017.
 - [90] M Heusel, H Ramsauer, T Unterthiner, B Nessler, S Hochreiter. Gans trained by a two time-scale update rule converge to a local nash equilibrium[C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2017; 6626-6637.
 - [91] A Borji. Pros and Cons of GAN Evaluation Measures[J]. arXiv Prepr. arXiv1802.03446 , 2018.
 - [92] X Mao, Q Li, H Xie, R Y K. Lau, Z Wang, S P Smolley. Least Squares Generative Adversarial Networks[C]. in 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) , 2017; 2813-2821.
 - [93] Z Deng, et al. Structured Generative Adversarial Networks [C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2017; 3899-3909.
 - [94] L I Chongxuan, T Xu, J Zhu, B Zhang. Triple generative adversarial nets[C]. in Advances in Neural Information Processing Systems, 2017; 4088-4098.
 - [95] Z Zhou et al. Activation Maximization Generative Adversarial Nets[C]. in International Conference on Learning Representations , 2018.
 - [96] J Bao, D Chen, F Wen, H Li, G Hua. CVAE-GAN: Fine-Grained Image Generation through Asymmetric Training[C]. in IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) , 2018 , vol. 00: 2764-2773.
 - [97] R Huang, S Zhang, T Li, R He. Beyond Face Rotation: Global and Local Perception GAN for Photorealistic and Identity Preserving Frontal View Synthesis[C]. in The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) , 2017; 2439-2448.
 - [98] Y Shen, P Luo, J Yan, X Wang, X. Tang. FaceID-GAN: Learning a Symmetry Three-Player GAN for Identity-Preserving Face Synthesis [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2018.
 - [99] L Hu, M Kan, S Shan, X Chen. Duplex Generative Adversarial Network for Unsupervised Domain Adaptation[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) , 2018.
 - [100] X Mao, Q Li. Unpaired Multi-Domain Image Generation via Regularized Conditional GANs[J]. CoRR, vol. abs/1805.0 , 2018.

- [101] Z Cao, M Long, J Wang, M I Jordan. Partial Transfer Learning With Selective Adversarial Networks [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [102] Y Chen, Y K Lai, Y J Liu. CartoonGAN: Generative Adversarial Networks for Photo Cartoonization [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [103] B Dai, S Fidler, R Urtasun, D Lin. Towards Diverse and Natural Image Descriptions via a Conditional GAN[C]. in 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2018, vol. 00: 2989-2998.
- [104] T H Chen, Y H Liao, C Y Chuang, W T Hsu, J Fu, M Sun. Show, Adapt and Tell: Adversarial Training of Cross-Domain Image Captioner [C]. in The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017.
- [105] Y Shen, R Ji, S Zhang, W Zuo, Y Wang. Generative Adversarial Learning Towards Fast Weakly Supervised Detection[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [106] J Li, X Liang, Y Wei, T Xu, J Feng, S Yan. Perceptual Generative Adversarial Networks for Small Object Detection[C]. in 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017; 1951-1959.
- [107] L Wei, S Zhang, W Gao, Q Tian. Person Transfer GAN to Bridge Domain Gap for Person Re-Identification[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [108] S Huang, D Ramanan. Expecting the Unexpected: Training Detectors for Unusual Pedestrians With Adversarial Imposters [C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017; 2243-2252.
- [109] J Wang, X Li, J Yang. Stacked Conditional Generative Adversarial Networks for Jointly Learning Shadow Detection and Shadow Removal[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [110] R Li, J Pan, Z Li, J Tang. Single Image Dehazing via Conditional Generative Adversarial Network[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [111] R Qian, R T Tan, W Yang, J Su, J Liu. Attentive Generative Adversarial Network for Raindrop Removal From a Single Image[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [112] J Chen, J Chen, H Chao, M Yang. Image Blind Denoising With Generative Adversarial Network Based Noise Modeling[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [113] H Huang, D Li, Z Zhang, X Chen, K Huang. Adversarially Occluded Samples for Person Re-Identification[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [114] Z Cao, M Long, C Huang, J Wang. Transfer Adversarial Hashing for Hamming Space Retrieval[J]. CoRR, vol. abs/1712.0, 2017.
- [115] J Song. Binary Generative Adversarial Networks for Image Retrieval [J]. CoRR, vol. abs/1708.0, 2017.
- [116] Y Cao, B Liu, M Long, J Wang. HashGAN: Deep Learning to Hash With Pair Conditional Wasserstein GAN[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
- [117] C Li, C Deng, N Li, W Liu, X Gao, D Tao. Self-Supervised Adversarial Hashing Networks for Cross-Modal Retrieval[C]. in The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.

- [118] X Zhao, G Ding, Y Guo, J Han, Y Gao. TUCH: Turning Cross-view Hashing into Single-view Hashing via Generative Adversarial Nets [C]. in Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence , 2017: 3511-3517.
- [119] T Karras, T Aila, S Laine, J Lehtinen. Progressive Growing of {GAN} s for Improved Quality, Stability, and Variation[C]. in International Conference on Learning Representations , 2018.

作者简介

霍 静 南京大学，助理研究员，计算机视觉、机器学习，CCF 会员



兰艳艳 中国科学院计算技术研究所，副研究员，机器学习与信息检索，CCF 会员



高 阳 南京大学，教授，人工智能、机器学习、大数据，人工智能与模式识别专委会常委，大数据专家委委员，CCF 高级会员



CAD/CAE 高精度仿真分析中的关键几何 计算理论与方法的研究进展与趋势

CCF 计算机辅助设计与图形学专业委员会

徐 岗¹ 李 新² 雷 娜³ 李 明⁴ 黄章进²

¹杭州电子科技大学，杭州

²中国科学技术大学，合肥

³大连理工大学，大连

⁴浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室，杭州

摘要

近年来，面向高精度仿真分析的新型计算方法（如等几何分析方法）成为研究热点，不仅为设计仿真无缝集成提供了有效途径，而且为几何计算领域提出了新的研究课题和挑战。按照 CAD/CAE 产品设计流程，本发展报告对如下 6 个与高精度工程仿真密切相关的几何计算问题进行了总结介绍：①面向设计仿真无缝融合的等几何分析方法；②面向等几何分析的新型样条建模理论；③面向等几何分析的计算域参数化方法；④面向等几何分析的高质量六面体网格生成；⑤高效灵活的新型等几何分析方法；⑥面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论与方法。围绕以上主题，本发展报告分别对其研究背景与问题概述、国内外研究现状、国内与国外研究进展比较、发展趋势与展望进行了详细介绍和深入分析。

关键词：等几何分析，几何计算，计算域参数化，适合分析的样条，等几何配点法，CAD 模型结构简化，六面体网格生成

Abstract

In recent years, new computational methods for high-precision simulation analysis (such as isogeometric analysis methods) have become a research hotspot, which not only provides an effective way for seamless integration of design simulation, but also presents new research topics and challenges for the field of geometric computing. According to the CAD/CAE product design process, this progress report summarizes the following six geometric computation problems related to high-precision engineering simulation: ① Iso-geometric analysis method for seamless integration of design and simulation; ② New spline modeling theory for isogeometric analysis; ③ computational domain parameterization method for isogeometric analysis; ④ high-quality hexahedral mesh generation for isogeometric analysis; ⑤ efficient and flexible new isogeometric analysis methods ⑥ CAD model structure simplification theory and method for high-precision simulation. Focusing on the above topics, this report provides a detailed introduction and in-depth analysis of its research background and issues, domestic and international research status, and progress, and discusses its development trends and

prospects.

Keywords: isogeometric analysis, geometric computing, parameterization of computational domain, analysis- suitable spline, isogeometric collocation method, structure simplification of CAD model, Hex-mesh generation

1 引言

先进制造产业的发展水平已成为国家核心竞争力的重要标志。近年来，为进一步提升产品制造业的智能化水平和转型升级，德国政府推出了“工业 4.0”计划，美国制造业领域提出了“工业互联网”概念，我国也于 2016 年 5 月推出了“中国制造 2025”。上述三种计划纲领的核心是智能制造技术。推进先进制造与智能制造的快速发展，是全球工业化发展的必由之路，也是中国制造转型升级的主攻方向。

计算机辅助设计（CAD）与计算机辅助工程（CAE）是先进制造领域的重要组成部分，CAD 与 CAE 相关技术的研发对打破高端制造领域的国外技术壁垒起着关键作用。CAD 技术起始于 20 世纪 50 年代，主要采用前沿计算机技术辅助工程产品的几何外形设计。CAD 技术从最初的二维草图模型设计，依次经历了三维线框模型、曲面模型、实体模型和特征模型的发展阶段。同时，从设计方法上，也经历了从静态设计到以参数化特征造型为基础的动态设计的发展过程。目前的 CAD 造型系统日益成熟且稳定，涌现了如 CATIA、UG、SolidWorks、Pro/E、SpaceClaim 等各种高端软件系统，它们广泛应用于各种复杂工业产品的造型，如汽车、飞机、轮船等。另一方面，CAE 技术与 CAD 技术几乎同时起步，却又独立发展。CAE 技术也起步于 20 世纪 50 年代，目前发展也已经比较成熟。传统的 CAE 技术主要指采用计算机仿真技术，对工程设计产品进行功能、性能与安全可靠性分析，模拟和预测其未来的工作状态和运行行为，以便及早发现设计缺陷。目前的 CAE 技术可对产品部件和整体装配模型进行各种复杂物理现象的仿真分析，如力学分析、热力学分析、电磁场分析、流体分析等以及各种耦合问题分析。同时也涌现了各种工业仿真计算软件系统，如 Ansys, Fluent, Abaqus 等，主要采用有限元方法（Finite Element Method, FEM）或其变体来求解在一定外在环境及物理条件下偏微分方程的边值问题。图 1 给出了 CAD 与 CAE 的对比。如何高效地实现高精度物理模拟仿真，以及实现设计与仿真的无缝融合，是计算机辅助设计与工程、计算机图形学、计算力学等多个学科交叉领域富有挑战性的研究课题。近年来，面向高精度仿真分析的新型计算方法（如等几何分析方法）成为研究热点，不仅为数值模拟和设计仿真无缝集成提供了有效途径，而且为几何计算提出了新的研究课题和挑战。因此，非常有必要对这一研究方向的研究背景、关键科学和工程问题、国内外研究现状进行详细介绍，并对其将来发展趋势做深入分析，让广大读者对高精度仿真分析的关键几何计算理论及方法的发展现状、方向和趋势有一个大致的了解，以吸引相关领域更多的学者和学生积极投入到这一研究方向。

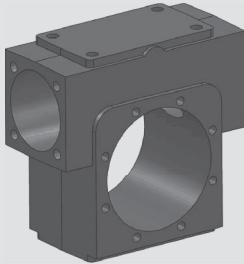
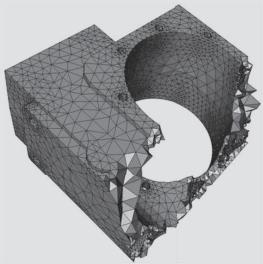
CAD	CAE
面向产品设计、加工	面向产品物理仿真
关注几何外形	关注性能及功能
采用连续边界 (B-rep) 表示	采用离散体网格表示
	
采用边界表示的 CAD 模型	采用离散体网格的 CAE 模型

图 1 CAD 技术和 CAE 技术之间的对比

按照 CAD/CAE 中产品设计流程及数值仿真方法中的前处理、求解器、后处理这一阶段流程，本进展报告的主题相关内容主要包括：①面向设计仿真无缝融合的等几何分析方法；②面向等几何分析的新型样条建模理论；③面向等几何分析的计算域参数化方法；④面向等几何分析的高质量六面体网格生成；⑤高效灵活的新型等几何分析方法；⑥面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论与方法。需要说明的是，上述六大主题内容并不是互相孤立的，而是一个有机的整体：第一个主题是对等几何分析思想的总体介绍和相关工作的研究总结；第五个主题从计算效率提升的角度介绍最近涌现的新型等几何分析方法；其余四个主题则分别从不同的角度为等几何分析建立了重要的几何基础。本进展报告将围绕以上主题，分别对其研究背景与问题概述、国内外研究现状、国内与国外研究进展比较、发展趋势与展望进行详细介绍和深入分析。

2 概述

2.1 面向产品设计仿真无缝融合的等几何分析方法

2.1.1 等几何分析的提出背景

作为智能制造的核心组成部分，数值仿真技术在实现产品设计智能化方面起着至关重要的作用。以 CAD 产品设计为例，在设计产品方案之初，首先建立产品的数字化模型，然后运用计算机仿真分析软件，模拟产品的性能属性，最大限度缩短产品开发时间，

最后通过外形和拓扑优化改进产品性能，减少样机问题，提高设计效率。因此，对 CAD 产品进行多学科物理性能计算分析是产品设计与制造的关键步骤，其仿真精度和计算效率直接影响到 CAD 产品的质量和性能。

随着产品复杂性和系统集成技术需求的日益提高，设计与仿真的无缝融合成为困扰数字化设计制造领域的难题之一。总体来看，CAD/CAE 的整个流程主要包括 3 个步骤（见图 2）。①产品设计：CAD 产品模型一般都是以 NURBS 模型作为标准数据表示形式；②有限元分析（FEA）：通过给定 CAD 边界得到四面体离散网格，然后再对得到的四面体网格进行分析求解；③外形优化（Shape Optimization）：为得到最优的 CAD 模型，需要根据有限元分析得到的结果，对初始的 CAD 模型外形进行优化，进而满足产品的性能需求。由此流程可以看出，导致 CAD/CAE 至今未能真正实现无缝融合的根本原因是在 CAD/CAE 工作流程的三个阶段中描述几何对象的数学模型各不相同。在著名的“Ten CAD challenges”一文中，CAD/CAE 几何模型数据的互用性更是被列为当今 CAD 领域所面临的第二大挑战课题。据统计，数据交换可以占到 CAE 软件大约 70% 的运行时间，而整个 CAD/CAE 过程 80% 左右的工作量用于离散网格生成。此外，由于有限元分析中的计算域是对 CAD 模型的逼近表示，这必然导致模拟分析及优化结果存在一定的误差。对于某些模拟仿真中的物理问题而言，由此所导致的误差可能会非常显著。因此，如何实现真正意义上的 CAD/CAE 系统的无缝融合，便成为 CAD/CAE 今后发展过程中急需解决的问题。因此，为了实现 CAD/CAE 流程中几何数据模型的统一，我们需要建立一个新的模拟分析框架。基于 CAD/CAE 无缝融合的迫切需求，等几何分析（isogeometric analysis）方法应运而生。

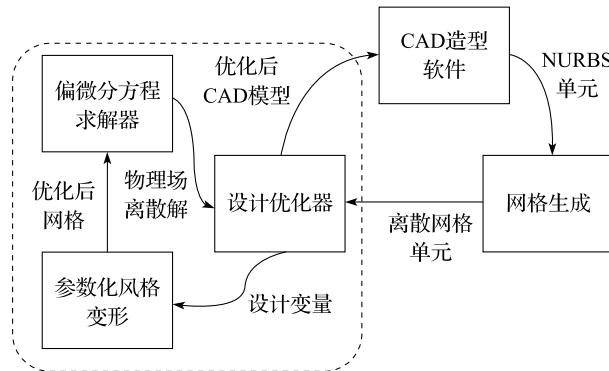


图 2 基于有限元分析的 CAD/CAE 工作流程

2.1.2 等几何分析的基本思想

等几何分析方法的提出为实现 CAD/CAE 系统的无缝融合提供了新途径。该方法由美国三院院士 T. J. R. Hughes 教授在 2005 年提出^[1]，其基本思想为：利用平面 NURBS 曲面（二维情形）或三变量 NURBS 参数体（三维情形）作为计算域模型，计算单元为节点区间所对应的曲面单元或体单元；以 NURBS 基函数作为形函数，以控制顶点的物理属

性分量作为拟求解的未知变量。由于该方法中设计与仿真阶段的几何描述形式完全一致，因而被称为“等几何分析”。图3给出了基于等几何分析的 CAD/CAE 新流程，表1对等几何分析与有限元分析进行了比较。相对于经典的有限元分析方法，该方法的主要优势在于：

- 1) 具有与 CAD 阶段统一的几何数学模型，或者两个阶段的几何数学模型具有互用性，无须进行容错转换（见图3）；

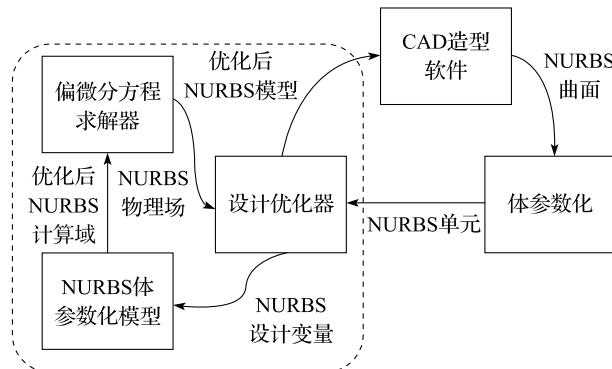


图3 基于等几何分析的 CAD/CAE 流程

- 2) 无须生成离散的计算域网格，只需由边界曲线生成平面曲面域（二维情形），或由边界曲面生成三变量参数体（三维情形），从而提高了计算域构造效率；
- 3) 与有限元的 C^0 基函数相比，等几何分析采用高阶 B 样条基函数，提高了模拟分析及优化设计的准确度，在薄板计算等问题中具有天然优势；
- 4) 基于等几何分析的形状优化过程以控制顶点作为优化变量，减少了优化变量的数目，提高了优化效率。

表1 等几何分析与有限元分析比较

	等几何分析	有限元分析
物理场表示形式	样条曲面（曲体）	离散网格面（体）
计算单元	节点区间所对应的子面片	三角形（四面体）
基函数	样条基函数	Lagrange 插值基函数
细化方法	插入节点、升阶	三角形（四面体）细分

2.2 面向等几何分析的新型样条建模理论

2.2.1 研究背景与基本要求

自由曲线曲面成为 CAD 中用于描述形状信息的主要工具，也可以这么说，自由曲线曲面是整个 CAD 的基础。它起源于汽车、飞机、船舶、叶轮等的外形放样工艺，由 Coons、Bézier 等大师于二十世纪六十年代奠定其理论基础。其中，几何形状信息的核心

问题是在计算机中的表示问题，即要使用既适合计算机处理，且有效地满足形状表示与几何设计要求，又便于形状信息传递和产品数据交换的形状描述的数学方法。从计算机对形状处理、形状信息传递和产品数据交换以及形状表示与设计等角度来看，要在计算机内表示某一工业产品的形状应满足下列要求：

- 几何不变性；
- 易于定界；
- 统一性，即能统一表示各种形式及处理各种情况，包括各种特殊情况；
- 具有丰富的表达力与灵活响应的能力；
- 易于实现连接，且在许多场合要求光滑拼接；
- 易于实现对形状的控制；
- 几何直观。

经过多年的发展，由于非均匀有理 B 样条（NURBS）方法的突出优点，国际标准化组织（ISO）于 1991 年颁布了关于工业产品数据交换的 STEP 国际标准，将 NURBS 方法作为定义工业产品几何形状的唯一数学描述方法，从而使 NURBS 方法成为曲面造型技术发展中最重要的基础，并成为 CAD/CAM 行业的工业标准。

在等几何分析的框架下，最基本且最重要的研究课题之一就是寻找设计与分析这两个领域的共同的数学表示形式。事实上，一个最优的适合分析的样条表示形式至少需要满足下面这些要求：

- 兼容 NURBS 表示形式；
- 适合设计；
- 线性无关；
- 代数精度；
- 水密曲面；
- 局部细分；

其中，第一条和第二条要求是来自于设计，第三条和第四条要求是来自于分析。因此，在这样的背景下，研究人员发展了大量的可用于等几何分析的样条理论并研究对应的几何造型和分析算法。

2.2.2 相关工作分类

面向等几何分析的新型样条理论目前已取得了较大进展，其相关工作可以如下进行分类：

- 张量积形式的样条模型表示

由于 NURBS 是工业的标准表示形式，因此在等几何发展的初始阶段，研究人员采用 NURBS 作为等几何求解的表示形式，并展开了一系列的系统研究，比如误差估计、加细方法等等。研究表明，基于 NURBS 的等几何分析在处理一些简单几何模型的工程问题时是非常成功的。螺旋线、摆线、悬链线、指数曲线等一系列超越曲线在机械产品设计中扮演着重要的角色，而 NURBS 模型并不能严格精确地表示这些特殊曲线模型，因此，一

些新型的非多项式样条空间的样条模型被提出并应用到等几何分析领域。

- 三角剖分上的样条

张量积形式的样条模型在几何拓扑表达上具有局限性，无法表达任意拓扑复杂模型，这给几何造型及等几何分析问题带来不便。定义在三角网格剖分上的样条可表达任意拓扑复杂模型，近年来关于这一课题的研究及其在等几何分析中的应用有了较大进展，提高了等几何分析的普适性和应用广度。

- 具有局部细分能力的样条

NURBS 曲面不能进行局部细分，在造型和求解时都会导致大量的不必要的控制点（系数）。从而导致很多复杂的 NURBS 模型不能直接用于等几何分析。所以，一个适合分析的样条表示形式最好满足第五条和第六条要求，才能使设计和分析能够更加紧密地融合起来。因此，近年来大量的研究人员主要集中研究具有局部细分能力的样条的构造并将它们应用到等几何分析上。研究人员提出了层次 B 样条、T 样条、T 网格上的样条和 LR 样条。我们将对其国内外的主要进展进行详细介绍。

- 非结构网格上的样条

通常我们的几何曲面的拓扑都非常复杂，利用一个单一的 NURBS 曲面只能表示亏格为 1 的曲面，因而如何将已有的表示形式推广到复杂拓扑也是一个热点问题。这里的基本想法主要有三类：基于细分方法，基于流形曲面的构造和利用有限个 Bézier 曲面片对非规则区域补洞。另一方面，CAD 模型中曲面表示通常形成一个封闭实体，而有些 IGA 求解的问题是定义在这个实体上。因此，建立体网格上的样条表示是另外一个重要的研究热点。

我们将在 3.2 节对上述相关工作进行详细描述。

2.3 面向等几何分析的计算域参数化方法

2.3.1 研究背景与问题描述

众所周知，传统的有限元分析需要在离散三角网格或四面体网格上进行求解。目前在网格生成这一研究方向，已有专门的学术会议专门探讨其最新研究进展^[264]。等几何分析作为有限元分析的一种改进，虽然无须由 CAD 模型的边界曲面表示生成离散的四面体网格作为计算域，但我们仍然需要由其边界信息生成连续的参数样条体以完成计算域的构造。这一体参数化过程与有限元方法中的网格生成过程的不同之处在于：我们需要在精确保持边界曲线（或曲面）的前提下，将 CAD 模型的内部用若干个样条曲面片（或三变量参数体）填充起来，而有限元分析中的网格生成过程得到的则是该 CAD 模型的四面体网格逼近表示。CAD 模型的体参数化问题在 Cottrell 和 Hughes 等所著的《Isogeometric Analysis: Toward Integration of CAD and FEA》一书^[2]中被列为等几何分析面临的最富有挑战性的公开问题之一，而这一问题显然属于几何设计与计算领域的范畴。

2.3.2 基本要求

在面向等几何分析的计算域参数化问题中，计算域参数化的质量主要体现在等参结构上，即平面参数曲面的等参数线网，或样条参数体的等参数曲面结构。从等几何分析求解的基本框架和具体要求出发，一个适合分析的计算域参数化应满足以下三点基本要求：

- 1) 正则性：从参数域到计算域应满足单射条件，即等参结构无自交；
- 2) 均匀性：等参结构形成的曲边网格单元大小尽可能均匀；
- 3) 正交性：等参结构尽可能正交（即相互垂直）。

2.3.3 相关工作分类

根据输入的计算域边界信息的不同，计算域参数化的相关问题可分为如下三个方向：

- 计算域参数化对等几何分析的影响

在等几何分析中，给定计算域的边界表示形式，其内部控制顶点可以有不同的分布情况，因而可以构造出各种不同的计算域参数化结果。因此，研究计算域参数化对等几何分析的影响，并由此找到计算域优化的一般方法，便成为值得研究的问题。

- 由样条边界构造适合分析的计算域参数化

实际工程中的 CAD 模型大多是通过 CAD 软件造型设计得到，通常以样条形式表示。因此，如何由给定的样条边界构造适合分析的计算域，便成为等几何分析急需解决的几何基础问题。在该类型的计算域参数化问题中，给定计算域的边界样条曲线，我们就可以得出样条曲面的阶数和节点向量，同时边界的控制点已知，那么计算域参数化的质量就取决于其内部控制点的位置。由此可知在计算域内部为控制顶点找到一个最优位置是解决该类型参数化问题的关键。

- 由网格模型构造适合分析的样条体参数化

在实际工程应用中，通过逆向工程所得到的 CAD 模型通常为三角网格模型。因此，如何构造适合分析的样条体参数化模型，拟合所给定的三角网格模型，也是等几何分析需要解决的重要问题。在 3.4 节我们将会对计算域参数化的相关工作和最新进展进行详细介绍。总体来看，目前面向等几何分析的计算域体参数化问题仍没有彻底解决，其参数化质量严重依赖于 CAD 模型内部的六面体单元分割结果。因此，我们将在下一节介绍高质量六面体网格生成的相关内容。

2.4 面向等几何分析的六面体网格生成

2.4.1 研究背景与问题描述

传统的 CAD 模型是将产品外形的表面用样条来表示，而等几何分析方法省却了从样条到网格的转换过程，需要的是 CAD 模型实体的样条表示。从样条曲面转换到样条体表

示，这是等几何分析的根基，而这一根本问题的解决依赖于体网格的生成。

通常，体网格可以分为四面体网格和六面体网格。在流体力学，空气动力学和大形变力学等方面，相对于四面体网格，结构化六面体网格具有极大优势（如计算精度高、收敛速度快、适用于大形变模拟等）。尤其在航空航天相关的一些空气动力学计算中，只有结构化六面体网格才会给出真正有物理意义的结果。然而，相较于四面体网格生成，结构化六面体网格生成问题非常困难（如图 4 所示）。目前，网格生成领域的学者已达成共识：无结构四面体网格生成问题已经基本解决，但结构化的六面体网格生成问题却依然悬而未决。在过去的数十年间，结构化的六面体网格的自动生成问题一直是 CAD/CAE 领域的根本难题——圣杯问题，因此这一问题被称为“神圣网格问题”。

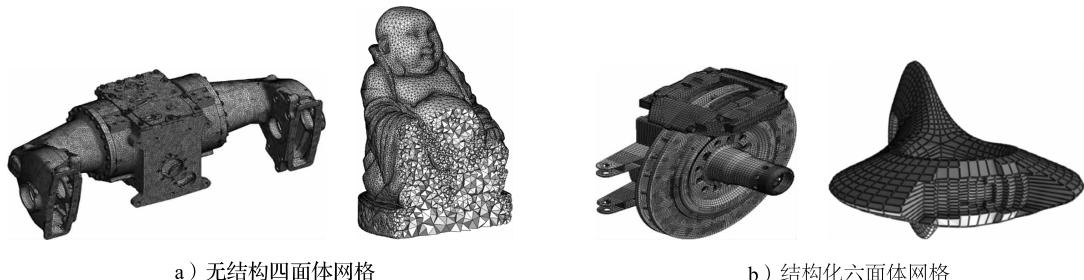


图 4

2.4.2 基本要求

在等几何分析中，要将实体用样条体进行表示，首先需要在实体内部生成结构化的六面体网格。所谓结构化，就是指局部上，六面体网格具有直积结构，和标准欧式空间中整数格点构成的网格同构。因此等几何分析提出的神圣网格问题更具有挑战性。等几何分析具有颠覆有限元法的潜力，这一新兴学科已成为当前 CAD/CAE、计算力学的研究前沿和热点，甚至一度引领这些领域的发展。然而，神圣网格问题成为制约等几何分析方法向前发展的瓶颈，该问题也引起各领域的重视，解决其理论和技术难点日益迫切。

2.4.3 六面体网格生成的主要理论及方法

在过去数十年间，神圣网格问题一直在网格生成领域占据中心地位，众多学者致力于六面体单元网格自动生成方法研究^[3]。美国 Sandia 国家实验室每年斥资主办 International Meshing Roundtable 国际会议，旨在在国际范围内推动研究网格生成技术。理论上，研究者主要是遵循菲尔兹奖得主 Bill Thurston 于 1993 年在数学论坛 Geometry In Action 中回答问题时给出的一个简要的主旨^[4]，它指出六面体网格生成是一个拓扑问题，关键是考虑六面体网格的对偶细分，其内部曲面结构诱导了六面体网格的结构。Murdoch 在其博士论文^[5]中正式提出了 Spatial Twist Continuum(STC) 的概念，即六面体有限元网格的对偶^[6]。此后，STC 成为六面体网格生成算法中的重要元素。1996 年 Scott Mitchell^[7]给出了对于亏格为 0 的曲面，其表面的四边形网格可以成为内部六面体网格的边界的一

个刻画。Eppstein^[8]于1999年根据该理论给出了一种构造方法。直到2014年Erickson用同调论的方法研究高亏格问题，从而将该结论推广到任意亏格情形^[9]：假如边界曲面上四边形网格具有偶数个面，则下面三个条件彼此等价：①四边形网格是六面体网格的边缘；②四边形网格的对偶在曲面中零调；③四边形网格中任何零调的子图必有偶数条边。此外，Erickson还将Eppstein的构造方法加以改进。然而，该构造方法非常复杂，很难直接转换成可使用的算法，而且这种方法构造出来的六面体网格没有清晰的张量积结构。

除了以上具备严密理论基础的方法之外，还有很多工程类方法，目前具有代表性的全六面体网格自动生成方法主要可概括为四大类，包括：原型法、映射法和扫描法；栅格法；扩展的AFT(Advancing Front Technique)方法；多子区域方法。这些方法大多较为工程化，基于经验，没有严格的理论保证一定能够生成结构化六面体网格。我们将会在3.4节对相关研究进展进行详细深入的介绍。

2.5 高效灵活的新型等几何分析方法

由于等几何分析中的形函数为高阶基函数，在刚度矩阵的填充过程中需要花费大量的数值积分计算成本，因而对于同样的自由度数目而言，其计算复杂度要比经典的有限元分析高。另一方面，在实际工程中，CAD数字产品的几何外形与拓扑信息越来越复杂。因此，对于复杂外形CAD产品，如何挖掘稳定、高效、灵活的等几何分析求解方法，也是困扰等几何分析向前发展的一大难题。鉴于此需求，一系列高效灵活的新型等几何分析方法被提出，主要包括：

- 等几何配点法
- 面向等几何分析的高效数值积分方法
- 面向等几何分析的并行计算
- 计算域与物理场样条空间相异的新型等几何分析方法

我们将在3.5节详细介绍其相关工作和最新进展。

2.6 面向高精度仿真的CAD模型结构简化理论

2.6.1 研究背景

一个典型工业设计及仿真流程主要包含预处理、仿真计算以及后处理等重要阶段^[10-11]，其中预处理阶段主要含模型理想化^[12]及体网格生成两部分。在模型理想化阶段，工程师对CAD模型进行各种简化操作，如细节特征移除、局部降维以及几何分解等，以降低原模型的几何复杂度。细节特征的存在会大大增加后续体网格化以及有限元分析的复杂度^[13]，更严重的是，它们有时会导致网格生成的失败或者是条件数很大的仿真计算，产生错误仿真结果^[14]。在极端情形下，原模型会由于太过复杂而难以进行有效

的工程仿真计算，模型简化在此起了本质作用。由于模型几何特征的复杂性、物理简化方式的多样性等原因，面向工程仿真的 CAD 模型简化是一项极其复杂且耗时、耗力的过程，需要大量人工参与，并高度依赖于工程师的经验。美国 Sandia 国家实验室的统计结果表明，含 CAD 模型简化的模型理想化过程占据了整体工程仿真 50% 以上的时间。

上述情况在我国也类似。如 2007 年《工业设计》杂志的一份调查问卷显示，烦琐的建模工作是 CAE 软件用户反映最为突出的问题。可以说，实现工程仿真结果可靠的几何设计模型理想化仍然是 CAD/CAE 集成的瓶颈。由于问题的挑战性，该问题近年来多次被列为公开问题提出^[10-11, 15]。

事实上，在 CAD 相关研究领域，尽管模型简化方法已经非常成熟^[16]，但是这些方法本质上是直接或间接建立在模型几何属性的基础上。由于没有考虑模型的物理属性及其所处的物理环境，这些简化方法往往难以保证满足一定的工程仿真精度。相反，在 CAE 领域，面向工程仿真精度控制的网格化及其后验误差估计多年来一直是关注焦点^[17-18]。然而，由于面向工程仿真的 CAD 模型简化方法及其仿真精度研究的学科交叉性，相关研究非常匮乏。

2.6.2 问题描述

对一 CAD 模型，图 5 展示了模型特征抑制前后的网格数目变化情况。体网格模型由多物理仿真商用软件 COMSOL 在默认参数下生成。对图 3a 所示原始模型移除掉部分几何细节特征（12 个孔、14 个混合曲面、6 个过渡），得到图 3b 所示简化模型。在同一网格生成参数条件下，后者网格数目仅约占前者的 1/30。即原始模型有 178 837 个网格单元，而简化模型只有 6448 个网格单元。究其原因，在原始模型的细节特征处需要更小尺寸的网格来保证曲面的光滑性，而简化的模型去掉了这些特征，大大减少了整体网格数目。可见简化对网格生成及工程仿真计算复杂度有着重要影响。然而，即使同一个模型，不同的模型几何简化会给出差别很大的仿真结果。如图 6a 所示模型，其含 6 个完全相同的孔状特征，右端固定，左端滑动，中部顶部受一定外载，S 为设计者感兴趣区域。图 6b 左半部分上、中、下分别对比了原模型、完全简化模型以及部分简化模型的仿真结果；各模型相应的网格模型亦由图 6c 右半部分给出。表 2 对比了不同模型的几何及物理参数。

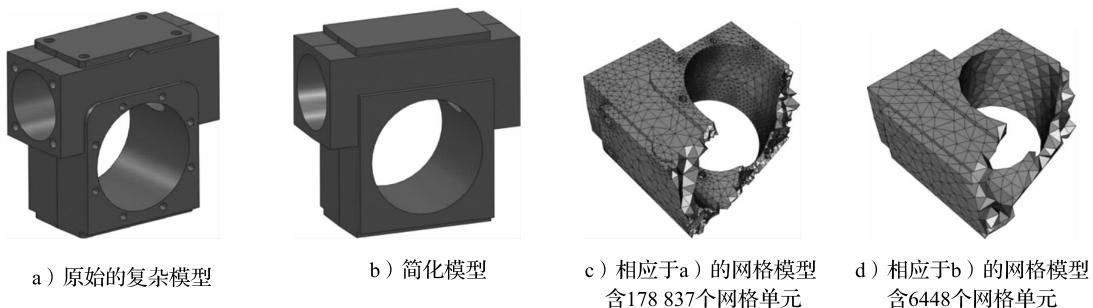


图 5 原始模型、简化模型及其相应网格模型对比

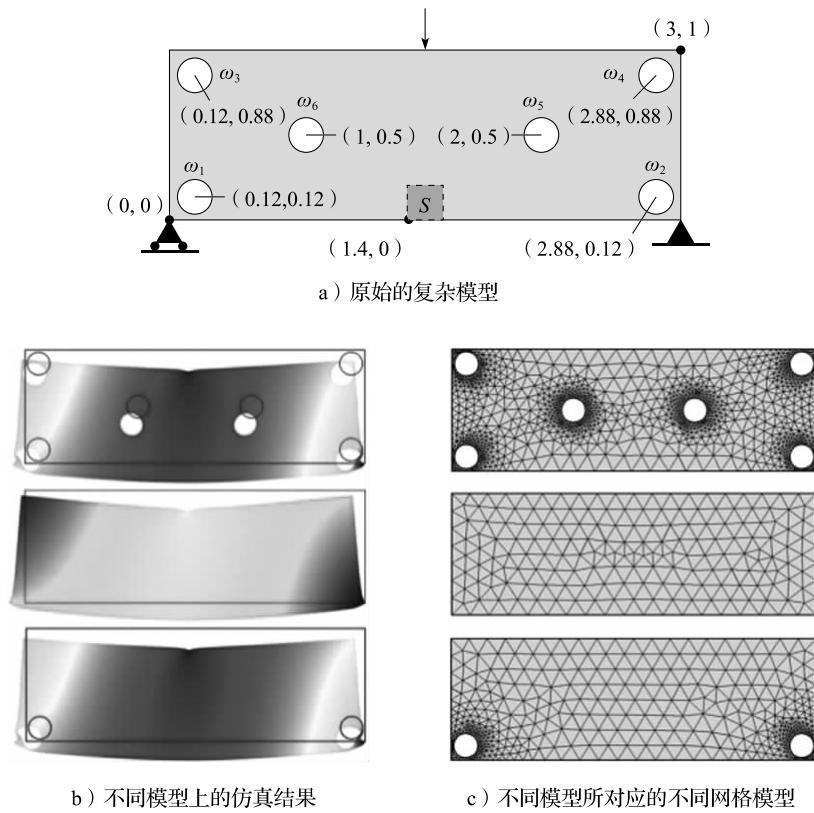


图 6 不同简化结果导致差异巨大的仿真计算结果

表 2 图 6 中不同模型的几何及物理参数

模型	网格数	S 处位移 $\times 10^{-3}$
原模型	2 221	22.79
简化模型	341	16.14
部分简化	875	22.3

从上述结果可见，完全简化或者有选择的简化所得到的仿真计算结果差异很大。完全简化模型虽然在网格数目上有了更大降低，但其物理仿真结果与原模型结果相差巨大，可信度低；而部分简化模型虽然网格数目比完全简化模型略多，但其精度与原模型相近，是更合理的选择。

综合以上分析可见，建立仿真可信的简化模型，需要考虑几何及物理的各个因素：模型的几何尺寸、位置，以及所处的物理环境。即使对几何外形完全相同的特征，不同物理情况可能会对仿真精度产生完全不同的影响，得到不同的简化模型。

全面解决问题的难点在于模型的几何及物理上的复杂性。首先，模型可能处于弹性力学、流体力学、热力学等不同的物理场中，它们所对应的分析方法和特征重要程度各不相同。其次，特征可能位于模型的内部或边界上，称为内部特征或边界特征。根据特

征是被移除还是添加，可将其分为负特征或者正特征。再次，特征可能处于 Neumann 边界条件或者 Dirichlet 边界条件或者混合边值条件约束下。最后，特征的数量不定，对于单特征和多特征，它们的处理方法也会不同。

整体解决工程仿真精度可控的模型简化涉及细节特征移除的几何操作、细节特征重要性评估，以及简化模型的最终生成等重要环节。图 7 给出了解决问题的整体流程。具体而言，首先对原输入 CAD 模型生成最简化模型。此简化模型由抑制所有待考虑的所有细节特征所生成，同时确定了备选抑制特征集合。其次，对简化模型进行仿真求解，由此定量后验评估任意特征组合对工程仿真结果的影响。而后，选择抑制特征集，决定哪些特征需要移除，并生成新的简化模型。上述过程经过若干次迭代，直至简化模型仿真达到一定的精度控制。我们将在 3.6 节对相关工作进行简要介绍。

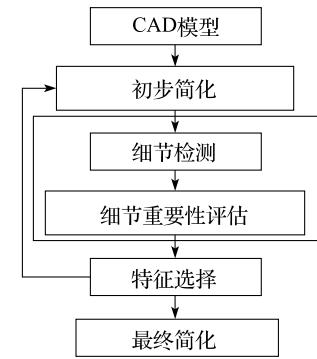


图 7 工程仿真精度可控的 CAD 模型简化整体流程

3 国内外研究进展

3.1 等几何分析方法研究进展

等几何分析方法不仅为实现 CAD/CAE 系统的无缝融合提供了新思路，而且为日趋成熟的几何计算领域注入了新活力，已成为几何设计与计算领域新的研究热点。总体来看，等几何分析领域现有的工作大致可分为 4 个研究方向：①基于等几何分析方法的仿真分析问题求解，包括热传导问题、固体力学问题、流体模拟等^[1, 19-20]；②基于各种不同类型样条工具的等几何分析方法，例如推广 B 样条、T 样条、PHT 样条、Powell-Sabin 三角样条、细分模型以及适合分析的 T 样条等^[21-27]；③面向等几何分析的改进处理方法，如边界条件的配置方法、面向等几何分析的数值积分方法等^[28, 30]；④面向等几何分析的几何计算方法，即研究等几何分析方法为几何设计与计算领域提出的新问题，主要包括计算域参数化以及可局部加细的新型样条理论两大分支^[31-38]。

给定由平面 B 样条曲面形成的计算域 Ω ，其参数域为 P ，假设其参数化形式如下：

$$G(s, t) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n R_{i,j} N_i^p(s) N_j^q(t)$$

其中， $N_i^p(s)$ 、 $N_j^q(t)$ 为 B 样条基函数， $R_{i,j}$ 为控制顶点。假设我们需要求解 $u(\xi)$ ， $\xi \in \Omega$ ，使得

$$\begin{aligned} Lu(\xi) &= f, \quad \xi \in \Omega \\ u &= 0, \quad \xi \in \Gamma_D, \quad \langle \nabla u, n \rangle = h, \quad \xi \in \Gamma_N \end{aligned}$$

这里 L 是一个微分算子。如果利用变分，将这个方程变成弱形式：

$$a(u, v) = l(v), \quad v \in V := \{u \in H^1(\Omega), \quad u|_{\Gamma_D} = 0\}$$

有限元方法就是将上述的空间 V 用一个有限维空间 S 逼近。而等几何分析就是将 $\{N_i^p(s) N_j^q(t) G^{-1}\}$ 作为 S 来逼近空间 V ，并通过求解一个线性方程来求解偏微分方程。图 8 给出了一个等几何分析求解框架中的计算域参数化表示及其光滑物理场。

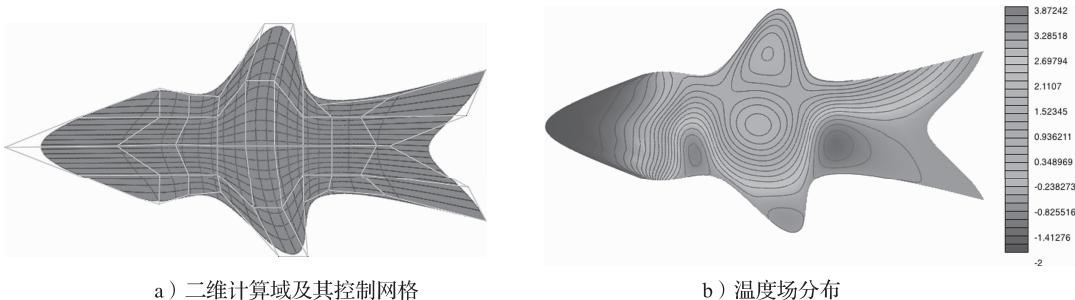


图 8 等几何分析求解实例

基于 NURBS 的等几何分析在处理大量的工程问题中都显示出比传统有限元更大的优势：更加鲁棒，更加稳定，更加快速。比如，如图 9 所示，在汽车冲压模拟中，在同样的精度下，等几何分析花费的时间大约是有限元分析方法的一半，从三个半小时提高到一个半小时。在和时间相关的问题中，等几何分析的优势更加明显。比如，在基于等几何分析的个性化医疗中，可利用该方法来模拟心脏瓣膜闭合，同样的精度下，有限元花费的时间大约是等几何分析的 500 倍（有限元需要大约 500 多个小时）^[39]。另一方面，在高阶的偏微分方程中，由于可以直接离散，等几何分析也显示出明显的优势。比如，基于 B 样条的等几何分析方法成功模拟了三维区域中沸腾的水的效果（见图 10），而传统的有限元则对此无能为力^[40]。由于是同样的表示形式，等几何分析在拓扑和形状优化上也优于传统的有限元方法^[41-42]。对于不同的工程分析仿真问题，例如弹性力学、流体力学、接触力学等实际问题，所求解的 PDE 数学物理方程虽然不同，但其基本框架大致相同。

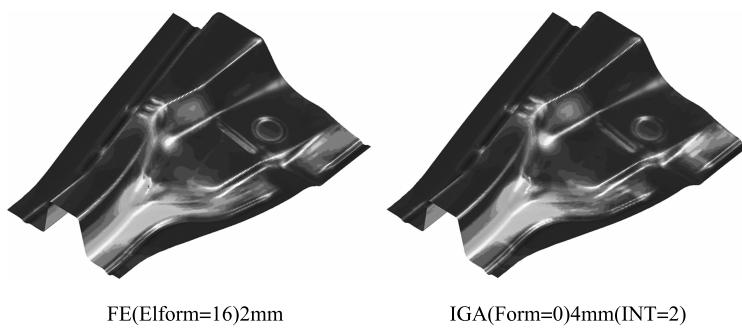
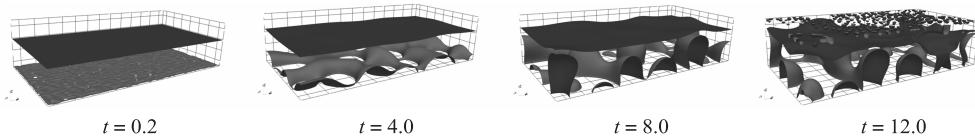


图 9 在汽车冲压模拟中，等几何分析的优势，在同样的精度下，等几何分析需要的时间是传统有限元的 42.5%

图 10 利用等几何分析模拟沸腾的水^[40]

目前国际上一些研发机构已经致力于基于等几何分析的 CAE 软件平台的开发，比如意大利应用数学与信息技术研究所（IMATI-CNR）开发的 GeoPDE 平台^[43]，法国国家信息与自动化研究所 GALAAD 课题组开发的 AXL 平台^[44]（见图 11），奥地利林茨大学开发的 G + Smo 平台^[45]，沙特阿卜杜拉国王科技大学开发的 PetIGA 平台等^[46]。此外，德国西门子公司、Abaqus、inTech 公司等都致力于将等几何分析方法集成于其 CAE 软件平台中。

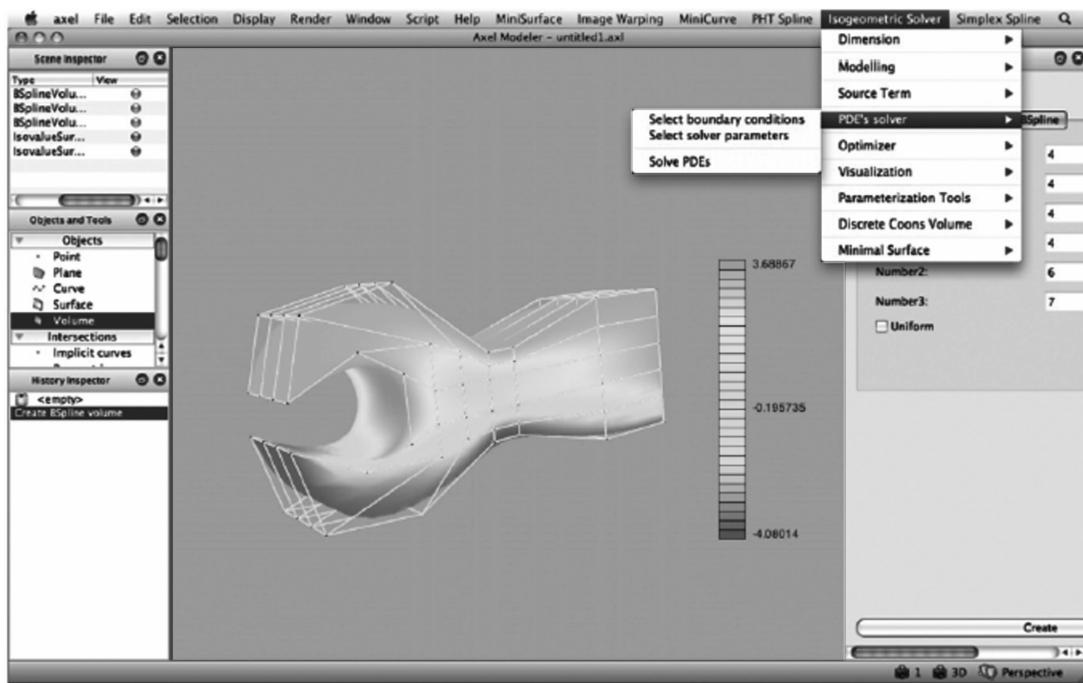


图 11 等几何分析软件平台 AXL

图 12 对 2008 年以来 Elsevier 出版社的学术期刊近 10 年所发表的等几何分析领域的相关论文进行了统计，可以发现，近年来等几何分析领域发表的论文数目呈现快速增长的态势。但目前等几何分析的研究仍处于初级阶段，该方法在应用广度与仿真计算的自适应性等方面仍具有一定局限性。从几何计算的视角出发，如何开发面向多学科等几何分析的几何造型工具与处理方法，便成为等几何分析与几何计算领域急需解决的课题。

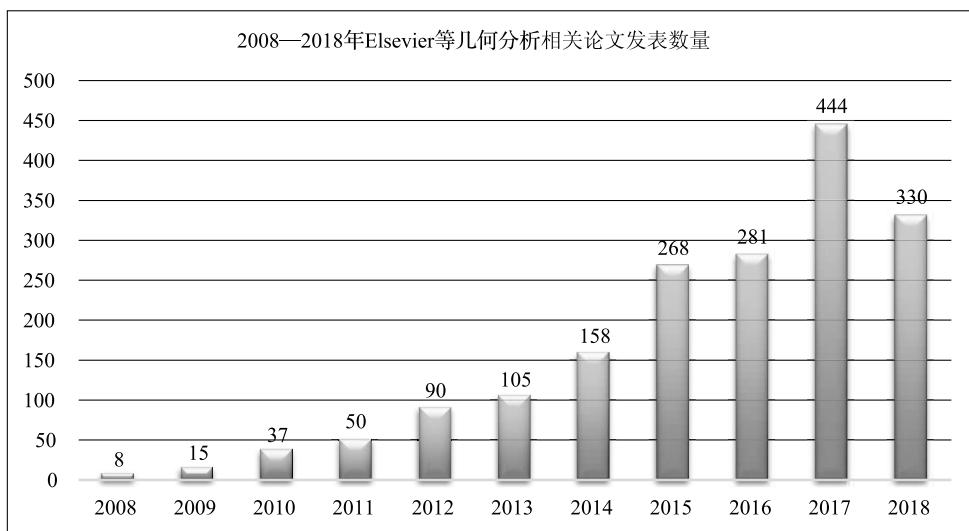


图 12 2008-2018 年 Elsevier 等几何分析相关论文发表数目统计

3.2 面向等几何分析的新型样条建模理论

3.2.1 张量积形式的样条模型表示

NURBS 模型是 CAD 领域的标准格式，也是一种最具代表性的张量积形式的样条模型。随着等几何分析方法的提出，研究人员相继研究了基于 NURBS 表示的等几何分析方法的误差估计、 k -加细方法及其收敛性^[47]。为了能够克服 NURBS 有理形式的缺点，并能精确表示圆和其他的一些特殊超越曲线曲面模型，一些非多项式空间的样条模型相继被提出。浙江大学数学系的汪国昭教授课题组在该研究方向上做出了重要贡献。以意大利罗马大学的 Carla Manni 教授为代表，一些学者进一步将非多项式空间的扩展样条模型引入到等几何分析领域，该模型在收敛性和形状表示的灵活性方面表现出较大优势^[48-50]。杭州电子科技大学徐岗课题组提出了一种构造非多项式样条空间的扩展 B 样条模型的统一方法，为扩展 B 样条模型在等几何分析领域的应用建立了理论基础，并进一步将其应用于热传导问题的等几何分析求解^[51]。

3.2.2 三角剖分上的样条

三角剖分上的样条更能表达拓扑任意复杂的几何外形。因此，研究人员开始研究三角剖分上的样条及其在等几何分析中的应用^[52]。罗马大学的 Speleers 教授给出了基于 Powell-Sabin 三角样条的构造和在等几何分析中的应用^[53-54]，见图 13。另外一类三角剖分上的样条是 Box 样条。Box 样条是计算机辅助几何设计领域的经典表示形式，有着严格的数学理论基础，然而在几何造型领域没有得到很好的发展。在等几何分析中，研究人员研究了如何将 Box 样条应用到等几何分析中以显示其优势。湖南师范大

学潘青等人提出了基于扩展 Loop 细分模式的等几何分析方法，并从理论上证明了其收敛性^[25]。为了给出 Box 样条的局部细分，层次 Box 样条及其在工程计算中的应用被提出^[55-56]（如图 14 所示），并被推广到任意拓扑，利用 Loop 细分基函数，建立了层次的 Loop 细分基函数并给出了其力学仿真，在效率和收敛阶上都优于传统的有限元^[57]（如图 15 所示）。

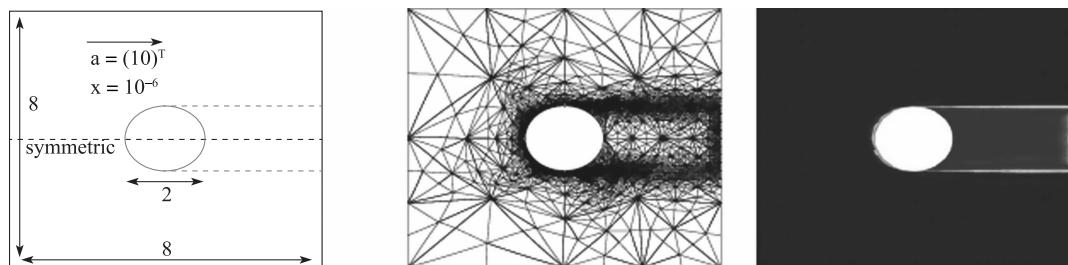


图 13 三角剖分上的样条

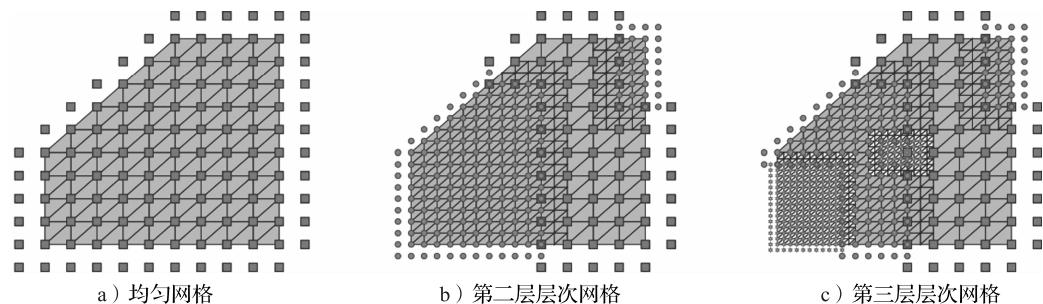


图 14 层次 Box 样条

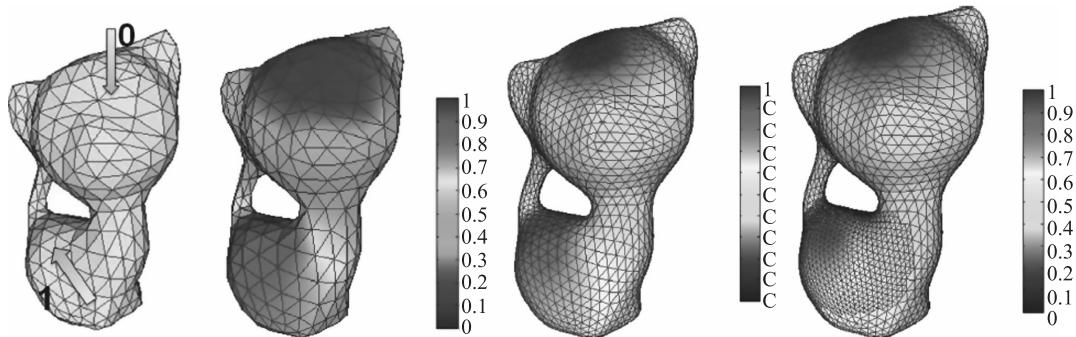


图 15 层次 Loop 细分

3.2.3 具有局部细分能力的样条的研究进展

裁剪 NURBS 曲面在工程设计中屡见不鲜，比如图 16 中的汽车的车门模型中包含了 1280 个裁剪 NURBS 曲面，而裁剪 NURBS 表示由于存在缝隙而不能直接用于等几何分

析，所以研究人员设法利用具有局部细分能力的样条来解决这个问题。到目前为止，具有局部细分能力的样条主要包括四类：层次 B 样条、T 样条、T 网格上的样条和 LR 样条。下面就这四类对国内外的研究进展做一个综述。



图 16 裁剪 NURBS 曲面在实际模型中非常常见

3.2.3.1 层次 B 样条

层次 B 样条最早是为了解决 B 样条曲面的局部编辑问题，由 Forsey 和 Bartels 提出^[58]。在随后的发展中，由于多层的结构，层次 B 样条在 CAD 中并没有得到很好的发展。随着等几何分析的出现，层次 B 样条再次引起了研究人员的关注，在等几何分析中也显示了很好的性能^[59]。这是因为，首先，层次 B 样条是直接基于 B 样条建立的，从而很方便将 B 样条的相关理论和算法推广到层次 B 样条上。另外，层次 B 样条非常便于推广到三维，而且，它的数据结构简单，可以用非常成熟的四叉树和八叉树结构，为其实现带来很大的便利。

假设我们有一系列嵌套的定义域 $\Omega_0 \supseteq \Omega_1 \supseteq \dots \supseteq \Omega_N$ ，两组嵌套的节点向量 $U^0 \subseteq U^1 \subseteq \dots \subseteq U^N$, $V^0 \subseteq V^1 \subseteq \dots \subseteq V^N$ ，节点向量 U^k , V^k 可以定义一系列张量积的 B 样条基函数，记作 B^k 。 B^k 中的 B 样条基函数张成的线性空间记作 S^k ，则 $S^0 \subseteq S^1 \subseteq \dots \subseteq S^N$ 。如果定义域是严格嵌套的，那么我们可以按照下面的方法构造层次 B 样条的基函数 H。

- 1) $H^0 = \{\beta \in B^0, \beta \text{ 在 } \Omega_0 \text{ 中非零}\}$;
- 2) 对 $k=0, 1, \dots, N-1$, $H^{k+1} = H_A^{k+1} \cup H_B^{k+1}$, 其中

$$H_A^{k+1} = \{\beta \in H^k, \beta \text{ 在 } \Omega_{k+1} \text{ 中零}\},$$

$$H_B^{k+1} = \{\beta \in B^{k+1}, \beta \text{ 在 } \Omega_{k+1} \text{ 中非零}\};$$
- 3) $H = H^N$ 。

但是这样构造出来的基函数不满足单位剖分性。因此，Giannelli 等人给出了截断层次 B 样条 (THB-splines) 的构造方法^[60]。关于截断层次 B 样条和层次 B 样条的构造方法的区别可以参考图 17。

事实上，记

$$\tau = \sum_{\beta \in B^{l+1}} c_{\beta}^{l+1}(\tau) \beta$$

则截断层次 B 样条基函数记作

$$\text{trunc}^{l+1} \tau = \sum_{\beta \in B^{l+1}, \sup(\beta) \notin \Omega^{l+1}} c_{\beta}^{l+1}(\tau) \beta$$

那么我们可以按照下面的办法给出截断层次 B 样条的基函数 T 的构造方法。

- 1) $T^0 = H^0$
- 2) 对 $k=0, 1, \dots, N-1$, $T^{k+1} = T_A^{k+1} \cup T_B^{k+1}$, 其中
 $T_A^{k+1} = \{\text{trunc}^{k+1} \beta \in T^k, \sup \beta \notin \Omega_{k+1}\}$
 $T_B^{k+1} = H_B^{k+1}$
- 3) $T = T^N$

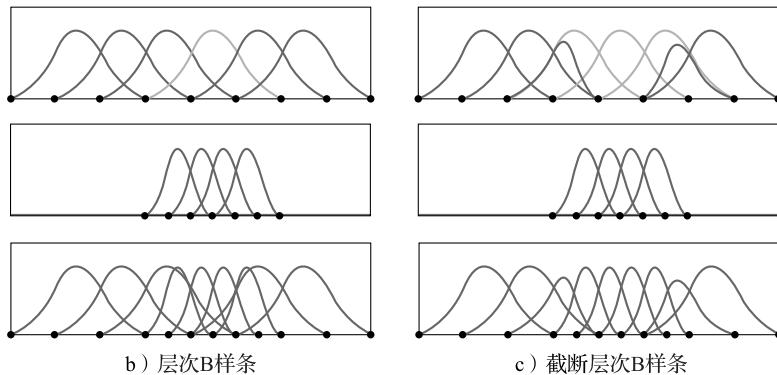
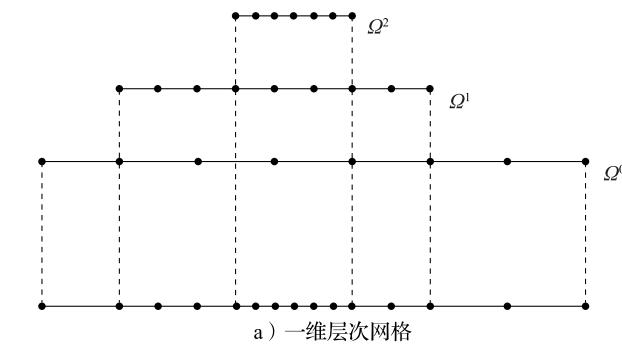


图 17 层次 B 样条和截断层次 B 样条在一维中的区别

层次 B 样条在等几何分析中得到了研究人员的大量关注，并研究了其中的关键理论基础和应用技术。截断的层次 B 样条基函数由于基函数的支集更小，从而在等几何分析中带来一定的优势。比如，如图 18 所示，利用层次 B 样条和截断层次 B 样条逼近同样的几何对象 b，假设得到同样的层次 T 网格 a，那么截断层次 B 样条对应的矩阵将更加稀疏，从而条件数更小，计算更加稳定。因此，在后续的研究中，截断层次 B 样条所张成的样条空间维数，以及空间的代数精度分别在文章^[61-63]中得到证明。此外，研究人员还将它们应用到曲面重构^[64]、平面参数化^[65]、数据结构^[66]、高斯积分^[67]和工程应用问题中^[68]。

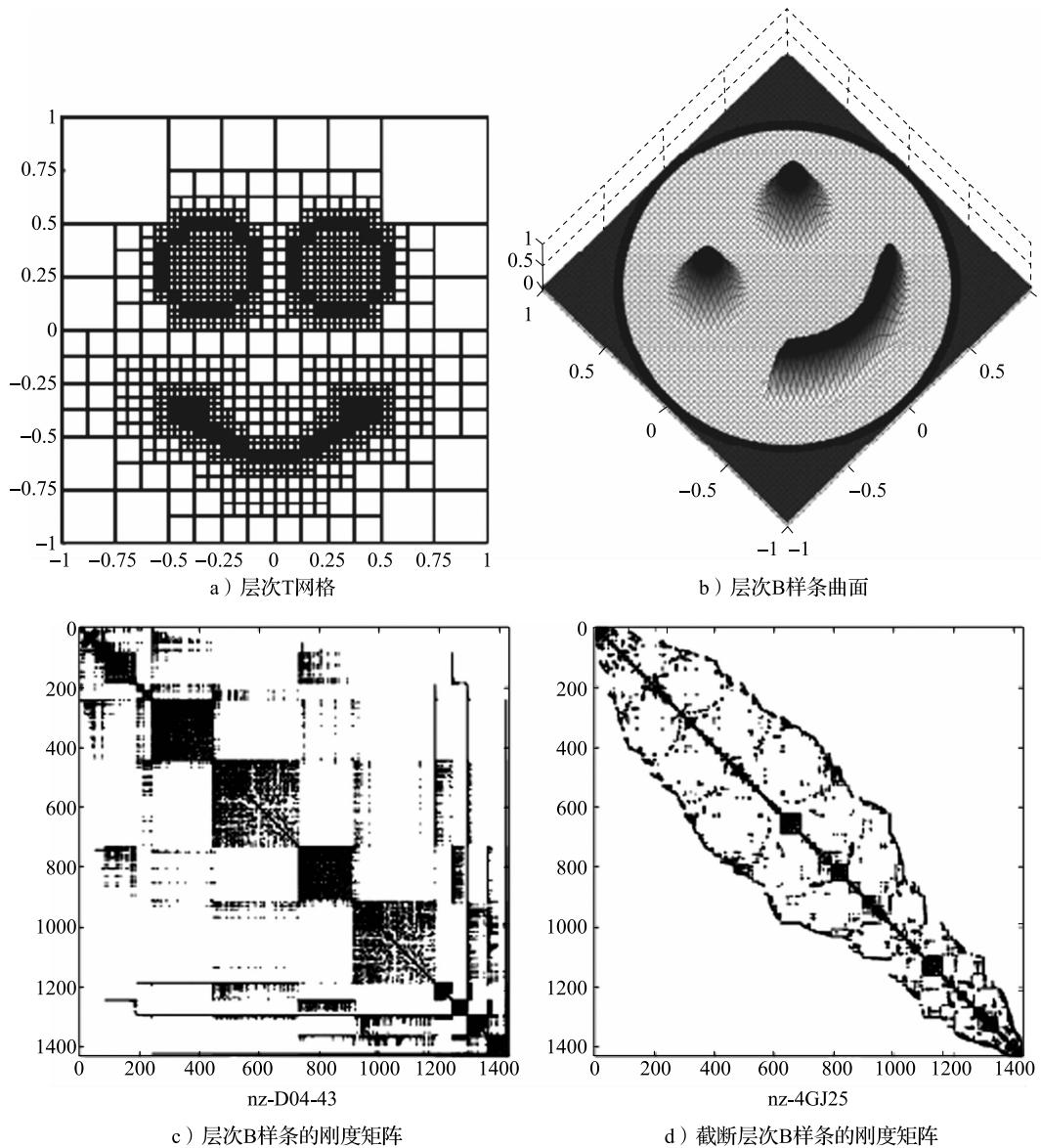


图 18 层次 B 样条和截断层次 B 样条

3.2.3.2 T 样条

T 样条是在 2003 年和 2004 年由美国杨伯翰大学的 Tom Sederberg 教授为了解决 NURBS 表示形式的缺陷而提出的^[69-70]。T 样条完全兼容 NURBS 表示形式并且具有局部细分能力。一个复杂的模型可以表示成单个无缝的 T 样条曲面。因此，T 样条在 CAD 中得到广泛应用。T 样条自提出后，在几何造型和等几何分析中研究人员展开了系统的研究。例如，研究人员分别研究了 T 样条的简化算法、缝合算法、裁剪 NURBS 曲面到 T 样条的转化^[71]（如图 19 所示）、曲面重构、等几何分析^[21-22]等。



图 19 裁剪 NURBS 曲面转化成 T 样条曲面

(1) T 样条的定义

给定一个空间的四边形控制网格，记它的顶点为 $P_i, i = 1, \dots, n$ 。该网格的顶点有三种类型，规则点（度为 4 的点，如图 20 中的圆点）、T 型控制点（如图 20 中的五角形点）和奇异点（度不为 4 的点，如图 20 中的方形点）。我们对网格的每一条边赋予一个非零的常数，称为节点距。这些节点距需要满足下面条件，即任意一个四边形的对边的常数和都相等。比如，在图 20 中， $d_{11} = d_{12} + d_{13}$, $d_8 = d_{10} + d_{11}$ 。有了这些信息，该控制网上的双三次的 T 样条定义为

$$T(s, t) = \sum_{i=1}^n P_i T_i(s, t)$$

这里， $T_i(s, t)$ 称为混合函数，它是一个双三次的张量积的 B 样条。B 样条节点通过下面的方式定义：将这个控制点和相应的节点距局部映射到平面上（每一个四边形对应平面上的一个矩形，矩形的长和宽是相应的节点距），然后，从这个点在水平和竖直方向上引两条直线，每一条直线找到五个和网格相交的点，这些点的参数给出了 B 样条的节点向量，如图 20 右图所示。

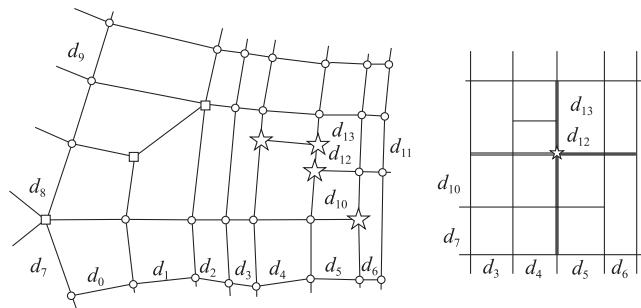


图 20 T 网格和混合函数的定义

可以看出，这样的定义方式不能适合所有点，比如奇异点。所以不能用这个办法定义的混合函数需要特殊的定义方式。目前，主要有两种方式，一种是基于非均匀细分格式，一种是基于局部几何连续的曲面片。这一部分的内容将在非结构样条中详细阐述。另外一个问题就是如何定义任意次数的 T 样条，这个概念可以直接推广。对于给定的 T 网格，按照次数的奇偶性，定义一系列锚点（anchors），如果次数是双偶次的，那么锚点对应每一个面的中心，如果有一个是奇数，锚点就对应到边的中点。然后，对每一个锚点，利用类似的方法可以定义混合函数，如图 21 所示。

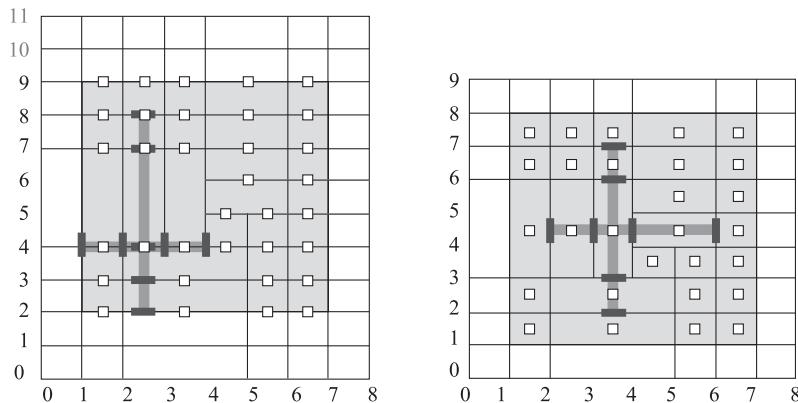


图 21 T 网格和混合函数的定义

(2) 适合分析的 T 样条

适合分析的 T 样条是一类具有良好数学性质的 T 样条，它通过 T 点的延伸方式进行定义^[72-75]。对于双三次 T 样条，T 点的延伸就是参数区域的通过相应顶点的一段线段。从该顶点出发，向穿过四边形面的一段和 T 网格相交两个顶点，而在另外一个方向和 T 网格相交一个端点。对于其他的次数，我们可以类似地定义 T 点的延伸，如图 22 所示。

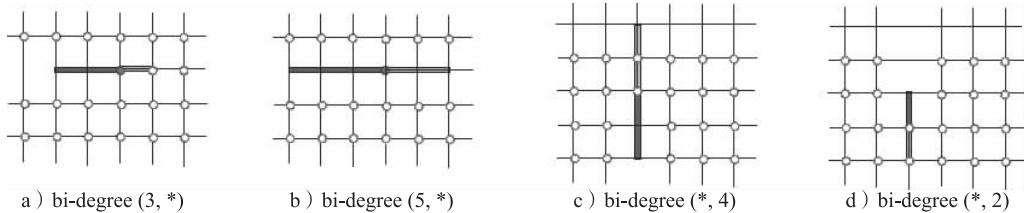


图 22 T 点的延伸

如果一个 T 网格所有的 T 点的不同方向上的延伸互不相交，那么这个 T 网格就称为一个适合分析的 T 网格，一个适合分析的 T 网格上的 T 样条就是一个适合分析的 T 样条。适合分析的 T 样条满足了前面提出的适合分析的样条的所有性质。最近，适合分析的 T 样条得到进一步的改进，得到适合分析 ++ T 样条^[76]。该类 T 样条包含适合分析的 T 样条，同时满足适合分析的 T 样条的所有数学性质。比如，图 23 中的两个 T 网格就是适合分析 ++ T 网格，但是不属于适合分析的 T 网格。

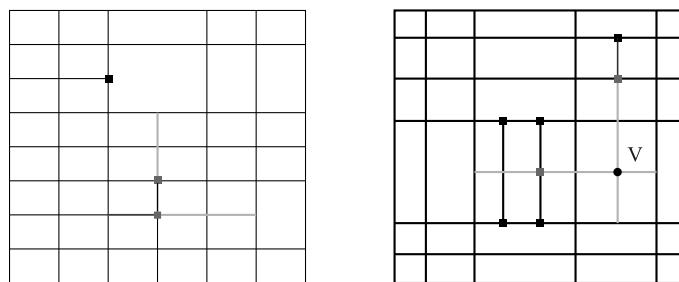


图 23 适合分析 ++ T 样条

(3) T 样条在等几何分析中的应用

T 样条被广泛应用于工程力学问题^[77-80]，比如基于 Bézier Extraction 操作实现从设计到分析的转换，将 T 样条应用于断裂模拟，利用相场模型处理动态的断裂，利用内聚区模型模拟断裂，利用 T 样条处理两片结构，结合 T 样条和层次 B 样条处理复杂几何的力学仿真，利用适合分析的 T 样条做壳分析（如图 24 所示），利用 T 样条处理形状优化（如图 25 所示）等等。另外，也有相关工作对不同的局部细分算法进行了比较，结果显示适合分析的 T 样条在整体上是最优的，结果见图 26。

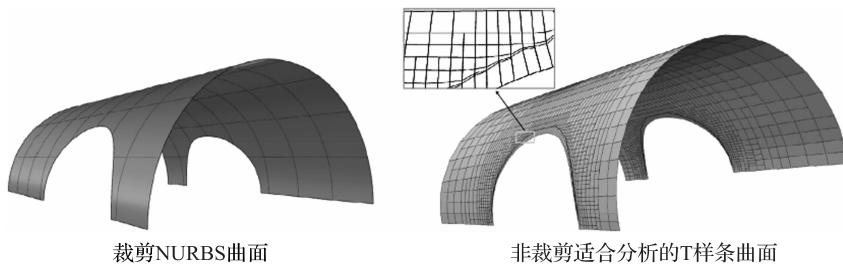


图 24 将适合分析的 T 样条应用到壳分析

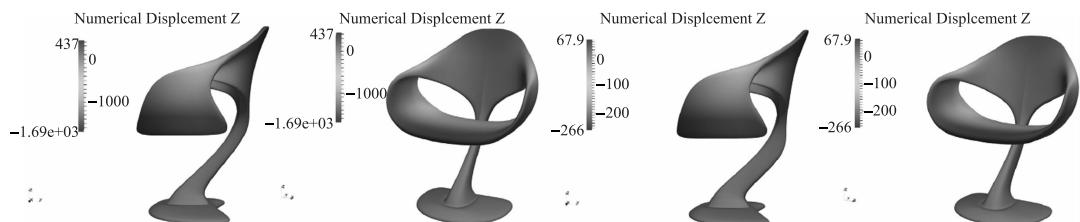


图 25 基于 T 样条的形状优化

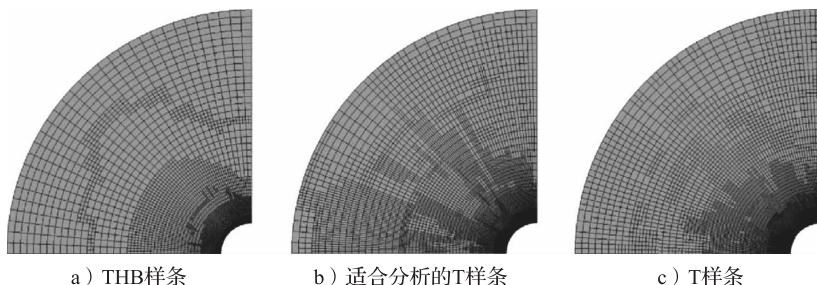


图 26 局部细分算法的比较

3.2.3.3 T 网格上的样条

T 网格上的样条直接将传统的样条空间的概念推广到 T 网格上的样条空间^[81-87]。给定一个 T 网格 T，假设它包含的面的集合为 F，定义域为 Ω ，那么 T 网格上的样条空间 $S = S(m, n, \alpha, \beta, T)$ 定义为：

$$S = \{f(s, t) \in C^{\alpha, \beta}(\Omega) \mid f(s, t) \mid_{\phi} \in P_{m, n}, \phi \in F\}$$

其中 $C^{\alpha, \beta}(\Omega)$ 是在 s, t 方向上 α, β 阶光滑的所有函数， $P_{m, n}$ 是双次数为 m, n 的多项式空间。可以看出，上述空间是一个线性空间。

对于线性空间，第一个问题就是计算它的维数。众所周知，B 样条空间的维数是非常容易计算的，然而 T 网格上的样条空间的维数要困难很多。到目前为止都没有给出上述线性空间的维数公式。中科大李新博士发现了当 $m = \alpha + 1$, $n = \beta + 1$ 时，存在 T 网格，它对应的样条空间的维数是不稳定的（见图 27），即它的维数不仅仅和网格的连接关系有关，而且和点的几何位置有关。这一发现告诉我们，在实际应用中，我们只能研究某些特殊的 T 网格上的样条空间。为了寻找一类维数稳定的样条空间，结合经典的光滑余因子方法以及同调代数理论可提出“基于满射条件的直和分解”方法^[81]。基于“满射条件”，可以把在 $m = \alpha + 1$, $n = \beta + 1$ 情况下的 T 网格上的样条空间分解为一元样条空间的直和来研究^[85]。根据这个理论，一方面可以找到维数稳定的样条空间，另一方面也可以给出该样条空间的一组初始基函数。

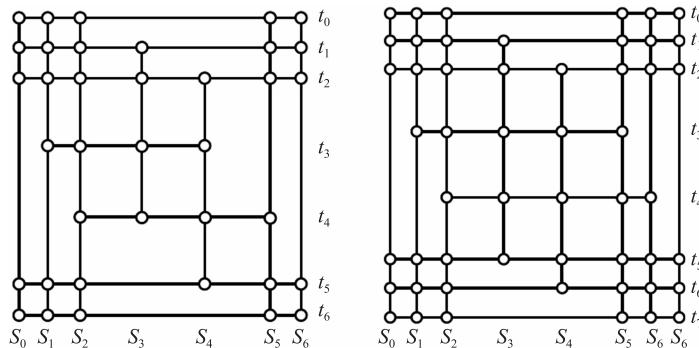


图 27 两个空间维数不稳定的例子

目前，非常成熟的一类空间是 PHT (Polynomial splines over Hierarchical T-meshes) 样条空间^[84]，它要求 T 网格是层次网格而且 $m = 2\alpha + 1$, $n = 2\beta + 1$ 。PHT 的局部细分算法是最优的，首先它不会带来任何额外的细分，而且它的局部细分没有任何的约束。另外，PHT 样条的构造可以通过一个通用的 Hermite 插值得到，因此，它的计算非常快，不过，PHT 最大的劣势是没有得到最高阶光滑。PHT 在几何造型和等几何分析中都得到了广泛的应用。给定一个三角网格和它的参数化，利用参数化我们可以估计每一个基点（十字点和边界点）对应的空间点的一阶导数和混合导数信息。然后，利用 PHT 的插值我们可以非常高效地重构一个 PHT 曲面拟合给定的网格曲面。图 28 就给出了一个 PHT 曲面拟合的例子，这个模型包含 10 万个顶点，利用 PHT 在通常的笔记本电脑上完成重构的时间大约是 2 秒钟。PHT 样条在等几何分析中也显示了其优势^[83]，如图 29 所示。

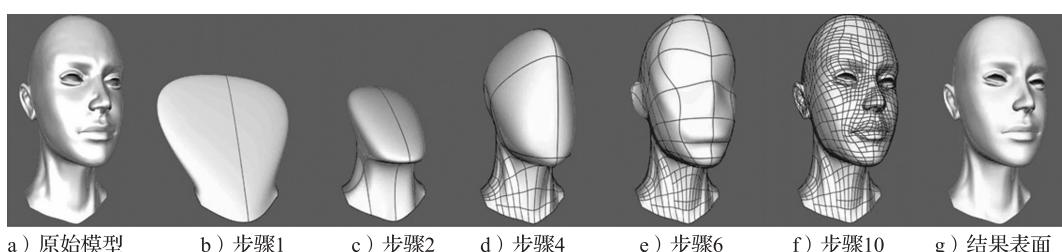


图 28 利用 PHT 样条做曲面拟合

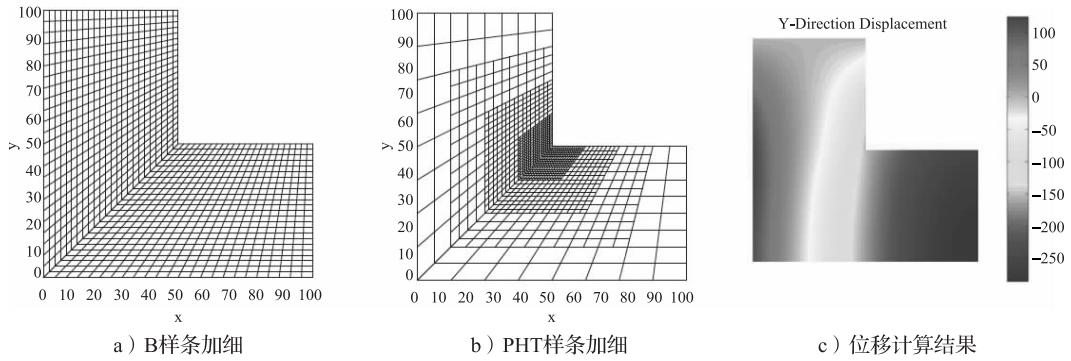


图 29 基于 PHT 样条表示的等几何分析

3.2.3.4 LR 样条

LR 样条是 Tor Dokken 在 2013 年提出的一种新的支持局部细分的样条表示形式^[86]。其基本想法和层次样条类似。不同的是 LR 样条是从张量积网格出发，每一步插入的是一条边。所有可以通过这种方式构造的网格称为 LR 网格。

首先我们从一个张量积网格 T_1 出发，构造相应的 B 样条基函数集合 B_1 。假设当前网格是 T_k ，函数集合为 B_k ，这个时候插入一条新边得到一个新的网格 T_{k+1} 。如图 30 所示，新的函数集合 B_{k+1} 通过下面的办法来构造。首先从函数集合 B_k 中取出一个 B 样条函数，然后检测当前插入边是否贯穿了该基函数的支集，如果没有，那么直接将这个函数放入到 B_{k+1} 中。如果该基函数被这条边贯穿，那么在这个 B 样条基函数中插入相应的节点并分解成两个新的 B 样条。如果这两个新的 B 样条基函数支集中没有任何贯穿的边，就将它放入 B_{k+1} 中，否则继续分解直到它的支集中没有任何贯穿的边。通过这个过程，我们就得到定义在当前 LR 网格 T_{k+1} 上的 LR B 样条 B_{k+1} 。

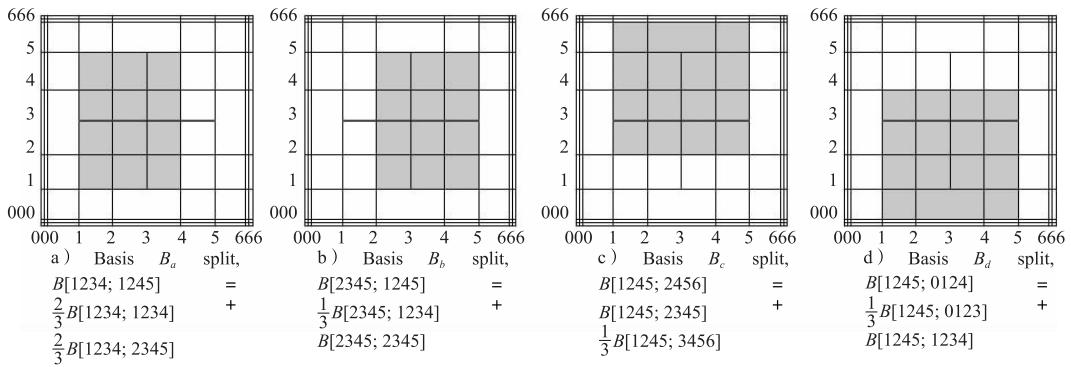


图 30 基于新网格的 LR B 样条细分

可以看出，LR 样条和层次样条类似，虽然具有局部细分能力，在几何造型上很难克服 NURBS 造型所存在的主要问题。但是作为等几何分析的求解表示形式而言还是具有一定优势。不过，LR 样条的混合函数也不是恒为线性无关，虽然作者提出了一个算法可

以检测混合函数的线性无关性，并通过插入更多的边使得新的 LR 样条是线性无关的，但这仍是 LR 样条在 IGA 应用上的最大障碍。

3.2.4 定义在非结构网格上的样条

上述方法都是针对简单拓扑的几何表示，为了表示具有复杂拓扑的几何外形，主要有三个方法：基于细分的表示方法^[87-93]，基于有限个 Bézier 片补洞的表示方法^[94-95]和流形曲面表示方法^[96-97]。

细分方法是计算机图形学领域中一种将 B 样条推广到任意拓扑表示的方法。目前，细分造型方法是影视动画行业的标准。因此，大量的研究工作集中在基于细分表示的等几何分析。比如，湖南师范大学潘青教授等人给出了推广的 Catmull-Clark 细分的等几何分析以及误差估计^[89]，奥地利林茨大学 Bert Juttler 教授等人研究了基于细分方法的等几何分析中的数值积分^[91]，卡内基 - 梅隆大学的魏小东博士等给出了层次 Catmull-Clark 细分以及推广的层次 Catmull-Clark 细分和它们在等几何分析中的应用^[87-88]，李新博士给出了一种新的非均匀细分用来改善奇异点附近的曲面质量^[93]，文献 [100] 中给出了基于 Catmull-Clark 体细分的等几何分析方法并应用到体的应力计算（如图 31 所示），

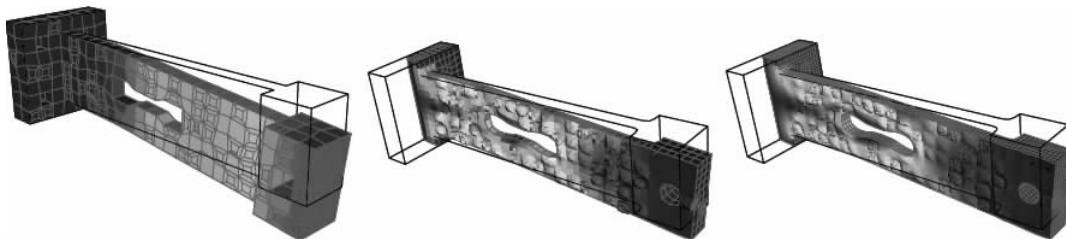


图 31 基于体细分的等几何分析

基于有限个 Bézier 曲面片补洞的想法中最重要的两个工作是^[94-95]。其中，文献 [94] 给出了 T 样条曲面在奇异点的表示，并利用配点法研究了 T 样条曲面上的边界元。由于该文方法中的几何表示和基函数均至少为 C^1 连续，从而为计算效率和收敛阶都带来好处，如图 32 所示。文献 [95] 中利用退化的参数化给出了奇异点附近的表示，并得到了最优收敛阶。这一方法最近被推广到三维体上的样条表示^[101]，如图 33 所示。

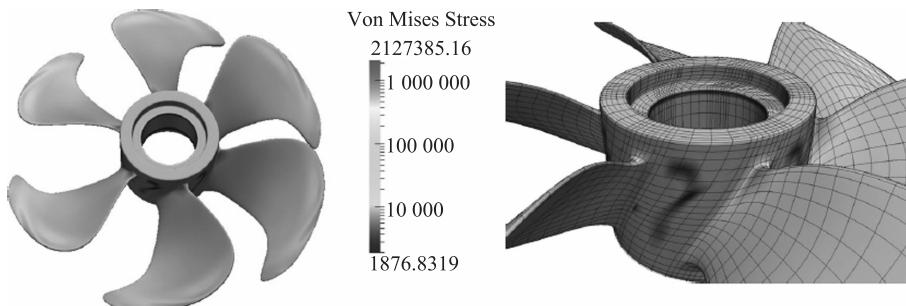


图 32 基于 T 样条的等几何边界元算例

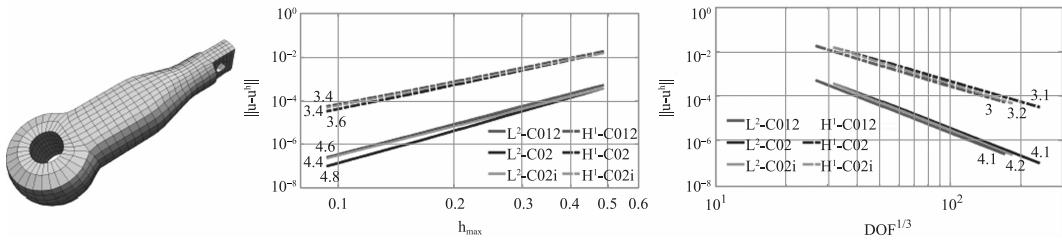


图 33 具有最优收敛的体上的等几何分析

此外，法国信息与自动化研究所 Bernard Mourrain 教授团队研究了定义在非结构四边网格上的 G^1 光滑连续的样条空间，给出了其维数公式，并提出了构造相应样条基函数的方法^[102-103]，该成果为进一步推动等几何分析向实际应用发展提供了重要几何计算理论基础。

3.3 面向等几何分析的计算域参数化

3.3.1 计算域参数化对等几何分析的影响

CAGD 领域著名专家 E. Cohen^[104]首次提出了 analysis-aware modeling 这一概念，并研究了计算域参数化结果对等几何分析结果的影响，发现计算域参数化不仅影响其求解的精度和收敛速度，而且影响求解的总体计算时间。正则性（即等参结构无自交）是计算域参数化需要满足的首要条件。杭州电子科技大学徐岗等^[105]给出了一种判别二维计算域是否正则（即无自交）的方法，并以二维热传导问题为例，对有精确解的情形，提出了通过优化内部控制顶点的位置对等几何分析计算域参数化进行优化的方法。文献 [106] 对相应的三维计算域的优化问题进行了研究。

对于无精确解的一般情形，杭州电子科技大学徐岗等^[105]通过先验误差估计方法，正式提出了 r-细化方法，并提出了一种基于二次对偶求解的误差评估方法，可以发现，通过该细化方法，内部控制顶点将向误差估计比较大的区域聚集。文献 [107] 将 r-细化和基于样条升阶的 p-细化结合起来，提出了 r-p 细化方法；文献 [108] 提出了基于局部误差估计的自适应 r-细化方法，可大大提高计算域参数化的优化效率。林茨大学 Bert Juttler 教授团队^[109]进一步从理论层面挖掘了计算域参数化以及节点分布对等几何分析求解的影响，发现对一般问题而言，求解误差与计算域的等参数线网格（或等参数面网格）的均匀性及正交性有关，这也为构造适合分析的计算域参数化提供了重要的理论依据。

在计算域参数化表示中，奇异性往往是难以避免的问题。特别是当我们讨论复杂计算域的参数化表示时，这一问题尤为突出。在等几何分析框架中，试探函数的正则性是需要考虑的问题。例如求解曲面上二阶椭圆形方程，试探函数需要满足 H^1 正则性。然而曲面参数化的奇异性很可能破坏曲面上试探函数的正则性，从而影响等几何分析问题的求解。近年来奇异参数化与试探函数的正则性的问题逐步得到研究人员的关注。林茨大

学课题组讨论了试探函数正则性和曲面参数化奇异性之间的关系^[110-111]。最近，合肥工业大学吴梦博士在这一研究方向取得了重要进展^[112-113]，考虑了具有孤立奇异点的曲面参数化中试探函数的 H^1 可积性条件，特别地，具体讨论了两类在应用中常见的曲面奇异参数化下试探函数的 H^1 正则性。当曲面上的孤立奇异点是由退化切向所导致时，根据 H^1 可积性条件讨论了如何设计适合等几何分析的 G^1 光滑曲面，即既保持几何设计的 G^1 光滑性要求，又保持在等几何分析数值求解中曲面上试探函数的 H^1 正则性。

3.3.2 由样条边界构造适合分析的计算域

实际工程中的 CAD 模型大多通过 CAD 软件造型设计得到，通常以样条形式表示。因此，如何由给定的样条边界构造适合分析的计算域，便成为等几何分析急需解决的几何基础问题。根据等几何分析的特点和要求，杭州电子科技大学徐岗与其合作者^[105]首次提出“适合分析的计算域参数化”这一概念，即一个适合分析的计算域参数化应满足 2.3 节所给出的正则性、均匀性、正交性三点要求。基于以上原则，对于二维计算域参数化问题，首先通过 Coons 插值方法得到初始参数化，然后以正则性作为约束条件，以等参结构的均匀性和正交性作为目标函数，将计算域的构造问题转化为一个约束优化问题的求解，以得到内部控制顶点的最优位置^[105]。文献 [114] 将该方法推广到三维体参数化的情形，并提出了 Coons 体的构造方法，对多子块的计算域体参数化问题进行了研究（见图 34），并以三维热传导问题为例进行了验证。由于求解约束优化问题的复杂度较高，美国威斯康辛大学钱小平教授团队基于分而治之和局部优化的思想对三维计算域体参数化问题进行了加速^[115]，可以处理一些外形比较复杂的模型。对于边界形状较为复杂的情形，上述方法可能得不到较理想的参数化结果，杭州电子科技大学许金兰博士利用中轴线提取和区域分解法，较好地解决了这一问题，其中面片之间满足 C^0 连续性^[116]。

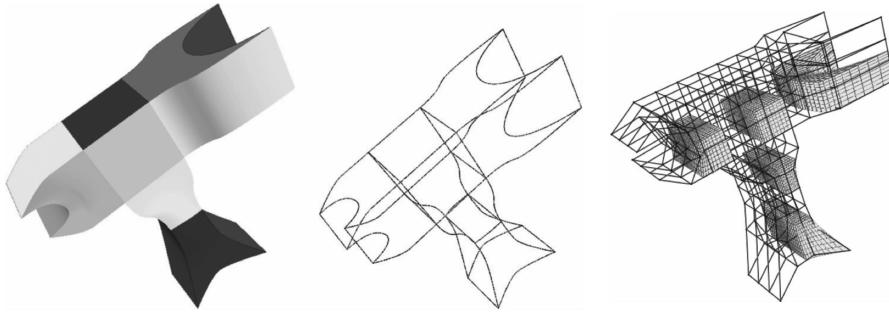


图 34 多子块 NURBS 样条体参数化^[21]

根据调和映射理论，如果从计算域到参数域的映射为调和映射，则其逆映射（即由参数域到计算域的映射）为一一映射。以此为启发，文献 [117] 将调和映射和变分方法相结合，提出了基于变分调和方法的计算域参数化方法，可以满足等几何分析的质量要求。2016 年中科大陈发来教授团队^[118]提出了一种基于 Teichmüller 拟共形映射的平面域参数化方法，所得到的参数化结果不仅从理论上保证是双射，而且具有极小化的共形扭曲，可以有效降低刚度矩阵的条件数，从而提高等几何分析求解的精度和稳定性。

平面复杂计算区域的参数化问题目前已成为研究热点。对于多片平面参数化问题, Buchegger 和 Jüttler^[119]提出了一种系统性的一般方法, 通过四边形面片集合来探索平面域的不同的可能参数化。罗马大学 Speleers 和 Manni^[120]研究了通过给定边界曲线来构造高质量 Powell-Sabin 三角样条平面参数化问题。文献 [121] 中利用截断层次 B 样条来解决基于特殊样条表达的平面参数化问题。杭州电子科技大学的徐岗团队针对高亏格和复杂 CAD 边界的计算域参数化问题^[122], 提出了一种通过区域分解以及全局/局部优化技术构造适合分析的平面参数化的一般框架 (见图 35)。首先, 在每个边界曲线上执行预处理操作, 如 Bézier 提取和细分, 以产生高质量的平面参数化; 然后提出一个鲁棒的平面区域划分框架, 生成计算域四边形分解的拓扑信息; 得到拓扑分解后, 通过全局优化技术构造与四边形网格边对应的内部 Bézier 曲线的最优布局, 实现了高质量的面片划分; 最后, 在每个四边形上对相邻 Bézier 面片施加 C^1/G^1 连续性约束, 然后通过 C^1 约束局部优化技术获得高质量的 Bézier 面片参数化, 从而得到具有较好均匀性和正交性的等参结构, 同时满足面片之间的连续性约束条件。在 2018 年 GMP 学术会议上, 中科大陈发来教授团队提出了利用 PolySquare 技术进行平面参数化的方法, 可生成内部无奇异点的多片参数化方法^[123]; 进一步, 上海理工大学的陈龙博士将其推广到三维区域的体参数化问题, 利用一种改进的 PolyCube 高质量生成技术构造内部无奇异点的体参数化。

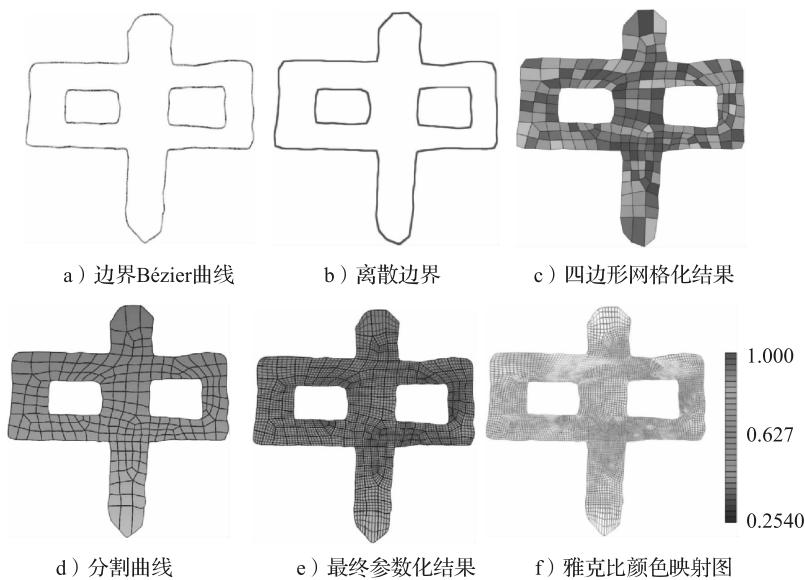


图 35 文献 [122] 中的参数化示例: a) 显示了输入边界 B 样条曲线预处理后的边界 Bézier 曲线; b) 给出了通过连接每个 Bézier 曲线的结束控制点获得的离散边界, 相应的四边形网格化结果如图 c) 所示; d) 通过全局优化方法显示了使用细分曲线构造的区域分解结果; e) 在每个子面片的局部优化过程之后, 最终的平面参数化结果用等参曲线表示; f) 通过呈现参数化的比例雅克比颜色映射图说明平面参数化的质量

对于复杂 CAD 模型, 内部空间划分是适合分析的体参数化研究的关键问题。林茨大学课题组基于边的连接图提出了将简单实体模型的内部空间进行六面体分割的方法^[124-125], 并给出了其收敛性的严格数学证明。对于给定边界为 T 样条曲面的情形, 文

献 [126] 利用基于八叉树的参数域分割方法和边界曲面的等距操作研究了相应的三变量 T 样条体参数化问题（见图 36），可生成高质量的计算域参数化。

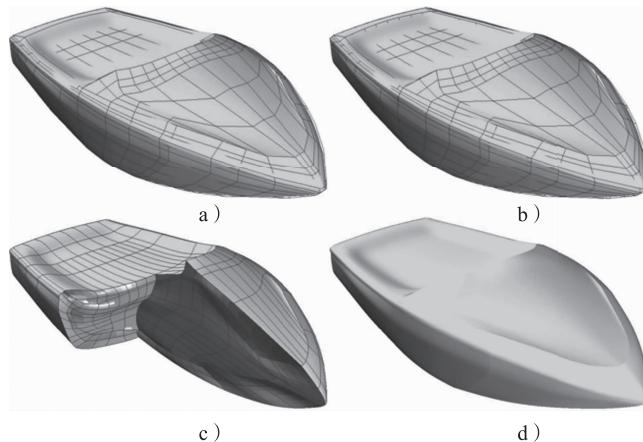


图 36 T 样条体参数化实例^[126]

上述工作主要考虑如何构造模型内部的控制顶点来生成高质量的适合分析的参数化结果。事实上，边界曲线或曲面的参数化质量（即均匀性和正交性）对最终生成的计算域参数化质量具有重要影响。Xu 等^[127]利用重新参数化技术来优化边界曲线曲面的参数化质量，从而可在不改变边界曲线曲面几何外形的前提下提高边界曲线曲面等参结构的均匀性和正交性，并进一步提升计算域的参数化质量（见图 37）。

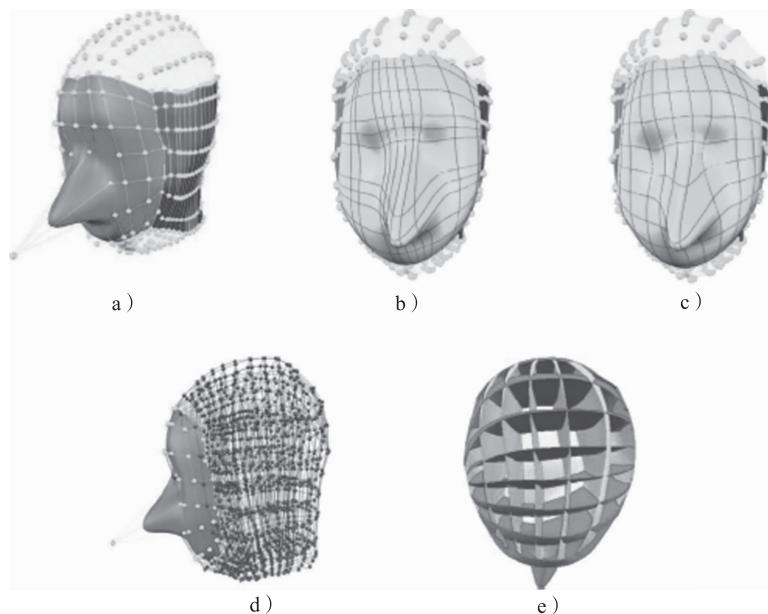


图 37 基于边界重新参数化的体构造^[127]

此外，在等几何分析中，通常利用优化边界曲线控制顶点的位置来实现外形优化，因而如果在此过程中计算域内部的控制顶点保持不变，则计算域参数化在此过程中会发

生变化，甚至会产生自交现象。为克服此问题，Choi 等人提出了在外形优化过程中通过更新内部控制顶点的位置来保证计算域参数化的质量^[128]。

3.3.3 由网格模型构造适合分析的样条体

在工程实际中，经常碰到产品通过三角网格模型离散进行表示。Martin 等利用离散调和映射方法来完成对四面体网格的参数体逼近^[129]；Escobar 等利用参数域剖分和插值逼近技术来构造三角网格模型的三变量 T 样条参数化^[130]。卡内基 - 梅隆大学 Jessica Zhang 教授团队在这一研究方向上做出了一系列的重要成果，首先利用参数映射和八叉树来构造拟合零亏格三角网格模型的三变量 T 样条参数化^[131]；对于任意拓扑网格模型，Wang 等利用 Polycube 工具和 morse 理论进行三变量 T 样条拟合^[132]；Liu 等^[134]提出了一种基于 CSG 布尔操作的 T 样条参数体生成方法；进一步，Liu 等^[136]提出了一种基于骨架的 Polycube 生成方法，进而构造以该 Polycube 为参数域的 T 样条参数体来拟合给定的网格模型。纽约大学石溪分校秦洪教授团队^[133]基于分而治之的思想完成部件分解，进而通过拟合得到 T 样条参数化。进一步他们^[135]提出了广义 PolyCube 模型，将其作为三变量参数体模型的参数域，并给出了由三角网格模型生成广义 Polycube 模型的一般方法。浙江大学蔺宏伟教授团队提出了四面体网格顶点的参数化公式^[137]，将四面体参数化到长方体参数域中，并且给出了一种快速鲁棒的迭代拟合算法，可将四面体网格拟合成三变量 B 样条体。德国魏玛包豪斯大学的 Timon Rabczuk 教授团队给出了一种基于 PHT 样条的水平边界集表示的体参数化方法^[138]。杭州电子科技大学徐岗与荷兰代尔夫特理工大学王昌凌教授团队合作，对于拓扑一致的多个 CAD 三维模型（见图 38），利用径向基函数插值映射提出了一种可以自动生成拓扑一致体参数化的框架^[139]。



图 38 拓扑一致体参数化方法^[139]

3.4 面向等几何分析的高质量六面体网格生成

3.4.1 原型法、映射法和扫描法

原型法是用预先设定的网格剖分模板来剖分可被识别的简单几何形体的一种网格生成方法。六面体网格原型就是用网格剖分将模板分解为六面体网格的简单几何形体。最基本的六面体原型为四面体，它可被分解为四个六面体^[140]。目前，复杂三维实体的全四面体网格全自动生成算法已经很成熟，结合四面体到六面体的网格剖分模板，即可轻

易地实现复杂三维实体的全六面体网格生成。但遗憾的是，这种方法的边界拟合能力弱，生成的网格质量较差。

映射法可以被认为是原型法的一种扩展，因为映射法在参数空间中的网格剖分一般使用一种最简单的六面体原型——正立方体。常用的有标架场法和多立方体法。标架场法通常是首先建立光滑标架场，然后从该标架场提取六面体网格^[141]，基本方法是在体内构造三组横截相交的向量场，然后把这些向量场提升到一个覆盖空间，在覆盖空间中将其合并成同一个向量场，之后根据霍奇理论将其光滑化后再映射回去，从而得到一个充分光滑的向量场。但是这些方法对于初始标架场的质量和四面体网格的质量非常敏感。对于非退化的体参数化，这些算法无法保证得到有效的奇异点结构。虽然采取一些技巧可以局部修正三维标架场的奇异点^[142-143]，但是它们无法得到适合生成全六面体网格的全局奇异点结构。总体来看，基于标价场的六面体网格生成研究，还处在发展阶段，具有很大潜力。但需要解决算法对奇异点和奇异线数目和位置的控制问题，同时算法的数学理论解释也需要进一步研究。

多立方体法^[144-146]则是把输入模型整个映射到一个规则区域，然后在规则区域生成六面体网格后再映射回去，从而得到原始模型的一个六面体网格剖分。该方法得到的六面体网格所有奇异点和奇异线都在模型表面，内部没有奇异部分^[147-148]。这些算法将实体表面曲面形变，变成多立方体曲面，所有的面都和某条坐标轴平行，然后将多立方体剖分成全六面体网格。因为不涉及对内部奇异点进行控制的复杂性，这种算法对于全六面体网格生成非常鲁棒。但是，这些算法会带来胞腔的巨大畸变。2016 年浙江大学黄劲教授团队^[149]等利用标架场来构造多立方体变换，从而生成全六面体网格（见图 39）。通过将恰当形式推广到闭形式，为多立方体变换提供新的自由度，使得算法能够处理高亏格模型，同时对模型几何特征有更好的保持。

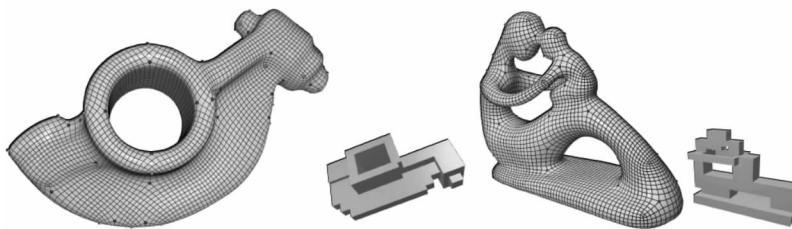


图 39 基于 frame field 构造多立方体变换，生成六面体网格

扫描法^[150-153]是由二维四边形有限元网格通过旋转、扫描、拉伸等操作形成六面体网格的一种方法。在扫描过程中，扫描断面还可以进行扭转与变形^[154-155]，形成特殊形状的实体网格。这种方法难度较低、较容易实现，在当今大多数的商用 CAD 软件和有限元前置处理软件中均有该功能。但是，该方法只能适用于形状简单的三维物体，且主要依靠人机交互来实现，自动化程度较低。2017 年浙江大学高曙明教授课题组提出了模型的伪扫掠模型分割^[156]，通过模糊聚类算法确定扫掠截面和扫掠方向，分析不同扫掠分块的相交情况，构造 cutting faces，实现模型分块。这种方法能够获得高质量的六面体

网格，但对网格的奇异线的结构控制以及背后的数学理论支撑需要进一步研究。

3.4.2 栅格法

由于三维栅格本身就是质量优良的六面体，因此无论是正则栅格法还是八叉树法，在六面体网格生成方面都具有得天独厚的条件。将栅格法应用于六面体网格生成已取得许多成果，比较有代表性的是 Schneiders 和 Loic 提出的方法。

Schneiders^[157]提出了采用所谓同构技术（isomorphism technique）的基于正则栅格的六面体网格剖分方法，该方法的基本步骤是首先用尺寸相同的正则化栅格（cell）覆盖在目标区域上面，删除完全落在目标区域之外的栅格、与目标域边界相交的边界栅格和距离边界非常接近的内部栅格，保留下来的内部栅格称为初始栅格，在初始栅格与目标域边界之间存在着未被覆盖的缝隙。然后，将初始栅格表面的每一个顶点投射到目标边界上并生成一个对应点，初始栅格的表面面片全部是四边形网格，这样每一个面片都可以在表面找到一个对应面。最后，连接相对应的四边形得到全六面体网格。

基于正则栅格的缺点是，为了剖分带有小尺寸几何特征的目标域，栅格尺寸也要相应缩小，这样就会产生太多的单元。在前面所提到的工作基础上，Schneiders^[158]等又提出了基于八叉树的六面体网格剖分方法。该方法最主要的贡献在于解决了不同级别分区之间的网格相容性问题。而 Loic^[159]提出的基于八叉树的六面体网格剖分方法，在八叉树建立时并不删除边界栅格，且在建立八叉树之后就立即插入相容六面体模板。对于边界栅格，将其顶点投射并移动到目标域表面，这样就恢复了目标域的边界。为了改善边界单元特性，可插入一个边界层栅格，然后通过节点优化来改善整体网格的质量。

3.4.3 扩展的 AFT 方法

Tautges 和 Blacker 提出的编须算法（whisker weaving）^[160]，以及 Blacker 和 Meyers 提出的粘贴算法（Plastering）^[161]都是 AFT(Advancing Front Technique) 方法的扩展形式。粘贴算法始终维护网格前沿，即用来描述已剖分区域边界的四边形面片集。剖分器迭代地从网格前沿中选择一个或多个四边形，粘贴上相应的六面体并更新前沿，直到整个域被剖分。然而在实践中，该方法通常会留下一些孔洞，这些未被剖分的区域只能用四面体填充。

编须算法是一种基于空间缠绕连续集（Spatial Twist Continuum, STC）^[162]概念的扩展的 AFT 方法。所谓空间缠绕连续集就是在三个方向平分六面体单元的相互交叉表面的组合，是六面体网格的一种对偶表达形式。编须算法首先生成的并不是六面体网格，而是它的对偶形式——空间缠绕连续集。一旦得到完整的空间缠绕连续集，六面体单元就可在其指导下放置到待剖分域中。粘贴算法基于局部几何测试来推进网格，对于复杂的几何实体很难闭合，难以保证网格内部连通性。与粘贴算法相反，编须算法基于与全局对偶密切相关的连通性信息进行网格推进，边界处的几何判据处于次要地位。编须算法生成的六面体网格质量（尤其是边界单元的质量）是所有算法中最好的，但它的实现也具有最高难度。虽然取得了一定的成功，但该方法对求解各类问题的鲁棒性与可靠性还有待进一步证实。

3.4.4 多子区域方法

多子区域方法 (multi-subdomain methods) 是基于“分而治之 (divide and conquer)”思想的一大类方法。具体地，多子区域方法分为三个主要步骤：首先将复杂目标域分解为可用已有算法进行剖分的简单子区域，然后对每个子区域进行剖分，最后将各个子区域的网格剖分结果组装起来从而形成目标域的整体网格。由此，一个大问题就被分解为三个较小的问题：①复杂目标域的自动分解；②简单子区域的网格剖分；③满足网格相容性要求的子区域网格组装。原型法、映射法和扫描法都可以作为子区域的网格剖分方法。子区域网格组装与子区域的网格剖分有密切关系，在某些情况下子区域网格在组装时能够自动满足相容性要求，而复杂三维实体的自动分解则是多子区域方法中最主要的难点。

自动分解技术的研究相当活跃^[163-168]，其中有代表性的工作是中面法和基于特征识别技术的三维实体自动分解方法。中面法^[169-171]是将三维待剖分域分解成简单可剖分子区域。中面定义为三维实体内最大球的球心的集合，所谓最大球是指不能为实体内其他球所含的球。待剖分域被中面分割后所得到的子区域一般具有可映射特性，这对六面体网格剖分是非常有利的。但是，现有中面算法一般需要大量几何与代数计算，自动化程度和几何适应能力也有待提高。Lu 等^[172]提出一种基于特征识别技术的三维实体自动分解方法。由于引入了一些启发性规则，该方法可以一定程度地模仿人在处理复杂几何体网格生成问题时的思考过程，加之其可以和 CAD 系统紧密集成，因此是一种较有前途的自动分解算法。2015 年浙江大学高曙光教授课题组提出一种自动的模型分块方法^[173]，首先对模型进行四面体剖分，然后使用原型法将四面体网格分割为六面体网格，核心是通过对网格插入薄板进行模型的分块。算法通过对薄板集合进行膨胀和提取操作，使得插入的薄板尽可能满足模型的全局几何特性，获得尽可能有意义的模型分块。

3.4.5 基于曲面叶状结构的六面体网格生成

在上述已有的各类算法中，仍然存在着很多不足，主要表现为以下方面：

1) **结构化和非结构化：**在过去数十年间，网格生成、计算机图形学和计算几何等领域对于六面体网格生成问题进行了大量的探索，积累了大量经验，并建立了一定的理论基础。但是所有方法生成的六面体网格都不保证是有结构化的。然而，等几何分析中需要六面体网格具有局部直积结构，因此传统的方法无法满足等几何分析的实际需求。结构化的神圣网格需要更进一步的探索。

2) **经验与理论：**目前虽然有很多关于六面体网格生成算法方面的研究，但是绝大多数的算法是经验性的算法，缺乏严格的理论基础。例如基于能量优化的方法，未能证明相应能量极值的存在性、唯一性，优化过程是否达到全局极值点也没有理论保证。长期以来，为神圣网格问题的解决建立严密的理论基础是该领域的根本问题之一。

3) **自动与人工：**六面体网格生成在工程实践中具有重要作用，但是目前不存在自动结构化的六面体网格生成算法，因此工业界只能采用半手工的方法。例如，在航空制造

业的波音公司，大约 70% 以上的时间和成本花费在手工网格生成上。这种手工作坊式的生产方式，枯燥低效且质量难以控制，造成大量时间和金钱的浪费，严重滞后于现代化的工业生产模式，成为机械制造业发展的瓶颈。因此，六面体网格的自动生成，一直是人们追求的目标。

4) **奇异点线不可控：**传统的六面体网格生成算法缺乏有效的手段控制奇异点和奇异线的数目和位置。等几何分析需要尽量减少奇异点的个数和奇异线的条数，并且希望能够控制奇异线的位置。已有方法要么奇异点、线的数目繁多，要么对奇异线的条数和位置无法预判，也无法直接控制，只能求得初解后再局部调节补偿。因此，如何减少奇异点、奇异线的条数来控制它们的位置，一直是六面体网格生成技术所面临的挑战之一。

为了生成适用于等几何分析的高质量六面体网格，必须能够回答以下基本理论问题：给定空间中封闭的高亏格曲面，对于其包围的内部实体，

- 1) 结构化的六面体网格（神圣网格）是否存在？
- 2) 如果存在，最少奇异点的个数是多少？
- 3) 如果存在，最少奇异曲线的条数是多少？
- 4) 这种神圣网格是唯一的吗？所有的神圣网格的集合如何描述？
- 5) 如何构造这种神圣网格？是否存在自动算法？

2017 年大连理工大学罗钟铉教授、雷娜教授与纽约大学石溪分校顾险峰教授合作，利用曲面的叶状结构 (foliation) 理论和黎曼面的全纯微分 (holomorphic differential) 理论对这些问题给出了确定的回答，从而将结构化神圣网格的理论向前推进了一步^[174]。这一理论的核心在于证明了三个基本几何拓扑概念本质上是一致的：可染色四边形网格、曲面叶状结构 (foliation) 和全纯二次微分 (holomorphic quadratic differential)，即所谓的三位一体。对于上面所提到的基本问题，他们给出的解答是：

- 1) 结构化的六面体网格存在，并且无穷多。
- 2) 如果边界曲面的亏格为 $g > 1$ ，当限定奇异点的度为 6 时，奇异点有 $4g - 4$ 个。
- 3) 最少内部奇异曲线的条数是 $2g - 2$ 条（边界上有 4 条）。
- 4) 该神圣网格不唯一，其中边界曲面上诱导的四边形网格构成一个线性空间，其维数是 $6g - 6$ 维。
- 5) 存在构造方法，其算法流程可以完全自动化。

图 40 显示了所谓的可染色四边形网格 (colorable quad-mesh)。假设给定曲面上的四边形网格，如果我们能够将所有的边红 - 蓝染色，使得每个四边形中，两组对边分别被染成红色和蓝色，则此四边形网格被称为是可染色的。

假设输入曲面是封闭曲面，如图 40 中的兔子曲面，给定一个可染色四边形网格，如兔子身上的红 - 蓝网格，可染色四边形网格的所有红边组成有限条圈，每条圈没有自相交点。同样，所有蓝边也组成

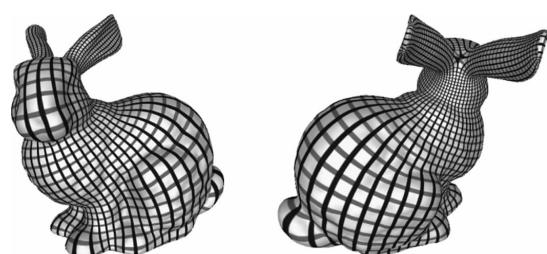


图 40 可染色四边形网格

有限条圈，每条圈也没有自相交点。

我们将兔子曲面进行细分 (subdivision)，每个四边形被劈成四个子四边形，则红圈和蓝圈的条数加倍。我们不停地细分下去，则兔子曲面被红圈覆盖，同时也被蓝圈覆盖。换言之，兔子曲面被分解成红圈的并集，也被分解为蓝圈的并集。局部上看，红（蓝）圈层层堆叠，彼此没有交叉或者折叠，由此，我们得到了两个叶状结构 (foliation)。

所谓叶状结构 (foliation)，就是将 n 维流形分解成 $(n - 1)$ 维子流形，其分解方式局部上具有直积结构，如图 41 所示，我们将曲面分解成一族曲线，每条曲线被称之为叶子。每片叶子可以是封闭曲线，或者无限延长的螺旋线。曲面上三条叶子交汇的点被称为是奇异点，一般情况下亏格为 $g > 1$ 的曲面上有 $4g - 4$ 个奇异点。在任意一个常点处（非奇异点），存在一个领域，叶状结构具有直积结构。



图 41 叶状结构 (foliation)

叶状结构的叶子实际上是曲面上的光滑流线，其速度切向量场为流场。最为光滑的流场被称为是所谓的调和场，其旋量处处为零，同时散度也处处为零。由此，曲面的叶状结构和曲面上的全纯微分联系起来。图 42 显示了亏格为二的曲面上的全纯二次微分，及其水平和铅直轨道。给定一个二维流形（曲面），我们建立一个坐标卡来覆盖。如果都采用复坐标，并且坐标变换都是可逆全纯函数，则曲面被称为是黎曼面。给定一个全纯二次微分 (holomorphic quadratic differential)，则它在每个局部坐标系下都是某个全纯函数导数的平方。

曲面上所有的全纯二次微分构成一个线性空间，如图 43 所示，前两个全纯二次微分之和等于第三个全纯二次微分。根据黎曼 - 罗赫定理，所有全纯二次微分构成的空间的维数等于 $6g - 6$ 。经典的 Hubbard-Masure 理论证明了可测叶状结构和全纯二次微分之间的等价关系，任给一个可测叶状结构，则存在一个全纯二次微分，微分的水平轨道诱导的叶状结构和给定叶状结构在一定意义上彼此等价。由此可知可染色四边形网格、可测叶状结构和全纯微分是相互等价的，即三位一体。基于三位一体的理论，可以设计六面体网格的自动生成算法^[175]。如下亏格为二的例子所示，首先计算全纯二次微分群的基底；然后，通过线性组合求得一个全纯微分；全纯微分的水平轨道给出了曲面的一个叶状结

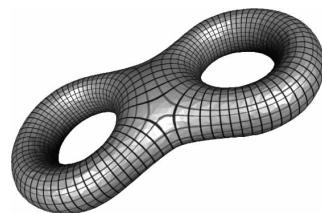


图 42 亏格为二的曲面上的全纯微分，
及其诱导的叶状结构

构, 如图 44a 所示。过奇异点的轨道被称为是奇异轨道, 每条奇异轨道连接着两个奇异点, 如图 44b 所示。曲面的叶状结构诱导了曲面上的四边形网格 (图 45a), 奇异轨道将曲面分解成圆筒曲面 (图 45b)。每个圆筒曲面包含着一个圆柱体, 表面的四边形网格向体内拓展成圆柱体的六面体网格, 如图 45c 所示。三个圆柱体交于一条奇异线。最后生成的六面体网格如图 45d 所示, 只有 4 个奇异点, 两条内部奇异曲线, 整体具有很好的结构性, 能够满足等几何分析中对六面体网格的质量需求。



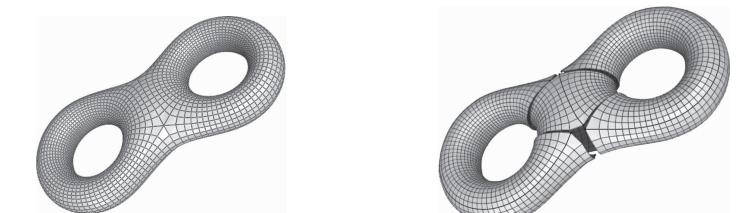
图 43 所有的全纯二次微分构成线性空间。前两个叶状结构之和等于第三个叶状结构



a) 曲面上全纯二次微分的水平轨道诱导的叶状结构

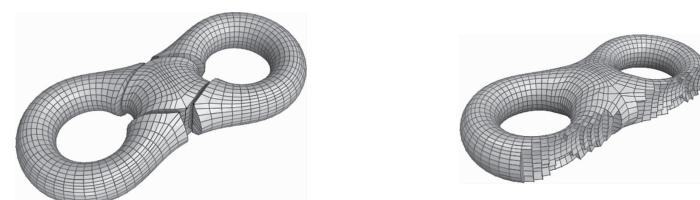
b) 叶状结构的奇异轨道

图 44



a) 叶状结构诱导的四边形网格

b) 奇异轨道将曲面分解成圆筒曲面



c) 曲面上的四边形网格向体内拓展成六面体网格

d) 六面体网格

图 45

3.5 高效灵活的等几何分析数值方法

3.5.1 等几何配点法

等几何分析中，等几何配点法相比于 Galerkin 方法能够有效减少计算开销，因而引起关注。在配点法中，所求解得到的数值解在计算区域内的某个点集里满足偏微分方程本身，而非 Galerkin 方法中方程的弱形式（通常一个点对应一个自由度）。这会使得产生的线性方程组条件非对称，并且使得边界的赋值比较困难。但配点法能够避免 Galerkin 方法中涉及的区域内部的数值积分。等几何分析使用的基函数为 B 样条基，这些基函数在单元内部具有高阶连续性，因此非常适用于配点法。

文献 [176] 首次对等几何分析中的配点法进行了理论研究和数值计算分析，随后 Schillinger 博士对 Galerkin 方法和配点法进行了更为缜密的比较^[177]，基于四次及更高次基函数的配点法与 Galerkin 方法相比，在自由度和计算代价方面都表现出更大的优势。对于偶数次的多项式基函数，在 Greville 纵标和 Demko 纵标上配置点时，配点法能够达到 H^1 范数下的最优收敛阶，即 $O(h^p)$ 。然而研究者们注意到，对于奇数次多项式，在 Greville 纵标和 Demko 纵标上配置点只能达到 $O(h^{p-1})$ 的收敛阶。这个发现在随后的研究中也进一步得到了证实^[178]，并且在动力学领域的应用中这个问题也被注意到^[179]，如配点法应用于 Timoshenko 梁^[180] 和空间杆^[181]，Reissner-Mindlin 薄板^[182] 以及 Bernoulli-Euler 梁和 Kirchhoff 薄板^[183] 等问题。Lorenzis 等提出了带 Neumann 边值问题的等几何配点法解决方案^[184]。浙江大学蔺宏伟教授等研究了等几何配点法在一类特殊方程上的相容性和收敛性，并推导了由等几何配点法计算得到的近似解的收敛阶^[185]。

一个很自然的需要考虑的问题就是：是否存在“最优”的配点位置，使得在能量范数下配点法能够达到和 Galerkin 方法一样的收敛阶。对于拟均匀网格，德国魏玛大学 Anitescu 等人^[186] 提出了一种新型配点方法，针对任意次多项式为基函数的配点法均能达到最优收敛阶，研究者们随后对此方法又进行了更深入的研究^[187-188]。由于这个方法是将点配置在等几何分析 Galerkin 公式中的超收敛点的位置，所以也称为“变分配置点”或者“超配置点”。文中提出，存在采样点，使得基于这些采样点的配点法可以得到 Galerkin 方法所求出的解。从而，变分配点法相当于只需要和控制点数目一样的积分点就可以严格得到 Galerkin 解。不过，在实际的计算中，如何得到这样的采样点，到目前为止还没有一个通用的方法。作为实例，图 46 对 Greville 纵标点与最优配置点的位置进行了比较；针对一个典型的标准化实例，图 47 对 IGA-Greville 配点法、IGA 超收敛配点法和 IGA 伽略金方法所得到的数值解误差进行了比较，IGA 超收敛配点法的误差比 IGA-Greville 配点法的误差显著减小，并且具有与 IGA 伽略金方法同样的 H^1 范数下的收敛阶（见图 48）。

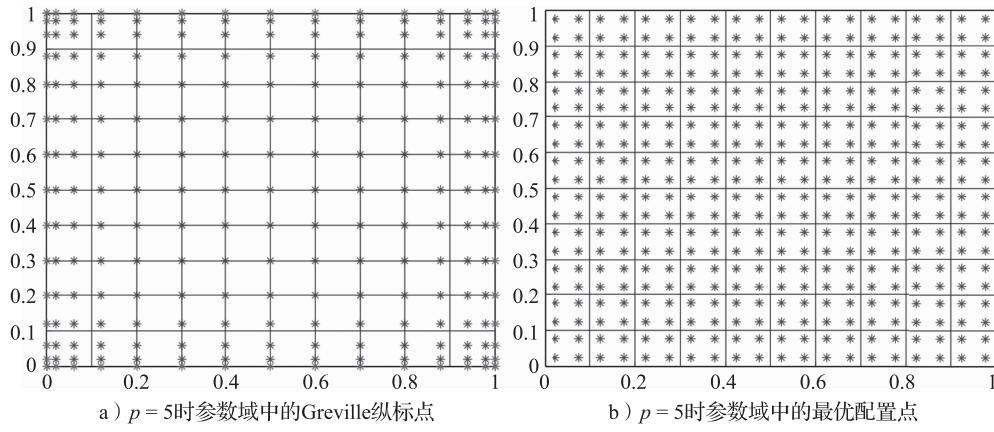
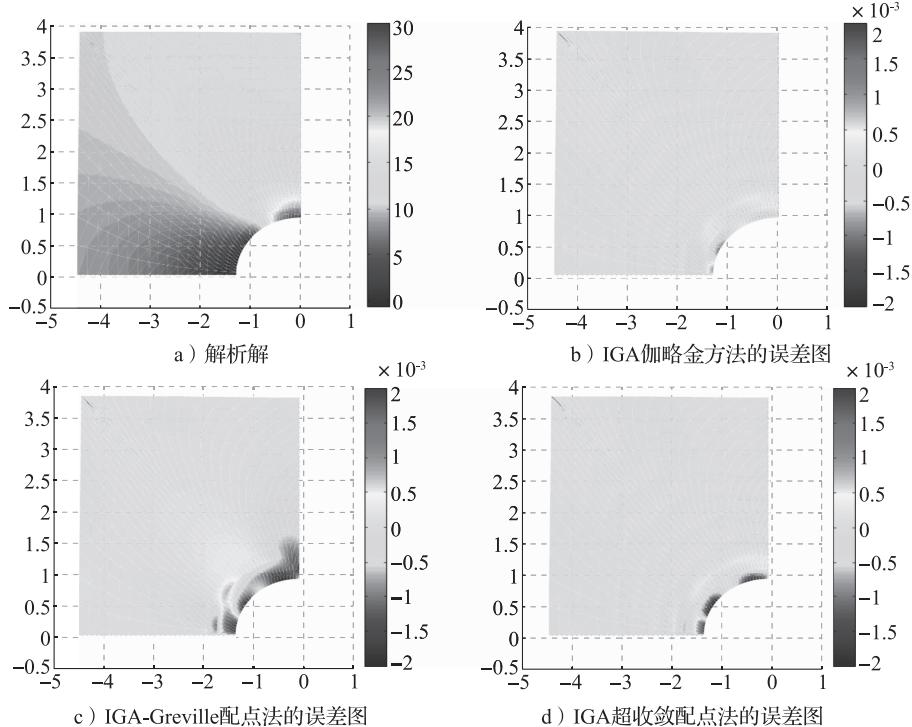


图 46

图 47 二维带圆孔弹性板问题的等几何配点法求解, $p=5$

3.5.2 面向等几何分析的高效数值积分方法

为了更加高效地利用等几何分析方法求解复杂工程的数值仿真问题, 高效的数值积分方法是其中的关键技术。2006 年, Hughes 教授给出了等几何分析下高斯积分点选取的一个通用规则: 高斯积分点的数目是所属空间的自由度的数目除以二^[189]。这个数目是完全高斯积分的四分之一 (二维问题) 和八分之一 (三维问题), 从而可以大幅减少计算量。然而, 高斯积分点的位置和权因子的计算是一个非线性问题, 一般不容易计算,

在文章中, Hughes 教授提出了利用牛顿迭代法来求解这些高斯积分点和权因子。针对计算的收敛问题, 文献 [190] 给出了一个更加简单的方法来改善这个算法。文献 [191] 和 [192] 则是对低次特殊样条给出了最优的高斯积分点和权因子。进一步, 文献 [193] 给出了基于矩阵每一行单独计算高斯积分点和权因子的方法, 在次数比较高的时候可以大幅度提高计算效率。奥地利林茨大学课题组则提出了基于多项式逼近、积分预计算及查找表的思想的方法来构造刚度矩阵^[194]。最近, 格罗宁根 Kosinka 教授课题组提出了一种面向细分曲面的快速高精度数值积分方法, 大大提高了计算效率^[195]。

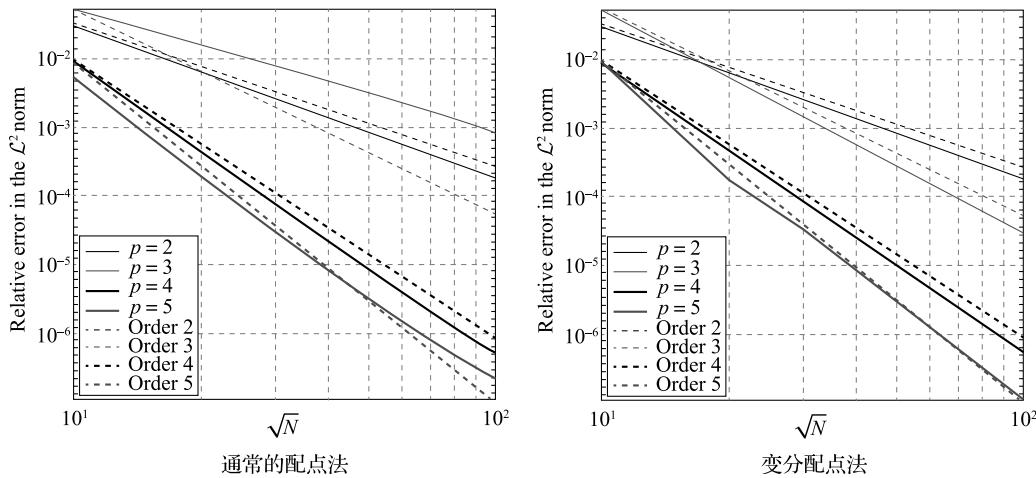


图 48 变分配点法可以得到更好的收敛阶^[186]

在实际工程中, 存在很多具有拓扑一致的 CAD 产品 (见图 1), 对于这样的同一类模型, 有限元模型重用已成为提高网格生成效率的有效方法。与模型重用不同, 在等几何分析求解过程中, 如果能实现分析重用, 特别是数值计算以及矩阵结构的重用, 将大大提高等几何分析的求解效率。杭州电子科技大学徐岗与王昌凌教授课题组合作, 提出了一种无须高斯积分计算的新型等几何分析方法^[139]。特别地, 对于具有一致拓扑的 CAD 模型, 提出了基于径向基函数的拓扑一致体参数化方法, 并进一步提出了基于预计算的等几何分析重用方法, 可显著提高体参数化与分析求解的效率, 使得等几何分析方法具有与传统有限元分析相似的计算效率, 从而进一步将等几何分析方法推向实际工程问题。

3.5.3 面向等几何分析的并行计算

等几何分析的求解过程主要分为两步: 装配和求解线性方程组。和 FEA 相比, IGA 使用了高光滑阶的基函数, 导致其刚度矩阵要稠密得多。对于大规模问题, 特别是三维模拟问题, 这极大地增加了装配和求解的计算开销。现已有不少工作针对面向等几何分析的并行计算问题展开研究。

装配线性方程组的计算成本主要在刚度矩阵的装配上。郭利财等^[196]提出了一种基于计算域分解的并行装配算法。主要思想是, 把计算域均匀划分给各个处理器, 并行地计算局部刚度矩阵, 然后使用一个多路归并算法来得到全局刚度矩阵。该算法在 8 核机

器上的加速比为 6.17。但算法使用了串行的全局合并算法，可扩展性有限。随后，他们又提出了一种基于矩阵分解的并行算法^[197]，每个处理器独立地构建全局刚度矩阵的一些行，从而避免了串行的全局合并过程。该方法在 32 核机器上的加速比达到 28.6。Karatarakis 等人^[198]在 GPU 上实现了类似于^[78]的并行装配方法，加速比可以达到 86。求解线性方程组的方法可分为两类：直接法和迭代法。最常用的直接方法是基于 LU 分解的多波（multi-frontal）求解法。Collier 等人^[199]研究了自由度 N 、基函数次数 p 和光滑阶 k 对串行多波直接求解器性能的影响。对于 C^{p-1} 连续的 B 样条解空间，一维问题的计算复杂度为 $O(Np^2)$ ，二维问题为 $O(N^{1.5}p^3)$ ，三维问题为 $O(N^2P^3)$ 。在相同自由度 N 和次数 p 的前提下，对于一维问题的求解， C^{p-1} 离散化速度是 C^0 离散化的 $1/p^2$ ；对于二、三维问题，则是 $1/p^3$ 。很显然，IGA 串行求解器不适用于大规模三维问题。Wozniak 等人探讨在共享内存并行机（GPU）^[200]和分布式内存并行机^[201]上实现并行多波直接求解器，发现对于 C^{p-1} 连续的解空间，计算复杂度分别降为 $O(\log(N/p)p^2)$ 、 $O(Np^2)$ 和 $O(N^{4/3}p^2)$ 。

相比直接法，迭代法在时间和内存开销上通常会少些。迭代求解器的性能取决于刚度矩阵的条件数。预条件算子可以有效地降低矩阵的谱条件数，从而加速迭代的收敛。FEA 中的预条件算子被陆续引入到 IGA 中。针对椭圆问题，Beirao da Veiga 等人^[202]提出一种基于 OAS(Overlapping Additive Schwarz) 预条件算子的重叠计算域分解方法，证明等几何 OAS 算子关于子区域数是可扩展的（即条件数的界与子区域数无关），且条件数界线性依赖于子区域与重叠尺寸的比值。他们又构造了一种基于 BDDC(Balancing Domain Decomposition by Constraint) 预条件算子的非重叠计算域分解方法^[203]，类似地证明了等几何 BDDC 算子的可扩展性和关于子区域与单元尺寸比值的次最优性。最近，Buffa 等人^[204]构建了一种最优的等几何 BPX 预条件算子，预条件后的刚度矩阵的谱条件数与单元尺寸无关。虽然这些预条件算子都具有很好的收敛性质，但由于算子构造和应用的计算代价太大，并不实用^[205]。

另一种常用的加速迭代求解的技术是多重网格法。郭利财^[206]直接使用粗网格上的精确解来作为细网格上的初始解，从而加速迭代的收敛。Gahalaut 等人^[207]分析了网间迁移算子的逼近性质和松弛算子的光顺性质，以此为基础证明了 IGA 多重网格方法的 h 无关的最优收敛速度。在固定基函数次数、网格重数和光滑阶的情形下，迭代次数为与单元尺寸无关的常量。但是当基函数的次数增加时，多重网格的收率速度急剧降低。于是，Gahalaut 等人^[208]提出了等几何 AMLI(algebraic multilevel iteration) 方法。实验表明，对于给定的基函数次数 p ，AMLI 方法的收率速度是 h 无关的；而当给定单元尺寸 h 时，收率速度几乎是 p 无关的。

3.5.4 计算域与物理场样条空间相异的新型等几何分析方法

从等几何分析方法的思想精髓来看（见图 49a），其主要包括两个基本特点：①所采用的计算域与所给定的 CAD 产品的几何数据表示具有一致性；②所求解的物理场采用与计算域一致的数学语言表示，即属于同一样条空间。第一点决定了等几何分析方法可实现设计与分析阶段几何数据的无缝融合，而第二点则在一定程度上限制了等几何分析方

法的灵活性，主要表现在：

1) 物理场的连续性严重依赖于计算域参数化的连续性：对于某些物理问题，所给定的计算域的样条空间可能无法达到所求解的物理场的高阶连续性要求；同样地，对于某些物理问题，可能只需在低阶样条空间中求解便可满足连续性要求，但所给定的计算域由高阶样条表示，这也在一定程度上增加了计算成本；对于多面片（multi-patch）问题，则需要在面片边界处施加额外连续性约束条件。

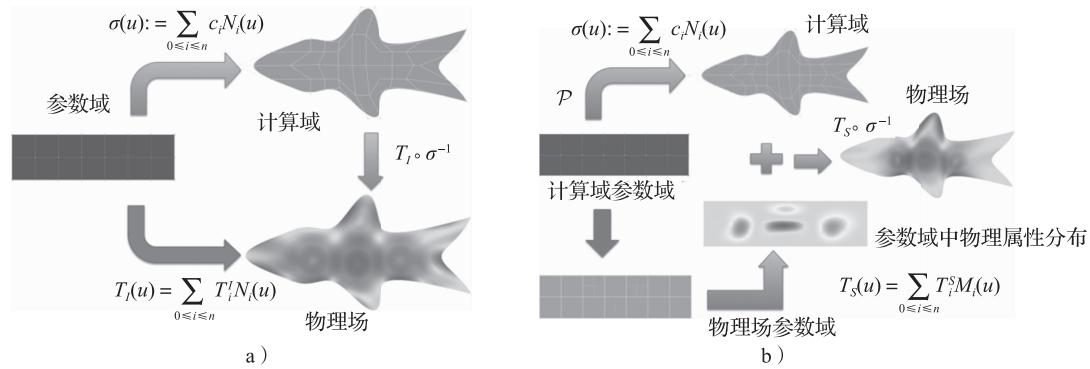


图 49 计算域与物理场样条空间相异的新型等几何分析方法

2) 局部加细不具有普适性：具有良好的局部加细性质的样条模型最近成为等几何分析领域的研究热点。为了利用这些局部细化样条进行等几何分析，需要将给定的 CAD 模型由 NURBS 这一标准形式转化为这些特殊样条的表示形式^[54]，但对于大部分的 CAD 模型而言，由 NURBS 表示到这些特殊样条模型的精确无损转换不可能实现或比较烦琐。

3) 产品几何外形的参数化形式在细化过程中发生改变：等几何分析方法中的细化方法需要对计算域和物理场同时进行节点插入等细化操作以增加自由度数目，但这一过程中产品几何外形的参数化也发生了相应改变，不仅计算成本高，而且为下一阶段的外形优化过程增加了难度。因此，如何在保持 CAD/CAE 几何数据一致性的前提下，提出一种新型分析方法，打破等几何分析方法的现有局限，提升其灵活性、局部细化性和求解效率，并方便后续的外形优化工作，便成为当务之急。

为克服上述局限性，杭州电子科技大学徐岗课题组与卢森堡大学、卡迪夫大学的课题组合作^[209]，提出了一种计算域与物理场样条空间相异的新型等几何分析方法，即在保持设计与分析阶段几何数据一致性的前提下，物理场与计算域采用不同的样条模型进行表达。如图 49b 所示，在广义等几何分析中，计算域与物理场具有相同的参数域范围，但其参数域的划分方式不同，例如 NURBS 计算域的参数域采用张量积节点网格划分，而 PHT 样条物理场的参数域则采用 T 网格划分，Powell-Sabin 样条物理场的参数域则采用三角网格划分。在预处理阶段，需要根据计算域的参数域和所选择的物理场的样条空间构造计算域和物理场的公共参数域。特别是对于计算域中子面片的参数域相分离的情况，根据子面片的拓扑连接关系来构造计算域和物理场的公共参数域，因而各个子面片的参数域会发生变化，但并不需要计算子面片重新参数化后的表示形式，只需将参数变换形式记录下来，后面求解阶段所用到的计算域参数化的偏导信息可通过参数变换的雅可比

矩阵计算得到。需要说明的是，在广义等几何分析中，只对物理场样条空间进行加细操作，而此过程中计算域的参数化保持不变，因而在求解过程中用到的与计算域有关的一些信息可以预先计算存储下来，从而提高整体计算效率。

3.6 面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论与方法

3.6.1 CAD 模型几何简化方法

将复杂 CAD 模型通过细节移除进行几何简化，以降低几何复杂度，是一个由来已久的问题，相应的各种几何操作算法也层出不穷。Thakur 等^[210]根据简化方法类型的不同，将模型简化方法分为基于体的简化、基于面的简化、基于显式特征的简化和基于降维的简化 4 类，并对各种相关几何操作技术给出了非常详细的描述与比较，在此不再重复。本文主要介绍面向 CAD/CAE 集成的 CAD 模型简化方法。如前所述，面向 CAD/CAE 集成的模型简化一直引起人们的关注，在几何计算领域，相关的研究工作主要集中在设计合理的几何操作，生成简化模型。整体来说，从输入 CAD 模型生成最终体网格模型，主要通过 3 种途径完成：基于特征的简化、基于几何面的简化和基于网格模型的简化，如图 50 所示。



图 50 从 CAD 模型生成简化体网格模型的不同技术策略

1) 基于特征的简化。对 CAD 模型进行简化最直接的方法是进行特征体识别及抑制^[211-221]。其主要通过对边界表示的 CAD 模型，利用其边面的几何结构信息，识别加工过程所需要的孔、槽等加工特征。特征识别的研究比较成熟，有基于图的方法^[211]、基于规则的方法^[213, 222]、基于体元的方法^[216]、凸包分解方法^[223]以及过渡特征识别^[224-227]等。然而，对于特征相交情形^[213]或者自由曲面特征情形^[219]，目前仍缺乏有效的特征识别方法。

采用特征识别进行模型简化一般是在特征识别的基础上构建封闭特征体，进而移除特征细节，生成保持原模型宏观结构的简化模型。各种特征体识别与抑制技术^[216-219, 223]可以在这里直接使用。此外，也存在部分多层次特征识别技术，可以用来指导建立在不同几何层次上的简化模型，如 Li 等^[215]基于对称恢复的方法，Liu 等^[229]基于语义特征模

型的方法。然而，由于目的性不同，并不特别适合直接采用特征抑制方法进行面向仿真的模型简化。本质上，传统特征识别技术是以识别加工特征为目的，如孔、槽等；而面向仿真的模型简化是以移除“细节”为目的，如细长边、狭小面、孔等。这些“细节”特征并不完全在传统特征定义集中，难以进行有效识别，或至少需要先采用合理的方法对这类特征进行定义。再如，特征相交与否在面向仿真的模型简化里并不起决定性作用，可整体当作细节识别。如果在简化前进行特征识别，事实上添加了许多不必要的复杂几何判断与操作，且有效性难以保证。

2) 基于几何面的简化。这类简化方法是把模型面直接看成小面片进行面合并^[230-234]，主要基于扩展三角面片模型简化方法实现。这里，细小模型面通过聚类方法形成若干区域，每个区域形成一张模型面。此方法避免了直接特征识别，可直接处理狭长边及细节特征，且并未直接构建特征体，更加稳定，效率也远高于基于特征识别的方法。为了有效记录模型的几何结构，Sheffer 等引入了虚拟拓扑（virtual topology）的概念^[233]，将拓扑结构与几何实体分离开来，使得一个拓扑结构可对应一组几何实体，如一个面可对应一个曲面集合等。在此基础上，可方便进行面、边的合并与收缩等操作，指导模型修改。各种不同简化方法的主要区别在面、边聚类方式和顺序等，以提高面合并的质量、改进简化结果^[230-234]。其中，Foucault 等^[229]研究如何通过模型结构的拓扑修改，如点、边删除，重新定义模型的拓扑结构，降低后续网格生成的复杂度。这里主要通过“网格约束拓扑”的数据结构来实现，作者本质上并未对模型进行特征抑制过程，而仅改变网格的粗密程度（见图 51）。Inoue 等^[231]在模型几何面合并的基础上，进一步考虑了网格生成的关系。其对每个面合并后的区域通过简单区域的投影生成面网格，然后合并生成原模型网格。图 52^[230]给出其中一结果。此外，Sun 等^[228]提出了一种实用的大范围模型简化方法，通过对模型表面蒙上简单平面，直接一次性去掉诸多模型细节，并保持模型的主要几何结构。

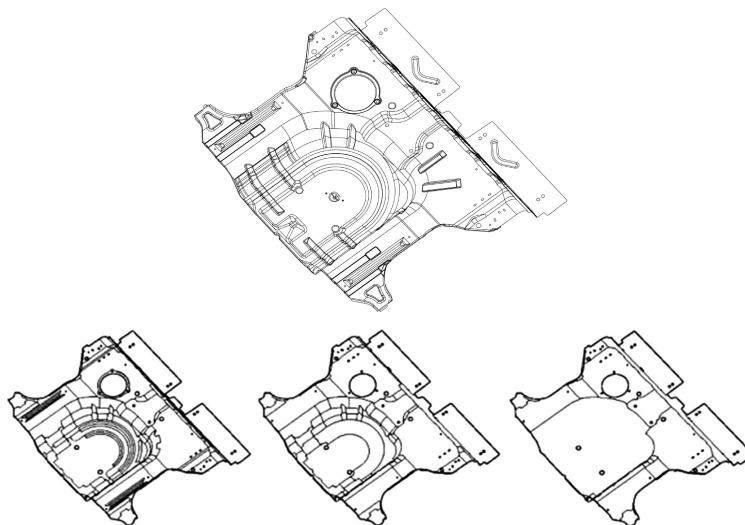


图 51 原模型及其不同简化模型

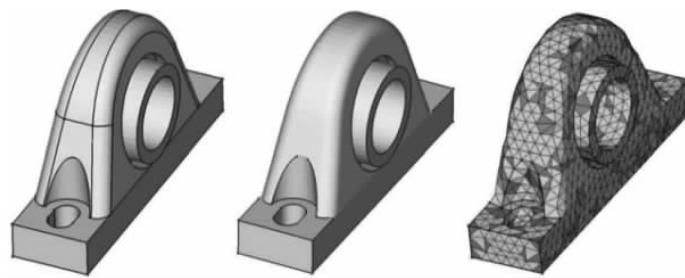


图 52 原模型、其拓扑简化模型及面网格模型

3) 基于网格模型的简化。这类方法首先把 CAD 模型转换成三角片网格模型, 然后通过较成熟的三角网格模型简化方法^[46], 实现 CAD 模型的简化。在三角化过程中, 由于几何面的几何尺寸及结构信息已经丢失, 决定选择哪些三角面片进行简化是需要解决的核心问题, 并需要注意在简化的过程中有效地保留模型的几何结构信息。

采用网格模型直接处理 CAD 模型简化的工作还有文献 [236], 其采用顶点移除以及球形误差区域的概念来实现模型简化。Gao 等^[237]则从另一方面对 CAD 网格模型引进了特征的概念, 从而通过在网格模型上进行特征识别然后再抑制的方法, 实现了 CAD 网格模型的简化。

3.6.2 特征抑制误差后验估计

3.6.1 节描述了有效生成简化模型的各种几何技术。然而, 如何在此基础上有效地选择抑制特征, 生成满足一定精度控制的简化模型, 仍是一公认的难题, 其中涉及了细节重要性评估、待移除细节特征选择等问题。

此问题学科交叉性强, 相关研究工作少。一般而言, 传统工程仿真领域主要研究 2 类误差: 数值逼近误差和物理建模误差^[238]。前者主要由数学模型的离散化产生, 后者由使用不同的数学模型表示物理现象产生^[238]。这 2 种类型的误差估计通常都假设几何模型在误差估计前后保持不变 (在一定的公差之内)。然而, 特征抑制误差估计问题涉及几何模型的修改, 难以直接采用已有的方法处理。

由于问题的重要性及挑战性, 事实上, 早在 1994 年, Keller 已经开始研究从计算域上移除细节特征对仿真影响的问题^[239]。之后, 该问题研究一直进展不大, 直到 2007 年, 重新得到了研究者的关注, 出现了一系列研究工作。

具体来说, 误差衡量方式同传统网格离散误差后验估计相似, 其由模型简化前后的某特定物理量变化情况决定。此物理量可由传统的整体能量定义, 也可采用更具实际工程意义的局部物理量衡量^[237], 如局部应力等。误差估计主要采用后验误差估计的方法: 假设简化模型上的仿真解已经给出, 复杂原模型解未知, 定量估计一个或者多个特征抑制前后某特定物理量的变化, 称为后验特征抑制误差估计。

后验特征抑制误差估计的相关理论及算法研究目前刚刚起步。整体而言, 已有的研究工作主要涉及所解决问题的不同层面和范围: 如不同的物理问题、线性问题或者非线

性问题、结构分析或者热学分析；受外载特征（及其特例自由特征）或者 Dirichlet 约束特征；模型边界特征或者内部特征；正特征或者负特征；单一特征或者多个特征（即忽略或考虑它们间相互影响）等。对前人的具体研究工作按此标准进行具体分类如表 3 所示。其中，Nm 表示 Neumann 边界条件；Dt 表示 Dirichlet 边界条件；Ng 表示负特征；In 表示内部特征；Bd 表示边特征；S 表示单特征；M 表示多特征。

表 3 特征抑制误差估计相关工作所解决问题范围

文献	物理现象	边值	特征类型	特征数
[240]	Poisson	Nm/Dt	In + Ng	S
[241]	Poisson	Nm	Ng	S
[242]	Elasticity	Nm	Ng	S
[243]	Bending	Nm	Ng	S
[262]	Poisson	Nm	Ng	S
[244]	Elasticity	Nm	All	S
[245]	Elasticity/(Nonlinear) Poisson	Nm	Ng	S
[246]	NonlinearPoisson	Nm/Dt	In + Ng	S
[247]	Poisson	Nm	Bd	M

可见已有工作主要集中在受 Neumann 边值约束的单一负特征。本文把研究问题分为假定特征独立和考虑特征相互影响两种情形。前者忽略特征之间的影响，多特征误差可简单地看成单特征误差之和，目前的方法主要集中在^[262, 215, 240-246, 248-251]，它们可主要分为基于外边值逼近的方法和基于区域统一的方法，具体待后续描述。

为了得到更精确的特征抑制的误差估计，需要进一步考虑各特征之间的相互作用对误差估计的影响，目前的唯一工作由基于扩展二次形状灵敏度分析的方法完成^[247]。这些工作主要面向目标导向的误差描述。此外，还有部分考虑整体能量变化的启发式方法^[229, 248, 252-253]，将在后面章节进行介绍。

3.6.2.1 基于外边值问题逼近的方法

Suresh 及其合作者首先研究了移除单一特征对工程仿真精度的影响问题^[240-243]，其使用“特征灵敏度”（feature sensitivity）的概念来定义特征抑制误差。基本思想如下：对模型内部孔，把孔的移除描述成特征在某形变参数 η 下的一个从 0 到 1 形变的过程。相应地，抑制前后目标函数的差异可以看成目标函数关于形变参数导数在 0 ~ 1 区间上的积分。此导数由体积分形式表达，可通过 Green 公式进一步转换到模型边界上或特征边界上，注意模型外边界保持不变。最终，原模型解在该局部边界上的值可由合理定义的外边值问题逼近给出。此方法本质上可以看成通过简化模型问题及外边值问题，对原模型问题给出了逼近，如图 53 所示。

基于这种思想，Suresh 等依次研究了热传导 Poisson 方程问题^[241]、线性力学问题^[242]、薄板振动问题等^[243]，主要考虑了受 Neumann 边值条件约束的内部孔问题。对此内孔问题，外边值问题相当于把计算域扩展到无穷大区域的边值计算问题，因此很容易

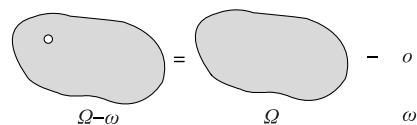


图 53 基于外边值问题逼近的特征抑制误差估计

给出定义。为处理边界负特征问题，作者通过进一步把原问题进行对称性变化，使得外边值问题可合理定义。此外，还对相关数值算法进行了讨论，提高了计算效率。在此研究工作前，相同研究团队也对 Poisson 方程所描述的热传导问题建立了粗略上下界，主要采用伴随理论和单调性分析方法处理^[240]。

这些开创性研究工作对特征抑制误差首次建立了定量的评估标准以及有效数值计算方法。但在适用表 3 所示范围、误差估计效果等方面（见后面数据对比）仍具有不少局限。更重要的，各特征被看成独立无关的，忽略了相互间的作用对工程仿真精度的影响，因此会在某些情形严重影响误差估计的精度。

3.6.2.2 基于区域统一的方法

浙江大学李明博士及其合作者注意到特征抑制误差估计的困难源于模型简化前后计算域的差异，因此基于区域统一思想，把特征抑制误差估计问题转化到相同区域处理，由此可借鉴已有的相关研究成果。该方法可直接用于处理负特征问题^[262, 245]，也可扩展到正特征问题^[244]，以及最近考虑的多特征作用的二阶特征抑制误差估计问题^[246]。此外，他们也研究了具有 Dirichlet 边值条件约束的非线性 Poisson 方程问题^[247]。

该问题最基本的情形是负特征情形，即原模型内部或边界含有一细节孔特征，简化模型为移除此特征所得的模型。如图 54 所示，辅以平凡的边界条件，可把简化模型上的物理问题转化到原模型上，形成统一区域。之后，计算区域不同引起的工程仿真误差可转化为同一区域下不同边值条件所引起的误差。后者是一种特殊的建模误差，可进一步采用经典伴随理论的伴随加权残量（Dual Weighted Residual, DWR）方法进行估计^[238]。最后，根据问题具体特点，误差估计最终转换为特征边界积分计算。

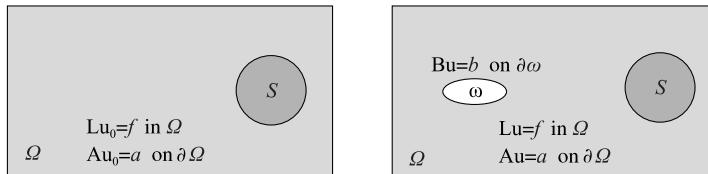


图 54 基于区域统一的特征抑制误差估计（正特征情形）

基于这种思想，Li 等对 Poisson 方程、线性静力学分析以及非线性 Poisson 方程进行了统一的处理^[245]，其主要考虑了 Neumann 条件下的负特征问题。他们还将此方法扩展至静力学分析下的正特征问题^[244]，其中采用了部分经验结论。在这些研究工作中，作者同时把特征抑制误差估计（Defeaturing Error Estimator, DEE）与前述的特征灵敏度分析（Feature Sensitivity Analysis, FSA）、经典的拓扑灵敏度分析（Topology Sensitivity Analysis, TSA），以及直接基于简化模型（采用有限元方法）计算的结果（Direct）做了比较，结果显示了该方法对特征抑制误差估计的高精确度。针对非线性 Poisson 问题，Li 等^[247]另一工作研究了 Dirichlet 边值条件下的特征抑制误差估计问题。该工作直接采用伴随理论进行误差估计，根据问题的几何结构特点，转化误差为特征边界上的积分值。

3.6.2.3 多特征抑制误差

前述工作均假定特征是独立的，多特征抑制误差简单地通过单特征抑制误差之和计

算。然而，如此处理会在某种情形下得到错误的误差估计结果^[247]。

如图 55 所示，矩形域 Ω 包含负特征 ω_1 和正特征 ω_2 ，其上非线性 Poisson 方程为

$$\text{Lu} = \text{div}(\nabla u) + \xi u^3 = f$$

其中， $\xi = 1$ 源项， $f = 1$ 。

模型顶边自由，另外三边满足 $u=0$ 的约束，感兴趣区域由位于特征 ω_1 和 ω_2 之间的小的方形区域解的平均值 $\varphi(u)$ 所定义。假设 u_0, u_1, u_2, u_ω 分别代表定义在以下区域

$$\Omega_0,$$

$$\Omega_1 = \Omega_0 \setminus \omega_1,$$

$$\Omega_2 = \Omega_0 \cup \omega_2,$$

$$\Omega_\omega = \Omega_0 \setminus \omega_1 \cup \omega_2$$

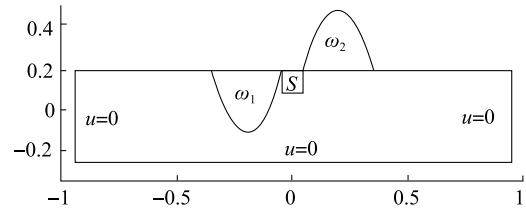


图 55 多特征相互作用对工程仿真精度的影响

问题的物理解。也就是特征全部抑制的模型，抑制 ω_1 或 ω_2 的模型，包含全部特征的模型。计算，将特征 ω_1, ω_2 都移除时，特征抑制误差为 $\varphi(u_\omega) - \varphi(u_0) = 0.11868$ 。如果将特征抑制误差看作 2 个单特征误差之和，有 $e_1 + e_2 = -0.04655$ 。其中

$$e_1 = \varphi(u_1) - \varphi(u_0) = -0.06672,$$

$$e_2 = \varphi(u_2) - \varphi(u_0) = 0.02017$$

可见，独立处理 2 个特征，因没有考虑 ω_1 和 ω_2 之间的影响，与真实误差相差很大。为此，Li 等^[246]提出了二阶特征抑制误差概念及其有效计算方法。基本思想如下：如将单个特征看成目标函数的偏导数，那么 2 个不同特征之间的影响则可通过混合偏导项表示，所对应的特征抑制误差可通过目标函数的某种二阶 Taylor 展开给出逼近。通过将特征抑制过程重新描述成模型边界的形变过程，进而转化目标物理量关于模型形变的变化为相应的二阶形状灵敏度实现。文献 [246] 不仅首次考虑了不同特征之间的相互作用对工程仿真精度的影响，也是首个不使用启发式算法来处理正特征抑制误差的方法。注意，边界特征是三维 CAD 模型的主要特征类型，而内部的三维特征在传统制造中很少会存在。

3.6.2.4 启发式数值逼近方法

近年来，出现了部分启发式的方法用来解决特征抑制误差估计问题，主要含局部计算方法^[248, 249-251]、多态模型方法等^[252-254]。

局部计算的基本思想是：把原复杂模型看成简化模型与围绕特征的局部小区域的组合^[248]。这样，特征抑制误差定义为简化模型与其逼近模型的整体能量差。该方法适用性广，可处理正特征或负特征，内部特征或边界特征。然而，该方法的关键一步是选择特征附近的局部区域，以逼近原模型在特征附近的仿真解。但此区域的有效选择并非易事，事实上类似采用区域分解求解原复杂模型在理论上的挑战很大。Tang 等基于功的互等原理来描述特征抑制前后模型内部能量的改变，给出了特征抑制误差的理论表示。进一步，他们设计了原模型仿真解的快速数值估计方法，最终给出了每个特征的重要性定量评价指标^[249-251]。特别地，还提出了边界补偿的概念，通过简化模型的仿真解快速计算出原模型的仿真解。这类启发式方法使用方便，但存在理论性完整的欠缺，在实际通

用性方面难以保证。

合肥工业大学刘晓平教授等在长期工程计算的基础上，提出了多态模型的概念^[252-254]，用于描述不同几何精度、计算精度下的状态，指导工程模型简化。该方法主要通过简化前后模型的仿真数值解与真实解的差异变化来描述特征抑制误差，最终通过启发式数值逼近技术，得到了影响特征抑制误差的3个关键因素。该方法值得进一步的探索，但目前其表示依赖于未定常数，可以说仅给出了特征对工程仿真重要性的定性分析。

此外，其他研究者也采取了与工程属性相关的前验几何准则^[255]，如体积、面积或重心等。然而这些方法本质上基于几何标准，如何定量评价这些几何特征对所研究的物理仿真问题的影响，并不清晰。

3.6.2.5 其他相关工作：灵敏度分析

特征抑制误差主要研究移除细小特征对工程仿真精度的影响，这与形状灵敏度分析(Shape Sensitivity Analysis, SSA)^[256]及TSA^[257]密切相关。SSA定义为几何模型上的物理目标函数关于特征的形状参数的微分。如Taroco等提出了非线性问题中求解二阶形状灵敏度分析的方法^[256]。这里，当移除边界特征时，原模型拓扑并未发生变化，此情形因此可看成形状灵敏度分析的某种特例。

与SSA不同，TSA主要研究一个几何模型内插入一个半径无穷小的圆孔问题^[257-259]。TSA目前主要使用在设计优化领域，作为梯度方向指导模型性能优化。然而，相关研究结果主要关注无穷小的拓扑改变情况，目前还难以直接扩展到具有一定尺寸的几何拓扑改变问题。最近，Hintermuller对于目标函数为整体势能的情形，推导出了Poisson方程的二阶拓扑灵敏度解析表示^[259]，有望将其扩展应用至解决更大尺寸的拓扑改变问题。

3.6.3 仿真可信模型简化整体流程

即使在已有技术及理论的基础上，生成满足一定工程仿真精度控制的简化模型仍非易事，需要持续的研究投入。下面首先介绍目前已有的相关工作及其面临的挑战。

Ferrandes等在启发式特征抑制误差估计的基础上，同时提出了生成整体简化模型的流程^[248]，在特征抑制误差估计时采用了启发式方法，去除重要的特征，直至生成满足一定仿真精度控制的简化模型。该方法是已有工作中为数极少的具体讨论采用特征抑制误差的进行可信模型简化的方法。Russ等提出了基于规则的模型简化方法^[260]——基于用户经验建立简化准则指导模型简化，并由专家最终确认简化结果。事实上，合理建立规则非常复杂，为此，其采用了中间格式及二元决策树对规则进行表示，并在Pro/E上实现了模型简化插件的开发。此方法本质上仍是基于经验方法的自动化实现。考虑到特征保留与否依赖非常丰富的经验和专家知识以及具体仿真内容，Danglade等进一步考虑采用机器学习的方法代替人为经验^[261]。问题主要涉及3个方面：训练数据的准备、学习方法的输入与输出，以及学习方法。作者首先基于各种简化及仿真结果建立了仿真模型库；然后，各种关键几何特征被抽取，如体积比、特征与外载间的距离等。之后，采用机器学习方法，对各种特征进行重要性排序，形成简化准则，指导新情形的模型简化。

4 国内与国外研究进展比较

4.1 面向设计仿真无缝融合的等几何分析及其扩展方法

等几何分析方法目前在计算力学领域正如日中天，有大量的研究人员从事相关研究，欧洲和美国也有几个大型科研项目支持等几何分析的相关研究。在国外的研究团队中，主要以等几何分析的提出者 Tom Hughes 教授团队及其弟子团队为主，其弟子团队遍布美国、意大利、瑞士、德国、韩国等国家，他们主要侧重于研究等几何分析的新理论、新方法及其在新问题中的应用。德国以欧洲科学院院士 Timon Rabczuk 院士的学术团队为主，主要侧重于自适应的等几何分析方法及等几何配点法研究，卢森堡以 Stephane Bordas 教授的研究团队为主，主要侧重于新型等几何分析方法及等几何边界元方法的研究。此外，华人科学家在该领域也做出了重要贡献，美国卡内基 - 梅隆大学的 Jessica Zhang 教授的研究团队在基于截断细分模式的等几何分析、等几何配点法等研究方向做出了重要成果；美国威斯康辛大学的钱小平教授所领导的研究团队在等几何分析形状优化和拓扑优化、基于三角样条和四面体样条的等几何分析方法等研究方向也做出了重要贡献。总体来讲，目前还是国外研究人员引领等几何分析领域的发展。

相对于国外研究的如火如荼，国内等几何分析方面的研究起步较晚，但在领域相关专家的积极推动下，目前等几何分析的相关研究在国内的影响力越来越大。2018 年 3 月，杭州电子科技大学徐岗教授在计算机图形学学术交流平台 GAMES 上组织了四期关于等几何分析的在线教程，共邀请了国内 8 位专家学者对等几何分析的相关基础性问题进行了介绍，相关课件和视频文件可在 GAMES 网址下载[⊖]；2018 年 8 月初，大连理工大学罗钟铉教授团队组织了网格生成与等几何分析国际学术会议，Tom Hughes 教授和 Tom Sederberg 教授均应邀参加[⊖]；2018 年 8 月底，在桂林举办的全国计算机辅助设计、图形学及几何计算联合会议上，徐岗教授和浙江大学陈建军教授联合组织了第一届几何计算与力学仿真前沿交叉学术论坛，共邀请了 15 位相关专家做邀请报告。这些学术活动的组织和开展，为推动等几何分析在国内学术界和产业界的发展提供了重要平台。

总体来看，国内从事等几何分析的计算力学领域的代表性团队及其侧重的方向为：厦门大学的王东东教授团队主要侧重于等几何分析中边界条件的施加以及无网格与等几何分析相结合的新型数值方法等；河海大学的余天堂教授团队主要侧重于等几何分析在各种力学仿真问题中的应用；北京航空航天大学的赵罡教授团队主要聚焦于基于 T 样条

⊖ <https://games-cn.org/>。

⊖ <http://igam2018.dlut.edu.cn>。

及裁剪几何的等几何分析相关研究；湖南大学的张见明教授团队主要从事等几何边界方法的研究，并已开发出具有实际工程应用实例的原型系统；西北工业大学张卫红教授团队在基于等几何分析的外形和拓扑优化等研究方向做出了重要贡献；杭州电子科技大学徐岗团队及其合作者在计算域与物理场样条空间相异的新型等几何分析框架方面做出了开创性工作；华中科技大学的黄正东、王书亭教授团队在等几何分析的相关问题上也做出了重要成果。此外，国内计算力学的青年才俊也开始在等几何分析领域崭露头角，比如大连理工大学的祝雪峰博士、北京航空航天大学的王伟博士、西北工业大学的贾悦博士和万能博士、华南理工大学的王英俊博士、湘潭大学的尹硕辉博士、广州大学的刘义捷博士等。

4.2 面向等几何分析的新型样条建模理论

开发挖掘新型的适合分析仿真的样条工具是等几何分析为几何计算领域提出的新课题和新挑战。在这一研究方向中，国内研究人员做出了重要贡献，在几种重要的新型样条表示形式中处于国际领先水平。国内代表性的研究团队及其工作包括：中国科学技术大学的陈发来团队在 T 网格上的样条上的一系列工作，建立了其理论基础，并给出了基于该样条的等几何分析的基本框架；大连理工大学的李崇军教授团队在 T 网格上的样条空间的维数计算上也做出了一系列工作；在 T 样条方面，中国科学技术大学的李新副教授做出了一系列重要工作，包括裁剪 NURBS 到 T 样条的转化，任意拓扑 T 样条的定义，适合分析的 T 样条和适合分析 ++T 样条的提出等；另外，北京航空航天大学的赵罡教授团队在 T 样条混合函数的基本性质以及 T 样条在裁剪几何的等几何分析上的应用展开了研究；浙江大学汪国昭教授及其弟子在变次数 B 样条及非多项式空间样条的构造方面做出了一系列重要工作；南京航空航天大学的唐月红教授团队的研究工作主要集中在基于 T 样条的逆向工程上；苏州大学的康红梅博士在 Box 样条，层次 Box 样条以及层次 Loop 细分的构造以及在等几何分析中的应用展开了系统研究；湖南师范大学的潘青教授在基于扩展细分方法的等几何分析方法及其收敛性证明方面做出了一系列重要工作。国外代表性的研究团队包括：杨伯翰大学的 Tom Sederberg 教授、南洋理工大学的郑建民教授团队主要集中在 T 样条在几何设计上的算法研究上；Tom Hughes 教授、杨伯翰大学的 Mike Scott 教授主要集中在 T 样条在等几何分析上的应用研究上；美国卡内基 - 梅隆大学 Jessica Zhang 教授的研究团队主要集中在体上和复杂拓扑上的局部细分样条的研究；意大利的 Buffa 教授团队主要集中在 T 样条在等几何分析中的基本理论研究；奥地利林茨大学的 Bert Juttler 教授团队的研究工作主要集中在层次 B 样条理论及其应用；挪威奥斯陆大学的 Tor Dokken 教授团队的研究工作主要集中在 LR 样条及其应用；法国 INRIA 的 Bernard Mourrain 教授团队在复杂拓扑几何光滑连续样条空间及其基函数构造上做出了重要成果。总体来看，国内研究团队和国外研究团队在这一研究课题上各有特色，而且在这一研究方向，涌现出较多的国内外合作研究成果。

4.3 面向等几何分析的计算域参数化

计算域参数化是等几何分析向前发展的重要瓶颈问题，属于几何计算领域的范畴。在这一研究方向中，国内研究人员做出了重要贡献，处于国际领先水平。国内代表性的研究团队及其贡献包括：中国科学技术大学陈发来教授团队主要聚焦于满足双射条件的计算域参数化问题，提出了一系列在理论上可以保证无翻转的计算域参数化方法；杭州电子科技大学徐岗教授团队最早提出了适合分析的参数化问题，目前主要研究基于 CAD 边界的复杂计算域的高质量平面参数化及体参数化问题；合肥工业大学的吴梦博士主要聚焦于奇异参数化理论的研究。国外代表性的研究团队及贡献包括：美国卡内基 - 梅隆大学 Jessica Zhang 博士的研究团队主要聚焦于基于三角网格边界表示的体参数化方法及 T 样条体参数化方法；美国威斯康辛大学的钱小平教授团队主要聚焦于基于三角样条和四面体样条表示的计算域参数化构造方法；奥地利 Bert Juttler 教授团队主要研究满足光滑约束条件的多面片平面参数化问题以及复杂区域剖分中分割面的构造问题。总体来看，国内研究团队主要聚焦于由 CAD 样条边界信息出发构造高质量计算域参数化问题，而国外研究团队主要研究由离散三角网格边界出发构造体参数化的问题。另一方面，在计算域参数化这一研究方向，国内外学术交流合作日益频繁，已出现若干国内外共同合作完成的学术成果。

4.4 面向等几何分析的高质量六面体网格生成

等几何分析与传统有限元方法相比，可以提高计算精度，简化设计和分析流程。但是，等几何分析需要一个前提：将样条曲面转换为体样条表示，而这一点，需要计算模型内部高质量的结构化六面体网格。数字几何、计算力学、计算机辅助设计等诸多领域的众多学者都对此问题充满兴趣。法国 INRIA 的 Pierre Alliez 教授建议网格的边应该和曲面的主曲率线尽量吻合；德国柏林自由大学的 Konrad Polthier 教授尝试用分支覆盖 (branch cover) 将标架场转换成微分形式。法国 INRIA 的 Bruno Levy 教授研究基于 Centroidal Voronoi Tessellation 的体网格生成算法。香港的雷诺铭教授团队研究如何用拟共形几何手段来提高网格质量；赵辉博士研究了多立方体法中四边形网格成为多立方体边界的拓扑条件。浙江大学高曙明教授团队对多子区域法有很深的研究，通过插入薄板、模糊聚类、模型的伪扫掠模型分解等手段生成六面体网格；浙江大学郑耀和陈建军教授团队在基于六面体的边界层网格方面取得突破性进展，为流体力学高精度仿真提供了重要几何工具^[263]；浙江大学黄劲教授团队利用标架场方法与多立方体法结合生成六面体网格，能够比较好地保持模型的几何特征。但是由于缺乏理论根基，算法中奇异点、奇异线的产生和分布不可控，其形状的分析也非常困难。大连理工大学罗钟铉、雷娜教授团队发现了曲面叶状结构、Strebel 微分和六面体网格生成之间的本质关联，为六面体网格生成建立了坚实的理论基础，并提出和实现了能够控制奇异点和奇异线的自动化六面

体网格生成算法。但算法并没有关注模型的几何特性，因而在保持模型几何特征方面比较困难。虽然国内外在此领域的研究都有不小的进展，但大多数研究都是比较经验性的，缺乏理论支撑。一方面，六面体网格生成需要建立严谨普适的理论框架，另一方面，六面体网格需要满足保持特征、疏密性、力学高精度仿真等实际应用要求。同时满足这两方面要求的六面体网格生成算法还需要研究人员不断努力。

4.5 面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化

面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化是 CAD/CAE 集成的瓶颈问题，交叉于 CAD、CAE 两个独立的研究领域，难度大，国内外的相关研究团队少。其中，国外主要团队有苏格兰的 Belfast Queen's University 的 Armstrong 和 Robison 等、法国 Leon 等、美国威斯康辛麦迪逊大学 Suresh 等。这些研究者在该领域，一般都有数十年积累，工作相对做得比较全面、完整。如 Armstrong 在含模型简化的模型理想化方面有着长期的研究，对各种对称情形的处理也有诸多研究工作。Leon 团队主要关注模型简化，在几何及拓扑简化、装配体模型简化方面做了一系列的研究工作。Suresh 团队主要从事后验特征抑制误差（称为特征灵敏度）估计等问题的研究，并由此对比其与拓扑灵敏度的关系。该团队近几年也开始了拓扑优化的研究。

国内研究团队主要有合肥工业大学的刘晓平教授团队、浙江大学高曙明教授和李明博士团队等。合工大团队首先提出了多态模型概念，对问题的解决提供了崭新的思路。浙大团队在各种模型简化方法以及特征识别方面做了出色工作。此外，该团队也对后验特征抑制误差估计做了一系列深入研究，得到了一系列重要成果。

5 发展趋势与展望

随着智能制造的迅猛发展，CAD/CAE 高精度仿真分析的技术需求为日益成熟的几何设计与计算领域提出了新的研究课题。本文依据目前高精度仿真分析急需解决的关键几何计算问题^[264]，重点介绍了面向设计仿真无缝融合的等几何分析方法、面向等几何分析的新型样条建模理论、面向等几何分析的计算域参数化方法、面向等几何分析的高质量六面体网格生成、高效灵活的新型等几何分析方法、面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论与方法等六个方向的相关工作和研究进展。总体来看，面向高精度仿真分析的几何计算问题研究仍处于初步阶段，目前发展的主要趋势可概括为：由特殊问题到一般问题，由简单问题到复杂问题，由二维问题到三维问题，由静态问题到动态问题，由线性问题到非线性问题。

本报告所总结的面向高精度仿真分析的五大研究方向仍存在大量有待解决的问题和挑战，同时这也是未来的研究重点和可能的发展方向。下面将依次介绍。

5.1 面向等几何分析的新型样条建模理论

在适合分析的新型样条理论研究方面，主要有下面一些重要的研究方向值得进一步探索：

1) 局部 k- 加细的样条表示：在等几何分析中，增加的自由度可以通过 h- 细分（网格单元变小，即节点插入），p- 细分（提高基函数次数，即升阶）和 k- 细分（结合 h- 细分和 p- 细分，新增加的节点处的光滑性也增加）。而对于局部加细样条，目前的研究主要集中在基于节点插入的局部加细样条上，所以如何在一个统一的框架下，找到基于升阶的局部加细样条并如何自然地将它们结合起来，对于某些仿真分析问题具有重要的应用价值。

2) 在所有的局部加细样条中（T 样条、PHT 样条、LR B 样条和 HB 样条等），每一个都具有一定的局限性，主要体现在两个方面：①是否具有简单的构造基函数的方法，从而可以融入当前的造型系统；②是否具有严格的数学理论从而可以稳定地应用于等几何分析。其中，适合分析的 T 样条基本满足上述两个条件，但适合分析的 T 样条的局部加细算法可能导致额外的节点插入。因此，如何寻找一种新颖的样条表示形式以完美满足上面两个要求，也是一个非常重要的课题。

3) 若将上述样条推广到任意拓扑，一个无法避免的问题就是奇异点。这里面有一系列重要的研究课题：包括奇异点处的最优收敛问题、非均匀节点奇异点处曲面质量问题、奇异点处的局部加细问题、奇异点处的保几何加细问题等。

4) 体样条相关问题的研究是将等几何分析推向实用的重要理论基础。如何建立定义在非结构化六面体网格上的光滑体样条理论体系，是其中的难点问题。

5.2 面向等几何分析的计算域参数化方法

目前，面向等几何分析的计算域参数化问题仍然没有完全解决，值得研究的方向包括：

1) 对于外形复杂的 CAD 模型，构造适合分析的体参数化，目前仍是一个悬而未决的难题。实际应用中的 CAD 模型通常包含大量的裁剪曲面，如何构造能够精确保持裁剪曲面信息的体参数化，目前鲜有研究工作涉及，仍是影响等几何分析应用广度的瓶颈问题。

2) 在等几何分析领域，目前计算域最优参数化的相关工作主要集中面向静态等几何分析问题，而动态等几何分析问题对计算域参数化的敏感度更强。对于时间相关的动态仿真问题，在不同时刻具有不同的数值解，如果任一时刻计算域均采用同一参数化进行表示，则所得到的每个时刻的数值解就会有比较大的误差。而在 CAD 产品模型的多学科物理场模拟问题中，经常涉及流体力学、传热分析等动态仿真问题，因此，在保持自由度数目不变的前提下，研究面向动态等几何分析的时变参数化问题，便成为当务之急。

3) 对于时间相关的动态等几何分析问题, 如何根据不同时刻的数值解特征, 既能自适应地进行局部加细以提高仿真精度, 又能在精度达到要求的区域自适应地进行局部加粗以减少计算成本, 从而保证在适当的自由度数目下, 尽可能提高仿真精度, 实现仿真精度和计算效率的最佳平衡, 也是一个值得深入研究的课题。

5.3 面向等几何分析的高质量六面体网格生成

六面体网格生成目前仍是困扰网格生成和等几何分析的瓶颈问题, 需要进一步研究的方向包括:

1) 目前, 基于曲面叶状结构的六面体网格生成算法侧重考虑了流形的拓扑结构和共形结构, 而忽略了几何信息。在实际应用中, 网格化需要充分考虑曲面的几何特征, 特别是曲面的主曲率方向、曲面的特征曲线、尖锐的折角曲线等。大多数情况下需要加入更多的奇异点或奇异线, 来使得六面体网格化更好地适应几何特征。面对这个挑战, 近日, 大连理工大学罗钟铉教授与雷娜教授团队在等几何分析与网格生成国际会议上, 提出了保持特征的六面体网格生成方法, 通过添加特征线约束, 结合体叶状结构, 展示了成功保持目标几何特征的算例。相信沿着这个思路, 必将取得“神圣网格”问题的终极突破。

2) 面向四面体网格的编辑和处理方法已比较成熟, 但面向六面体网格的编辑和处理方法的相关研究刚刚起步, 六面体网格简化、奇异结构编辑等问题值得深入研究;

5.4 高效灵活的新型等几何分析方法

等几何分析求解的理论和技术框架目前已相对成熟, 但仍有一些值得深入研究的课题:

1) 对于等几何分析配点法而言, 其收敛性仍未从理论上完整证明, 仍值得深入研究。

2) 可局部加细样条空间上的配点法鲜有人研究, 等几何配点法的误差估计还没有理论上的进展, 而等几何分析中采用可局部加细的样条时, 误差估计子有着重要的地位。

3) 细分方法还没有在等几何配点法中得到应用。细分曲面是进行任意拓扑复杂曲面造型的强有力工具, 并已被集成应用到等几何伽略金方法之中。遗憾的是, 目前还没有基于细分模式的等几何配点方法, 其主要困难在于如何在细分过程中对采样点进行选择和自动更新。进一步, 尽管等几何伽略金方法已被应用于服装动态模拟问题, 但实时性远未达到。若能将高效的等几何配点法和可表示复杂拓扑的细分造型模式结合起来, 服装的实时动态仿真问题的解决指日可待。

4) 将两种新型等几何分析方法结合起来考虑, 也是值得研究的问题, 例如可以将配点法和计算域与物理场样条空间相异的新型等几何分析方法结合起来, 将在灵活性和求解效率上取得进一步提升;

5) 可视化功能是 CAD 模型分析仿真的后处理工作。由于等几何分析所求解得到的物理场具有精确的高阶数学表达, 因而在面向等几何分析的可视化方面, 应有不少可挖掘的研究课题。

6) 与有限元方法相比, 等几何分析方法本身所具有的特性可能在图形图像处理、计算机视觉等方面具有应用潜力。目前虽然已有一些尝试性的工作, 但这一方向仍值得进一步深入研究。

5.5 面向高精度仿真的 CAD 模型结构简化理论与方法

整体而言, CAD 模型的几何简化操作已经相对成熟, 各种方法也很多。然而, 定量评价一个或多个特征对工程仿真精度的影响仍处于起步阶段。如何把两者进行有效结合, 生成仿真精度可控的简化模型, 仍然有待持续长久的研究, 以在实际工业中广泛应用。目前, 仍有如下方向有待深入研究:

1) **特征相互影响。**二阶特征抑制误差的概念首次研究了特征间相互作用对工程仿真精度的影响。然而, 此方面的研究才处于起步阶段, 有待进一步的扩展。目前此方法仅对二维用 Bézier 曲线表示的边界特征给出具体误差解析表示, 具体扩展此方法至三维自由特征尚不明确。此外, 目前主要考虑了多个边界特征情形, 通过扩展二阶 SSA 实现。相应地, 可进一步扩展高阶拓扑灵敏度, 实现对多个内部特征相互影响的情形。而对于边界特征与内部特征均存在的情形, 需要建立某种新型的高阶拓扑 - 形状灵敏度实现。最后, 目前的基于灵敏度分析的方法会得到非常复杂的高阶特征抑制误差表示, 未来工作还需要研究如何给出更加简洁的高阶特征抑制误差。

2) **误差估计的可信度。**目前各种后验特征抑制误差估计方法在许多情形下会具有很好的精度, 然而在某些特殊情形下精度不足。如何保证所有情况下误差估计的可信度是个重要挑战。本质上来说, 误差估计在所有情形下的可信度是比其在绝大多数情形下的高精度更重要的事情。解决此问题, 需要通过建立误差的一个紧致的上下界来实现。

3) **简化模型或其网格生成的整体过程。**对于复杂模型, 我们需要在误差估计指导的基础上, 最终生成工程仿真精度可信的简化模型及其网格, 但其中各种技术细节仍需深入挖掘与实现, 主要涉及各种几何及仿真计算问题: 如基模型选择、循环过程中的待抑制特征集的选择、重网格化、重仿真计算、重误差估计等问题。

4) **自适应简化与网格化的关联。**模型简化的最终目的是生成简化网格模型, 此过程不仅涉及简化模型的生成, 还涉及此过程中的网格自适应生成。如何将两者进行有效结合以形成可行方案, 有待进一步研究。或许可通过整体定义尺度函数, 以整体指导模型的自适应简化及重网格化。

5) **标准测试问题及实际工业应用。**目前还缺乏标准测试问题来评价简化误差评估的准确度。需要给出有代表性的二维问题、实际三维问题以及各种典型测试情形。特别地, 需要给出在具体物理分析场景下具有明显的重要性的细节特征。因为此特征可能依赖于具体的边值条件, 也可能对应模型的某种仿真奇异点, 破坏了模型的仿真的局部属性。

6 结束语

本报告针对面向 CAD/CAE 领域高精度仿真分析的几何计算关键问题，从六大板块内容概述了其在智能制造与先进制造领域的国内外研究进展与分析，并对未来发展趋势和研究内容进行了展望。希望本报告能使读者对几何计算与数值仿真等交叉研究方向的最新进展有较为全面的了解和认识，并对将来的研究工作开展有所启发。

致谢

本文在撰写过程中，收到了浙江大学冯结青教授、清华大学雍俊梅教授、计算机辅助设计与图形学专委会，以及 CCF 学术工委多位专家的宝贵意见，在此一并表示感谢！

参考文献

- [1] Hughes T J R, Cottrell J A, Bazilevs Y. Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry, and mesh refinement [J]. Computer Methods in Applied Mechanicsand Engineering, 2005, 194(39) : 4135-4195.
- [2] Cottrell J A, Hughes T J R, Y Bazilevs. Isogeometric Analysis: Toward Integration of CAD and FEA [M], Wiley, 2009.
- [3] Shepherd J F, Johnson C R. Hexahedral mesh generation constraints[J], Eng. Comput. 2008, 24 (3) : 195-213.
- [4] Thurston B. Geometry in Action: Hexahedral decomposition of polyhedral[OL]. <https://www.ics.uci.edu/~eppstein/gina/Thurston-hexahedra.html>.
- [5] Murdoch P J. The spatial twist continuum: a dual representation of the all hexahedral finite element mesh [D]. Brigham Young University, 1995.
- [6] Murdoch P J, Benzley S E. The spatial twist continuum[C]. In: Proceedings , 4th international meshing roundtable. Sandia National Laboratories, 199. 5243-251.
- [7] Mitchell S A. A Characterization of the Quadrilateral Meshes of a Surface Which Admit a Compatible Hexahedral Mesh of the Enclosed Volume[C]. In proc. 13th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS' 96), Lecture Notes in Computer Science 1046, Springer, pages, 1996, 465-476.
- [8] Eppstein D. Linear-complexity hexahedral mesh generation[J]. Comput. Geom. Theory Appl, 1999, 24 (12) : 3-16.
- [9] Erickson J. Efficiently hex-meshing things with topology[C]. Discrete & Computational Geometry , 2014, 52(3) : 427-449.

- [10] Shapiro V, Tsukanov I, Grishin A. Geometric issues in computer aided design/computer aided engineering integration[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2011, 11(2) : 021005.
- [11] Shimada K. Current issues and trends in meshing and geometric processing for computational engineering analyses[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2011, 11(2) : 021008.
- [12] Lee S. A CAD- CAE integration approach using feature- based multi- resolution and multi- abstraction modeling techniques[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(9) : 941-955.
- [13] White D, Saigal S, Owen S. Meshing complexity: predicting meshing difficulty for single part CAD models[J]. Engineering with Computers, 2005, 21 : 76-90.
- [14] Shewchuk J. What is a good linear element interpolation, conditioning, and quality measures [C]. Proceedings of 11th International Meshing Roundtable. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2002: 115-126.
- [15] Quadros W, Owen S. Defeaturing CAD models using a geometry- based size field and facet- based reduction operators[C]. Proceedings of the 18th International Meshing Roundtable, Berlin: Springer. 2009: 301-328.
- [16] Thakur A, Banerjee A, Gupta S A survey of CAD model simplification techniques for physics- based simulation applications[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(2) : 65-80.
- [17] Gratsch T, Bathe K. A posteriori error estimation techniques in practical finite element analysis [M]. Computers & Structures, 2005, 83(4-5) : 235-265.
- [18] Kelly D, De J, Gago S, et al. A posteriori error analysis and adaptive processes in the finite element method[J]: Part I: error analysis. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1983, 19 (11) : 1593-1619.
- [19] Auricchio F, da Veiga L B, Buffa Lovadina A, C. Reali A, and Sangalli G. A fully “locking- free” isogeometric approach for plane linear elasticity problems[J]: A stream function formulation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 197: 160-172.
- [20] Bazilevs Y, Calo V M, Hughes T J R, Zhang Y. Isogeometric fluid structure interaction: Theory, algorithms, and computations[J]. Computational Mechanics, 2008, 43 : 3-37.
- [21] Bazilevs Y, Calo V M, Cottrell J A, Evans J, Hughes T J R, Lipton S, Scott M A, and Sederberg T W. Isogeometric analysis using T-Splines[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(5-8) : 229-263.
- [22] Dorfel M, Juttler B, Simeon B. Adaptive isogeometric analysis by local h-refinement with T-splines[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(5-8) : 264-275.
- [23] Speleers Hendrik, Manni Carla, Pelosi Francesca, Sampoli M Lucia. Isogeometric analysis with Powell- Sabin splines for advection-diffusion-reaction problems[J], Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 221-222(1) : 132-148.
- [24] Scott M A, Li Xin, Sederberg T W, Hughes T. Local refinement of analysis- suitable T- splines [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 213-216(1) : 206-222.
- [25] Pan Q, Xu G L, Xu G, Zhang Y. Isogeometric analysis based on extended loop’ s subdivision [J]. Journal of Computational Physics, 2016, 229 : 731-746.
- [26] Wang P, Xu J, Deng J, Chen F. Adaptive isogeometric analysis using rational PHT- splines [J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(11) : 1438-1448.

- [27] Deng J, Chen F, Li X, Hu C, Tong W, Yang Z, Feng Y. Polynomial splines over hierarchical T-meshes [J]. *Graphical Models*, 2008, 74(4) : 76-86.
- [28] Wang D, Xuan J. Improved NURBS-based isogeometric analysis with enhanced treatment of essential boundary conditions [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, 199 (37-40) : 2425-2436.
- [29] Barton M, Calo V M. Gauss-Galerkin quadrature rules for quadratic and cubic spline spaces and their application to isogeometric analysis [J]. *Computer-Aided Design*, 2017, 82 : 57-67.
- [30] 陈涛, 莫蓉, 万能. 等几何分析中 Dirichlet 边界条件的配点施加方法 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48 (5) : 157-163.
- [31] Martin T, Cohen E, and Kirby R M. Volumetric parameterization and trivariate B-spline fitting using harmonic functions [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2009, 26(6) : 648-664.
- [32] Escobar J M, Cascon J M, Rodriguez E, Montenegro R. A new approach to solid modeling with trivariate T-splines based on mesh optimization [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, 200(45-46) : 3210-3222.
- [33] Zhang Y, Wang W, Hughes T J R, Solid T-spline Construction from boundary representations for genus-zero geometry [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2012, 249 : 185-197.
- [34] Wang W, Zhang Y, Liu L, Hughes T J R. Trivariate solid T-spline construction from boundary triangulations with arbitrary genus topology [J]. *Computer Aided Design*, 2013, 45(2) : 351-360.
- [35] Johannessen K A, Kvamsdal T, Dokken T. Isogeometric analysis using LR B-splines [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, 269 : 471-514.
- [36] Xu G, Mourrain B, Duvigneau R, Galligo A. Parameterization of computational domain in isogeometric analysis: Methods and comparison [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2011, 200(23-24) : 2021-2031.
- [37] Xu G, Mourrain B, Duvigneau R, Galligo A. Optimal analysis-aware parameterization of computational domain in 3D isogeometric analysis [J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(4) : 812-821.
- [38] Xu G, Mourrain B, Duvigneau R, Galligo A. Analysis-suitable volume parameterization of multi-block computational domain in isogeometric applications [J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(2) : 395-404.
- [39] Morganti S, Auricchio F, Benson D, Gambarin F. I, Hartmann S, T J R H. Real patient-specific isogeometric structural analysis of aortic valve closure [J]. *CMAME*, 2015.
- [40] Liu J, Landis C M, Gomez H, Hughes T J R. Liquid-Vapor Phase Transition: Thermomechanical Theory, Entropy Stable Numerical Formulation, and Boiling Simulations [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, 297 : 476-553.
- [41] Qian X. Full analytical sensitivities in NURBS based isogeometric shape optimization [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, 199 : 2059-2071.
- [42] Wall W A, Frenzel M A, Cyron C. Isogeometric structural shape optimization [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, 197 : 2976-2988.
- [43] GeoPDEs [OL]. <http://rafavzqz.github.io/geopdes/>.
- [44] Axl [OL]. <http://axel.inria.fr/>.
- [45] G + Smo [OL]. <http://www.gs.jku.at/gismo>.
- [46] PetIGA [OL]. <https://bitbucket.org/dalcinl/petiga/>.
- [47] Hughes T J R, Bazilevs Beirao Y, Veiga de, Cottrell J A, Sangalli G. Isogeometric analysis:

- approximation, stability and error estimates for h-refined meshes [J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol. 16, No, 2006, 7, 1031-1090.
- [48] Manni C, Pelosi F, Lucia M Sampoli. Generalized B-splines as a tool in isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 200, Issues, 2011, 5-8: 867-881.
- [49] Bracco, Lyche T, Manni C, Roman F, Speleers H. Generalized spline spaces over T-meshes: Dimension formula and locally refined generalized B-splines [J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 272 (1) : 187-198.
- [50] Manni C, Reali A, Speleers H. Isogeometric collocation methods with generalized B-splines [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2015, 70(7) : 1659-1675.
- [51] Xu G, Sun N, Xu J, Hui K, Wang G. A unified approach to construct generalized B-Splines for isogeometric applications [J]. Journal of Systems Science & Complexity, vol. 2017, 30(4), 983-998.
- [52] Jaxon N, Qian X. Isogeometric analysis on triangulations [J]. Computer-Aided Design, 2014, 46: 45-57.
- [53] Speleers H, Manni C, Pelosi F, Sampoli M L. Isogeometric analysis with Powell-Sabin splines for advection-diffusion-reaction problems [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 221-222(1) : 132-148.
- [54] Speleers H, Manni C, Pelosi F. From NURBS to NURPS geometries [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 255(0) : 238 - 254.
- [55] Kanduč, C Giannelli, Pelosi F, Speleers H. Adaptive isogeometric analysis with hierarchical box splines [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 316: 817-838.
- [56] Pelosi, Giannelli Manni C, Sampoli ML, Speleers H. Splines over regular triangulations in numerical simulation [J]. Computer-Aided Design, 2017, 82: 100-111.
- [57] Kang H, Li X, Deng J, Chen F, Truncated Hierarchical Loop Subdivision Surfaces and Application in Isogeometric Analysis [J], Computers and Mathematics with Applications, 2016, 72(8) : 2041-2055.
- [58] Forsey D R, Bartels R H. Hierarchical B-splines refinement [C], SIGGRAPH 1988: 205-212.
- [59] Vuong A V, Giannelli C, Jüttler B, Simeon B. A Hierarchical Approach to Adaptive Local Refinement in Isogeometric Analysis [J], Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(49) : 3554-3567.
- [60] Giannelli C, Juettler B, Speleers H. THB-splines: the truncated basis for hierarchical splines [J]. Computer Aided Geometric Design, 2012, 29: 485-498.
- [61] Giannelli C, Jüttler B. Bases and dimensions of bivariate hierarchical tensor-product splines [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2013, 239(1) : 162-178.
- [62] Mokriš D, Jüttler B, Giannelli C. On the completeness of hierarchical tensor-product B-spline [J]. Comp. Appl. Math., 2014, 271: 53-70.
- [63] Zore U, Jüttler B. Adaptively refined multilevel spline spaces from generating systems [J]. Computer Aided Geometric Design, 2014, 31, 545-566.
- [64] Kiss G, Giannelli C, Zore U, Jüttler B, Grossmann D, Barner J. Adaptive CAD model (re-)construction with THB-splines [J]. Graphical Models, 2014, 76(5) : 273-288.
- [65] Falini A, Špeh J, Jüttler B. Planar domain parameterization with THB-splines [J], Computer Aided Geometric Design, 2015, 35-36(C) : 95-108.
- [66] Kiss G, Giannelli C, Jüttler B. Algorithms and Data structures for truncated hierarchical B-splines [M].

- Mathematical Methods for Curves and Surfaces, 2014, M. Floater et al., Springer, Lecture Notes in Computer Science, 2012, 304-323.
- [67] Hiemstra R R, Calabro F, Schillinger D and Hughes T J R. Optimal and reduced quadrature rules for tensor product and hierarchically refined splines in isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 316: 966-1004.
- [68] Großmann D, Jüttler B Schlusnus H, Barner J, Vuong A V. Isogeometric simulation of turbine blades for aircraft engines[J]. Computer Aided Geometric Design, 2012, 29(7): 519-531.
- [69] Sederberg T W, Zheng J, Bakenov A, Nasri A. T-splines and T-NURCCs[J]. ACM TOG, 2003, 22(3): 161-172.
- [70] Sederberg T W, Cardon D L, G Finnigan T, N S North, Jianmin Zheng, T Lyche. T-spline simplification and local refinement[J]. ACM TOG, 2004, 23(3): 276-283.
- [71] Sederberg T W, Finnigan G, Li X, Lin H, Heather Ipson: Watertight trimmed NURBS[J]. ACM Trans. Graph. 2008, 27(3): 1-8.
- [72] Li X, Sederberg T. W, Zheng, Hughes T, Scott M A. On linear independency of Tsplines blending functions[J], Computer Aided Geometric Design, 2012, 29(1): 63-76.
- [73] Scott M A, Li Xin, Sederberg T W, Hughes T. Local refinement of Analysis- suitable T-splines [J], Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 213-216(1-3): 206-222.
- [74] Li X, Scott M. A. Analysis-suitable T-splines: characterization, refineability, and approxymatio- n[J], Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2014, 24(06): 1141-1164.
- [75] Evans E J, Scott M. A Li X, Thomas D C. Hierarchical T-splines: Analysis-suitability, Bezier extraction, and application as an adaptive basis for isogeometric analysis [J], Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 284: 1-20.
- [76] Li X, Zhang J. AS ++ T- splines: linear independence and approximation [J], Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 333: 462-474.
- [77] Wei X, Zhang Y, Liu L, Hughes T J R. Truncated T-splines: Fundamentals and methods[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 316: 349-372.
- [78] Schillinger D, Dede L, Scott M A, J Evans A, Borden M J, Rank E, Hughes T J R, An isogeometric design-through- analysis methodology based on adaptive hierarchical refinement of NURBS, immersed boundary methods, and T- spline CAD surfaces [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 249 - 252: 116 - 150.
- [79] Borden M J, Verhoosel C V, Scott M A, Landis C M, Hughes T J R. A phase- field description of dynamic brittle fracture[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 217: 77-95.
- [80] Verhoosel C V, Scott M A, Hughes T J R, de Borst R. An isogeometric analysis approach to gradient damage models[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 86: 115-134,
- [81] Deng J, Chen F, Feng Y, Dimensions of spline spaces over T-meshes[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2006 194(2) : 267-283.
- [82] Nguyen-Thanh N, Kiendl J, Nguyen-Xuan H, Wuchner R, Bletzinger KU, Bazilevs Y, Rabczuk T. Rotation free isogeometric thin shell analysis using PHT- splines [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011; 200(47-48): 4310-3424.
- [83] Wang P, Xu J, Deng J, Chen F. Adaptive isogeometric analysis using rational PHT- splines [J].

- Computer-Aided Design. , 2011, 43, 11.
- [84] Deng J, Chen F, Li X, Hu C, Tong W, Yang Z, Feng Y. Polynomial splines over hierarchical T-meshes [J]. Graphical Model, 2008 s, 74(4) : 76-86.
- [85] Li X, Chen F. On the instability in the dimension of splines spaces over T-meshes[J]. Computer Aided Geometric Design, 2011, 28(7) : 420-426.
- [86] Dokken T, Lyche T, Pettersen K, Polynomial F. splines over locally refined box-partitions[J]. CAGD, 2013, 30(3) 331-356.
- [87] Wei X, Zhang Y, Hughes Ts J R, Michael A Scott. Truncated hierarchical Catmull- Clark subdivision with local refinement[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 291 : 1-20.
- [88] Wei X, Zhang Y J, Hughes T J R, Michael A Scott. Extended truncated hierarchical Catmull- Clark subdivision[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 299 : 316-336.
- [89] Pan Q, Xu G, Xu G, Zhang Y. Isogeometric analysis based on extended Catmull-Clark subdivision[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2016, 71(1) : 105-119.
- [90] Kang H, Li X, Deng J, Chen F. Truncated Hierarchical Loop Subdivision Surfaces and Application in Isogeometric Analysis[J], Computers and Mathematics with Applications, 2016, 72(8) : 2041-2055.
- [91] Juttler B, Mantzaaris A, Perl R, Rumpf M. On numerical integration in isogeometric subdivision methods for PDEs on surfaces [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 302 : 131-146.
- [92] Yuan X, Tang K. Rectified unstructured T-splines with dynamic weighted refinement for improvement in geometric consistency and approximation convergence[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 316 : 373-399.
- [93] Li X, Finnigan T, Sederberg T W. G1 non-uniform Catmull- Clark surfaces[J], ACM Trans. Graph. 2016, 35(4) : 1-8.
- [94] Scott M A, Simpson R N. Evans J A, Lipton S, Bordas S P A, Hughes T J R, Sederberg T W. Isogeometric boundary element analysis using unstructured T-splines[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 254(0) : 197 - 221.
- [95] Toshniwal, Speleers H, Hughes T J R. Smooth cubic spline spaces on unstructured quadrilateral meshes with particular emphasis on extraordinary points: Geometric design and isogeometric analysis considerations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 327: 411-458.
- [96] Sangalli G, Takacs T, azquez R V. Unstructured spline spaces for isogeometric analysis based on spline manifolds[J]. Computer Aided Geometric Design, 2016, 47: 61-82.
- [97] Majeed M, Cirak F. Isogeometric analysis using manifold-based smooth basis functions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 316 : 547-567.
- [98] Zhang Y, Wang W, Hughes T J R. Solid T-spline construction from boundary representations for genuszero geometry[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 249: 185-197.
- [99] Wang W, Zhang Y, Liu L, Hughes T J R. Trivariate solid T- spline construction from boundary triangulations with arbitrary genus topology[J]. Computer-Aided Design, 2012.
- [100] Burkhart D, Hamann B, Umlauf G. Isogeometric finite element analysis based on Catmull- Clark: subdivision solids[J]. In Computer Graphics Forum. 2010: 1575-1584.
- [101] Wei X, Zhang Y J, Toshniwal D, Speleers H, Li, Manni C, Evans J A, Hughes T J R. Blended B-Spline Construction on Unstructured Quadrilateral and Hexahedral Meshes with Optimal Convergence

- Rates in Isogeometric Analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018.
- [102] Mourrain B, Vidunas R, Villamizar N. Dimension and bases for geometrically continuous splines on surfaces of arbitrary topology [J]. Computer Aided Geometric Design, 2016, 45: 108-133.
- [103] Wu M, Mourrain B, Galligo A, Nkong B. Hermite type Spline spaces over rectangular meshes with complex topological structures [J]. Communications in Computational Physics, 2017, 21(3): 835-866.
- [104] Cohen E, Martin T, Kirby R M, Lyche T and Riesenfeld R F, Analysis-aware Modeling: Understanding Quality Considerations in Modeling for Isogeometric Analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 199(5): 334-356.
- [105] Xu G, Mourrain B, Duvigneau R, Galligo A. Parameterization of computational domain in isogeometric analysis: methods and comparison [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(23): 2021-2031.
- [106] Xu G, Mourrain B, Duvigneau R, Galligo A. Optimal analysis-aware parameterization of computational domain in 3D isogeometric analysis [J]. Computer-Aided Design, 2010, 812-821.
- [107] 徐岗, 王毅刚, 胡维华. 等几何分析中的 r-p 型细化方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23 (12): 2019-2024.
- [108] 徐岗, 朱亚光, 邓立山, 王毅刚. 局部误差驱动的等几何分析计算域自适应优化方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26 (10) 1633-1638.
- [109] Pilgerstorfer E, Juttler B. Bounding the influence of domain parameterization and knot spacing on numerical stability in Isogeometric Analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, 268: 589-613.
- [110] Takacs T, Juttler B. Existence of Stiffness Matrix Integrals for Singularly Parameterized Domains in Isogeometric Analysis [J], Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2011, 200: 3568-3582.
- [111] Takacs T, Juttler B. H^2 regularity properties of singular parameterizations in isogeometric analysis [J]. Graphical Models 2012, 74: 361-372.
- [112] Wu M, Mourrain B, Galligo A, Nkonga B. H1-parameterizations of planar physical domains with complex topology in Isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2017, 381: 296-318.
- [113] Wu M, Wang X. A H^1 -integrability condition of surfaces with singular parametrizations in isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 332: 136-156.
- [114] Xu G, Mourrain B, Duvigneau R, Galligo A. Analysis-suitable volume parameterization of multi-block computational domain in isogeometric applications [J]. Computer-Aided Design, 2013, 45: 395-404.
- [115] Wang X, Qian X. An optimization approach for constructing trivariate B-spline solids [J]. Computer-Aided Design, 46(2014) 179-191.
- [116] Xu J, Chen F, Deng J. Two-dimensional domain decomposition based on skeleton computation for parameterization and isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 284: 541-555.
- [117] Xu G, Mourrain B, Duvigneau R, Galligo A. Constructing analysis-suitable parameterization of computational domain from CAD boundary by variational harmonic method [J]. Journal of Computational Physics, 2013, 252: 275-289.
- [118] Nian X, Chen F. Planar domain parameterization for isogeometric analysis based on Teichmuller mapping

- [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 311: 41-55.
- [119] Buchegger F, Jüttler B. Planar multi-patch domain parameterization via patch adjacency graphs [J]. Computer-Aided Design, 2016, 82: 2-12.
- [120] Speleers H, Manni C. Optimizing domain parameterization in isogeometric analysis based on Powell-Sabin splines [J]. Journal of Computational & Applied Mathematics, 2015, 289(C): 68-86.
- [121] Falini A, Špeh J, Jüttler B. Planar domain parameterization with THB-splines [J]. Computer Aided Geometric Design, 2015, 35-36(C): 95-108.
- [122] Xu G, Li M, Mourrain B, Rabczuk T, Xu J, Stéphane P A Bordas. Constructing IGA- suitable planar parameterization from complex CAD boundary by domain partition and global/local optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 328: 175-200.
- [123] Xiao S, Kang H, Fu X, Chen F. Computing IGA- suitable planar parameterizations by PolySquare-enhanced domain partition [J]. Computer Aided Geometric Design, 2018, 62: 29-43.
- [124] Jüttler B, Kapl M, Nguyen D, Pan Q, Pauley M. Isogeometric segmentation: The case of contractible solids without non-convex edges [J]. Computer-Aided Design, 2014, 57: 74-90.
- [125] Nguyen D, Pauley M, Jüttler B. Isogeometric segmentation. Part II: On the segmentability of contractible solids with non-convex edges [J]. Graphical Models, 76(5): 426-439.
- [126] Zhang Y, Wang W, Hughes T J R. Conformal solid T-spline construction from boundary T-spline representations [J]. Computational Mechanics, 2013, 51: 1051-1059.
- [127] Xu G, Mourrain B, Galligo A, Rabczuk T. High-quality construction of analysis- suitable trivariate NURBS solids by reparameterization methods [J]. Computational Mechanics, 2014, 54: 1303-1313.
- [128] Choi M, Cho S. A mesh regularization scheme to update internal control points for isogeometric shape design optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 285: 694-713.
- [129] Martin T, Cohen E, Kirby R M. Volumetric parameterization and trivariate B-spline fitting using harmonic functions [J]. Computer Aided Geometric Design, 2009, 26: 648-664.
- [130] Escobara J M, Casconb J M, Rodrigueza E, Montenegro R. A new approach to solid modeling with trivariate T-spline based on mesh optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(45): 3210-3222.
- [131] Zhang Y, Wang W, Hughes T J R. Solid T-spline construction from boundary representations for genus-zero geometry [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 201: 185-197.
- [132] Wang W, Zhang Y, Liu L, Hughes T J R. Trivariate solid T-spline construction from boundary triangulations with arbitrary genus topology [J]. Computer-Aided Design, 2013, 45: 351-360.
- [133] Li B, Qin H. Component-aware tensor-product trivariate splines of arbitrary topology [J]. Computers & Graphics, 2012, 36(5): 329-340.
- [134] Liu L, Zhang Y, Hughes T J R, Scott M A, Sederberg T W. Volumetric T-Spline construction Using Boolean operations [J]. Engineering with Computers, 2014, 30(4): 425-439.
- [135] Li Bo, Li X, Wang K, Qin H. Surface Mesh to Volumetric Spline Conversion with Generalized Polycubes [J]. IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. 2013, 19(9): 1539-1551.
- [136] Liu L, Zhang Y, Liu Y, Wang W. Feature-preserving T-mesh construction using skeleton-based polycubes [J]. Computer-Aided Design, 2015, 58: 162-172.
- [137] Lin H, Jin S, Hu Q, Liu Z. Constructing B-spline solids from tetrahedral meshes for isogeometric analysis [J]. Computer Aided Geometric Design, 2015, 35-36: 109-120.

- [138] Chan C, Anitescu C, Rabezuk T. Volumetric parametrization from a level set boundary representation with PHT-splines[J]. Computer-Aided Design, 2017, 82: 29-41.
- [139] Xu G, Kwok, T H, Wang, C C. Isogeometric computation reuse method for complex objects with topology-consistent volumetric parameterization[J]. Computer-Aided Design, 2017, 91: 1-13.
- [140] Taniguchi T, Goda T, Kasper H, et al. Hexahedral mesh generation of complex composite domain[C]. In: Proceedings of the 5th International Conference on Grid Generation in Computational Field Simulations, Mississippi State University. 1996, 699-707.
- [141] Huang J, Tong Y, Wei H, Bao H. Boundary aligned smooth 3D cross-frame field[J]. ACM Trans. Graph. 1999, 30 (6) : 143.
- [142] Li Y, Liu Y, Xu W, Wang W, Guo B. All-hex meshing using singularity-restricted field[J]. ACM Trans. Graph. 2012, 31(6) : 177.
- [143] Jiang T, Huang J, Wang Y, Tong Y, Bao H. Frame field singularity correction for automatic hexahedralization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(8) , 1189-1199.
- [144] He Y, Wang H, Fu C W, Qin H. A divide-and-conquer approach for automatic polycube map construction[J]. Comput. Graph., 2009 33(3) : 369-380.
- [145] Gregson J, Sheffer A, Zhang E. All-hex mesh generation via volumetric polycube deformation[J], Comput. Graph. Forum 30(5) , 2011.
- [146] Huang J, Tong Y, Wei H, Bao H. Boundary aligned smooth 3D cross-frame field[J]. ACM Trans. Graph., 2011. 30(6) : 143.
- [147] Livesu M, Sheffer A, Vining N, Tarini. Practical hex-mesh optimization via edge-cone rectification[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015 , 34(4) , 1-11.
- [148] Gao X, Deng Z, Chen G. Hexahedral mesh reparameterization from aligned base-complex[J]. ACM Transactions on Graphics, , 2015 , 34(4) : 142; 1-142; 10.
- [149] Huang J, Jiang T, Shi Z, Tong Y, Bao H, Desbrun M. ℓ_1 -based construction of polycube maps from complex shapes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(3) : 25: 1-25: 11.
- [150] Lai M W, Benzley S E, Sjaardema G, et al. A multiple source and target sweeping method for generating all-hexahedral finite element meshes[J]. In: Proceedings of the 5th International Meshing Roundtable, Dearborn, 1998 , 217-228.
- [151] 关振群, 顾元宪, 马正阳, 等. 基于 AutoCAD 的有限元建模系统 AutoFEM [J]. 计算力学学报, 1998, 15 (2) : 239-244.
- [152] Staten M L, Canann S A, Owen S J. BMsweep: locating interior nodes during sweeping, in: 7th International Meshing Roundtable[J], IMR, 1998, 7-18.
- [153] 有限元分析与优化设计软件系统 JIFEX V2.0 用户手册 [M]. 大连: 大连理工大学, 1999.
- [154] Staten M L, Canann S A, Owen S J. BMSWEEP: Locating interior nodes during sweeping[J]. In: Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable, Dearborn, 1998 , 7-18.
- [155] Knupp P. Next-generation sweep tool: a method for generating all-hex meshes on two- and one-half dimensional geometries[J], in: 7th International Meshing Roundtable. , 1998 , 505-513.
- [156] Wu H, Gao S, Wang R, et al. Fuzzy clustering based pseudo-swept volume decomposition for hexahedral meshing[J]. Computer-Aided Design, 2018 , 96: 42-58.
- [157] Schneiders R. A grid-based algorithm for the generation of hexahedral element meshes[J]. Engineering

- with Computers,, 1996, 12(3/4) : 168-177.
- [158] Schneiders R, Weiler F. Octree-based generation of hexahedral element meshes[J]. In: Proceedings of the 5th International Meshing Roundtable, Pittsburgh, 1996, 205-216.
- [159] Loic M. A new approach to octree- based hexahedral meshing [J]. In: Proceedings of the 10th International Meshing Roundtable, Newport Beach, 2001, 209-221.
- [160] Tautges T J, Blacker T, Mitchell S. The whisker-weaving algorithm: A connectivity based method for constructing all-hexahedral finite element meshes[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(19) : 3327 ~ 3349.
- [161] Blacker T D, Meyers R J. Seams and wedges in plastering: A 3D hexahedral mesh generation algorithm [J]. Engineering with Computers, 1993, 9(2) : 83-93.
- [162] Murdoch P, Benzley S E. The spatial twist continuum[J]. In: Proceedings of the 4th International Meshing Roundtable, Albuquerque, 199, 243-251, 5.
- [163] Liu S, Rajit G, Automatic hexahedral mesh generation by recursive convex and swept volume decomposition[J]. in: 6th International Meshing Roundtable, 1997, 347-364.
- [164] Sheffer A, Etzion M, A Rappoport, M Bercovier, Hexahedral mesh generation using the embedded Voronoi graph[J]. Eng. Comput. 1999.
- [165] Blacker T. The Cooper tool[J]. in: 5th International Meshing Roundtable, 1996, 15(3) : 248-262.
- [166] Hohmeyer M, Christopher W. Fully- automatic object-based generation of hexahedral meshes[J]. in: 4th International Meshing Roundtable, 1995.
- [167] White D, Mingwu L, Benzley S, Sjaardema G. Automated hexahedral mesh generation by virtual decomposition[J]. in: 4th International Meshing Roundtable, 1995.
- [168] Miyoshi K, Blacker T. Hexahedral mesh generation using multi-axis Cooper algorithm[J]. in: 9th International Meshing Roundtable, 2000.
- [169] Price M A, Armstrong C G. Hexahedral mesh generation by medial surface subdivision: Part I[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1995, 38(19) : 3335-3359.
- [170] Price M A, Armstrong C G. Hexahedral mesh generation by medial surface subdivision: Part II[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(1) : 111-136.
- [171] Li T S, McKeag R M, Armstrong C G. Hexahedral meshing using midpoint subdivision and integer programming[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 124: 171-193.
- [172] Lu Y, Gadh R, Tautges T J. Feature based hex meshing methodology: Feature recognition and volume decomposition[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(3) : 221 ~ 232.
- [173] Wang R, Shen C, Chen J, et al. Automated Block Decomposition of Solid Models Based on Sheet Operations ☆[J]. Procedia Engineering, 2015, 124: 109-121.
- [174] Lei N, Zheng X, Jiang J, Lin Y, Gu X. Quadrilateral and Hexahedral Mesh Generation Based on Surface Foliation Theory[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 316, 758-781.
- [175] Lei N, Zheng X, Luo Z, Gu X. Quadrilateral and Hexahedral Mesh Generation Based on Surface Foliation Theory II [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 321, 406-426.
- [176] Auricchio F, Da Veiga L B, Hughes T J R, Reali A, Sangalli G. Isogeometric collocation methods[J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2010, 20(11) : 2075-2107.

- [177] Schillinger D, Evans J A, Scott M A, Hughes T J. Isogeometric collocation: Cost comparison with galerkin methods and extension to adaptive hierarchical NURBS discretez- ations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013 , 267: 170-232,
- [178] Reali A, Hughes T J R, An Introduction to Isogeometric Collocation Methods[J], 2015 , 561: 173-204.
- [179] Auricchio F, da Veiga L B, Hughes T, Reali A, Sangalli G. Isogeometric collocation for elastostatics and explicit dynamics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engine- ering, 2012. , 249-252, 2-14.
- [180] da Veiga L, Lovadina B C, Reali A. Avoiding shear locking for the timoshenko beam problem via isogeometric collocation methods[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 241-244, 38-51.
- [181] Auricchio F, L da Veiga B, Kiendl J, Lovadina C, Reali A. Locking- free isogeometric collocation methods for spatial timoshenko rods[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013 , 263: 113-126.
- [182] Kiendl J, Auricchio F, da Veiga L Lovadina B C, Reali A. Isogeometric collocation methods for the reissner-mindlin plate problem[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 201 , 284: 489-507.
- [183] Realiand A, Gomez H. Anisogeometric collocation approach for bernoulli- euler beams and Kirchhoff plates[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015 , 284: 623-636.
- [184] De Lorenzis L, Evans J A, Hughes T J R, et al. Isogeometric collocation: Neumann boundary conditions and contact[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015 , 284: 21-54.
- [185] Lin H, Hu Q, Xiong Y. Consistency and convergence properties of the isogeometric collocation method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013 , 267: 471-486.
- [186] Anitescu C, Jia Y, Zhang Y J, Rabczuk T. An isogeometric collocation method using superconvergent points[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015 , 284: 1073-1097.
- [187] Gomezand H, Lorenzis L D. The variational collocation method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2016 , 309: 152-181.
- [188] Montardini M, Sangalli G, Tamellini L. Optimal- order isogeometric collocation at galerkin superconvergent points[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017 , 316: . 741-757.
- [189] Hughes T J R, Reali A, Sangalli G. Efficient quadrature for NURBS-based isogeometric analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010 199: 301-313.
- [190] Auricchio F, Calabro F, Hughes T J R, Reali A, Sangalli G. A simple algorithm for obtaining nearly optimal quadrature rules for NURBS- based isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012 , 249-252(1) : 15-27.
- [191] Barton M, Calo V M. Gaussian quadrature for splines via homotopy continuation: rules for C2 cubic splines[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2016 , 296: 709-723.
- [192] Barton M, Calo V M. Optimal quadrature rules for odd- degree spline spaces and their application to tensor- productbased isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016 , 305: 217-240.
- [193] Calabro F, Sangalli G, Tani M. Fast formation of isogeometric Galerkin matrices by weighted quadrature [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016.

- [194] Mantzaflaris A, Jüttler B. Integration by Interpolation and Look- Up for Galerkin- based Isogeometric Analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 284: 373-400.
- [195] Pieter J Barendrecht, Bartoň M, Kosinka J. Efficient quadrature rules for subdivision surfaces in isogeometric analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 340, 1-23.
- [196] 郭利财, 黄章进, 顾乃杰. 一种用计算域分解的等几何分析并行化方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34 (6): 1396-1399.
- [197] Guo L, Huang Z, Gu N. A Parallel NURBS-based Isogeometric Analysis Framework on Multi-core CPUs [J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(16): 6549-6600.
- [198] Karatarakis A, Karakitsos P, Papadrakakis M, GPU accelerated computation of the isogeometric analysis stiffness matrix[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, 269: 334-355.
- [199] Collier N, Pardo D, Dalcin L, Paszynski M, Calo V M. The cost of continuity: A study of the performance of isogeometric finite elements using direct solvers [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, 213-216: 353-361.
- [200] Wozniak M, Kuznik K, Paszy M, Calo V M, Pardo D. Computational cost estimates for parallel shared memory isogeometric multi-frontal solvers[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2014, 67 (10): 1864-1883.
- [201] Wozniak M, Paszy M, Pardo D, Dalcin L, Calo V M. Computational cost of isogeometric multi-frontal solvers on parallel distributed memory machines [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 284: 971-987.
- [202] Beirao L da Veiga, D Cho, Pavarino L F, Scacchi S. Overlapping Schwarz methods for Isogeometric Analysis[J]. SIAM J. Numer. Anal. 2012, 50 (3): 1394-1416.
- [203] Beirao L da Veiga, D. Cho, Pavarino L F, Scacchi S. BDDC preconditioners for isogeometric analysis [J]. Math. Models Methods Appl. Sci. 2013, 23 (6): 1099-1142.
- [204] Buffa A, Harbrecht H, Kunoth A, Sangalli G, BPX- preconditioning for isogeometric analysis [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 265: 63-70.
- [205] Collier N, Dalcin L, Pardo D, Calo V M. The Cost of Continuity: Performance of Iterative Solvers on Isogeometric Finite Elements[J]. SIAM Journal on Scientific Computing Volume, 2013, 35(2): A767-A784.
- [206] 郭利财. 通过并行计算和多重网格提升等几何分析计算效率 [D]. 中国科学技术大学, 2013.
- [207] Gahalaut K P S, Kraus J K, Tomar S K. Multigrid methods for isogeometric discretization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 253: 413-425.
- [208] Gahalaut K P S, Tomar S K. Algebraic multilevel preconditioning in isogeometric analysis: Construction and numerical studies [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 266: 40-56.
- [209] Atroshchenko E, Tomar S, Xu G, Bordas Stephane. Weakening the tight coupling between geometry and simulation in isogeometric analysis: From sub- and super- geometric analysis to Geometry- Independent Field[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering 114 (10), 1131-1159.
- [210] Thakur A, Banerjee A, Gupta S. A survey of CAD model simplification techniques for physics- based simulation applications[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(2): 65-80.
- [211] Gao S M, Shah J J. Automatic recognition of interacting machining features based on minimal condition subgraph[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(9): 727-739.

- [212] 高曙明. 自动特征识别技术综述 [J]. 计算机学报, 1998, 21 (3): 281-288.
- [213] Han J, Pratt M, Regli W C. Manufacturing feature recognition from solid models: a status report [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(6): 782-796.
- [214] Li B F, Liu J. Detail feature recognition and decomposition in solid model [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(5): 405-414.
- [215] Li M, Langbein F C, Martin R R. Constructing regularity feature trees for solid models [C]. Proceedings of the 4th International Conference on Geometric Modeling and Processing. Heidelberg: Springer 2006: 267-286.
- [216] Sakurai H, Dave P. Volume decomposition and feature recognition, Part II: curved objects [J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(6-7): 519-537.
- [217] Sandiford D, Hinduja S. Construction of feature volumes using intersection of adjacent surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(6): 455-473.
- [218] Sashikumar V, Milind S. Reconstruction of feature volumes and feature suppression [C]. Proceedings of 7th ACM Symposium Solid Modeling and Applications, New York: ACM Press, 2002: 60-71.
- [219] Sunil V, Pande S. Automatic recognition of features from freeform surface CAD models [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(4): 502-517.
- [220] Vandenbrande J. Automatic recognition of machinable features in solid Models [M]. Rochester, New York: University of Rochester, 1990.
- [221] Venkataraman S. Reconstruction of feature volumes and feature suppression [C]. Proceedings of ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. New York: ACM Press, 2002: 60-71.
- [222] Regli W. Geometric algorithms for recognition of features from solid models [M]. College Park: University of Maryland, 1995.
- [223] Waco D, Kim Y. Geometric reasoning for machining features using convex decomposition [J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(6): 477-489.
- [224] Sashikumar V, Milind S, Rahul R. Removal of blends from boundary representation models [C]. Proceedings of 7th ACM Symposium Solid Modeling and Applications, New York: ACM Press, 2002: 83-94.
- [225] 孙锐, 李明, 高曙明. 相交过渡的识别与抑制算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010: 22 (10): 1639-1646.
- [226] 孙锐, 李明, 高曙明. 基于体重构的过渡特征抑制算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17 (6): 1149-1156.
- [227] Zhu H, Menq C. B-rep model simplification by automatic fillet/round suppressing for efficient automatic feature recognition [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(2): 109-123.
- [228] Sun R, Gao S M, W Zhao. An approach to B-rep model simplification based on region suppression [J]. Computers & Graphics, 2010, 34(5): 556-564.
- [229] Liu Y J, Lai K L, Dai G, et al. A semantic feature model in concurrent engineering [J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2010, 7(3): 659-665.
- [230] Foucault G, Cuilliere J, Francois V, et al. Adaptation of CAD model topology for finite element analysis [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(2): 176-196.
- [231] Inoue K, Itoh T, Yamada A, et al. Face clustering of a large-scale CAD model for surface mesh generation [J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(3): 251-261.

- [232] Lee K, Armstrong C, Price M, et al. A small feature suppression/unsuppression system for preparing B-Rep models for analysis[J]. Proceedings of the ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. New York: ACM Press, 2005: 113-124.
- [233] Sheffer A, Blacker T, Bercovier M. Clustering: automated detail suppression using virtual topology[C]. Trends in Unstructured Mesh Generation, New York: ASME Press, 1997, 220: 57-64.
- [234] Sheffer A. Model simplification for meshing using face clustering[J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(13): 925-934.
- [235] Luebke D. A developer's survey of polygonal simplification algorithms[J]. Computer Graphics and Applications, 2001, 21(3): 24-35.
- [236] Fine L, Remondini L, Leon J. Automated generation of FEA models through idealization operators[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 49(12): 83-108.
- [237] Gao S M, Zhao W, Lin H, et al. Feature suppression based CAD mesh model simplification[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(12): 1178-1188.
- [238] Oden J, Prudhomme S. Estimation of modeling error in computational mechanics[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 182(2): 496-515.
- [239] Keller J. Removing small features from computational domains[J]. Journal of Computational Physics1994, 113(1): 148-150.
- [240] Gopalakrishnan S, Suresh K. A formal theory for estimating defeatur- induced engineering analysis errors[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(1): 60-68.
- [241] Turevsky I, Gopalakrishnan S, Suresh K. Defeaturing: A posteriori error analysis via feature sensitivity[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2008, 76(9): 1379- 1401.
- [242] Gopalakrishnan S, Suresh K. Feature sensitivity: a generalization of topological sensitivity[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44(11): 696-704.
- [243] Turevsky I, Gopalakrishnan S, Suresh K. An efficient numerical method for computing the topological sensitivity of arbitrary-shaped features in plate bending[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 79(13): 1683-1702.
- [244] Li M, Gao S M. Estimating defeatur-ing-induced engineering analysis error for arbitrary 3D features[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(12): 1587-1597.
- [245] Li M, Gao S M, Zhang K. A goal-oriented error estimator for the analysis of simplified designs[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 255(1): 89-103.
- [246] Li M, Zhang B, Martin R. Second-order defeatur-ing error estimation for multiple boundary features[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2014, 100(5): 321-346.
- [247] Li M, Gao S M, Martin R. Engineering analysis error estimation when removing finite-sized features in nonlinear elliptic problems[J]. Computer-Aided Design, 2012, 45(2): 361-372.
- [248] Ferrandes R, Marin P, Leon J, et al. A posteriori evaluation of simplification details for finite element model preparation[J]. Computers & Structures, 2009, 87(12): 73-806.
- [249] Tang Jianguo, Gao Shuming, Lin Hongwei, et al. An evaluation index for estimating defeatur-ing-induced impacts on finite element analysis[C]. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information Conference. New York: ASME Press, 2009: DETC2009-87115.

- [250] 唐建国, 高曙明, 薛宏伟. 面向 CAE 的模型简化中的误差评估与边界补偿 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22 (8): 1308-1315.
- [251] Tang J G, Gao S M, Li M. Evaluating defeaturer-induced impact on model analysis[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2013, 57(57): 413-424.
- [252] 刘晓平, 金灿, 李书杰. 有限元仿真分析软件中建模的多态机理研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (3): 538-542.
- [253] 刘晓平, 李书杰, 吴敏等. 有限元领域中多态模型误差分析方法 [J]. 软件学报, 2008, 19 (zk): 173-181.
- [254] Liu X P, Wu L, Luo Y T, et al. Study on concept & mechanism of multi-state model in scientific computing[C]. Proceedings of the 6th International Conference on CAID&CD. International Academic Publishers, 2005: 750-755.
- [255] Foucault G, Marin P, Leon J. Mechanical criteria for the preparation of finite element model [C]. Proceeding of the 13rd International Meshing Roundtable. Berlin: Springer, 2004: 413-426.
- [256] Taroco E, Buscaglia G, Feljoo R. Second-order shape sensitivity analysis for nonlinear problems[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1998, 15(2): 101-113.
- [257] Nazarov S. Asymptotic analysis of shape functional[J]. Journal de Mathematiques Pures et Appliques, 2003, 82(2): 125-196.
- [258] Amstutz S. Sensitivity analysis with respect to a local perturbation of the material property [J]. Asymptotic Analysis, 2006, 49(1-2): 87-108.
- [259] Hintermüller M, Laurain A, Novotny A. Second-order topological expansion for electrical impedance tomography[J]. Advances in Computational Mathematics, 2012, 36(2): 235-265.
- [260] Russ B, Dabbeeru M, Chorney A, et al. Suppressing features to generate simplified models for finite element analysis[C]. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information Conference. New York: ASME Press, 2011: 115-125.
- [261] Danglade F, Pernot J, Véron P. On the use of machine learning to defeature CAD models for simulation [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2014, 11(3): 358-368.
- [262] Li M, Gao S M, Martin R. Estimating effects of removing negative features on engineering analysis[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(1): 1402-1412.
- [263] 郑耀, 陈建军. 非结构网格生成: 理论、算法和应用 [J]. 科学出版社, 2016.
- [264] 徐岗, 李新, 黄章进, 吴梦, 薛宏伟. 面向等几何分析的几何计算 [J]. 计算机辅助设计与图形学, 2015 (4): 570-581.

作者简介

徐 岗 于2008年在浙江大学获得博士学位, 现为杭州电子科技大学计算机学院教授, 博士生导师。研究方向是计算机辅助设计、几何计算与等几何分析。CCF 高级会员, CCF 计算机辅助设计与图形学专委会委员。



李 新 于 2008 年在中国科学技术大学获得博士学位，现为中国科学技术大学副教授，博士生导师。研究方向是几何计算与等几何分析。CCF 会员。



雷 娜 于 2002 年在吉林大学获得博士学位，现为大连理工大学国际信息与软件学院教授，博士生导师。研究方向是计算共形几何、网格生成、计算机图形学。CCF 会员，CCF 计算机视觉专委会委员。



李 明 于 2004 年在中科院数学与系统科学学院获得博士学位，现为浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室副教授，博士生导师，研究方向是智能设计及制造、数字材料、数字样机等。



黄章进 于 2005 年在中国科学技术大学获得博士学位，现为中国科学技术大学计算机科学与技术学院副教授，研究方向是计算机图形学、GPU 计算。CCF 会员。



记忆驱动的媒体学习与创意

CCF 多媒体技术专业委员会

吴 飞¹ 韩亚洪² 廖彬兵¹ 于俊清³

¹浙江大学，杭州

²天津大学，天津

³华中科技大学，武汉

摘要

借鉴大脑的工作机理来发展人工智能是当前人工智能发展的重要方向之一。目前人们对大脑的认识尚未清晰，本文以记忆和注意力等机制为中心，介绍了这些方面的三个代表性工作，如神经图灵机、记忆网络和可微分神经计算机。在这个基础上，介绍了利用记忆网络的研究工作，分别是记忆驱动的自动问答、记忆驱动的电影视频问答和记忆驱动的创意（文本生成图像）。最后，本文展望了媒体学习与创意的未来，认为数据驱动和知识引导是人工智能未来发展的趋势之一。

关键词：记忆驱动，知识引导，媒体学习，媒体创意

Abstract

The development of artificial intelligence based on the memory mechanism of the brain is the frontier basic research. At present, the understanding of our brain is still a hard problem. This report focuses on the memory and attention mechanism of the brain. First, it introduces three representative works, namely Neural Turing Machine, Memory Networks and Differentiable Neural Computer. Then the report introduces some specific applications: knowledge memory network for question answering, memory-driven movie question answering and memory-driven creativity (text-to-image). In the end, this report shows the future work of media learning and creativity, it is considered that data-driven and knowledge-guidance via memory augmented is one of the potential development trends.

Keywords: Memory augmented; Knowledge augmented; Media learning; Media creativity

1 引言

经过百万年演化的人脑或许是世界上最复杂最精密的机器，它承载了人的所有智能活动（注意、学习、记忆、直觉、顿悟和决策等）。人脑的核心结构由百亿级神经元及百万亿级神经突触构成。每个神经元通过神经突触“接收”从其他神经元传递过来的信息，再将加以处理后的信息通过神经突触传递给其他神经元。这样，外界感官信息（视

觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉)以复杂方式在大脑中分析与处理,形成感知和认知。

“工欲善其事,必先利其器”。为了仿真大脑对外界信息的处理机制,首先要观测信息在大脑神经元和神经突触之间的“传递”。目前,光、电、磁、声等观测与调控技术为大脑观测提供了有效手段,打开了理解大脑、模拟大脑、连接大脑的大门。当前较为成熟的大脑观测方式有CT(电脑断层扫描)、MRI(磁共振成像)、PET(正电子发射计算机断层扫描)和fMRI(功能性磁共振成像)等。

记忆是大脑智能的基础。神经科学研究发现^[1],人类有瞬时记忆、工作记忆和长期记忆三种形式的记忆体,三种记忆体及其联系如图1所示。瞬时记忆用来感知外界信息,如我们“眼观六路、耳听八方”,从外界环境中不断感知信息。瞬时记忆所感知得到的信息如果没有引起注意,则这些信息就成为“耳边风”。只有那些引起注意的信息被送入工作记忆体,直觉、顿悟和推理等智能活动就基于这些数据展开。在工作记忆区域中,当前输入(通过各种感官感知)信息(即当前数据)与非当前输入信息(已存储的历史信息,如已有知识和过往经验)一起发生作用。也就是说,人脑在进行感知和认知时,不仅要对当前数据进行处理,还需要调动大脑中存储的相关信息。因此,注意力与记忆在人的认知理解过程中扮演了重要的角色,特别是对于文本、语音与视频等序列数据的知识获取和理解至关重要。

古语常言“弦外之音、画外之意”,这就是人脑在认知理解中不仅仅依赖当前数据,还通过从长期记忆中唤醒类似信息,而对当前信息做出加工和处理。可见,如果能对上述三种记忆体之间的交互和融合进行算法建模,我们就可以建立起一种“类脑计算”模式,完成智能处理任务。

《记忆碎片》这部电影描述了一位短期记忆缺失的人物。在生活中,这个人物有一个原型,该原型人物失去了记住半个小时前发生的事情的能力。科学家们一直认为,短期记忆在大脑中海马区形成与储存,长期记忆在大脑皮层长期储存。学习与记忆被认为由如下三部分组成:将事件编码进神经网络,将编码好的信息储存起来,将来回忆的时候重新调出使用。这个过程如图2所示。

由于“端到端”深度学习在识别分类等任务中表现了优异的性能,因此如何在深度学习模型中引入注意力机制和外在记忆结构,以挖掘数据中的感兴趣信息和有效利用外来信息,是当前人工智能研究的热点。

这一方面的代表性工作是针对序列数据学习的反馈神经网络(RNN)^[2]。理论上,RNN的当前状态依赖于所有前序输入与状态,也就是说RNN每个时刻可“记忆”过往

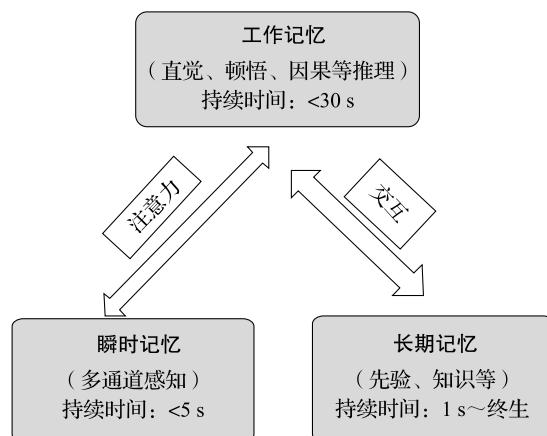


图1 瞬时记忆、工作记忆、和长期记忆
三种记忆体及联系

全部信息，但在实际使用中由于梯度消失使得 RNN 在很短的序列中就表现出“遗忘”的特性，即多步之前的状态对当前状态输出几乎没有影响。为了克服这个问题，LSTM^[3]、GRU^[4]等模型引入了“短时记忆”的概念，即当前时刻状态的输出受到其过往若干时刻状态的影响。在“短时记忆”基础上，LSTM 进一步学习序列数据中若干输入单元与某一输出之间的影响权重，使得 LSTM 具备了“注意力”机制，在机器翻译、语音识别和图文生成等领域取得了巨大成功，这一学习输入序列数据和输出序列数据之中若干单元之间相互影响的注意力机制也被称为“内在记忆”（internal memory）。

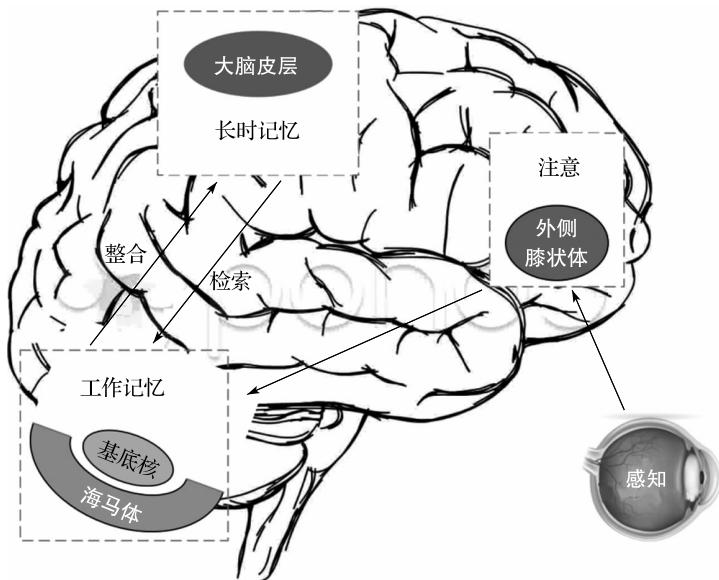


图 2 大脑皮层中长时记忆和海马体中工作记忆的示意图

如前所述，人脑在理解当前场景和环境时，有效地利用了与当前输入数据相关的信息，这些信息存储在外部记忆体（external memory）中。神经图灵机（neural turing machine）^[5]就是通过一个控制器（LSTM 实现）来对一个外部记忆库（相当于图灵机中的纸带）中的知识进行读/写操作，以有效利用已有知识和先验信息，这被称为是一种深度神经推理（deep neural reasoning）的方法。类似的工作还有记忆网络（memory networks）^[6]、自适应计算时间（adaptive computation time）、Neural GPU、Neural Random Access Machines 以及通过强化学习来训练 NTM 和堆栈、队列等形式的外在记忆体随机访问方法。

在端到端深度学习中引入注意力机制和记忆结构，可有效利用当前数据以外的数据和知识，克服了仅依赖于输入数据进行驱动学习的不足，在零样本学习等方面表现出一定的优势。为此，基于记忆驱动的手段和方法在媒体学习和创意中成了热点。

本文余下部分组织如下，第二节介绍关于记忆网络的三个经典工作：神经图灵机、记忆神经网络和可微分神经计算机。第三节将会介绍国内关于记忆网络的研究与应用。第四节将会对国内外关于记忆网络的研究进行比较。第五节将会展望基于记忆驱动的媒体学习和创意。

2 国际研究现状

国际上关于记忆网络的代表性工作有三个：神经图灵机^[5]、记忆网络^[6]和可微分神经计算机^[7]。

2.1 神经图灵机

2.1.1 引言

计算机程序主要有三种基本机制：基本操作（例如算术运算），逻辑流控制（分支）和外部存储器（可以在计算过程中写入和读取）^[8]。尽管机器学习在复杂数据建模方面取得了广泛的成功，但是它在很大程度上忽略了逻辑流控制和外部存储器的使用。

递归神经网络（RNN）^[2]能够对长期的复杂的数据进行学习和变换，使得其从其他机器学习方法中脱颖而出。此外，众所周知，RNN 是图灵完备的^[9]，因此如果将 RNN 合理搭建，它是有能力模拟任意过程的。然而，可能在实践中并不简单。因此，我们丰富了标准的 RNN 的功能以简化算法任务。这种丰富主要是通过一个大的、可寻址的存储器。图灵通过无限记忆磁带丰富有限状态机，类似地，这种设备被称为“神经图灵机”（NTM）^[5]。与图灵机不同，NTM 是一种可微分的计算机，可以通过梯度下降进行训练，是学习程序的一种实用机制。

在人类认知中，与算法操作最相似的过程被称为“工作记忆”。虽然工作记忆的机制在神经生理学上仍然有些模糊，但是工作记忆可以简单理解为短暂的存储信息及基于规则操作的能力^[10]。从计算学来说，这些规则是简单的程序，存储信息构成了这些程序的参数。因此，NTM 类似于工作内存系统，它旨在解决需要将近似规则应用于“快速创建的变量”的任务。快速创建的变量^[11]是快速绑定到内存插槽的数据，就像将数字 3 和数字 4 放在常规计算机的寄存器中并相加得到 7 一样^[12]。NTM 与工作存储器模型还有另外的相似性，因为 NTM 的架构使用注意力机制来选择性地读取和写入存储器。与大多数工作内存模型相比，我们的架构可以学习使用其工作内存，而不是在符号数据上部署固定的程序。

2.1.2 神经图灵机模型

神经图灵机（NTM）的架构包含两个基本组件：神经网络控制器和存储器组。图 3 展示了 NTM 的架构图。像大多数神经网络

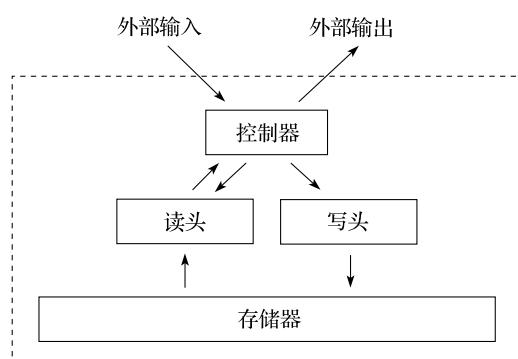


图 3 神经图灵机的架构

一样，控制器通过输入和输出向量与外部世界进行交互。但与标准网络不同的是，它还使用选择性地读写操作与存储矩阵进行交互。类比图灵机，我们将网络的输出称为“头”。

至关重要的是，该架构的每个组成部分都是可微分的，因此可以直接用梯度下降进行训练。我们通过定义“模糊”（blurry）读写操作来实现这一点，这些操作可以或多或少地与内存中的所有元素进行交互（而不是像普通的图灵机或数字计算机那样寻址单个元素）。模糊程度由注意力“焦点”机制决定，该机制使得每个读取和写入操作只与存储器的小部分交互。由于与存储器的交互非常稀疏，因此 NTM 倾向于存储数据而不受干扰。引起注意力集中的记忆位置由读写头的输出决定。这些输出定义了在存储器矩阵中行上的加权（称为存储器“位置”）。每个权重定义了磁头在每个位置读取或写入的程度。因此，读写头可以在单个位置大幅地修改存储器，或者在许多位置少量地修改存储器。

2.1.2.1 读

令 \mathbf{M}_t 为 t 时刻 $N \times M$ 存储矩阵的内容，其中 N 是存储位置的数量， M 是每个位置的矢量大小。设 \mathbf{w}_t 为 t 时刻由读头给出的 N 个位置上的权重向量。由于所有权重都是标准化的，因此 \mathbf{w}_t 的 N 个元素 $w_t(i)$ 遵循以下约束：

$$\sum_i w_t(i) = 1, 0 \leq w_t(i) \leq 1, \forall i$$

由读头返回的长度为 M 的读取向量 \mathbf{r}_t 被定义为存储器中行向量 $\mathbf{M}_t(i)$ 的凸组合：

$$\mathbf{r}_t \leftarrow \sum_i w_t(i) \mathbf{M}_t(i)$$

这说明记忆和加权是可微分的。

2.1.2.2 写

参考 LSTM 中的输入门和遗忘门，可将写入分解为两部分：擦除（erase）和添加（add）。

给定 t 时刻由写入头给出的加权 \mathbf{w}_t ，擦除向量 \mathbf{e}_t ，对上一时刻的存储器向量 $\mathbf{M}_{t-1}(i)$ 的修改如下：

$$\tilde{\mathbf{M}}_t(i) \leftarrow \mathbf{M}_{t-1}(i) [1 - \mathbf{w}_t(i) \mathbf{e}_t]$$

其中，**1** 是全为 1 的行向量，将与存储器位置的内容进行点乘。因此，只有当位置和擦除元素的权重都是 1 时，存储单元的元素才被复位为零；如果位置加权或擦除权重为零，则存储内容保持不变。由于乘法是可交换的，当存在多个写头时，可以以任意顺序进行擦除操作。

每个写头还会产生一个长度为 M 的添加向量 \mathbf{a}_t ，在执行擦除步骤后将其添加到存储器中：

$$\mathbf{M}_t(i) \leftarrow \tilde{\mathbf{M}}_t(i) + w_t(i) \mathbf{a}_t$$

同样地，多个写入头在执行添加操作时的顺序是无关紧要的。所有写头的擦除和添加操作执行完后即为 t 时刻存储器的最终内容。由于擦除和添加都是可微分的，因此复合写操作也是可微分的。值得注意的是，擦除和添加向量都有 M 个元素，允许对存储器的每

个位置的元素进行细粒度的操控。

2.1.2.3 地址机制

前面已经展示了读取和写入的等式，但还没有描述如何产生权重。这些权重通过两种寻址机制相结合而产生。第一种机制“基于内容的寻址”，将注意力集中在那些与控制器发出的值相似的位置上。这与 Hopfield 网络的内容寻址相似^[13]。基于内容的寻址的优点是检索简单，仅需要控制器产生对存储数据的一部分的近似，然后将其与存储器进行比较以产生精确的存储值。

但是，并非所有问题都适用于基于内容的寻址。在某些任务中，变量的内容是任意的，但变量仍然需要可识别的名称或地址。算术问题就属于这一类：变量 x 和变量 y 可以取任何两个值，但仍应定义函数 $f(x, y) = x \times y$ 。此任务的控制器可以获取变量 x 和 y 的值，将它们存储在不同的地址中，然后检索它们并执行乘法运算。在这种情况下，变量是按位置而不是内容来寻址的。我们将这种形式的寻址称为“基于位置的寻址”。基于内容的寻址比基于位置的寻址更为通用，因为内存位置的内容也可以包含位置信息。然而，实验发现，提供基于位置的寻址作为原始操作被证明对于某些形式的泛化是必不可少的，因此需要同时使用这两种机制。

图 4 给出了整个寻址系统的流程图，它显示了在读取或写入时构造加权向量的操作顺序。

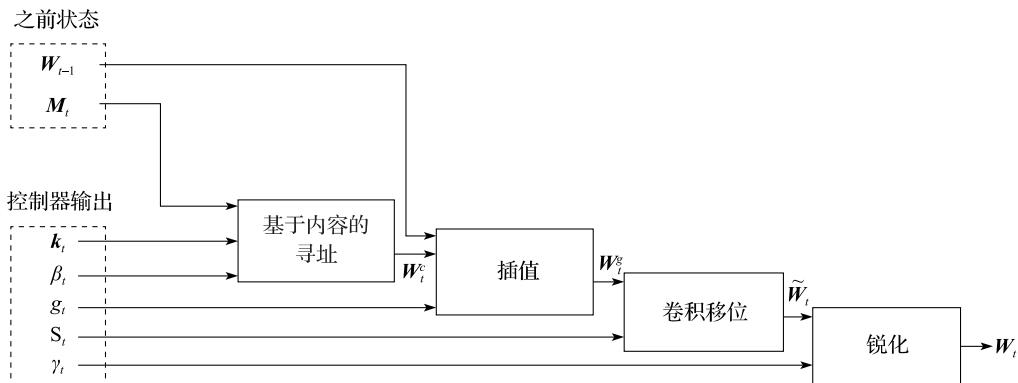


图 4 地址机制的流程图

(1) 基于内容的寻址机制

对于内容寻址，每个头（无论是用于读取还是写入）首先产生长度 M 的键向量 (key vector) \mathbf{k}_t ，其通过与每个向量 $\mathbf{M}_t(i)$ 进行相似性度量 $K[\cdot, \cdot]$ 得到。基于内容的系统基于相似性和键强度 (key strength) β_t 生成归一化加权 w_t^c ，其可以放大或衰减焦点的精度：

$$w_t^c(i) \leftarrow \frac{\exp(\beta_t K[\mathbf{k}_t, \mathbf{M}_t(i)])}{\sum_j \exp(\beta_t K[\mathbf{k}_t, \mathbf{M}_t(j)])}$$

在实现时，相似性度量采用余弦相似度：

$$K[\mathbf{u}, \mathbf{v}] = \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}{\|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{v}\|}$$

(2) 基于位置的寻址机制

基于位置的寻址机制旨在促进跨存储器位置的简单迭代和随机访问跳转。它通过对加权旋转移位来实现。例如，如果当前加权完全集中在某个位置，则旋转 1 会将焦点移动到下一个位置。负的移位会使权重向相反方向移动。

在旋转之前，每个磁头发出范围为 (0, 1) 的标量插值门 (interpolation gate) g_t 。 g 的值用于混合上个时刻由头产生的加权 \mathbf{w}_{t-1} 与在当前时刻由内容系统产生的加权 \mathbf{w}_t^c ，产生门加权 (gated weighting) \mathbf{w}_t^g ：

$$\mathbf{w}_t^g \leftarrow g_t \mathbf{w}_t^c + (1 - g_t) \mathbf{w}_{t-1}$$

如果门是零，则内容加权被完全忽略，直接使用上个时刻的加权。相反，如果门是 1，则忽略上个时刻的加权，此时采用基于内容的寻址。

插值后，每个磁头都会发出一个移位加权 (shift weighting) s_t ，它定义了整数移位上的归一化分布。例如，如果允许在 -1 和 1 之间移位，则 s_t 具有三个元素，这三个元素对应于执行 -1、0 和 1 的移位的程度。定义移位权重的最简单方法是使用关于控制器的适当大小的 softmax 层。

如果用 0 到 $N-1$ 来索引 N 个存储器的位置，则通过 s_t 作用于 \mathbf{w}_t^g 的旋转可以表示为以下的卷积：

$$\tilde{w}_t(i) \leftarrow \sum_{j=0}^{N-1} w_t^g(j) s_t(i-j)$$

其中，所有的索引计算都以 N 为模计算。如果移位权重不明显，上述等式中的卷积运算会导致权重随时间泄漏或分散。例如，如果给定 -1、0 和 1 的偏移权重为 0.1、0.8 和 0.1，则旋转将把聚焦在单个点的权重转换为在三个点上略微模糊的权重。为了解决这个问题，每个头都会发出另一个标量 $\gamma_t \geq 1$ ，它的作用是锐化最终的加权：

$$w_t(i) \leftarrow \frac{\tilde{w}_t(i)^{\gamma_t}}{\sum_j \tilde{w}_t(j)^{\gamma_t}}$$

加权内插、基于内容的寻址以及基于位置的寻址的组合寻址系统可以以三种互补模式操作。①加权可以由内容系统选择而无须修改位置系统；②可以先选择内容寻址系统产生的加权然后再进行移位；③可以在没有基于内容的寻址系统的任何输入的情况下旋转上个时刻的加权。

2.1.2.4 控制器网络

上述 NTM 架构有多个参数，包括存储器的大小，读写头的数量以及允许位移的范围。但最重要的是用作控制器的神经网络的类型，尤其是选择使用循环网络还是前馈网络。像 LSTM 这样的循环控制器有自己的内部存储器，可以补充矩阵中更大的存储器。如果将控制器与数字计算机中的中央处理单元（虽然具有自适应而非预定义指令），存储器矩阵与 RAM 进行比较，则循环控制器的隐藏激活函数类似于处理器中的寄存器。它们允许控制器混合多个时间戳中的信息。另一方面，前馈控制器可以通过在每一步中在

存储器中的相同位置读取和写入来模拟循环网络。此外，前馈控制器通常赋予网络操作更大的透明度，因为读取和写入存储器矩阵的模式通常比 RNN 的内部状态更容易解释。然而，前馈控制器的一个局限是并发读写头的数量。使用单个读头，它可以在每个时间戳上对单个存储器向量仅执行一元变换，使用两个读头可以执行二元向量变换，以此类推。循环控制器可以在内部存储上个时刻的读向量，因此不受此限制。

2.2 记忆网络

2.2.1 引言

大多数机器学习模型缺乏一种简单的方法来读取和写入部分（可能是非常大的）长期记忆组件，并将其与推理无缝地结合在一起。因此，它们没有利用现代计算机的存储这一巨大优势。例如，考虑被告知一组事实或故事的任务，然后必须回答有关该主题的问题。原则上，这可以通过诸如递归神经网络（RNN）^[3,14]之类语言模型来实现，因为这些模型被训练来在读完一串文字后预测下一个（一组）单词。然而，它们的记忆（由隐藏状态和权重编码）通常太小，不足以划分以准确记住过去的事（知识在其中被压缩成稠密向量）。众所周知，RNN 难以执行记忆，例如输出与他们刚读过的相同的输入序列的简单复制任务^[15]。对于其他任务，情况类似，例如，在视觉和音频领域中，观看电影并回答关于它的问题需要长期记忆。

2.2.2 记忆网络

记忆网络由存储器 \mathbf{m} 和 4 个（可能需要学习）组件 I 、 G 、 O 和 R 组成，如下所示：

- I : (输入特征图)：将输入转换为内部特征表示。
- G : (概括 generalization)：在给定新输入的情况下更新旧存储器。我们将这种方式称之为概括，因为网络在此阶段有机会压缩和概括其存储器以用于未来用途。
- O : (输出特征图)：在给定新输入和当前存储器状态的情况下，产生新输出（在特征表示空间中）。
- R : (响应)：将输出转换为所需的响应格式。例如，文本或动作。

给定输入 x （例如字符、单词、句子、图像或音频信号），模型的流程如下：

- 1) 将 x 转换为内部特征表示 $I(x)$ 。
- 2) 有新输入时更新存储器： $\mathbf{m}_i = G(\mathbf{m}_i, I(x), \mathbf{m}), \forall i$ 。
- 3) 给定新输入和存储器时，计算输出特征： $\mathbf{o} = O(I(x), \mathbf{m})$ 。
- 4) 最后，解码输出特征 \mathbf{o} 以给出最终响应： $r = R(\mathbf{o})$ 。

这个过程在训练和测试的时候都会用到。记忆网络涵盖了一大类可能的实现。组件 I 、 G 、 O 和 R 可以使用现有机器学习文献中的任何想法，例如 SVM、决策树等。

I 组件：组件 I 可以使用标准预处理，例如，文本输入的解析和实体解析。它还可以将输入编码为内部特征表示，例如，将文本转换为稀疏或稠密特征向量。

G 组件： G 的最简单形式是将 $I(x)$ 存储在存储器中的“槽”（slot）中：

$$\mathbf{m}_{H(x)} = I(x)$$

其中， $H(\cdot)$ 是选择槽的函数。也就是说， G 更新 \mathbf{m} 的索引 $H(x)$ ，但存储器的其他部分保持不变。 G 的更复杂的变体可以返回并基于当前输入 x 更新先前存储的记忆。如果输入是字符或字级别，则可以对输入进行分块操作并将每个块存储在存储器槽中。

如果存储器很大（例如所有的 Freebase 或 Wikipedia），则需要对存储器进行组织。这可以通过刚刚描述的插槽选择函数 H 来实现：例如，可以设计或训练它以按实体或主题的方式存储记忆。因此，为了效率， G （和 O ）不需要对所有存储器进行操作：它们只能对检索到的候选子集进行操作。

如果存储器变满，则“忘记”的过程也可以由 H 实现，因为它选择替换哪块存储器，例如， H 可以对每个存储器的使用进行评分，并且会覆盖掉最没用的记忆。

O 和 R 组件： O 组件通常负责从记忆读取和执行推断，然后 R 组件负责在给定 O 的情况下产生最终的响应。例如，在问答设置中， O 负责找到相关的存储记忆，然后 R 产生答案的实际措辞，例如 R 可以是以 O 的输出为条件的 RNN。

2.2.3 记忆神经网络的实现

在我们的基本架构中， I 模块采用文本作为输入。首先假设这是一个句子：要么是事实的陈述，要么是系统要回答的问题。文本以其原始格式存储在下一个可用存储器插槽中。因此， G 模块仅用于存储此新记忆，所以旧记忆不会更新。

推理的核心在于 O 和 R 模块。给定 x 的情况下， O 模块通过寻找 k 个支持记忆（supporting memory）来产生输出特征。这里 k 最多为 2，但可推广到更大的 k 。对于 $k=1$ ，使用以下方法检索到得分最高的支持记忆：

$$o_1 = O_1(x, \mathbf{m}) = \arg \max_{i=1, \dots, N} s_o(x, \mathbf{m}_i)$$

其中， s_o 是对句子 x 和 \mathbf{m}_i 的匹配程度进行评分的函数。对于 $k=2$ 的情况，在给出第一个支持记忆后可通过以下方式找到第二个支持记忆：

$$o_2 = O_2(x, \mathbf{m}) = \arg \max_{i=1, \dots, N} s_o([x, \mathbf{m}_{o_1}], \mathbf{m}_i)$$

其中，候选记忆 \mathbf{m}_i 的得分不仅取决于原始输入，还取决于第一个支持记忆的得分，其中方括号表示列表。最终输出 o 为 $[x, \mathbf{m}_{o_1}, \mathbf{m}_{o_2}]$ ，将会输入到模块 R 。

最后， R 需要产生一个文本响应 r 。最简单的回答是返回 \mathbf{m}_{o_k} ，即输出我们检索到的先前发出的句子。为了生成真正的句子，可以改为使用 RNN。

Joe went to the kitchen. Fred went to the kitchen. Joe picked up the milk.
 Joe travelled to the office. Joe left the milk. Joe went to the bathroom.
 Where is the milk now? A: office
 Where is Joe? A: bathroom
 Where was Joe before the office? A: kitchen

图 5 通过简单模拟生成的“故事”语句，问题和答案的示例

图 5 中给出了一个示例任务。为了回答问题 $x = “现在牛奶在哪里?”$ ， O 模块首先根

据 x 对所有记忆（即所有先前看到的句子）打分以检索出最相关的事，在这种情况下， \mathbf{m}_{o_1} = “乔离开了牛奶”。然后，它将再次检索记忆以找到给定的 $[x, \mathbf{m}_{o_1}]$ 时，第二个相关的事，即 \mathbf{m}_{o_2} = “乔前往办公室”（乔离开牛奶去之前的最后一个地方）。最后，R 模块在给定 $[x, \mathbf{m}_{o_1}, \mathbf{m}_{o_2}]$ 的条件下将对单词打分以输出 r = “office”。

2.2.4 记忆网络的训练

记忆网络采用监督学习进行训练，可获取输入和响应。也就是说，在训练期间，知道上述 o_1 和 o_2 方程式中两个最大函数的最佳选择。然后采用随机梯度下降（SGD）进行训练。具体而言，对于给定问题 x ，真实响应 r 和支持句子 \mathbf{m}_{o_1} 和 \mathbf{m}_{o_2} （当 $k=2$ 时），最小化模型参数 U_o 和 U_R ：

$$\begin{aligned} & \sum_{\bar{f} \neq \mathbf{m}_{o_1}} \max(0, \gamma - s_o(x, \mathbf{m}_{o_1}) + s_o(x, \bar{f})) \\ & + \sum_{\bar{f}' \neq \mathbf{m}_{o_2}} \max(0, \gamma - s_o([x, \mathbf{m}_{o_1}], \mathbf{m}_{o_1}) + s_o([x, \mathbf{m}_{o_1}], \bar{f}')) \\ & + \sum_{\bar{r} \neq r} \max(0, \gamma - s_R([x, \mathbf{m}_{o_1}, \mathbf{m}_{o_2}], r) + s_R([x, \mathbf{m}_{o_1}, \mathbf{m}_{o_2}], \bar{r})) \end{aligned}$$

其中， \bar{f} 、 \bar{f}' 和 \bar{r} 是除正确标签之外的所有其他选择， γ 是边界（margin）。在 SGD 的每一步，对 \bar{f} 、 \bar{f}' 和 \bar{r} 进行采样，而不是计算所有的训练样例^[16]。

在 R 组件使用 RNN（而不是如上所述使用单个单词响应）的情况下，可将最后一项替换为语言建模任务中使用的标准对数，其中序列 $[x, o_1, o_2, r]$ 被送入到 RNN 中。在测试时，给定 $[x, o_1, o_2]$ 的预测 r 。

2.3 可微分神经计算机

现代计算机将计算和存储分开。计算由处理器执行，处理器可以使用可寻址存储器来使操作数进出。这带来了两个好处：可使用可扩展存储来填写新信息以及可将存储内容视为变量。变量对于算法的通用性至关重要：要在一个数据和另一个数据上执行相同的程序，算法只需要更改它从中读取的地址即可。与计算机相比，人工神经网络的计算和存储资源在网络权重和神经元活动中是混合在一起的。这有一个问题：随着任务的存储需求的增加，这些网络既无法动态分配新的存储空间，也不能学习独立于任务变量值的算法。

最近的研究表明神经网络擅长于感知处理^[17]、序列学习^[18-19]和强化学习，然而认知科学家和神经科学家认为神经网络在表示变量和数据结构的能力方面受到限制，也不能没有干扰的存储长时间尺度的数据^[20-21]。可微分神经计算机（DNC^[7]）旨在通过提供具有对外部存储器的读写访问的神经网络来结合神经网络和计算处理的优点。这种对外部存储器的访问是聚焦于某个狭窄的区域的，以最大限度地减少各存储器之间的干扰，并实现长期存储^[22-23]。整个系统是可微分的，因此可以通过梯度下降进行端到端的训练，使网络能够以目标导向的方式学习如何操作和组织记忆。

2.3.1 系统概览

DNC 是一个拥有外部存储器矩阵的神经网络。如果存储器可以被认为是 DNC 的 RAM，那么网络则称之为“控制器”，它是一个可微分的 CPU，其操作是通过梯度下降来学习的。DNC 架构与最近的神经存储器架构^[6,24]的不同之处在于，存储器可以被选择性地写入和读取，也允许存储器内容的迭代修改。早期形式的 DNC，如神经图灵机^[5]，具有类似的结构，但它的存储器访问方法更有限。

传统计算机使用唯一地址来访问存储器内容，而 DNC 使用可微分注意机制^[5,25-26]来定义 $N \times W$ ，表示在存储矩阵 M 中 N 行（“位置”）上的分布。这些分布称之为权重，表示每个位置参与读取或写入操作的程度。由读取加权 w^r 在存储器 M 上返回的读取向量 r 是存储器位置上的加权和： $r = \sum_{i=1}^N M[i, \cdot] w^r[i]$ ，其中 “·” 表示所有的 $j = 1, 2, \dots$ 。类似地，写入操作使用写入加权 w^w ，它首先用擦除向量 e 擦除，然后再添加写入向量 v ： $M[i, j] \leftarrow M[i, j] (1 - w^w[i] e[j]) + w^w[i] v[j]$ 。决定和使用权重的功能单元称为读写头。读写头的操作如图 6 所示。

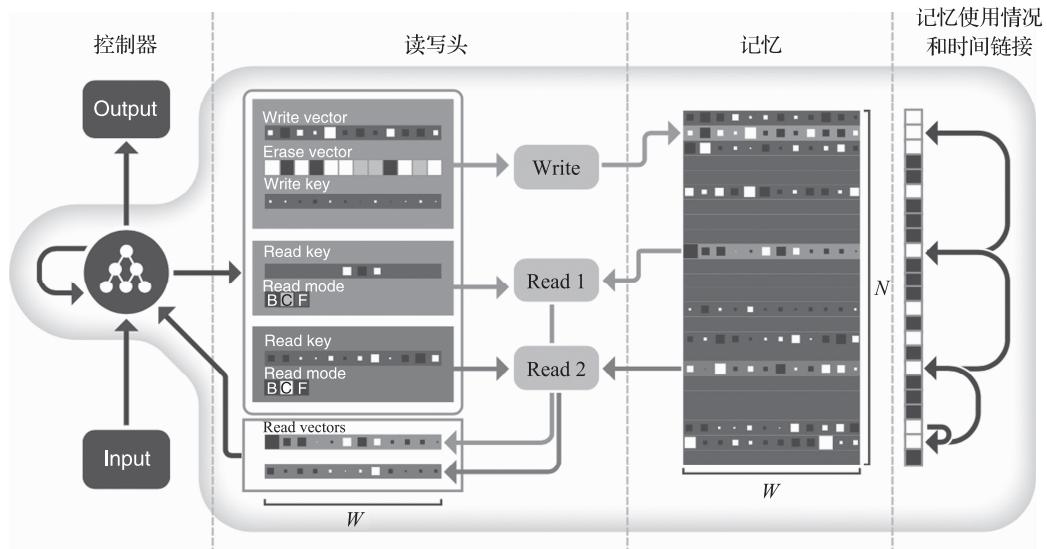


图 6 可微分神经计算机的架构

2.3.2 读写头与存储器的交互

读写头使用三种不同形式的可微分注意力机制。第一种是内容查找 (content lookup)^[5, 25, 27-28-29]，将控制器发出的键向量根据相似性度量（如余弦相似度）与存储器中的每个位置的内容进行比较。相似性得分可让读取头用于关联召回 (associate recall)^[27] 或让写入头用于修改存储器中的现有向量的权重。值得注意的是，即使只能匹配部分内存位置内容仍可大幅度地参与该位置的读取或写入。这实现了一种模式补全 (pattern completion) 形式，其中通过读取存储器位置而得到的值也可以包括键向量中不

存在的附加信息。通常来说，键值检索提供了用于在外部存储器中检索关联数据结构的丰富机制，因为一个地址的内容可以有效地对其他地址的引用进行编码。

第二种注意力机制记录了在 $N \times N$ 的时间链路矩阵 L 中的连续写入位置之间的转换。如果 i 是在 j 之后写入的下一个位置，则 $L[i, j]$ 接近于 1，否则接近于 0。对于任意的加权 \mathbf{w} ，操作 $L\mathbf{w}$ 平滑地将焦点向前移动到那些在 \mathbf{w} 中强调之后写入的位置，而 $L^T\mathbf{w}$ 向后移动焦点。这使得 DNC 具有按照写入顺序恢复序列的天赋（native ability），即使这些写入不是在相邻的时间戳中。

第三种注意力机制用于给写入操作分配存储空间。每个位置的“使用程度”表示为 0 到 1 之间的数字，并且选取未使用位置的权重传递给写入头。每次写入位置时使用程度会自动增加，每次读取后会自动减少。这允许控制器重新分配不再需要的存储器。分配机制独立于存储器的大小和内容，这意味着可以训练 DNC 以某种尺寸的存储器来解决任务，并且稍后在无须重新训练的情况下升级到更大的存储器。原则上，这可以通过当任何位置的最小使用量超过某个阈值时自动增加该位置的数量来使用无限的外部存储器。

注意力机制的设计主要是出于计算的考虑。内容查找可以形成关联数据结构；时间链接使得能够顺序检索输入序列；注意力分配为写入头提供未使用的位置。然而，DNC 的记忆机制与哺乳动物海马体的功能之间存在有趣的相似之处。DNC 的存储可以做到快速修改且可以是一次性的（one-shot），类似于海马 CA3 和 CA1 突触的长期增强^[30]。海马齿状回是一个产生神经的区域^[31]，被用来增加稀疏性，从而增加存储器容量^[32]：基于使用程序的存储器分配和稀疏权重可以在我们的模型中提供类似的机制。人类“自由回忆”实验表明回忆的概率与首次呈现的顺序相同，这是一种由时间上下文模型^[33]引起的海马依赖现象，与时间链接的形成有一些相似性。

3 国内研究进展

3.1 外在记忆驱动下的自动问答

3.1.1 引言

问答系统是一个允许用户发布问题和解决问题的平台。问答系统的好处已在^[34-35]中得到充分认可。一些问答网站在现实世界中变得越来越流行，并且随着时间的推移已经积累了大量的问题与答案。凭借着大量的问答数据，问答系统已成为一个活跃的研究领域，并在信息检索和自然语言处理（NLP）领域引起了广泛的关注^[36]。在各种问答研究中，仿真问答（FQA）是最广泛研究的任务之一^[37]。

对于给定的一段描述性语句，仿真型问答旨在提取实体答案。单句问题^[38-39]是 FQA

中最常见的形式。例如：“世界上最大的大陆是什么？”。另一方面，还有另一种形式的FQA，其问题是描述某个实体的描述性段落。这种FQA的一个典型例子叫作Quiz Bowl。Quiz Bowl^[40-41]问题由一系列有序句子组成，这些句子从不同角度描述了答案的方方面面。它有一个名为“金字塔”的属性，意味着先前描述问题的句子包含更隐蔽的线索，而之后的句子会给出较为具体的信息。图7展示了一个Quiz Bowl问题及其相应答案的示例。具有相同颜色的单词与答案具有相同的指示性提示（例如，Notre Dame du Haut和Villa Savoye是Le Corbusier使用钢筋混凝土框架设计的两座建筑。）。这个问题包含六个有序句子。前面的句子包含的答案信息较少，后面的句子提供了更有用的线索来揭示答案。

No.	Question Description
1.	This architect is one of the first designer to use reinforced concrete.
2.	This man argued that architecture has historically been dominated by the influence of “regulating lines”.
3.	Pilotis, roof gardens and long horizontal sliding windows are included in this architect’s Five Points of Architecture introduced in his book, Towards a New Architecture.
4.	He connected one of his buildings with the wings of a dove and included irregularly spaced rectangular openings within its two-feet thick walls.
5.	This city planner of Chandigarh, India used columns called pilotis to raise many of his buildings above the ground.
6.	For 10 points, name this Swiss-French designer of the Notre Dame du Haut and the Villa Savoye.
Answer	Le Corbusier

图7 Quiz Bowl中一个描述建筑师“勒柯布西耶”的例子。这些句子包含有关答案不同方面的线索。前面的句子对答案的提示较少，但是后面的句子提供了更有用的线索用于获取答案

现有方法倾向于将Quiz Bowl问题视为文本分类任务。文献[40]在词袋模型的基础上，使用Naive-Bayes模型进行答案识别。为了完全理解每个句子的语义，文献[41]使用依赖树递归神经网络(DT-RNN)来利用句子编码中的依赖信息。文献[42]引入了堆叠卷积神经网络(CNN)，以学习原始文本的句子表示和段落表示，并将这些特征映射到相应的答案中。在文献[43]中，作者提出了一个深度平均网络(DAN)来学习描述段落与其答案之间的相关性。

3.1.2 时序增强知识存储网络

上述方法仅侧重于利用单个句子与其对应答案之间的语义相关性，通过构建更好的语义空间以完成Quiz Bowl数据的语义分类任务。然而社会学和生物学的研究表明^[44-45]，决策的形成通常受到信息流中不同时间节点下不同信息的综合影响。在Quiz Bowl竞赛中，当给出一系列有序的句子时，答案的线索会逐渐给出。因此，最好利用句子的时序相关性来识别答案。除此之外，人类在阅读时，会联想到有相关性的辅助信息。在大多数情况下，当我们接收到问题后，都会通过检索自身已有知识，给出正确答案^[46-47]。因此，文献[48]推测问题语句之间的时序相关性和外部知识是有助于提升Quiz Bowl回

答准确率的两个因素，而利用这两个因素提升问答效果对本任务也是极具意义的。

基于以上的假设，文献 [48] 感兴趣的是如何有效地利用有序句子中的时序相关性和外部辅助知识以提高 Quiz Bowl 的回答表现。具体来说，文献 [48] 设计了一种名为时序增强知识存储网络（Temporality Enhanced Knowledge Memory Network, TE-KMN）的新型网络架构。这种端到端架构引入了一种基于注意力的时序模型，它是门控循环单元（GRU）^[4]的扩展，用于捕获有序语句的时序相关性。同时，利用每个描述句之外的辅助知识，增强对每句话的理解。

图 8 是文献 [48] 提出的时序增强知识存储网络（TE-KMN）结构图，其中，(a) 左下角是训练数据。对于每个答案，有几个有序的描述性句子从不同方面逐渐揭示一个答案。靠前的句子包含较少与答案相关的线索，而后序语句则包含较多相关的线索。左上角是一个知识存储器，由外部辅助知识组成，这里的知识主要来自维基百科。(b) 给出答案，假设总共有 T 个有序句子从不同方面描述答案（即 s_1, s_2, \dots, s_T ）。每个句子 s_i 都被编码为向量 x_i 。每个句子的隐向量 $h_i (1 \leq i \leq t-1)$ 将影响隐向量 h_t 的学习。隐向量 h_t 之后被传送到知识存储网络，并将与句子 s_t 相关的外部辅助知识做进一步推理。(c) 更新 T-GRU 的注意力机制。右上角是更新前的 T-GRU。右下角是同一个 T-GRU， h_1, h_2, \dots, h_{t-1} 是读取前面句子的 T-GRU 的隐藏输出。红色和绿色实心圆圈分别代表更新前后的 α 值。

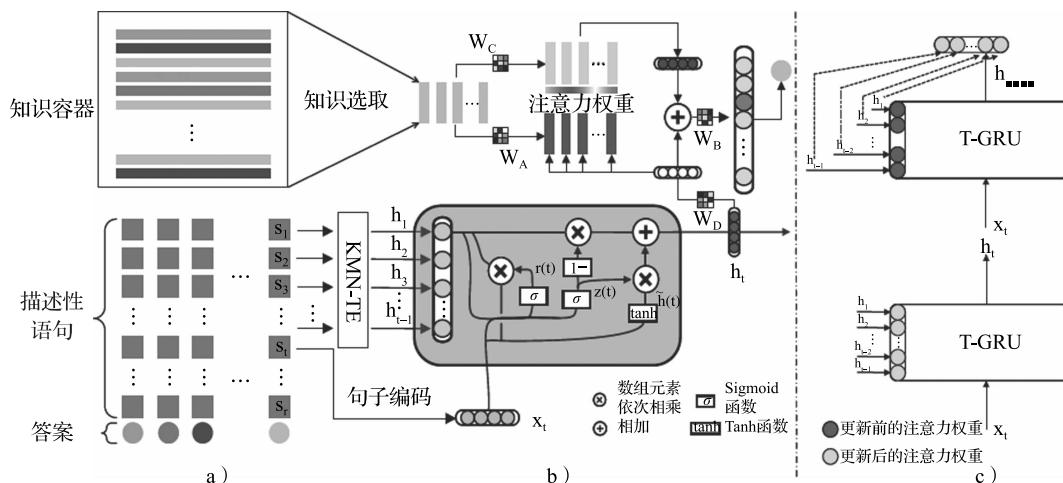


图 8 时序增强知识存储网络（TE-KMN）结构图

在 NAQT 数据集的实验结果表明，TE-KMN 优于其他最先进的方法，证明了有序语句的时序相关性和外部辅助知识有助于提高问答模型的性能。

3.2 基于层叠记忆网络的电影视频问答

3.2.1 引言

建立视觉理解和人机交互之间的联系是人工智能领域的一项具有挑战的任务。尽管

视觉自动描述^[49-50-51-52]在建立视觉内容与自然语言连接上取得了一定进展，但它通常用于描述视觉内容的粗略语义信息，缺少对不同视觉线索之间的建模以及推理的能力。而视觉问题回答（VQA）^[53-54-55]能够依赖全面的场景理解，对不同层次的视觉内容进行推理以找到正确的答案。

人脑在应对和 VQA 类似的认知任务时，不仅需要对当前接收到的信息进行处理，还需要根据接收到的信息对大脑中存储的知识进行检索和推理。因此注意力机制和记忆在认知理解的过程中有很重要的作用。目前 VQA 任务中常见的方法是通过卷积神经网络（CNN）和递归神经网络（RNN）^[53]在同一特征空间下学习图像和问题特征组合的表示。为了准确地关联特定的语言信息与特定的视觉内容，同时根据问题对已有的视觉内容进行推理，注意力机制^[55]或动态记忆^[54]被提出来用于提高 VQA 的性能。

视频可以被看作是图片在时间和空间上的拓展，因此视频理解任务，需要模型不仅能够编码每一帧的信息而且需要编码连续视频帧之间的时序性依赖关系。和一般视频相比，大多数电影具有特定的背景（例如动作电影和战争电影）以及拍摄风格。因此，仅通过视觉内容来理解电影的故事是一项具有挑战性的任务。另一方面，电影通常包含由演员之间对话组成的字幕信息，这部分信息能够为更好的理解电影内容提供帮助。针对视频理解等认知任务，虽然 LSTM 能够编码具有时序依赖性的时序信息同时具有一定的记忆能力，但是 LSTM 的记忆能力有限并且不具备推理能力。为了提高模型的记忆能力并体现推理过程，NTM^[55]通过一个控制器（LSTM）来对一个外部记忆库（相当于图灵机中的纸带）中的知识进行读/写操作，以有效利用已有知识和先验信息，类似的工作还有 Memory Networks^[6]。

文献 [56] 探究了如何利用电影片段的视觉信息以及电影字幕进行电影问题回答任务。其提出的层叠记忆网络（LMN）分别通过静态单词记忆模块和动态字幕记忆模块来存储单词和电影字幕信息，同时通过这两个模块学习电影视觉内容的分层表示，即帧级和片段级。静态单词模块包含 MovieQA 数据集^[57]中的所有单词信息，而动态字幕记忆模块包含所有字幕信息。方法框架如图 9 所示，通过用静态单词模块中存储的单词信息表

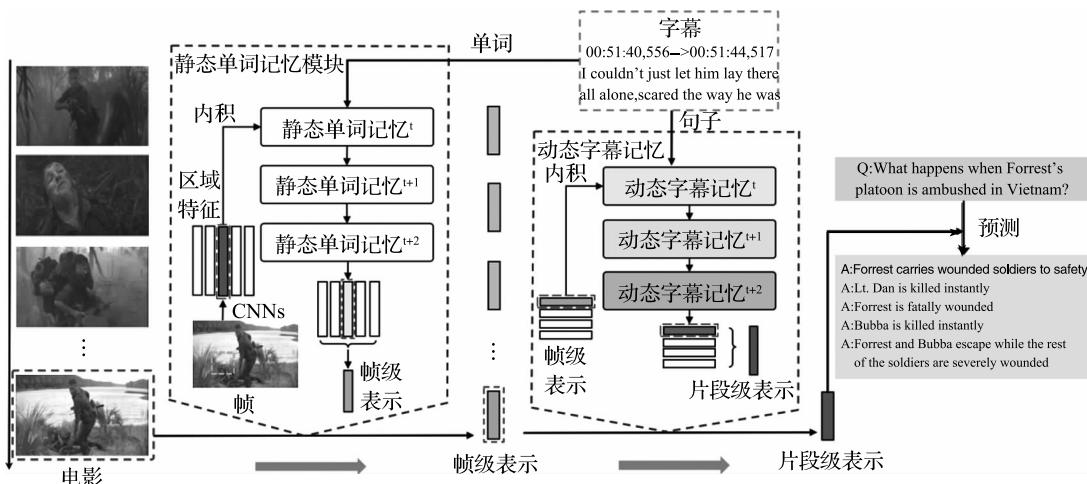


图 9 LMN 模型的框架。首先通过静态单词记忆模块得到区域和帧级的表示。然后将帧级的表示输入到动态字幕记忆模块中得到最后的片段级表示，并用来回答问题

示每个电影视觉帧的区域特征并得到帧级表示。其次，生成的帧级表示输入到动态字幕记忆模块并得到最终的电影片段级表示。因此，分级形成的电影表示不仅对每一帧内视觉内容和单词之间的对应关系进行编码，而且还对电影片段内的字幕和帧之间的时间对应关系进行编码。

层叠记忆网络（LMN）能够同时利用视觉内容以及字幕内容进行电影问答任务。LMN 的输入是逐帧特征图序列 $\{I_1, I_2, \dots, I_T\}$ ，输出是 LMN 预测的正确答案。后续小节将介绍 LMN 如何通过静态单词记忆和动态字幕记忆表示帧级和片段级的视觉内容。

3.2.2 用静态单词记忆模块表示电影视频帧

该模块的主要目标是通过静态单词记忆模块得到电影片段帧中特定区域的语义表示。该模块如图 10 所示有一个静态单词记忆模块 $W_e \in i^{|V| \times d}$ ，它可以被看作是一个单词数量为 $|V|$ 的将单词映射为 d 维连续向量的单词嵌入矩阵。静态单词记忆模块可以通过 skip-gram 模型学习^[58]。 $\{I_1, I_2, \dots, I_T\}$ 是从 CNN 的卷积层中提取的逐帧特征图序列，特征图序列中每一项的形状为 $C \times H \times W$ ，其中 C 、 H 、 W 分别表示通道，特征图的高和宽。因此能够得到 $H \times W$ 大小的区域特征 $\{l_{ij} \in i^C\}$ 其中 $i \in \{1, 2, \dots, T\}$, $j \in \{1, 2, \dots, H \times W\}$ 。与直接将区域特征映射到公共空间的联合嵌入方法不同，文献 [56] 通过静态单词记忆表示区域特征。首先通过映射 $W_l \in i^{d \times C}$, $v_{ij} = W_l l_{ij}$ 将区域特征映射到单词空间，其中 v_{ij} 表示第 i 个电影片段帧的第 j 个映射后的区域特征。接下来利用内积计算映射后的区域特征与静态单词记忆中单词特征的相似度。计算过程如下：

$$\alpha_{ijk} = v_{ij}^T w_k \quad (1)$$

其中， w_k 表示静态单词记忆 W_e 中的第 k 行向量。 v_{ij} 和 w_k 都先进行了归一化操作，因此 α_{ijk} 等价于 cosine 相似度。接下来区域特征 v_{ij} 可以用记忆当中所有单词向量的加权和表示：

$$v_{ij} := \sum_{k=1}^{|V|} \alpha_{ijk} w_k \quad (2)$$

其中， $|V|$ 代表静态单词记忆的大小。符号 $:=$ 表示“更新”操作。因此帧级的表示可以通过下面的公式计算：

$$v_i = \sum_{j=1}^{H \times W} v_{ij} \quad (3)$$

因为每个区域特征是所有单词向量的加权和， v_i 可以看作第 i 个电影帧的语义表示。这个过程和图片区域上的注意力机制相似。但是该模型建立了记忆中的单词与每一个区域特征之间的联系。

文献 [56] 提出的静态单词记忆有两个特点：①静态单词记忆可以看作一个单词嵌

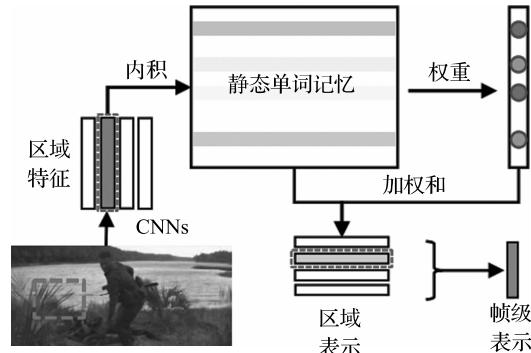


图 10 词记忆模块的框架图

入矩阵，我们可以利用记忆将单词映射为连续向量；②静态单词记忆可以用于表示电影帧中的区域特征。

3.2.3 用动态字幕记忆模块表示电影片段

该模块的主要目的是通过动态字幕记忆得到电影片段中特定帧的语义表示。因为电影不仅包含视觉内容还包含字幕信息，因此文献 [56] 提出了用动态字幕记忆模块来表示带有电影字幕的电影片段。如图 11 所示，假设电影视频帧已被表示为公式 (3) 的输出 v_i 。然后，通过静态单词记忆得到字幕的表示 $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ，同时将 $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 作为动态字幕记忆。动态字幕记忆的表示过程如下：

$$\beta_i^n = v_i^T s_n \quad (4)$$

$$v_i := \sum_{n=1}^N \beta_i^n s_n \quad (5)$$

$$v = \sum_{i=1}^T v_i \quad (6)$$

其中， β_i^n 表示第 n 个字幕和第 i 帧之间的相似度。公式 (5) 表示第 i 帧被所有字幕表示的加权和替代。电影片段级的表示 v 能够通过所有帧级表示 $\{v_i\}$ 的加权和得到。

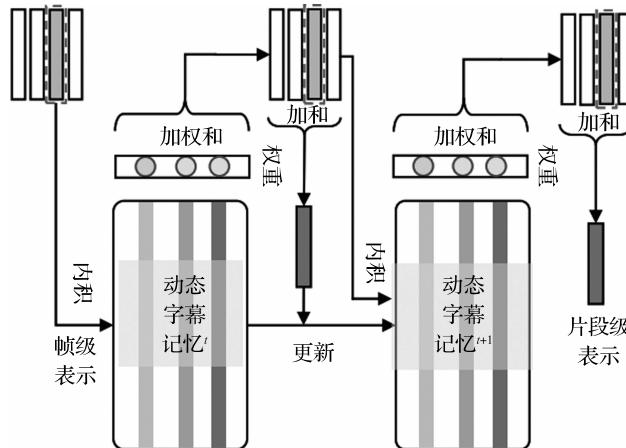


图 11 动态字幕记忆模块的框架图

当在电影问答任务中只使用视频信息而不使用字幕信息时公式 (6) 中的帧级的表示 $\{v_i\}$ 是公式 (3) 的输出。这样片段级的表示从单词空间转换到字幕句子空间，然后用文献 [17] 中提到的方法进行电影问答任务：

$$a = \text{softmax}((v + u)^T g) \quad (7)$$

其中， u 表示问题向量， $g = \{g_1, g_2, \dots, g_5\}$ 和 g_h 分别表示问题中的所有答案和第 h 个答案。问题和答案的表示都是通过静态单词记忆 W_e 嵌入得到的。需要注意的是静态单词记忆在表示电影视频帧的区域特征、句子中的单词时是共享的。每个电影的字幕记忆都不相同。因此单词记忆是静态的，字幕记忆是动态的。同时上面所提到的静态单词记

忆和动态字幕记忆都只有一个记忆层。

总的来说，层叠记忆网络^[56]具有以下优点：1) 分别用静态单词记忆和动态字幕记忆得到区域特征和帧级特征，而不是学习联合嵌入矩阵。分层的帧级和片段级表示包含更丰富的语义信息，并在电影问答中获得良好的性能。2) 通过利用准确的单词和字幕信息表示每一个区域和帧级的特征，在回答问题的过程中该模型能够支持精确的推理。

3.3 外在记忆驱动下的创意：文本生成图像

3.3.1 引言

根据自然语言描述生成真实图像（text-to-image）是一项活跃的研究任务。该技术适用于许多实际应用，如图像编辑、原型和游戏设计。基于生成对抗网络（GAN）^[59]的模型已经在CUB和Oxford Flower^[60]等单类别单物体数据集上取得了非常有前景的结果。然而，现有的方法在像MSCOCO^[61]这样的复杂数据集上取得的效果非常有限，在这些数据中，通常一个图像会包含不同的对象，并且对象很少处于图像正中^[62-63]的位置。为了生成复杂的场景，现有的方法试图利用词级注意力细粒度模型^[64]，建立层次化的文本到图像的映射^[65]，以及通过额外的对话增强文本描述^[66]。然而，使用辅助视觉知识进行的工作还很少。根据人的作画过程，现实世界的场景或一些参考可以帮助作画者快速学习并提高作画质量。也就是说，一位成熟的作画者通常会在他/她的绘画中找到和使用额外的相关视觉线索。

基于这些直觉，文献[67]使用图像子块作为视觉提示来增强文本到图像的生成。具体来说，文献[67]使用候选区域网络（Region Proposal Network, RPN）^[68]提取的候选块（proposal）作为存储在外部视觉知识存储器中的视觉线索。候选块特征向量可以被视为有意义的图像子块的视觉概要，尤其是那些包含实际物体概率最高的图像子块。RPN提取的候选块（即视觉线索）具有许多视觉细节，例如纹理、形状、颜色、物体大小等，它们可以被文本激活，并和文本描述一起合成最终的图像。

在文献[67]中，给定一个文本句子和外部视觉记忆，其首先利用多模态编码器将文本句子编码成多模态隐藏向量。多模态编码器类似于文献[29]提出的记忆网络模型。然而，文献[67]使用词嵌入而不是词袋表示。其主要贡献如下：提出了一个名为视觉记忆创意对抗网络（vmCAN）的模型，通过适当整合外部视觉记忆，以生成复杂的真实世界图像。vmCAN采用多模态编码器将视觉线索和文本描述编码为多模态隐藏向量。在MSCOCO数据集上的实验表明，该方法的Inception Score比基线提高了17.6%。

3.3.2 视觉线索抽取

Region Proposal Network由文献[68]提出，通过对锚点区域框进行排名和优化，以生成最有可能包含对象的候选块。如图12所示在RPN之后，ROI池化（region of interest pooling）用于将不同大小的CNN特征图标准化为相同大小。ROI池化的输出将作为视觉线索。

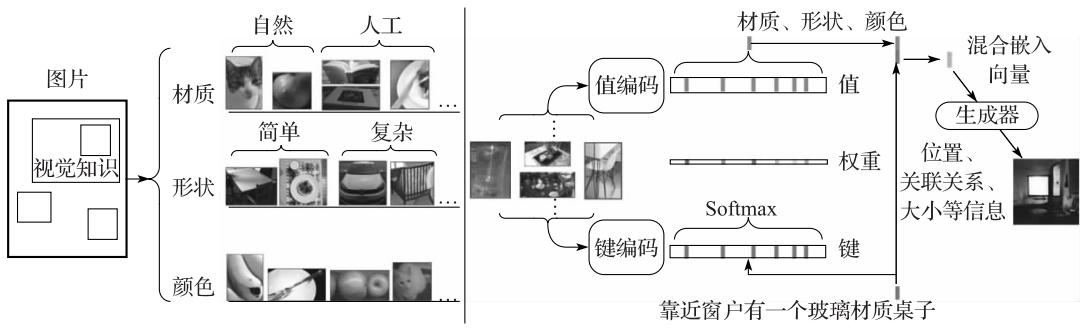


图 12 候选块会在图片生成时提供纹理、形状和颜色线索，构成了视觉知识记忆。例如在给出句子“带有靠近窗口的椅子的玻璃桌子”之后，多模式编码器激发一些有用的视觉线索（即视觉知识存储器中的提议）以生成多模态隐藏向量

文献 [67] 从 MSCOCO 训练数据集图像中提取了大约 320 000 个候选块以构建知识库。每个候选块都是 1 024 维的语义向量。当一个图像中有超过 5 个候选块时，只保留最有可能是物体的前 5 个候选块。

3.3.3 多媒体编码

基于记忆网络，文献 [67] 的多模式编码器使用两个编码器和注意机制来编码 Proposal（即视觉线索）和文本描述。

首先使用预先训练的文本编码器 $\varphi^{[62]}$ 将文本描述 t 编码为连续表示 $\varphi(t)$ 。再使用文献 [63] 提出的方法进一步扩充文本嵌入。这种扩充有助于为对抗性训练生成大量额外的文本嵌入^[69]。具体来说，在输入文本向量上使用全连接层以生成 μ 和 σ 。增强文本向量为 $\varphi(t)' = \mu + \sigma \odot \zeta$ ，其中 ζ 从 $N(0, 1)$ 中采样， \odot 是逐点乘法运算符。增强后的文本向量维度为 d 。从 Proposal 知识记忆中随机抽取 m 个 Proposal， $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$ 。基于文献 [29]，这些 Proposal 分别编码为键表示和值表示：

$$k_i = \kappa_0(p_i)$$

$$v_i = \nu_0(p_i)$$

其中， p_i 是维度为 1024 的 Proposal 特征向量， k_i 和 v_i 的维度为 d 。键表示用于参与和加权检索出来的知识。值表示包含生成图片时的指示。键和值编码器都是神经网络，它们由简单的完全连接层加上 ReLU 激活函数组成。多模态隐向量的生成如下：

$$a_i = \text{Softmax}(\varphi(t)^T k_i)$$

$$o = \sum_i v_i a_i$$

$$c = (o, \varphi(t)')$$

$$\hat{c} = \text{ReLU}(Wc + b)$$

其中， \hat{c} 是维度 d 的多模态隐向量。

3.3.4 图像迭代生成

得到多模态隐向量后，将其输入给生成器，作为生成器的条件，约束生成器的生成

结果，在我们的实验中有两个生成器，前者生成 $64 * 64$ 的图像，并输出给下一个生成器，第二个生成器则会输出 $256 * 256$ 的最终图像。两个生成器都使用生成对抗模型的框架进行训练，相应的，每个生成器都对应一个判别器，判别器用于指导生成器的生成。具体框架如图 13 所示。在生成的第一阶段，增强文本嵌入 $\varphi(t)'$ 和随机采样的 m 个 Proposal 将被编码为多模态表示 \hat{c}_0 。此特征向量将指导大小为 $64 * 64$ 图像的生成。对于阶段 II，来自第一阶段的多模态表示 \hat{c}_0 将和新采样的 m 个 Proposal 一起被编码，输出 \hat{c}_1 。第一阶段生成的图像经过下采样后和 \hat{c}_1 连接并用于实际图像生成。

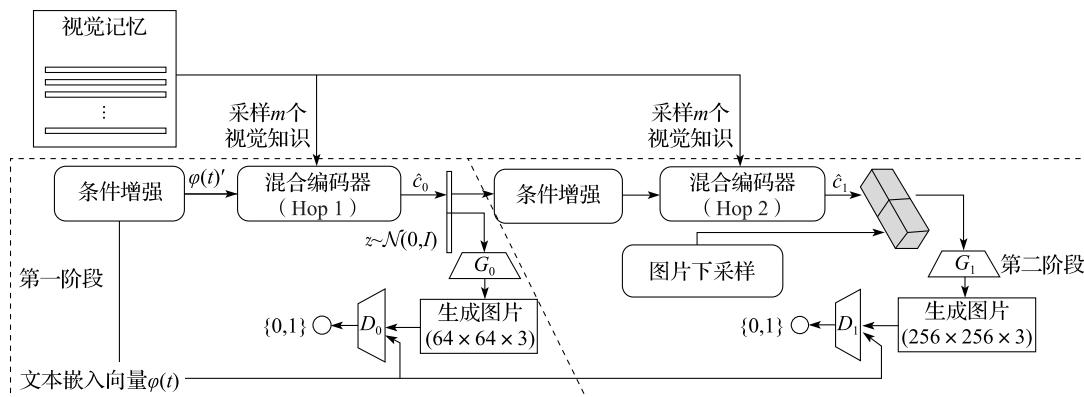


图 13 vmCAN 的框架图

4 国内外研究进展比较

关于国内外记忆网络的研究进展，对近五年（2014-2018）发表在机器学习与人工智能相关的国际顶级会议（ICML、NIPS、ICLR、AAAI、IJCAI、CVPR）上的论文进行调研，统计分析了题目包含“memory”的论文，统计结果如表 1 所示。

表 1 2014~2018 年国际顶级会议上关于记忆网络的论文数量统计

	ICML		NIPS		ICLR		AAAI		IJCAI		CVPR		总计
	国际	国内	国际	国内	国际	国内	国际	国内	国际	国内	国际	国内	
2014	0	0	1	0	0	0	1	0	—	—	0	0	2
2015	1	0	6	0	1	0	2	0	1	0	0	0	11
2016	5	1	4	0	2	0	0	0	2	0	0	1	15
2017	1	0	5	0	2	0	4	0	4	3	4	1	24
2018	1	0	—	—	9	0	6	4	1	7	6	4	38
总计	8	1	16	0	15	0	13	4	7	10	10	6	90

近五年来，国内外总共有 90 篇关于记忆网络的文章发表在上述的关于机器学习和人工智能的 6 大国际顶级会议中，统计调查以后，有以下发现：

1) 总体来讲，国际上关于记忆网络的研究领先于国内。在已发表的 90 篇文章中，其中 69 篇来自于国际，21 篇来自于国内。且在认可度相对更高的 ICML 和 NIPS 上的文

章数量，国际是远多于国内的。

2) 关于记忆网络的研究呈现快速增长趋势，且增长速度越来越快。2014年的时候只有2篇关于记忆网络的研究，但随后以每年10篇左右的增长趋势增长，2018年关于记忆网络的研究已经达到38篇，这其中还不包括NIPS 2018的文章。可以预见，之后两年关于记忆网络的研究会越来越多。

3) 各大会议上每年关于记忆网络的研究数量分布均匀，体现了记忆网络的通用性。各大会议既包含了理论又包含了应用，各个会议上每年的论文数量都较为均匀，体现了记忆网络的通用性，更加说明了记忆网络研究的重要性。

5 发展趋势与展望

随着近几年记忆网络的发展，利用外部存储形式的机器学习方法已经成为新一代人工智能发展中不可或缺的一个方向。国内外关于记忆网络的研究正在蓬勃发展，每年发表在各大顶级会议上的论文数量正在逐年攀升，且增长趋势并没有放缓。记忆网络的应用也非常广泛，自动问答、视觉问答、物体检测、强化学习、文本生成图像等各个领域都有应用，较为均匀地分布在各大顶级会议上。

回顾机器学习与人工智能的发展历史，可以发现机器学习与人工智能正在朝着深度学习和神经网络的方向发展，如表2所示，各种经典的机器学习方法正在朝着深度/神经的方向发展。

表2 一些机器学习的发展趋势

浅层模型	深层模型
语言模型	神经语言模型
贝叶斯学习	贝叶斯深度学习
图灵机	神经图灵机
强化学习	深度强化学习
X	深度/神经 + X

我们认为下一代的人工智能应该是从数据、经验中并能自动推理的永不停息（never-ending）的学习^[70]。数据驱动的机器学习方法已经成功运用于自然语言、多媒体、计算机视觉、语音和跨媒体等领域，后续应通过例如注意力机制、记忆网络、迁移学习、强化学习等方式与人类知识进行有机结合，从而实现从浅层计算到深度推理、从单纯的数据驱动到数据驱动与逻辑规则相结合、从垂直领域的智能到更通用的人工智能的发展。

6 结束语

记忆是大脑智能的基础。本文以记忆网络为切入点，详细阐述和比较了近年来国内

外关于记忆网络的研究，并介绍了记忆网络在自动问答、电影问答、文本生成图像上的成功应用，认为记忆驱动的媒体学习与创意是新一代人工智能发展的重要方向之一。

参考文献

- [1] Baddeley A. Working memory[J]. *Science*, 1992, 255(5044) : 556-559.
- [2] Coller C, Kuchler A. Learning task-dependent distributed representations by backpropagation through structure[J]. *Neural Networks*, 1996, 1 : 347-352.
- [3] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory [J]. *Neural computation*, 1997, 9 (8) : 1735-1780.
- [4] Chung J, Gulcehre C, Cho K H, et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling[J]. arXiv preprint arXiv: 1412. 3555, 2014.
- [5] Graves A, Wayne G, Danihelka I. Neural turing machines [J]. arXiv preprint arXiv: 1410. 5401, 2014.
- [6] Jason W, Sumit C, Antoine B. Memory networks[C]. In Proceedings of the International Conference on Representation Learning(ICLR 2015), 2015.
- [7] Graves A, Wayne G, Reynolds M, et al. Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory[J]. *Nature*, 2016, 538(7626) : 471.
- [8] Von Neumann J. First Draft of a Report on the EDVAC[J]. *IEEE Annals of the History of Computing*, 1993(4) : 27-75.
- [9] Siegelmann H T, Sontag E D. On the computational power of neural nets[C]. Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory. ACM, 1992: 440-449.
- [10] Zaremba W, Sutskever I. Learning to execute[J]. arXiv preprint arXiv: 1410. 4615, 2014.
- [11] Hadley R F. The problem of rapid variable creation[J]. *Neural computation*, 2009, 21(2) : 510-532.
- [12] Minsky M L. Computation: finite and infinite machines[M]. Prentice-Hall, Inc., 1967.
- [13] Hopfield J J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 1982, 79(8) : 2554-2558.
- [14] Mikolov T, Karafiat M, Burget L, et al. Recurrent neural network based language model[C]. Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association, 2010.
- [15] Zaremba W, Sutskever I. Learning to execute[J]. arXiv preprint arXiv: 1410. 4615, 2014.
- [16] Weston J, Bengio S, Usunier N. Wsabie: Scaling up to large vocabulary image annotation[C]. IJCAI, 2011, 11 : 2764-2770.
- [17] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [C]. Advances in neural information processing systems, 2012: 1097-1105.
- [18] Graves A. Generating sequences with recurrent neural networks [J]. arXiv preprint arXiv: 1308. 0850, 2013.
- [19] Sutskever I, Vinyals O, Le Q V. Sequence to sequence learning with neural networks[C]. Advances in neural information processing systems, 2014: 3104-3112.
- [20] Fusi S, Drew P J, Abbott L F. Cascade models of synaptically stored memories[J]. *Neuron*, 2005, 45

- (4) : 599-611.
- [21] Ganguli S, Huh D, Sompolinsky H. Memory traces in dynamical systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(48) : 18970-18975.
- [22] Kanerva P. Sparse distributed memory [M]. MIT press, 1988.
- [23] Amari S I. Characteristics of sparsely encoded associative memory [J]. Neural networks, 1989, 2(6) : 451-457.
- [24] Vinyals O, Fortunato M, Jaitly N. Pointer networks [C]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2015 : 2692-2700.
- [25] Bahdanau D, Cho K, Bengio Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate [J]. arXiv preprint arXiv: 1409. 0473, 2014.
- [26] Gregor K, Danihelka I, Graves A, et al. Draw: A recurrent neural network for image generation [J]. arXiv preprint arXiv: 1502. 04623, 2015.
- [27] Hintzman D L. MINERVA 2: A simulation model of human memory [J]. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 1984, 16(2) : 96-101.
- [28] Kumar A, Irsoy O, Ondruska P, et al. Ask me anything: Dynamic memory networks for natural language processing [C]. International Conference on Machine Learning, 2016 : 1378-1387.
- [29] Sukhbaatar S, Weston J, Fergus R. End-to-end memory networks [C]. Advances in neural information processing systems, 2015 : 2440-2448.
- [30] Magee J C, Johnston D. A synaptically controlled, associative signal for Hebbian plasticity in hippocampal neurons [J]. Science, 1997, 275(5297) : 209-213.
- [31] Johnston S T, Shtrahman M, Parylak S, et al. Paradox of pattern separation and adult neurogenesis: A dual role for new neurons balancing memory resolution and robustness [J]. Neurobiology of learning and memory, 2016, 129 : 60-68.
- [32] O'reilly R C, McClelland J L. Hippocampal conjunctive encoding, storage, and recall: Avoiding a trade-off [J]. Hippocampus, 1994, 4(6) : 661-682.
- [33] Howard M W, Kahana M J. A distributed representation of temporal context [J]. Journal of Mathematical Psychology, 2002, 46(3) : 269-299.
- [34] Jureczyk P, Agichtein E. Discovering authorities in question answer communities by using link analysis [C]. Proceedings of the sixteenth ACM conference on Conference on information and knowledge management. ACM, 2007 : 919-922.
- [35] Li B, Lyu M R, King I. Communities of Yahoo! answers and Baidu Zhidao: Complementing or competing? [C]. Neural Networks (IJCNN), The 2012 International Joint Conference on. IEEE, 2012 : 1-8.
- [36] Bilotti M W, Elsas J, Carbonell J, et al. Rank learning for factoid question answering with linguistic and semantic constraints [C]. Proceedings of the 19th ACM international conference on Information and knowledge management. ACM, 2010 : 459-468.
- [37] Wang M. A survey of answer extraction techniques in factoid question answering [J]. Computational Linguistics, 2006, 1(1).
- [38] Bao J, Duan N, Zhou M, et al. Knowledge-based question answering as machine translation [C]. Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers), 2014, 1 : 967-976.

- [39] Yao X, Van Durme B. Information extraction over structured data: Question answering with freebase[C]. Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1 : Long Papers) , 2014 , 1 : 956-966.
- [40] Boyd- Graber J, Satinoff B, He H, et al. Besting the quiz master: Crowdsourcing incremental classification games [C]. Proceedings of the 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning. Association for Computational Linguistics , 2012 : 1290-1301.
- [41] Iyyer M, Boyd- Graber J, Claudio L, et al. A neural network for factoid question answering over paragraphs[C]. Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP) , 2014 : 633-644.
- [42] Zheng S, Bao H, Zhao J, et al. A novel hierarchical convolutional neural network for question answering over paragraphs[C]. Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT) , 2015 IEEE/WIC/ ACM International Conference on. IEEE , 2015 , 1 : 60-66.
- [43] Iyyer M, Manjunatha V, Boyd- Graber J, et al. Deep unordered composition rivals syntactic methods for text classification[C]. Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing (Volume 1 : Long Papers) , 2015 , 1 : 1681-1691.
- [44] Carr C E. Processing of temporal information in the brain[J]. Annual review of neuroscience , 1993 , 16 (1) : 223-243.
- [45] Ivry R B. The representation of temporal information in perception and motor control[J]. Current opinion in neurobiology , 1996 , 6(6) : 851-857.
- [46] Schwegpe J, Rummer R. Attention, working memory, and long-term memory in multimedia learning: an integrated perspective based on process models of working memory[J]. Educational Psychology Review , 2014 , 26(2) : 285-306.
- [47] Minsky M. Society of mind[M]. Simon and Schuster, 1988.
- [48] Duan X, Tang S, Zhang S, et al. Temporality-enhanced knowledgememory network for factoid question answering[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering , 2018 , 19(1) : 104-115.
- [49] Li L, Tang S, Deng L, et al. Image Caption with Global-Local Attention[C]. AAAI , 2017 : 4133-4139.
- [50] Pan P, Xu Z, Yang Y, et al. Hierarchical recurrent neural encoder for video representation with application to captioning [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition , 2016 : 1029-1038.
- [51] Wang M, Hong R, Li G, et al. Event driven web video summarization by tag localization and key-shot identification[J]. IEEE Transactions on Multimedia , 2012 , 14(4) : 975-985.
- [52] Yang Z, Han Y, Wang Z. Catching the temporal regions-of-interest for video captioning[C]. Proceedings of the 2017 ACM on Multimedia Conference , ACM , 2017 : 146-153.
- [53] Malinowski M, Rohrbach M, Fritz M. Ask your neurons: A neural-based approach to answering questions about images[C]. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision , 2015 : 1-9.
- [54] Xiong C, Merity S, Socher R. Dynamic memory networks for visual and textual question answering[C]. International conference on machine learning , 2016 : 2397-2406.
- [55] Zhu Y, Groth O, Bernstein M, et al. Visual7w: Grounded question answering in images [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition , 2016 : 4995-5004.

- [56] Bo Wang, Youjiang Xu, Yahong Han, et al. Movie Question Answering: Remembering the Textual Cues for Layered Visual Contents[C]. AAAI, 2018.
- [57] Tapaswi M, Zhu Y, Stiefelhagen R, et al. Movieqa: Understanding stories in movies through question-answering[C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016: 4631-4640.
- [58] Mikolov T, Chen K, Corrado G, et al. Efficient estimation of word representations in vector space[J]. arXiv preprint arXiv: 1301. 3781 , 2013.
- [59] Goodfellow I, Pouget- Abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial nets[C]. Advances in neural information processing systems, 2014: 2672-2680.
- [60] Nilsback M E, Zisserman A. Automated flower classification over a large number of classes [C]. Computer Vision, Graphics & Image Processing, 2008. ICVGIP' 08. Sixth Indian Conference on. IEEE, 2008: 722-729.
- [61] Lin T Y, Maire M, Belongie S, et al. Microsoft coco: Common objects in context [C]. European conference on computer vision. Springer, Cham, 2014: 740-755.
- [62] Reed S, Akata Z, Yan X, et al. Generative adversarial text to image synthesis[J]. arXiv preprint arXiv: 1605. 05396 , 2016.
- [63] Zhang H, Xu T, Li H, et al. Stackgan: Text to photo-realistic image synthesis with stacked generative adversarial networks[J]. arXiv preprint, 2017.
- [64] Xu T, Zhang P, Huang Q, et al. AttnGAN: Fine- grained text to image generation with attentional generative adversarial networks[J]. arXiv preprint, 2017.
- [65] Hong S, Yang D, Choi J, et al. Inferring semantic layout for hierarchical text-to-image synthesis[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7986-7994.
- [66] Ghazvininejad M, Brockett C, Chang M W, et al. A knowledge-grounded neural conversation model[J]. arXiv preprint arXiv: 1702. 01932 , 2017.
- [67] Zhang S, Dong H, Hu W, et al. Text-to-Image synthesis via visual-memory creative adversarial network [C]. Proceedings of the 2018 Pacific-Rim Conference on Multimedia, 2018.
- [68] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster r- cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks[C]. Advances in neural information processing systems, 2015: 91-99.
- [69] Dong H, Yu S, Wu C, et al. Semantic image synthesis via adversarial learning[J]. arXiv preprint arXiv: 1707. 06873 , 2017.
- [70] Zhuang Y, Wu F, Chen C, et al. Challenges and opportunities: from big data to knowledge in AI 2. 0 [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(1) : 3-14.

作者简介

吴 飞 浙江大学计算机学院教授，主要研究方向为人工智能、跨媒体计算、多媒体分析与检索和统计学习理论，CCF 会员。



韩亚洪 天津大学计算机学院教授，主要研究方向为多媒体分析与检索、计算机视觉和机器学习，CCF 会员。



廖彬兵 浙江大学计算机学院博士生，主要研究方向为人工智能和数据挖掘，CCF 学生会员。



于俊清 华中科技大学计算机学院教授，主要研究方向为基于内容的视频分析、索引与检索、多核计算与流编译、视频情感计算、网络安全与大数据处理，CCF 会员。



网络智慧化技术研究进展与趋势

CCF 互联网专业委员会

邬江兴¹ 胡宇翔¹ 兰巨龙¹

¹国家数字交换系统工程技术研究中心，郑州

摘要

利用人工智能技术优化网络结构、资源配置、功能管理与业务承载等，使互联网具备面向泛在用网场景的智慧化“自动驾驶”能力是当前网络技术发展的重要趋势。本文首先介绍了网络智慧化概念提出的背景和发展历程，探讨了网络智慧化的技术内涵。然后对典型机器学习算法进行了分类，并对网络智慧化技术的国内外研究进展进行了综述和比较。最后对下一步可能的发展趋势进行了分析和讨论。

关键词：互联网，人工智能，网络智慧化，路由优化，资源适配，服务质量

Abstract

Making use of artificial intelligence to optimize the network structure, resource allocation, function management, service bearing and so on, so as to qualify Internet the smart “automatic driving” ability for various ubiquitous network scenes, is an important development trend. This paper first introduces the background and development course as well as the technique connotation of smart network. Afterwards, this paper introduces the classification of typical machine learning algorithms and presents the review and comparison of the research progress at home and abroad. At last, the possible development trend of the next step is analyzed and discussed.

Keywords: Internet, artificial intelligence, Smart Network, Routing Optimization, Resource Adaptation, Quality of Service

1 引言

随着信息通信网络技术的不断发展，互联网已成为与国民经济和社会发展高度相关的重要基础设施，对提高社会生产力、助推经济社会升级转型、创造新的经济增长点与就业机会等具有深远影响。互联网在当前社会中扮演的角色日益增多，多元化终端类型、接入方式不断发展，人 - 人、人 - 机、机 - 机、网 - 网通信等成为常态，要求网络必须为海量业务提供多元、个性、高效的服务。然而，现有互联网的数据传输、资源管理和运行维护方式僵化，其单一固定甚至基于人工的配置管理和调度等机制已无法满足网络快速发展带来的泛在用网场景需求，导致网络复杂性倍增，运行与维护开销巨大。同时，

现有用于刻画网络功能、性能等的模型和评价体系，及由此构建的资源提供和业务承载方法均面临深刻变化，使得网络效率低下，用户体验差。

近年来，人工智能（Artificial Intelligence, AI）技术的蓬勃发展，以及软件定义网络/网络功能虚拟化（Software-defined Networking/Network Function Virtualization, SDN/NFV）技术的发展和广泛应用，使得全网范围内的统一控制与配置以及与网络状态细粒度感知的难度大大降低，也为建立网络自我驱动的智慧化运行机制提供了良好发展契机。机器学习、深度学习、群体智能等人工智能技术在网络路由优化、流量分类、入侵检测等方面的应用研究逐渐深入并开始在现实网络系统中得到应用。

互联网与人工智能深度融合的网络智慧化技术描绘了新型网络演进和发展的前景。利用人工智能技术优化网络结构、资源配置、功能管理与业务承载等，使互联网具备面向泛在用网场景的智慧化“自动驾驶”能力，从而优化网络性能、提升用户体验、降低网络运行和维护成本等。同时，网络智慧化更使互联网具备自我优化能力，改善因人类对复杂网络环境的认知局限造成的服务体验差和运营效率低等不利局面，引导传统简单、粗放的网络资源管理和运营模式升级，使网络在自主决策、辅助决策等方面有质的提升，同时也促进和提高了创新网络技术的研究与发展，对解决当前大规模网络应用中存在的潜在问题和未来网络的前瞻性发展方向都具有重要意义。

本文首先介绍了网络智慧化概念提出的背景和发展历程，探讨了网络智慧化的技术内涵。然后对典型机器学习算法进行了分类，并对网络智慧化技术的国内外研究进展进行了综述和比较。最后对下一步可能的发展趋势进行了分析和讨论，为广大研究人员提供参考。

2 网络智慧化技术发展历程

M. I. T 的 David D. Clark 教授等人早在 2003 年就提出了网络“知识平面”（knowledge plane）概念^[1]，建议对现有的分布式互联网建立一个基于全局视图、协调统一、自主认知的智能控制系统，来完成大规模网络中复杂策略的生成和管理，以实现网络的自配置、自适应、自修复。同时，他们也指出通过知识平面解决网络智慧化可能会面临的问题，包括网络知识的表示和利用、规模化组织、知识传递以及恶意和不可信信息的处理等。

受此观念启发，R. W. Thomas 等人于 2005 年提出了认知网络的概念^[2]。通过赋予和增强网络的认知和理解能力，使之能够在满足端到端服务的基础上感应当前网络的运行状态、形成决策并作用于当前网络，且在感知、决策的相关环节与运行环境相互作用，从而不断学习完善、相互适应并最终达到预期目标。其设计架构如图 1 所示。

上述两篇文献以高屋建瓴的方式描绘了网络智

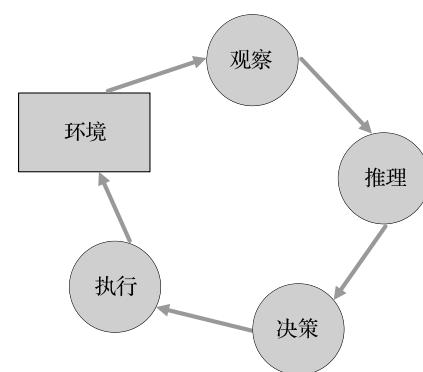


图 1 认知网络逻辑图

慧化发展蓝图。然而，由于传统分布式网络系统的计算、感知等能力限制，全局化的网络视图获取以及优化决策等一直无法实现，网络智慧化难以发挥预期效果。因此，在此后的很长一段时间内，网络智慧化技术的发展并没有取得突破性进展。

2008 年，Nazim 等人在论文“Challenges for Autonomic Network Management”^[3]中论述了通过相关技术解决对日益复杂的网络功能进行自动化管理的难点。论文指出，目前想要对网络功能实现自动控制，首要问题在于将网络管理者或上层用户的需求自动转化为网络策略。论文分析了现有的网络功能自动化实现架构的特点以及存在的问题，并在此基础上提出了可能的未来研究方向：自动化单元（autonomic cell）。

2009 年，Hajer Derbel 等人发表了论文“ANEMA: Autonomic network management architecture to support self-configuration and self-optimization in IP networks”^[4]，提出了较为详细的网络自动管理实现框架。ANEMA 通过将网络功能逻辑分层，建立了由高层抽象目标向底层网络基本功能转变的层层递进的解析架构。首先，由上层用户或者网络管理者提出上层的需求，在 ANEMA 中将此需求按照系统给定的功能实现策略（utility function policy）来定义，将抽象的高层目标初步转化为网络优化指标。进而，ANEMA 通过相关的全局网络策略定制，可以根据网络优化目标为网络中不同的自动控制域下发具体策略，进而控制自动管理个体的网络行为，最终完成从上层策略到网络底层行为的映射。整个网络的工作流程如图 2 所示。

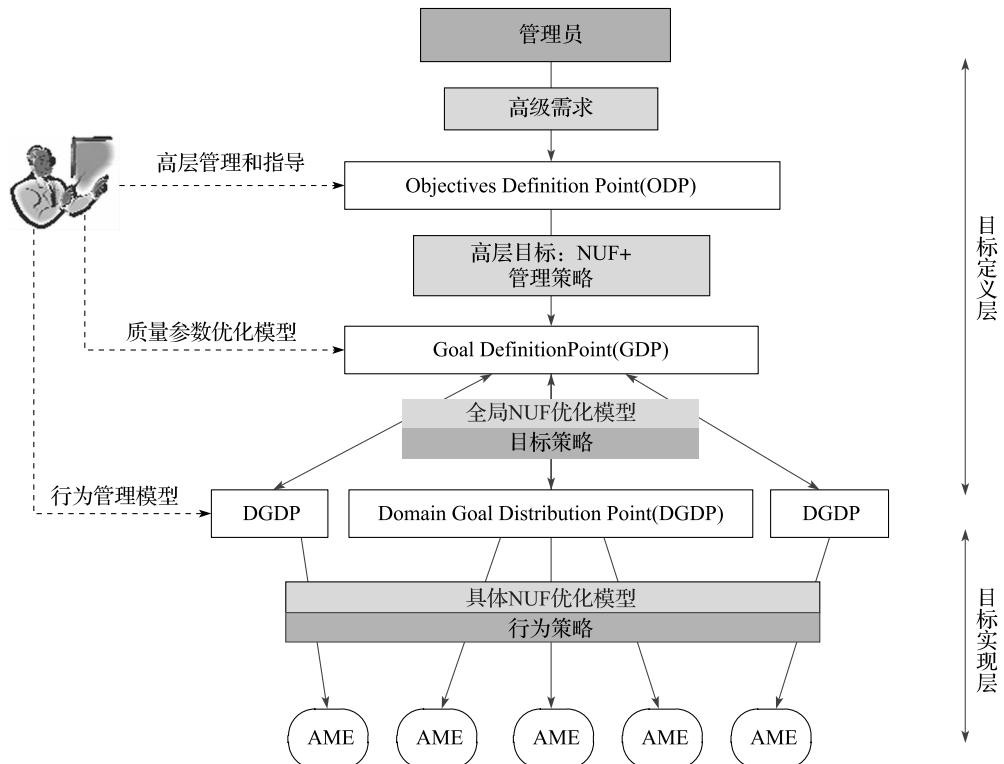


图 2 ANEMA 结构

2016年，Michele Zorzi等人发表了论文“COBANETS: a new paradigm for cognitive communications systems”^[5]，提出了一种智能网络架构COBANETS。该论文重点论述了通过把监督学习、非监督学习和概率生成模型相结合的方式来实现大范围的网络特征提取和智能化策略制定。相对于之前的相关研究，该研究对人工智能技术在网络中的使用有了更深入地探索。同时，该论文也指出了相关的技术难点，包括大规模数据的获取、数据传输和同步、长期时空范围的网络行为探索、多目标优化、网络知识的表示和安全性等方面，如图3所示。该论文的研究为后续实现具体人工智能技术提供了指导。

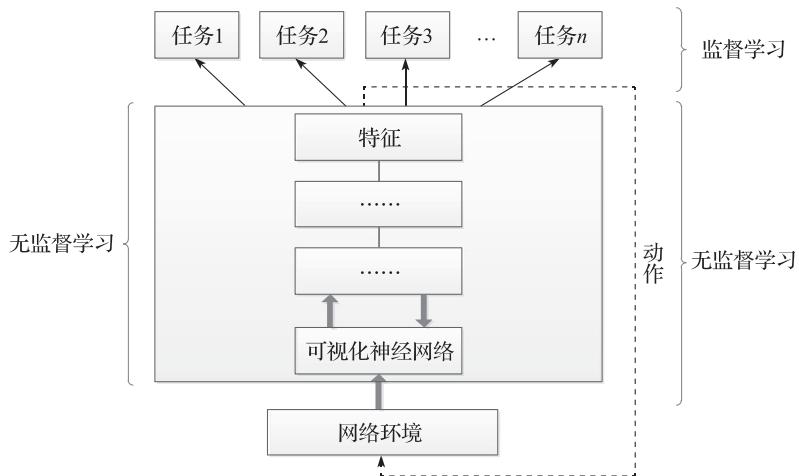


图3 COBANETS 结构

2017年，Albert Mestres等人发表了论文“Knowledge-Defined Networking”^[6]，系统论述了SDN环境下网络自主认知和优化的实现方式——知识定义网络KDN。如图4所示，

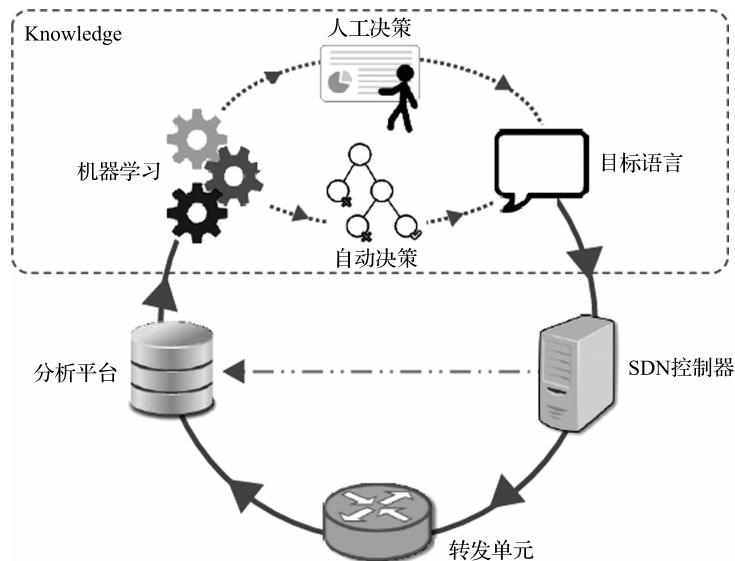


图4 KDN 逻辑结构

作者重新定义了网络知识平面，将网络行为建模和决策过程融合到 SDN 架构中，通过 Analytics 平台收集 SDN 控制器和转发单元的信息并提供给决策层。决策层再根据特定的机器学习（Machine Learning, ML）算法，将收集到的网络知识进行分析并做出相应的动作决策，并且通过 SDN 控制器作用于网络运行。知识定义网络的重要贡献在于：该文献在总体架构层面给出了人工智能技术在网络中应用的体系模型、实现方案和前景分析等，并验证了该方案在典型场景中应用的有效性，为相关工作提供了良好借鉴。

3 网络智慧化技术内涵

网络智慧化的目标是借助人工智能和软件定义网络等技术的蓬勃发展以及网络资源的性能提升与广泛普及，以网络传输效能、节点运行效能、业务承载效能和服务提供效能等为约束，在结构优化、资源配置、功能管理与业务承载等方面进行智能控制并自我优化，使网络具备面向泛在用网场景的智慧化“自动驾驶”能力。此时，用户将不再关注“用网过程”和“用网体验”的问题，而是将其归结为简单的“用网目的”的二元问题。网络自主地根据用户的“用网目的”决定网络资源的配置方案和服务提供方式等，并智能地动态适应用户需求的变化，在数以亿计的用户、网元和业务之间进行适配协调，使网络不仅使用便捷且用户无感，从而从根本上为各种类型、层次的业务提供多元、个性、高效等的服务。

网络智慧化技术充分借鉴人类社会、生物机体内部运行以及生物群体智慧等领域的研究成果，拓展人类智慧在网络构建和运行中的应用深度和广度，提供了“源于现实世界启迪，创造高于现实世界”的用网体验。具有智慧化特征的网络在构建时能够从近似于人类自然语言描述的需求出发，自动推演出合适的网络资源组成、节点协作模式、运行控制模式等，并且能够根据实际的运行效果进行自我调整和优化。同时，在满足用户和业务需求方面，具有智慧化特征的网络也能够通过自身“学习”，基于智能感知、大数据和人工智能等技术，促使网络在满足现实需求方面不断优化服务的效果和性能。

网络智慧化在开放可编程网络架构下采用细粒度感知等机制获取网络视图信息，并借助深度学习、增强学习等人工智能技术进行数据分析、智能决策等新型“自动驾驶”网络架构，其基本逻辑是构建“感知—决策—适配”一体的自主智能控制闭环，采用网络资源智能协调控制技术、智能传输优化技术和业务智能适配的服务承载技术等，实现网络资源与上层业务的实时最优适配和拟合，从而提供面向用户服务体验的大规模网络智慧服务。相比于现有网络，智慧化网络不仅具有全局化、实时化、个性化、高效化的策略制定能力，还具有自我感知、自主决策、自主学习和演进能力，其运行逻辑可以抽象为图 5。

“感知—决策—适配”一体的网络智慧化传输与管理包括：①感知：通过泛在互联、可定义感知等技术，动态、实时感知网络业务与网络资源分布，并基于高层感知语义的

统一描述模型生成全网视图，支持网络感知对象、感知动作、关联规则和功能分配的可定义；②决策：针对网络状态复杂、流量行为多变、业务模型不确定等特点，生成复杂不确定业务与资源的拟合决策，实时决策网络中的资源管理策略、运维控制规则等；③适配：针对互联网复杂不确定情况下网络结构对业务需求的适应性问题，运用 SDN、NFV、可重构等新兴技术，进行路由调度、功能重构、资源配置、服务承载等自适应调节，增强网络的业务适应性和可扩展性，支持跨域资源的动态协同分配和深度融合利用，使其具有柔性组织能力和持续演进能力。

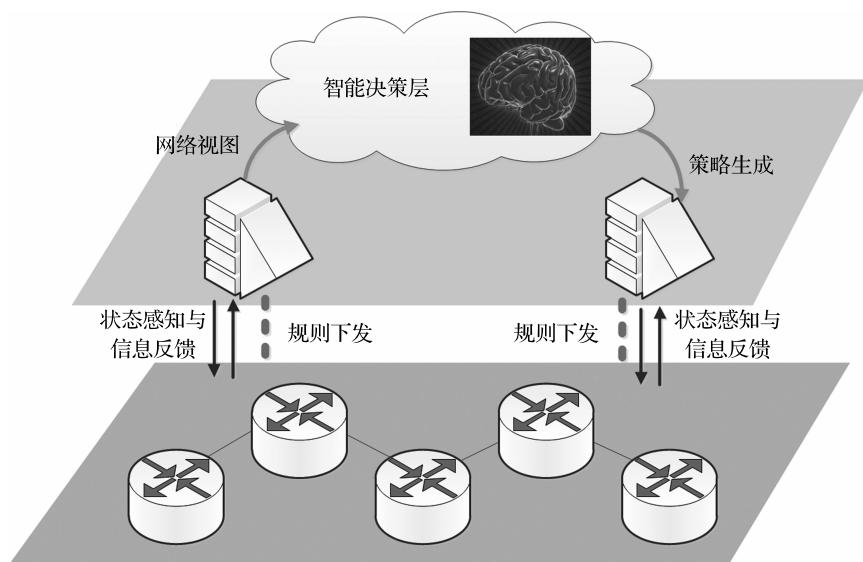


图 5 网络智慧化运行逻辑

在该逻辑中，智慧拟合决策具有以下三个重要性质：

- 演变跟随。在动态适应网络应用的传送要求和保证网络资源效率之间进行折中，屏蔽在小时间尺度上业务特性的天然随机波动，基于服务效果对服务需求进行稳定偏倚的资源调整。
- 自主驱动。自主驱动网络资源管控，以符合应用要求和服务效果之间固有动力学规律的自然方式，有效把握资源改变的时间、空间尺度，实现暂态业务与网络资源配置的实时最佳拟合，形成自主反馈、循环控制结构。
- 聚类拟合。网络对业务进行聚类拟合，使网络资源调整只针对特定的目标业务类，而不影响其他任何非目标业务类的服务效果。

由上图可以看出，网络智慧化可根据自身的网络状态与具体需求结合大数据、深度学习、增强学习等技术使网络具有自主策略定制能力，以最优运行效果为导向自主生成细粒度差异化的智能网络策略。深度学习/增强学习等人工智能算法，特别是深度神经网络，发展迅速，其通过云计算、专有硬件加速等方式获得的强大计算能力以及海量数据的存储和处理能力，为实施网络智能决策提供了重要支撑。

4 机器学习算法分类

自 1950 年前后机器学习引起热潮以来，其在大规模数据处理、分类以及智能决策方面的卓越性能，使它成为破解当前网络运维与管理僵局的有效武器。同时，在网络系统中引入机器学习也在提供服务质量、路由优化、入侵检测等方面发挥重要作用^[7,10]。本文依据机器学习算法在网络系统中的应用模式大致将其分为监督学习、无监督学习与增强学习，如图 6 所示。其中，有监督和无监督的人工神经网络（ANN）已经被应用于从路由到入侵检测的各种网络领域。而传统的、浅层的人工神经网络经常被用于主动网络管理的流量预测等^[11-13]。近期，深度学习系统如深度信念网络、Deep ANN 和深 Boltzmann 机等在网络中的应用也有了突破，带来了显著的性能增益^[14,16]。

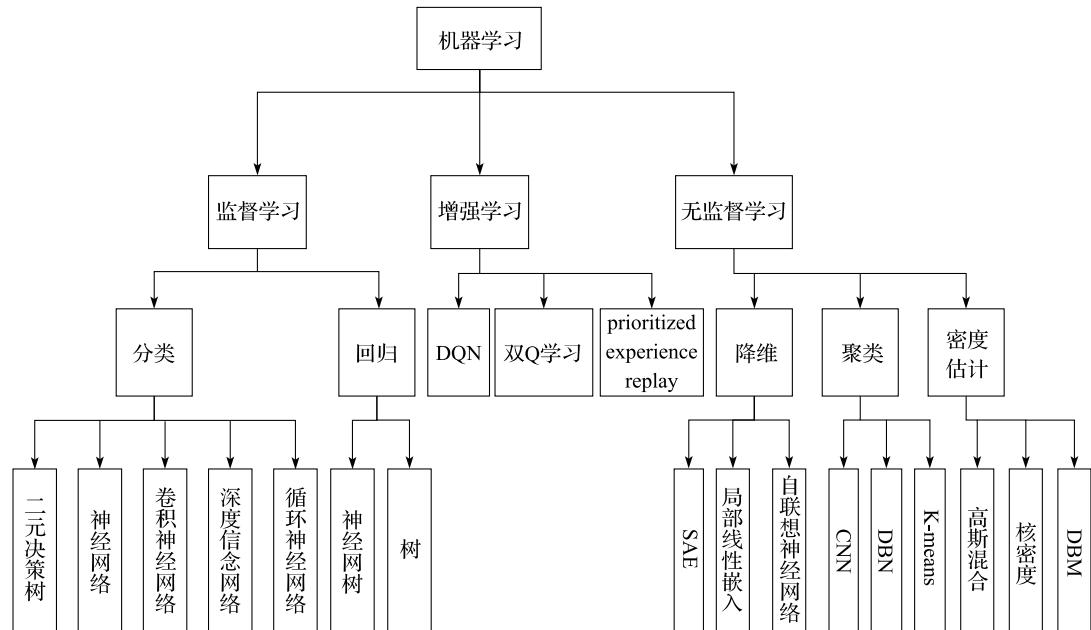


图 6 机器学习的分类框架

4.1 监督学习

监督学习指利用一组已知类别的样本调整分类器的参数，使其达到所要求的性能的过程。在监督学习中，每个实例都是由一个输入对象（通常为矢量）和一个期望的输出值（也称为监督信号）组成的。监督学习算法是一个分析训练数据并产生推断的逻辑功能。一个最佳的方案将允许算法来正确地决定未知实例的类标签。

分类是监督学习最基本的应用，即通过训练已有的训练样本（即已知数据及其对应

的输出) 得到一个最优模型(这个模型属于某个函数的集合, 最优则表示在某个评价准则下是最佳的), 再利用这个模型将所有的输入映射为相应的输出。对输出进行简单的判断, 从而实现分类的目的, 也就具有了对未知数据进行分类的能力。常见的基本监督学习算法包括卷积神经网络、深度信念网络等。

监督学习算法已广泛应用于互联网运维的方方面面, 直观例子就是数据流分类。文献 [17] 和 [18] 利用神经网络进行特征提取和流分类器训练。而监督学习的另一个重要应用便是路由优化, 如 Kato^[19] 等人提出的一种基于监督学习的异构网络路由控制方案。

4.2 无监督学习

无监督学习是一种利用类别未知(没有被标记)的训练样本解决模式识别中的各种问题的机器学习方式。近年来, 无监督学习在分层学习、聚类算法、因子分析、潜在模型和异常值检测等方面有长足的进展。同时, 通过云计算和分布式计算实现的巨大计算能力与存储和处理大量数据能力的不断提高, 激发了学术界在网络领域应用无监督学习技术的兴趣。无监督学习的一般任务为聚类、降维等。

聚类的目标是以簇的形式在未标记的输入数据中寻找数据的隐藏模式^[20]。简单来说, 聚类就是基于不同特征之间的相似性将数据划分到有意义的自然分组中。常见的聚类技术包括 CNN、DBN、K-means 等。目前, 聚类技术被广泛应用于各类网络的流量分析和异常检测等。文献 [21] 采用遗传算法(GA)结合层次聚类方法对数据进行预处理, 从而实现了一种基于支持向量机(SVM)的高效分类器。文献 [22] 讨论了一种基于网格和密度的, 用于异常和入侵检测的聚类方法。

用较少的维度表示数据是无监督学习的另一个任务。真实世界的数据在许多数据集中通常具有高维度, 这些维度可以衍生出成千上万个甚至数百万个潜在的相关维度^[23]。然而, 可以观察到的数据的固有维数(控制参数)是小于或等于总维数的。为了通过提取内在维度找到底层数据的基本模式, 必须确保数据的核心信息不丢失。目前, 学术界已经提出了数种减少数据维度的技术^[24], 包括高维投影到较低维度、独立表示和稀疏表示等。常见的降维技术有堆叠自动编码器(SAE)、局部线性嵌入、自联想神经网络等。

4.3 增强学习

增强学习(RL)是一种试图学习动态操作环境下最优动作的ML技术。具体而言, 它是一种决策者(或智能体)观察来自操作环境的状态和奖励, 并采取优化的行动, 从而最终收敛到最佳行动的技术。鉴于操作状态的动态性, 与状态密切相关的最佳动作也会发生变化。其中, 状态代表决策因素, 而所选择行动对网络造成的正面或负面影响则用奖励值来表征。典型算法如 Q-learning 等^[25]。

近年来, 增强学习和深层神经网络相结合产生了深度强化学习(DQN)方法, 可适

用于无可用手特征、状态空间无法完全观测或低维的环境。其中，CNN 的输入是原始图像数据（作为状态 state），输出则是每个动作对应的价值评估（Q 值）。除此之外，增强学习还存在多种改进算法，如 MARL^[26]、RLFA^[27]等。

由于功能的多样性，增强学习已被广泛应用于网络优化。例如，利用多智能体之间的信息交互（例如动作、Q 值、值函数）来执行目标跟踪，其中多智能体之间执行调度和分配目标跟踪任务，以跟踪 WSN 中的移动目标^[28]。MRL 可用于计算运行的操作环境为特定状态的概率，然后根据该概率选择信道以减少干扰。RL 在网络中的另一个应用是优化路由选路^[29]，例如文献 [30] 将深度增强学习引入到路由选路中。此外，RL 也是一种通过检测恶意节点及其攻击来作为增强 CRN 安全的辅助手段^[31]。

5 国内外研究进展与比较

5.1 流量分类

流量分类是网络智慧化的典型应用之一，对网络监控、入侵检测以及服务质量保障都具有十分重要的作用。网络流量分类和应用识别也是 IP 网络工程、管理和控制以及其他关键领域的核心技术之一。传统流量分类方法是基于深度包检测（Deep Packet Inspection, DPI）模块来实现，该模块可以对数据包负载进行准确检测，从而识别和控制业务流。然而，DPI 受到数据包内容负载的加密、使用私有协议、P2P 端口加密等一系列限制，并不能有效识别所有数据流，并且识别底层协议也需要进行大量的逆向工程。另外，随着当前网络应用的大量涌现，很多应用都提供同质化服务，导致 DPI 在识别每个具体应用并维护其数据库时是低效的。在实际网络中，单纯的 DPI 技术会消耗大量的计算资源、带来一定的时间延迟、降低网络反应速率。

针对上述不足，相关研究学者提出将机器学习应用于流量分类中。与传统方法相比，基于 ML 的流分类机制不需要对数据包的负载进行检查，只提取流粒度的特征。例如前 N 个数据包的大小、源和目的 IP 地址、协议与流到达间隔等。从理论上分析，基于 ML 的流分类机制的计算复杂度更小，并且可以对加密流量进行分类。

早在 2004 年，文献 [32] 就率先提出使用 ML 中的概率聚类算法对数据包流进行双向聚类，从而实现高效的流量分类任务。该算法根据数据流的各种属性对其进行聚类，例如数据包大小统计、到达时间间隔统计、字节数和连接持续时间等。在此基础上，文献 [33] 对聚类算法进行改进，应用无监督机器学习方法进行互联网流量识别，并将结果与之前应用的有监督机器学习方法进行比较。无监督方法使用基于期望最大化（Expectation Maximization, EM）的聚类算法，并采用朴素贝叶斯分类器提高分类精度。研究结果发现，无监督聚类技术的准确率高达 91%，超过有监督技术 9%。

此外，无监督技术可用于发现来自未知应用程序的流量，并有可能成为探索 Internet 流量的绝佳工具。类似的，在 2006 年的 SIGCOMM 会议上，文献 [34] 同样采用聚类技术，针对基于端口或有效负载分析对网络流量分类愈发困难的问题，提出使用两种无监督聚类算法（K-means 和 DBSCAN）进行网络流量分类的方法。其核心思想是在网络通信时利用应用程序的特性对流量进行分类。通过与经典的 AutoClass 分类方案进行比较，结果显示 K-means 和 DBSCAN 都具有较好的改进效果，流量分类速度得到大幅度提升。

文献 [35] 介绍了网络流量分类的不同层次和机器学习领域的相关知识，分析了基于端口和有效载荷的流量分类方法存在的问题，以 K-means 方法为主要分类手段，采用特征选择来寻找最佳特征集和对数变换以提高准确性，试验了无监督 K-means 来评估效率和性能。不同数据集上的实验结果表明，该方法可以获得高达 80% 的整体准确度，并且在对数转换后，准确度可以提高到 90% 或更高。

文献 [36] 首次提出使用半监督学习来应对网络中流量分类的问题。该研究指出，基于端口识别的有效性以及深度包检测方法开销问题，促使在网络通信时利用应用程序的独特流动特性完成流量分类。该方法允许根据训练数据设计分类器，训练数据包含少量标签和许多未标签流，并考虑实用分类问题，例如分类器的寿命和分类器再训练需求。经过长达 6 个月的经验性互联网流量跟踪评估，实验结果表明使用包含标记的训练数据可以实现流量和字节分类的高准确度（即大于 90%）。

文献 [37] 从实时流量分类的角度出发，提出了一种基于有监督 ML 学习的聚类算法完成流的识别与选择。该算法通过识别流的最近 N 个分组的滑动窗口，以一种连续的方式重复分类决策过程，成功完成了自动识别正确数据流的学习训练。在算法性能评估方面，以准确性、模型构建时间、分类速度和物理资源消耗为评价指标与其他有监督 ML 算法进行对比，显示出较好的优化效果。

互联网流量分类问题的两个显著特征是数据量大和流量类别不平衡。在传统分类方法中，如果使用 248 个统计特征来表征网络流量，分类器的计算成本将会过大。基于此，文献 [38] 提出了一种基于 ML 的新特征选择方法进行流量分类，其核心思想是基于信息论对一个特征的类偏向程度进行评估；同时也设计了一种新的特征选择方法来减少特征并缓解多级失衡。实验结果表明，通过引用的特征选择方法提高了大多数类别的准确性，同时在计算成本方面降低了少数类别的精确度。

文献 [39] 首次提出基于使用关联的网络流量分类策略，该策略使用非参数近邻（Nearest Neighbor, NN）结合数据内相关性的统计测量来有效分类流量，成功解决了监督和无监督学习分类模型的三个主要缺点。首先，训练数据标记需要大量计算和时间，所以不适用于稀疏复杂网络。其次，支持向量机等多种监督方案对训练数据量不够稳健。最后，如果训练样本很少，所有的监督和非监督算法都表现不佳。因此，使用相关性对流量进行分类更加有效和适应。

文献 [40] 针对 ML 方法分类效率低下和可用性难以保证的问题，提出了基于主要成分分析的网络流量分类技术（Principal Component Analysis, PCA）。首先，该方法使用

基于快速相关的过滤器（Fast Correlation-Based Filter, FCBF）算法过滤训练数据集以获得合适的流属性。然后，PCA 处理这些流属性，为每一类流构建特征子空间，使用最近邻居规则准确识别测试流量样本的流量等级。最后，在公共数据集上进行实验，比较方法的性能。实验结果表明，基于 PCA 的方法比朴素贝叶斯（Naïve Bayes, NB）估计方法和朴素贝叶斯核（Naïve Bayes Kernel, NBK）估计方法具有更高的精度、稳定性和更快的速度。

文献 [41] 以高斯混合模型为基础，建立了一种用于智能流量系统的实时流量状态分类模型。为了完成流量建模，首先对流量数据特征进行讨论，流量数据统计分析结果表明，大量流量数据的概率密度可以通过几个高斯分布来合成。据此，提出了一种结合高斯混合和线性回归的流量状态评估模型。在该模型中，利用高斯混合模型将历史流量数据按照自由流、准自由流和约束流三种流量状态聚类为三组，同时约束流数据将用于训练线性回归模型。基于这两个步骤，流量性能被描述为四个状态，即自由流量、准自由流量、同步流量和堵塞流量。最后，设计实验的结果表明，该模型可以有效地评估流量性能。

文献 [42] 将网络流量分类场景扩展至软件定义网络（SDN）环境下，借助 SDN 的数控分离和集中式控制的优势实现准确的流量分类。核心思想是借助从 OpenFlow 交换机中接收到的数据包的头部信息和控制器中的统计数据对 SDN 上的流量进行分类。通过提取流量统计并基于神经网络变量（如 Feed-forward Neural Network、Multilayer Perceptron、Non-linear Autoregressive Exogenous Multilayer Perceptron 和 NaïveBayes）的协议能力，提出了一种基于应用层协议的在线流量分类框架，实施流程如图 7 所示，主要分为在线和离线两个阶段，离线阶段的训练数据和建模作为在线阶段机器学习的输入，二者互相配合共同完成流量分类任务。

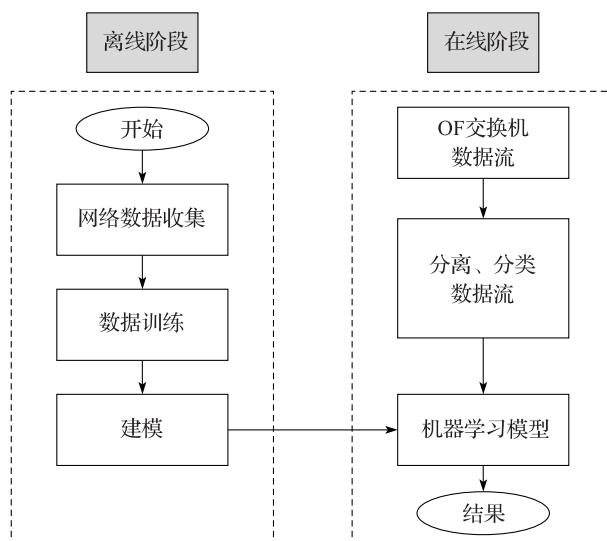


图 7 SDN 网络环境下流量分类实施流程

针对无线局域网 (Wireless Local Area Networks, WLAN) 信道流量分类的不确定性问题, 文献 [43] 结合通用背景模型提出了一种新的高斯混合模型变体, 并首次将其用于对 WLAN 流量进行分类。为了辅助入侵检测, 关键目标是被动监视和分类 WLAN 上的不同流量类型, 以确保遵守网络安全策略。该文提出了一种基于矢量量化决策树的 ML 算法, 被称为 Tree, 自适应并行矢量量化器。与其他测试的 ML 算法相比, 当在同一天对六种不同的流量类型进行训练和测试时, 获得的 F- 分数平均值 (精确度和召回率的调和平均值) > 0.84 , 适用于无线流量分类。

根据上述总结, 表 1 列出了当前流量分类方法的简要概述。

表 1 流量分类方法概述

参考文献	ML 类别	技术	概述
文献 [32]	有监督	基于 EM 聚类	双向聚类实现高效的流量分类
文献 [33]	无监督	基于 EM 聚类	发现来自未知应用程序的流量
文献 [34]	无监督	K-means	流量分类速度得到大幅度提升
文献 [35]	无监督	K-means	获得高达 80% 整体分类准确度
文献 [36]	无监督	GMM	实现流量分类 90% 高准确性
文献 [37]	有监督	朴素贝叶斯聚类	自动识别正确数据流
文献 [38]	无监督	特征提取	特征选择方法提高类别准确性
文献 [39]	半监督	NN (Nearest Neighbor)	适用于稀疏复杂网络
文献 [40]	无监督	PCA	具有更高的精度, 稳定性
文献 [41]	无监督	高斯模型	具有有效地评估流量的性能
文献 [42]	有监督	PCA	流量分类整体准确率达 95%
文献 [43]	无监督	高斯模型	适用于无线流量分类

5.2 入侵检测

入侵检测 (Intrusion Detection, ID) 是网络安全的重要研究领域之一, 所采用的技术按检测对象可分为特征检测与异常检测。传统的特征检测基于先前收集的入侵流量的特征来识别当前网络中的流量是否存在入侵行为。异常检测根据创建的系统概要、网络和用户程序活动的基线图像来识别当前网络是否存在入侵这一异常行为。现阶段, 将机器学习应用到入侵检测也是当前网络安全的研究热点, 许多监督和无监督学习技术已被有效地应用于入侵检测^[21]。网络智慧化也要求网络能够智能地感知到恶意流量的入侵与攻击, 从而采取相应的安全策略。

该领域最初的研究重点是应用基本的无监督聚类算法来检测入侵和异常。例如, 基于密度和网格的无监督方法来准确地将高维数据集分类到一组聚类中, 以提高检测的精度。早在 2005 年, 文献 [44] 就首次提出使用径向基函数 (Radial Basis Functions, RBF) 设计层次化入侵检测系统框架。基于该框架, 串行层次式入侵检测 (Serial Hierarchical Intrusion Detection, SHID) 用于识别误用攻击和自适应异常攻击。同时, 并行层次式入侵检测 (Parallel Hierarchical Intrusion Detection, PHID) 用于增强 SHID 的功

能和性能。最后，实验结果表明，SHID 和 PHID 可以实时检测网络入侵，自动训练新的入侵分类器，并自适应地修改其自身结构。

另一种广泛应用于入侵检测的无监督技术是自组织特征映射 (Self-organizing feature Map, SOM)，SOM 的特点是可以自动组织各种输入并相互推导，然后确定新输入是否符合推导模式，从而检测到异常输入。文献 [45] 提出了一种新的基于无监督学习算法实现网络异常检测的系统架构，借助 SOM 能够保留与有效载荷内容有关的部分信息，以无监督的方式表征数据包有效载荷的重复模式，并将其“压缩”为单个字节的信息。在大多数网段上，流量属于相对少量且经常使用的服务和协议，良好的学习算法可将其映射到相对较少的群集上。实验结果表明，SOM 可以成功学习并识别这些模式。

文献 [46] 设计了 RT-UNNID (Real-Time Unsupervised Neural-Net-based Intrusion Detector) 系统用于入侵检测，该系统提出了一种实时解决方案，使用无监督神经网络来检测流量中已知和新型的网络攻击，并且具有训练、测试和调整无监督网络以进行入侵检测的功能。基于该系统，评估了无监督自适应共振理论网络 (Adaptive Resonance Theory nets, ART) 和一个传统的无监督自组织映射网络 (SOM)。在仿真实验中，作者使用了 27 种类型的攻击评估 RT-UNNID，在 ART 网络和 SOM 网络分别获得了 97% 和 95% 的精确度。

文献 [47] 提出了一种级联 K-means 聚类方法 “K-means + ID3”，用于对计算机网络中异常和正常活动进行分类。K-means 聚类方法首先使用欧几里得距离相似性将训练实例分为 k 个聚类，在每个群集上表示正常或异常实例的密度区域。随后，每个群集上的 ID3 决策树通过学习群集内的子群来改进决策边界。为了获得关于分类的最终决定，使用最近邻居规则和最近共识规则将 K-means 和 ID3 决策相组合。该方法在 NAD (Network Anomaly Data)、DED (Duffing Equation Data) 和 MSD (Mechanical System Data) 三个不同的应用领域进行检测，结果显示检测准确率至少达到了 79.9% 以上。类似地，在文献 [48] 中，研究人员同样提出使用 K-means 聚类方法进行入侵检测，与传统的无监督学习方法相比，该方法显示出了较高的准确性和较好的性能优势。随后，文献 [49] 对现有的 K-means 方法进行改进，提出了基于 “K-means + C4.5”的异常检测方法，该方法级联 K-means 聚类和 C4.5 决策树方法。实验结果显示，与单独的 K-means 和 C4.5 方法相比，该方法在检测准确性方面具有较大提升。

传统的网络入侵检测系统 (Network Intrusion Detection System, NIDS) 依赖由外部代理提供的先验知识，包括签名以及正常操作配置文件。针对该问题，文献 [50] 提出了一种无监督的网络入侵检测系统 (Unsupervised Network Intrusion Detection System, UNIDS)，能够检测未知的网络攻击，而无须使用任何类型的签名、标记流量或训练。UNIDS 提出了基于子空间聚类和多重证据累积技术的新型无监督异常值检测方法，用于精确定位不同类型的网络入侵和攻击，如 DoS/DDoS、探测攻击、蠕虫传播、缓冲区溢出、非法访问网络资源等。实验在三个不同的流量数据集中评估 UNIDS 检测未知攻击的能力，包括 KDD99 数据集以及来自两个运营网络的实际流量数据。此外，UNIDS 使用的算法高度还适用于并行计算，这可以大大缩短系统的总体分析时间。

文献 [51] 提出了协同聚类的概念，考察两种不同的协同聚类算法对两个群集连接的有效性。研究发现，当在整个数据集上运行共同聚类（超过 100 次运行）时，一个群集的攻击平均连接数为 92.44%，另一个群集的攻击平均连接数为 75.84%。这些结果表明共聚类是一种强大的无监督方法，可用于区分正常连接与异常连接。最后，研究人员展望该想法可能会激发对社交网络异常检测的研究，例如识别垃圾邮件发送者和诈骗者。

在文献 [52] 中，研究人员对不同机器学习模型的性能进行了探索。在网络检测中，入侵检测系统可以基于网络和系统行为来检测计算机系统异常，不同机器学习方法探索不同假设空间，使用不同的搜索策略。同时，不同的功能集也适用于不同类型问题。该文献比较了显式、隐式和混合机器学习模型在几种公开可用的入侵检测问题中的性能。研究发现组合使用通常比单独使用机器学习方法提供更好的性能，并且混合模型可以利用其不同的泛化机制来减少基本模型的个别局限性。

文献 [53] 类比生物遗传思想，提出了基于人工免疫系统的入侵检测，其核心思想是通过无监督学习方法获得先天免疫。该方法将网络流量归类为正常和可疑流量，通过对比用于无监督机器学习的不同方法，并选择在该架构中使用基于密度的噪声应用空间聚类，在没有任何先验知识的情况下制定未标记数据的不可见结构。该文献的创新之处在于利用无监督机器学习为人工免疫系统内的适应性免疫提供在线和实时训练。

现阶段，具有强大分析能力的贝叶斯网络（Bayesian Network，BN）分类器已被越来越多地应用于入侵检测。然而，现有的 BN 分类器存在两个主要问题。首先，BN 分类器通常使用基于次优模型的启发式方法进行数据训练。其次，分类器的数据集训练非常耗时。针对上述问题，文献 [54] 通过贝叶斯模型平均（Bayesian Model Averaging，BMA）在贝叶斯网络模型平均（Bayesian Network Model Averaging，BNMA）上构建分类器，BNMA 分类器训练和评估流程如图 8 所示。研究人员在 NSL-KDD 数据集上训练和评估 BNMA 分类器，因为该数据集冗余较少，因此比通常使用的 KDD Cup 99 数据集更具权威性。研究结果表明，BNMA 分类器在检测精度方面明显优于朴素贝叶斯分类器和启发式 BN 分类器。

文献 [55] 提出了一种聚类中心和近邻相结合的入侵检测系统（CANN）。在该系统中，测量并相加两个距离，第一个距离是每个数据样本与其聚类中心之间的距离，第二个距离是数据与同一聚类中最近邻居之间的距离。然后，求和一维距离特征来表示每个数据样本，用于 k-NN(k-Nearest Neighbor) 分类器的入侵检测。基于 KDD-Cup 99 数据集的实验结果表明，CANN 分类器不仅性能优于（或类似于）k-NN，而且支持向量机在原始特征表示的训练和测试方面具有高分类准确率。

文献 [56] 研究并开发了一种识别网络流量异常的算法，该算法通过有限高斯混合模型无监督地拟合一组网络数据。其主要特征是在线选择混合分组的数量以及每个分组的拟合参数。通过推导最小消息长度准则描述准确性和计算复杂性之间的最佳折衷。假定正常网络行为由具有最高协方差矩阵的聚类来解释，而其他较小分量被认为代表异常。实验使用 KDD99 Cup 数据集进行测试，和以往算法相比具有高准确率，同时也降低了误报次数。国内方面，文献 [57, 60] 也提出了基于机器学习的入侵检测方法。

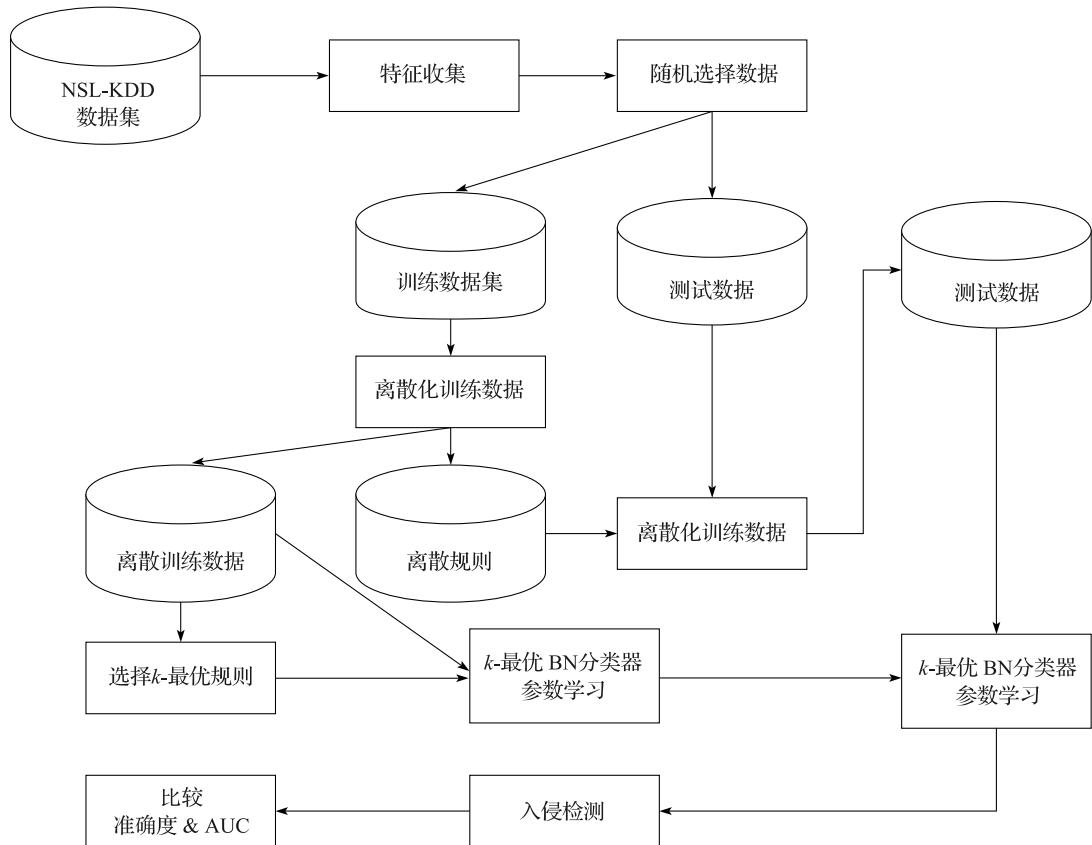


图 8 BNMA 分类器训练和评估流程

根据上述总结，表 2 列出了当前入侵检测方法的简要概述。

表 2 入侵检测方法概述

参考文献	ML 类别	技术	概述
文献 [44]	有监督	分层 NN	应用径向基函数实时检测入侵
文献 [45]	无监督	SOM	基于 TCP 数据行为检测异常
文献 [46]	无监督	SOM	在实时 IDS 中结合 SOM 与 ART
文献 [47]	有监督	K-means + ID3	级联 K-means 聚类和 ID3 决策树
文献 [48]	无监督	K-means	较高准确性和较好的性能优势
文献 [49]	无监督	K-means + C4.5	级联 K-means 聚类和 C4.5 决策树
文献 [50]	无监督	子空间聚类	检测未知的网络攻击
文献 [51]	有监督	协同聚类	共聚类是一种强大的无监督方法
文献 [52]	半监督	SOM	组合使用机器学习提供更好性能
文献 [53]	无监督	空间聚类	提供在线和实时训练
文献 [54]	无监督	BMA	检测精度明显优于 NB 和 BN
文献 [55]	有监督	k-NN	聚类中心和近邻相结合
文献 [56]	无监督	高斯模型	具有高准确率，低误报次数

5.3 QoS/QoE 与 TCP 传输优化

基于机器学习、网络测量等技术，智慧化网络可以对数据流实现更细粒度的感知与控制，在错误恢复、带宽利用、提高吞吐量方面实现更高的性能，从而有效优化服务质量/体验质量（QoS/QoE），实现更加有效的数据传输。

网络需要适应互联网流量的动态性和突发性，保证良好稳定的 QoS/QoE，从而不影响最终用户的体验。然而，由于互联网的动态特性，使得无法通过预定义自适应算法来满足未来应用对网络资源的需求，因此难以保证 QoS/QoE。针对此，研究者提出用机器学习根据当前网络状态来适时调整网络参数，以稳定或最优化用户体验。例如，采用基于监督分类的无监督特征学习架构来控制视频准入和资源管理。

文献 [61] 提出基于增强学习来提高网络的带宽可用性，从而提高网络吞吐量性能。该模型嵌入在创建操作环境模型的节点中，并将其用于为所采取的虚拟动作生成虚拟状态和奖励。由于代理不需要等待操作环境的真实状态和奖励就可以在短时间内探索虚拟操作环境中的各种动作，因此其有助于加快学习过程。

文献 [62] 首次使用机器学习技术对无线传感网（Wireless Sensor Network, WSN）中的 QoS 进行优化，提出了一种基于多参数自组织映射神经网络（Energy Based Clustering-Self organizing, EBC-S）的集中式自适应能量聚类协议。该协议能对传感器节点能量水平和坐标进行聚类，将一些最大能量节点作为 SOM 地图单元的权重，使能量较高的节点吸引能量较低的最近节点，如图 9 所示。该方法能够形成能量均衡的群集并平均分配能量消耗。最后，与以前的协议进行比较，仿真结果证明该方法能够延长网络的生命周期，同时通过分布式节点部署可以确保网络具有更大的覆盖范围。

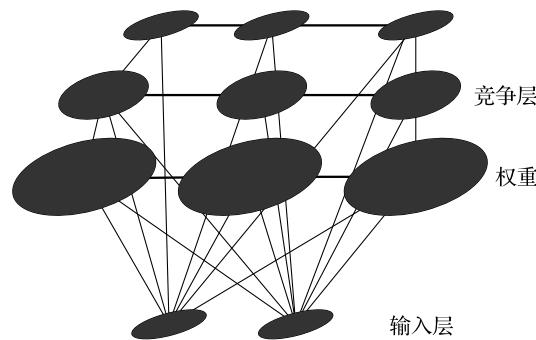


图 9 EBC-S 组织架构

类似地，在文献 [63] 中，作者研究了在资源受限的无线传感器网络中使用协作通信来提供服务质量（QoS），并且提出了基于多代理强化学习的多跳网格协作通信机制（Multi-agent Reinforcement Learning based multi-hop mesh Cooperative Communication, MRL-CC）。在 MRL-CC 中，为可靠的数据传播构建了多跳网格协作结构，使用多智能体强化学习算法定义合作伙伴分配以及编码传输方案。在仿真实验中，MRL-CC 与基于多跳网

格结构的协作通信方案 (Multi-hop Mesh structure based Cooperative Communication, MMCC) 进行比较, 实验度量包括网络流量负载、干扰和传感器节点的移动性。仿真结果表明, MRL-CC 在 QoS 指标的许多方面表现良好, 并且适合于大规模网络和高度动态环境。

文献 [64] 评估基于自组织神经网络结构的语音服务 QoE, 通过估算平均意见得分 (Mean Opinion Score, MOS) 感知指标, 验证了 IP 语音服务中传输语音的质量应该从最终用户的角度来研究。该方法将与 IP 数据传输相关的特定技术参数转化为最终用户对服务的接受程度, 并在基于改进的神经自组织映射 (SOM) 结构中完成算法开发与模拟任务。

随着新兴多媒体服务的出现, 云服务提供商面临着一系列新的挑战, 主要表现为必须对终端用户体验做出快速反应, 并提供更好的服务质量 (QoS)。在云网络视频流传输背景下, 文献 [65] 调查了影响体验质量 (QoE) 的重要参数: 网络参数、视频特性、终端特性和用户配置文件类型; 描述了以平均意见评分 (MOS) 形式收集 QoE 数据集的不同方法。然后, 使用机器学习 (ML) 方法对使用这些方法收集的初步 QoE 数据集进行分类。最后, 该方法评估了六个分类器, 并确定了最适合 QoS/QoE 关联任务的分类器。

为解决融合中心的集中式数据挖掘方案所遇到的传输功耗问题, 文献 [66] 提出了一种基于深度神经网络 (Deep Neural Network, DNN) 的分布式数据挖掘方法, 将深度神经网络划分为不同层次, 并将其放入相应传感器中。通过所提方案, WSN 中的分布式数据挖掘计算单元共享了许多融合中心的计算负担。传输 DNN 处理数据的功耗远小于传输原始数据的功耗。最后, 构建故障检测方案以验证该方法的有效性。结果表明, 检测率为 99%, WSN 共享数据挖掘计算任务的功耗降低了 58.31%。

文献 [67] 提出了一种机器学习方法来支持基于 QoE 的视频准入控制和资源管理算法, 可以从 H.264 编码视频帧中自动提取未知视频序列的质量和速率特性。该方法将无监督特征学习与监督分类技术相结合, 从而提供一种高效且可扩展的方法来估计表征每个视频的 QoE 参数。然后, 使用该 QoE 表征来管理通过共享信道的同时视频传输, 以保证最终用户的最低质量水平。仿真结果表明, 所提出的基于学习的视频序列 QoE 分类优于常用的离线视频分析技术, 并且基于 QoE 的准入控制和资源管理算法优于标准的内容不可知策略。

由于存在恶意的次用户或频道损伤, CRN 通信可能会随时中断, 文献 [68] 考虑认知无线网络 (Cognitive Radio Network, CRN) 中协作频谱感知问题。作者提出了一种可以检测和跟踪恶意用户和 CRN 中异常测量的空间频率框架。该框架将频谱感知和恶意用户识别归纳为特定的优化问题, 旨在利用频谱占用和恶意用户出现所固有的稀疏性完成检测。所提方案通过节点位置信息来获取改进性能, 并且可以处理丢失或不准确的位置信息及噪声报告。仿真结果证明该方法可以顺序地并入多个次用户并适应时变信道。

就 TCP 协议而言, 由于 TCP 提供了可靠且有序的传输, 因此, 拥塞控制是该协议的

主要关注点之一，通常与 RFC 5681 中定义的算法相关。但是，经典的拥塞控制算法在混合有线/无线网络是次优的，因为它们在所有网络情况下都以相同的方式对数据包丢失做出反应。为了克服经典 TCP 拥塞控制算法的这个缺点，文献 [69] 首次介绍了机器学习技术在改善有线/无线网络中 TCP 拥塞控制方面的应用。由于 TCP 在混合有线/无线网络中是次优的，它以相同的方式对由于链路错误造成的拥塞做出反应。因此，使用机器学习技术从随机网络拓扑模拟中获得的数据库自动构建损失分类器，它应该同时满足计算约束和拥塞损失错误分类率的时间变化约束。仿真结果表明，它与 TCP 的组合显著改善了无线网络上的带宽使用，并且不会损害 TCP 在有线网络上的良好行为。国内方面，文献 [71, 73] 提出了基于神经网络的 QoS 检测判别方案，从而提升了网络 QoS 以及 QoE 的性能。

文献 [74] 设计了 Remy，一种在多用户网络中端到端的拥塞控制方法。该方法使用基于三个因素的改进马尔可夫决策过程模型：①关于网络的先验知识；②基于用户需求（即吞吐量和延迟）的流量模型；③最大化的目标函数。通过 ML 学习方法，专门针对该网络部分生成了定制的拥塞控制方案，以适应其独特的需求。然而，使用无监督学习方法对数据包丢失分类仍然是一个开放的研究问题，需要设计针对多模混合网络的实时自适应拥塞控制机制。

根据上述总结，表 3 列出了当前 QoS/QoE 与 TCP 传输优化方法的简要概述。

表 3 QoS/QoE 与 TCP 传输优化方法概述

参考文献	技术	概述
文献 [61]	RL	基于增强学习来提高网络带宽可用性
文献 [62]	聚类	延长网络的生命周期
文献 [63]	SOM	适合于大规模网络和高度动态环境
文献 [64]	SOM	估算平均意见得分感知指标
文献 [65]	MOS	调查影响 QoE 的重要参数
文献 [66]	PCA	数据挖掘计算任务的功耗降低
文献 [67]	ICA	QoE 视频准入控制和资源管理
文献 [68]	NN	检测和跟踪恶意用户
文献 [69]	PCA	改善有线/无线网络中 TCP 拥塞控制
文献 [70]	CNN	波形感知
文献 [71, 73]	神经网络	QoS 感知预测与优化
文献 [74]	Markov 模型	改进马尔可夫决策过程模型

5.4 降维和可视化

网络数据通常由多个维度组成，为了有效地应用机器学习技术，需要减少对网络数据进行降维，这在网络中有许多重要的潜在应用。特别地，可以使用降维来改进网络操作（如针对异常/入侵检测、可靠性分析或故障预测）和网络管理（如通过高维网络数据的可视化），构成网络智慧化的重要基础。

降维技术已被应用于异常/入侵检测系统。例如，SDN 网络中 DDoS 检测技术使用堆叠稀疏自动编码器的无监督来做特征提取和降维。自动编码器的降维在蜂窝网络的故障预测和可靠性分析中也起着至关重要的作用。例如，深层信念网络和自编码器作为自组织网络的逻辑故障预测技术等。

文献 [75] 为了提高入侵检测性能，在网络入侵检测中应用 PCA 降维，利用自动参数选择主要成分分析（Principal Component Analysis, PCA）与支持向量机（Support Vector Machine, SVM）相结合的新方法。通过该技术减少了训练和测试时间，提高了识别入侵准确性。所提方法在 KDD 数据集上进行了测试。考虑到少数攻击出现在测试集的问题，将数据集细分为训练和测试。结果表明，该方法能够成功识别入侵。实验结果表明，该方法的分类精度优于其他使用支持向量机的分类技术。由于分类器输入需要减少特征集，因此，可最小化资源消耗，从而最大限度地减少训练和测试开销时间。

文献 [76] 利用以熵为特征的网络流特征和原始复制器神经网络的扩展版本，提出了用于学习正态模型的深度学习技术。该组合能够对任意大量数据进行入侵检测，从而应用于大型网络。所提方法是无监督的，不需要标记数据，无须假设训练数据完全没有攻击也能准确检测整个网络的异常情况。在真实网络数据上的评估表明，该方法通过秒级训练的神经网络学习正态模型，可以准确地检测到不同强度的资源耗尽攻击。

文献 [77] 提出了 SDN 网络环境下的异常检测程序，一种基于深度学习的多矢量 DDoS 检测系统。SDN 保障了网络的灵活性，可根据不同的目标对网络设备进行编程，并且无须使用第三方供应商的特定硬件。通过使用多尺度 PCA 执行特征提取的降维，将系统实施为 SDN 控制器上的网络应用程序，基于深度学习功能减少从网络流量报头导出的大量功能，然后使用小波分析，从而将异常业务与流分离。仿真实验根据不同的性能指标评估所提系统，将其应用于不同的流量场景，结果显示具有高准确度和低误报率。

为了最大化提升降维效果，文献 [78] 采用模糊集合理论方法降维，结合模糊 C 均值聚类算法评估网络使用质量。作者将研究场景设定为通过数据挖掘技术分析 Web 日志存储库，为解决直接消除低支持数 URL 和小型会话可能导致大量信息丢失的问题，提出了一个模糊解决方案。根据模糊隶属函数为 URL 和用户会话分配权重，随后应用模糊 C 均值聚类算法发现用户配置文件的聚类。最后，在实验评估部分，比较了基于软计算的降维方法与直接消除小会话和低支持数 URL 的传统方法。结果表明，模糊特征评估和降维聚类具有更好的性能和有效性指数。

文献 [79] 提出使用基于最小协方差行列式估计器进行异常检测，并且降低稳健 PCA 的维数。在一个强大的基于 PCA 的异常检测方案中，可以在构建子空间之前从测量的流量数据中去除异常值。虽然稳健 PCA 方法是有效的，但它需要很高的计算成本才能获得子空间的最佳位置矢量和散布矩阵。通过扩展最小协方差行列式估计器（一种稳健 PCA 方法），作者提出了一种新的异常检测方案，具体方法如下。首先，所提方案利用流量周期性检测每个测量流量周期的异常情况；其次，在构建子空间之前，通过使用前一

周期获得的位置矢量和散布矩阵，从测量的流量数据中去除异常值。最后，在 Abilene 网络中，基于测量的流量数据验证所提方案的准确性。

文献 [80] 通过总结现有多媒体流量入侵检测的降维方案，提出了一种基于降维多媒体数据的无监督特征选择方案，并分析了三个主要领域的应用，包括特征选择、入侵检测系统和多数据流中的异常检测。该方案提供了两个基本模型，用于提高异常检测精度的无监督特征选择模型及其扩展版。基于上述模型可以减少包含大流量和大尺寸的数据流，删除不相关和冗余特征。最后，在实验部分，作者提供了无监督特征选择模型案例以及实验结果分析，并将其作为实施阶段的概念模型进行推广。

降维的另一个重要应用是用低维表示高维数据以实现数据的可视化。例如，PCA 和 t-SNE 可以用来提取高维数据的底层结构，然后可以将其视觉化，以帮助人们来洞察和决策^[81]。文献 [82] 提出了一种基于流形学习的可视化工具，用于网络流量可视化和异常检测，实施流程如图 10 所示。当网络发生流量异常或入侵企图时，网络流量分布将发生变化。通过源目地端口，IP 地址或 AS 号监视网络是异常检测技术的重要手段。因此，作者提出基于流形学习的工具，用于大数据集的可视化，强调数据集存在异常小或大的相关性。使用该工具显示 NetFlow 在 Abilene 骨干网上能够记录的异常流量。此外，该工具还提供了一个基于 Java 的在线 GUI，它允许使用可视化方法进行交互式演示。

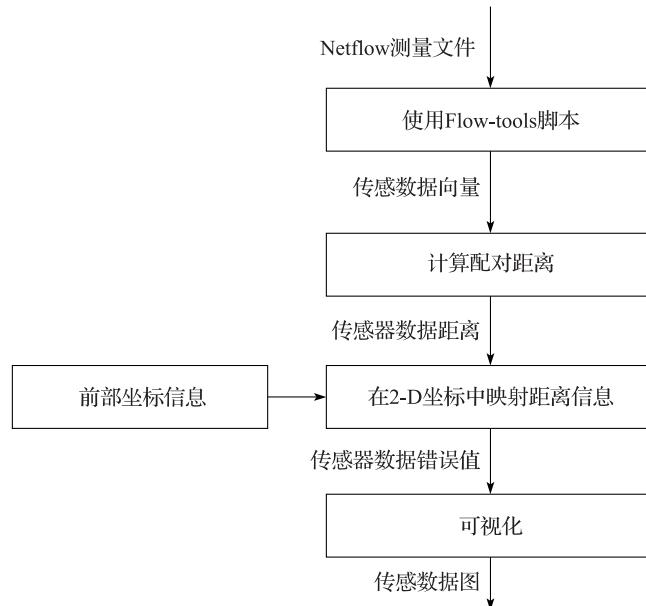


图 10 从 NetFlow 数据输入到数据映射输出的数据可视化流程图

针对机器人网络中流量预测的问题，文献 [83] 提出了基于共形预测器的新型聚类技术。与传统的聚类方法不同，该技术允许通过设置所需的置信度来控制任何群集之外的对象数量，在此主要考虑多类无监督学习问题，并将开发的技术应用于机器人网络流量。随后，作者还介绍了一系列描述机器人流量的扩展功能，并对结果进行了

细致讨论。

随着新型网络的快速发展，降维技术和工具也扩展至多种网络环境。文献 [84] 基于降维和模糊分类技术提出了一种自组织网络（Self-Organizing Networks, SON）异常检测半监督学习方案。该方案提出了增强型半监督分类算法，允许网络结合先验知识适应新的行为模式。实验结果表明，所提方案主动检测与各种故障类别相关的网络异常，同时在低维子空间使用预测数据可以实现可视化网络故障轨迹。

文献 [85] 关注长期演进（Long-Term Evolution, LTE）网络的自动及时检测任务，提出使用次要分量分析降维统计网络中用户级别数据来检测局部的中断。该方法可以从常规用户设备收集用户级统计数据，而不需要大规模耗时的驱动测试和测量行为。仿真结果显示，所提方法在根均方误差（RMSE）和百分比增益方面具有最佳可靠性且有效减小了位置误差。

根据上述总结，表 4 列出了当前降维和可视化方法的简要概述。

表 4 降维和可视化方法概述

参考文献	网络类型	技术	概述
文献 [75]	Cognitive Network	PCA	减少了训练和测试时间
文献 [76]	WSN	深度学习	任意大量数据进行入侵检测
文献 [77]	SDN	PCA	多矢量 DDoS 检测系统
文献 [78]	Web	K-means	采用模糊集合理论方法降维
文献 [79]	Cognitive Network	PCA	最小协方差行列式估计器检测异常
文献 [80]	Multimedia Web	自动编码	降维多媒体数据的无监督特征选择
文献 [81]	Cognitive Network	PCA t-SNE	高维数据可视化
文献 [82]	Neural Network	Manifold Learn	基于流形学习的可视化工具
文献 [83]	Bot Network	聚类	基于共形预测器的新型聚类技术
文献 [84]	SON	t-SNE	可视化网络故障轨迹
文献 [85]	LTE	聚类	检测 LTE 网络局部中断

5.5 路由优化

近年来，随着网络规模的逐步扩大和网络应用的多样化推出，网络流量近乎呈现指数增长。在此背景下，流量控制和路由优化对保证服务质量显得至关重要。特别是在实时多媒体网络中，不当的路由选路会导致拥塞、丢包，而之后的重传又会加剧拥塞。因此，网络拥塞后重传并非最佳选择，改进之处在于需要对路由选路进行优化。传统路由协议的核心理念在于选择具有最大或最小度量值的路径，例如，最短路径（Short Path, SP）算法。然而，传统 SP 算法存在收敛速度慢的问题，不适合动态网络，对网络变化的延迟响应可能导致严重的拥塞^[38]。

为了解决现有路由协议的不足，相关研究人员探索了基于机器学习的方法对路由选路过程进行优化。文献 [86] 首次提出使用基于神经网络的分类协作路由技术，以改善无线传感器网络的使用寿命。该方法首先介绍了神经网络的分类技术，通过减少节点数

据流量来降低能耗。然后，传感器数据使用 ART1 神经网络模型进行分类，利用分布式节点填充无线传感器网络，并设计了合作路由协议用于确保整个网络中所有节点能量均匀分散，从而大幅度提高 WSN 的使用寿命。

与文献 [86] 类似，文献 [87] 在 WSN 中采用基于分层或集群的路由策略用于提高网络寿命。此外，聚类技术被用于实现无线传感器网络中的高效节能路由，其中具有最高残余能量的节点可用于收集数据并发送信息。作者还提出了模糊 C 均值方法用于分析群集协议，仿真结果表明，该协议可以降低能耗，提高网络寿命。

为解决水下传感器网络 (UnderWater Sensor Network, UWSN) 的路由问题 [88]，文献 [89] 提出了一种基于强化学习 QELAR 的自适应和节能感知路由协议。采用 MAC 协议，使传感器节点的剩余能量更均匀地分布以延长网络的生命周期。每个节点的剩余能量以及一组节点之间的能量分配在整个路由过程中都需要考虑，以此计算奖励函数并用于选择合适的路由路径。最后，作者在 Aqua-sim 平台上对所提协议进行了大量仿真，并在分组传输速率、能量效率、时延和生命周期方面与现有的一种路由协议进行比较。结果表明，QELAR 平均寿命比现有协议增加了约 20%。

文献 [90] 描述了分布式路由管理解决方案，考虑关于网络链路状态统计的服务质量 (QoS) 信息。目标是基于当前的资源利用率向路由算法提供动态度量，即路由度量将取决于流量负载和各个链路上的实时时延。在网络拥塞区域，基于情景感知选择路径，通过确定最佳路线来增强全网的链路容量。

文献 [91] 提出了一种基于有监督深度学习的异构网络流量控制路由方案，其中本地节点的流量处理模式如图 11 所示。虽然采用有监督方法可以有效提升路由选择效率，但收集具有标签的异构流量所需的计算量较大，并且输入数据的不平衡和过度拟合使该方法具有较低的容错率。

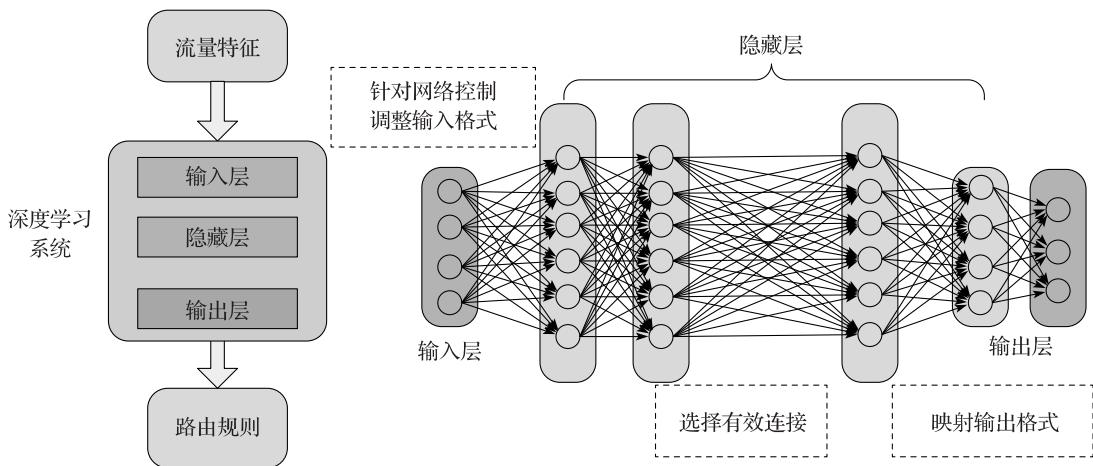


图 11 本地节点流量处理模式

文献 [92] 提出了一个由底层的深层信念网络 (Deep Belief Network, DBN) 和顶层的多任务回归两部分内容构建的深层架构，可以无监督的方式学习流量预测的有效特征。

为了将多任务学习融入所提的深层架构中，DBN 上层使用了多任务回归层进行有监督预测。同时，该架构还设计了一种基于顶层权重的分组方法，以使多任务学习更有效。实验结果表明，该架构对流量预测和路由优化具有高准确性和可用性。

随着软件定义路由器（Software-Defined Router, SDR）的提出，SDR 可以提供具有可扩展性和可编程性的经济高效的数据包处理平台。多核平台极大地提升了 SDR 的并行计算能力，使其能够采用人工智能技术，即深度学习来管理路由路径。文献 [93] 探索了基于深度学习的数据包处理技术的新机遇，以便将计算需求从基于规则的路由计算转换为基于深度学习的高吞吐量数据包处理和路由预测；开发了一个有监督的深度学习系统来构建路由表，并将中央处理器（Central Processing Unit, CPU）和图形处理器（Graph Processing Unit, GPU）在 SDR 中实现有机集成，如图 12 所示。在仿真实验中，作者演示了输入和输出流量模式如何通过计算机模拟来增强深度学习型 SDR 的路由计算，结果表明所提方法在时延、吞吐量和信令开销方面优于传统的 OSPF 路由技术方法。国内方面，文献 [94, 96] 也提出了基于流量识别的路由控制。

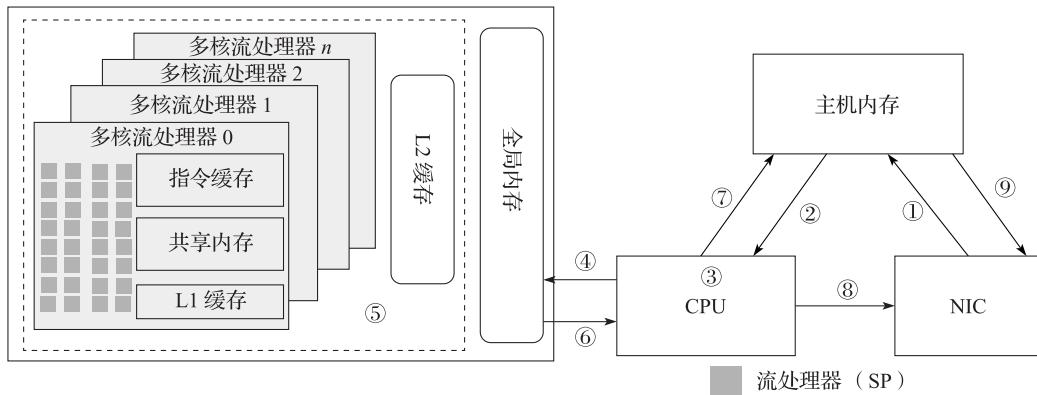


图 12 基于 CPU 和 GPU 集成的 SDR 架构

根据上述总结，表 5 列出了当前路由优化方法的简要概述。

表 5 当前路由优化方法

参考文献	网络类型	技术	概述
文献 [86]	WSN	神经网络	基于神经网络的分类协作路由技术
文献 [87]	WSN	聚类	基于分层或集群的路由策略
文献 [88]	UWSN	MDS	使用 MDS 预处理统计数据集
文献 [89]	UWSN	Q-learning	基于强化学习节能感知路由协议
文献 [90]	Internet Traffic	PCA	基于情景感知执行路由选择
文献 [91]	Internet Traffic	深度学习	有监督深度学习的异构网络流量路由
文献 [92]	Internet Traffic	DBN	多任务学习融合深层架构
文献 [93]	SDN	PCA	CPU + GPU 集成处理模式

6 发展趋势与展望

6.1 智慧化路由与流量调度

传统流量调度机制主要依靠人工预先制定或确定策略的调度算法完成，在复杂多变的网络运行环境下适应性、动态性较差。网络智慧化借助深度学习、增强学习等人工智能技术，能够在 SDN 等新型网络架构基础上实现对海量网络细粒度视图的快速分析和智能分类。通过精细化网络视图分类和人工智能算法快速动态的定制化路由策略，能够提升流量调度的有效性，从而打破传统人工调度策略的局限性，提高精细化的流量调度策略定制能力。

具体来说，网络智慧化可开发基于控制器的全局流量信息定期收集应用，将流量视图信息作为输入数据，利用深度增强学习等人工智能框架对流量特征和路由策略进行匹配训练。通过大量的训练步数，使增强学习框架能够自主探索针对不同流量场景下的最优路由策略，从而得到动态实时跟进网络中的业务流量分布情况进而提供的最佳路由策略。

6.2 智慧化网络安全防御机制

目前的网络安全防御机制主要通过分析现有数据流特征来判断潜在的针对漏洞、后门等的攻击行为，其本质在于将数据流的多维空间信息映射为特定攻击分类。传统技术（如查表、决策树分类等）效率低下，且对 0-day 攻击抵抗性差。

网络智慧化通过深度学习与 DPI 等技术的深度结合，首先从现有防火墙等设备中收集大量已知的网络攻击数据信息，通过给不同的数据添加不同攻击类型的标签得到训练数据集。用所得数据集来训练 DBN 等深度神经网络，借助于深度神经网络对数据集特征的抽象提取能力，可脱离对人工判别的依赖性，实现漏洞的自动发现，提升对入侵流特别是 0-day 攻击的检测效率，从而提高网络的安全防御能力。

6.3 网络资源智慧适配

目前网络功能虚拟化技术、缓存技术等都需要对设备中的计算、存储、带宽等资源进行动态分配和调度。传统的调度策略基于人工分析和决策，难以在系统实时运行过程中对复杂多变的状态进行细致考虑。借助深度学习、增强学习等人工智能技术，网络智慧化可有效提高决策系统对输入状态的分析能力，提升策略制定的多样化和精细化性能。

以目前的数据中心最小化语意相关流调度为例，数据中心在处理并发业务时会将语意相关流分给不同处理单元进行并行操作。通过引入深度增强学习机制，可以调整语意

相关流拆分后的不同处理单元对不同流的资源分配方式，降低语意相关流的平均完成时间，从而实现数据中心资源的智能适配。同时，面对网络中业务需求时间分布不均衡等问题，对数据中心等场景下的网络资源进行智能休眠等操作，也将在绿色网络构建中扮演重要角色。

6.4 智慧化网络规划

传统的网络规划需要工程师建立在大量工程经验基础上制定，且对人工分析依赖性强，难以建立明确的数学模型进行精确描述。深度学习、增强学习等人工智能技术可以借助大量数据的训练提炼系统特性，在网络资源编排、网络切片设置等方面快速给出部署方案。智慧化网络规划具有训练时间短、稳定性高、分析能力强等优势，是下一步发展的重要趋势。

以目前的无线网络为例，在区域化部署网络节点的过程中需要考虑信号覆盖、业务负荷、频谱分配等多项因素，建模复杂，同时也具有明显的经验依赖性。通过深度学习等人工智能模型进行大量部署案例分析，将可能实现机器自动提供参数调整建议，辅助人为决策，提高部署效率。

6.5 网络智慧化运维

随着网络规模的增加，网络运维所需要的工作量急剧增长，网络数据的多样性、多维性、非结构化等特征也会体现得更加明显。在网络运维过程中，需要面对大量网络异常信息，对这些信息进行人为分析存在处理周期长、专业依赖性强、难以多层次关联等问题。

基于深度学习等人工智能技术的网络智慧化运维能够从海量运维记录中准确学习运维规则；能够在问题发现、自动报警、辅助决策等方面自动完成网络运维，大大减轻了运维工程师的工作量，且其移植性、准确性都具有较高的可靠性。

7 结束语

互联网与人工智能深度融合的网络智慧化技术描绘了新型网络演进和发展的前景。利用人工智能技术优化网络结构、资源配置、功能管理与业务承载等，使互联网具备面向泛在用网场景的智慧化“自动驾驶”能力，从而优化网络性能、提升用户体验、降低网络运行和维护成本等，是新型网络技术发展的重要趋势。

本文首先介绍了网络智慧化概念提出的背景和发展历程，探讨了网络智慧化的技术内涵。然后对典型机器学习算法进行了分类，并对网络智慧化技术的国内外研究进展进行了综述和比较。最后对下一步可能的发展趋势进行了分析和讨论，为广大研究人员提供参考。

参考文献

- [1] Clark D D, Partridge C, Ramming J C, et al. A knowledge plane for the internet[C/OL]. Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications ACM, 2003: 3-10. https://www.researchgate.net/publication/221164618_A_Knowledge_Plane_for_the_Internet?ev=pub_cit.
- [2] Thomas R W, Dasilva L A, Mackenzie A B. Cognitive networks [C/OL]. First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. IEEE, 2005: 352-360. https://www.researchgate.net/publication/4194092_Cognitive_networks?ev=prf_cit.
- [3] Agoulmene N, Balasubramaniam S, Botvitch D, et al. Challenges for Autonomic Network Management [C/OL]. MACE 2006. <http://repository.wit.ie/744/>.
- [4] Derbel H, Agoulmene N, Salatün M. ANEMA: Autonomic network management architecture to support self-configuration and self-optimization in IP networks[C/OL]. Computer Networks, 2009, 53(3): 418-430. https://www.researchgate.net/publication/223584134_ANEMA_Autonomic_network_management_architecture_to_support_self-configuration_and_self-optimization_in_IP_networks.
- [5] Zorzi M, Zanella A, Testolin A, et al. COBANETS: A new paradigm for cognitive communications systems[C/OL]. International Conference on Computing, NETWORKING and Communications. IEEE, 2016: 1-7. <https://www.computer.org/csdl/proceedings/icnc/2016/8579/00/07440625-abs.html>.
- [6] Mestres A, Rodrigueznata A, Carner J, et al. Knowledge-Defined Networking[C/OL]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2016, 47(3): 2-10. <https://arxiv.org/abs/1606.06222>.
- [7] Mai V, Devroye N, Tarokh V. The Primary Exclusive Region in Cognitive Networks[C/OL]. Consumer Communications and NETWORKING Conference, 2008. Ccnc. IEEE, 2009: 1014- 1019. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4446530/>.
- [8] Latif S, Pervez F, Usama M, et al. Artificial Intelligence as an Enabler for Cognitive Self-Organizing Future Networks[J/OL]. arXiv preprint 2017. <https://arxiv.org/abs/1702.02823>.
- [9] A Patcha, J M Park. An overview of anomaly detection techniques: Existing solutions and latest technological trends [J/OL]. Computer networks, 2007, 51 (12): 3448- 3470. https://www.researchgate.net/publication/222816540_An_overview_of_anomaly_detection_techniques_Existing_solutions_and_latest_technological_trends.
- [10] T T Nguyen, G Armitage. A survey of techniques for Internet traffic classification using Machine Learning. IEEE Communications Surveys & Tutorials 10 (4), 56- 76 [C/OL]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(4): 56-76. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.474.858&rep=rep1&type=pdf>.
- [11] Abu Alsheikh M, Lin S, Niyato D, et al. Machine Learning in Wireless Sensor Networks: Algorithms, Strategies, and Applications[J/OL]. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2015, 16 (4): 1996-2018. <https://arxiv.org/abs/1405.4463>.
- [12] S Shenker, M Casado, T Koponen, N McKeown, et al. The Future of Networking, and the Past of Protocols[J/OL]. Open Networking Summit, 2011,20: 1-30. <http://arcen.ru/knowledge-base?pdf=s>

- 516287236b4e5. pdf.
- [13] Malik A, Qadir J, Ahmad B, et al. QoS in IEEE 802. 11-based wireless networks: A contemporary review [J/OL]. Journal of Network & Computer Applications, 2015, 55: 24-46. <https://www.semanticscholar.org/paper/QoS-in-IEEE-802.11-based-wireless-networks%3A-A-Malik-Qadir/7937267a84cf289675cf3faddac677de4dcf056a>.
- [14] Qadir J. Artificial intelligence based cognitive routing for cognitive radio networks [J/OL]. Artificial Intelligence Review, 2013, 45(1): 1-72. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10462-015-9438-6>.
- [15] Ahad N, Qadir J, Ahsan N. Neural networks in wireless networks: Techniques, applications and guidelines [J/OL]. Journal of Network & Computer Applications, 2016, 68: 1-27. <http://www.zentralblatt-math.org/zport/en/?q=an%3A11670960>.
- [16] Guyon I M, Gunn S R, Nikravesh M, et al. Feature extraction: foundations and applications [J/OL]. Studies in Fuzziness & Soft Computing, 2006, 205(12): 68-84. http://www.springer.com/cda/content/document/productFlyer/productFlyer-CN_978-3-540-35487-1.pdf?SGWID=0-0-1297-173663711-bookseller.
- [17] Qazi Z A, Lee J, Jin T, et al. Application-awareness in SDN [J/OL]. Computer Communication Review, 2013, 43(4): 487-488. http://www.cs.stonybrook.edu/~zaqazi/demo_paper.pdf.
- [18] Reza M, Javad M, Raouf S, et al. Network Traffic Classification using Machine Learning Techniques over Software Defined Networks [J/OL]. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, 2017, 8(7): 1-9. https://www.researchgate.net/publication/318894970_Network_Traffic_Classification_using_Machine_Learning_Techniques_over_Software_Defined_Networks.
- [19] Kato N, Fadlullah Z M, Mao B, et al. The Deep Learning Vision for Heterogeneous Network Traffic Control: Proposal, Challenges, and Future Perspective [J/OL]. IEEE Wireless Communications, 2016(99): 2-9. <http://pdfs.semanticscholar.org/bf10/e87e1a190773413bd6daec941f7f45abf166.pdf>.
- [20] Grira N, Crucianu M, Boujemaa N. Unsupervised and Semi-supervised Clustering: a Brief Survey [C/OL]. 7th ACM SIGMM international workshop on Multimedia information retrieval. 2013: 125-135. <http://www.csis.pace.edu/~ctappert/dps/d861-12/session3-p1.pdf>.
- [21] Chimphlee W, Abdullah A H, Mohd N M S, et al. Anomaly-Based Intrusion Detection using Fuzzy Rough Clustering [C/OL]. International Conference on Hybrid Information Technology. IEEE, 2006: 329-334. <https://www.semanticscholar.org/paper/Anomaly-Based-Intrusion-Detection-using-Fuzzy-Rough-Chimphlee-Abdullah/b819df296e5f5e7e4db01cc330bc94e02de02914>.
- [22] Leung K, Leckie C. Unsupervised anomaly detection in network intrusion detection using clusters [C/OL]. Proceedings of the Twenty-eighth Australasian conference on Computer Science- Volume 38. Australian Computer Society, Inc, 2005: 333-342. <http://crpit.com/confpapers/CRPITV38Leung.pdf>.
- [23] Roweis S T, Saul L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding [J/OL]. science, 2000, 290(5500): 2323-2326. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.5279&rep=rep1&type=pdf>.
- [24] Fodor I K. A survey of dimension reduction techniques [J/OL]. Neoplasia, 2002, 7(5): 475-485. http://www.researchgate.net/publication/288902944_A_survey_of_dimension_reduction_techniques.
- [25] S Richard S, B Andrew G. Reinforcement learning: an introduction [M/CD]. Cambridge: MIT Press, 1998. http://www.academia.edu/download/38529120/9780262257053_index.pdf.

- [26] Schwartz H M. Multi-agent machine learning: A reinforcement approach [M/CD]. John Wiley & Sons, 2014. <http://www.bokus.com/bok/9781118362082/multi-agent-machine-learning/>.
- [27] Khan M I, Rinner B. Resource coordination in wireless sensor networks by cooperative reinforcement learning [C/OL]. Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 895-900. https://pervasive.uni-klu.ac.at/publications/pdf/Khan_PERCOM2012.pdf.
- [28] Lundén J, Koivunen V, Kulkarni S R, et al. Reinforcement learning based distributed multiagent sensing policy for cognitive radio networks [C/OL]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on. IEEE, 2011: 642-646. https://www.researchgate.net/publication/260636322_Multiagent_Reinforcement_Learning_Based_Spectrum_Sensing_Policies_for_Cognitive_Radio_Networks?ev=prf_cit.
- [29] Lin S C, Akyildiz I F, Wang P, et al. QoS-Aware Adaptive Routing in Multi-layer Hierarchical Software Defined Networks: A Reinforcement Learning Approach [C/OL]. IEEE International Conference on Services Computing. IEEE, 2016: 25-33. <https://www.computer.org/csdl/proceedings/scc/2016/2628/00/2628a025-abs.html>.
- [30] Stampa G, Arias M, Sanchez-Charles D, et al. A Deep-Reinforcement Learning Approach for Software-Defined Networking Routing Optimization [J/OL]. arXiv preprint arXiv: 1709.07080, 2017. <https://arxiv.org/pdf/1709.07080.pdf>.
- [31] Ling M H, Yau K L A, Qadir J, et al. Application of reinforcement learning for security enhancement in cognitive radio networks [J/OL]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 809-829. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156849461500589X>.
- [32] McGregor A, Hall M, Lorier P, et al. Flow clustering using machine learning techniques [C/OL]. International Workshop on Passive and Active Network Measurement. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004: 205-214. https://researchcommons.waikato.ac.nz/bitstream/handle/10289/10848/Flow_Clustering_Using_Machine_Learning_Techniques.pdf?sequence=2.
- [33] Erman J, Mahanti A, Arlitt M. Qrp05-4: Internet traffic identification using machine learning [C/OL]. Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM'06. IEEE. IEEE, 2006: 1-6. http://www.academia.edu/download/44413264/QRP05-4_Internet_Traffic_Identification_20160404-11716-121cq52.pdf.
- [34] Erman J, Arlitt M, Mahanti A. Traffic classification using clustering algorithms [C/OL]. Proceedings of the 2006 SIGCOMM workshop on Mining network data. ACM, 2006: 281-286. <http://www.ce.unioroma2.it/courses/MMI/memopaper2.pdf>.
- [35] Liu Y, Li W, Li Y C. Network traffic classification using K-means clustering [C/OL]. Computer and Computational Sciences, 2007. IMSCCS 2007. Second International Multi-Symposiums on. IEEE, 2007: 360-365. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4392626/>.
- [36] Erman J, Mahanti A, Arlitt M, et al. Offline/realtime traffic classification using semi-supervised learning [J/OL]. Performance Evaluation, 2007, 64 (9-12): 1194-1213. <http://www.hpl.hp.com/techreports/2007/HPL-2007-121.pdf>.
- [37] Nguyen T T T, Armitage G. Clustering to assist supervised machine learning for real-time IP traffic classification [C/OL]. Communications, 2008. ICC'08. IEEE International Conference on. IEEE, 2008: 5857-5862. <https://pdfs.semanticscholar.org/efea/d5fe49d98646211ec567b6ba56137593afad.pdf>.

- [38] Zhen L, Qiong L. A new feature selection method for internet traffic classification using ml [J/OL]. Physics Procedia, 2012, 33: 1338-1345. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212015337>.
- [39] Zhang J, Xiang Y, Wang Y, et al. Network traffic classification using correlation information [J/OL]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed systems, 2013, 24(1): 104-117. <http://www.nsclab.org/yang/publications/TPDS-2011-10-0744.pdf>.
- [40] Yan R, Liu R. Principal component analysis based network traffic classification [J/OL]. Journal of computers, 2014, 9(5): 1234-1240. <https://pdfs.semanticscholar.org/ddec/8ecb112150f247029cbabceac22565d6cb73.pdf>.
- [41] Liu X, Pan L, Sun X. Real-time traffic status classification based on gaussian mixture model [C/OL]. Data Science in Cyberspace (DSC), IEEE International Conference on. IEEE, 2016: 573-578. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7866189/>.
- [42] Parsaei M R, Sobouti M J, Khayami S R, et al. Network Traffic Classification using Machine Learning Techniques over Software Defined Networks [J/OL]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS, 2017, 8(7): 220-225. https://www.researchgate.net/publication/318894970_Network_Traffic_Classification_using_Machine_Learning_Techniques_over_Software Defined_Networks.
- [43] Kornycky J, Abdul-Hameed O, Kondoz A, et al. Radio Frequency Traffic Classification Over WLAN [J/OL]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 56-68. <https://www.computer.org/csdl/trans/nt/2017/01/07475937-abs.html>.
- [44] Zhang C, Jiang J, Kamel M. Intrusion detection using hierarchical neural networks [J/OL]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(6): 779-791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865504002624>.
- [45] Zanero S. Analyzing TCP Traffic Patterns Using Self Organizing Maps [C/OL]. International Conference on Image Analysis and Processing. Springer-Verlag, 2005: 83-90. http://link.springer.com/10.1007/11553595_10.
- [46] Amini M, Jalili R, Shahriari H R. RT-UNNID: A practical solution to real-time network-based intrusion detection using unsupervised neural networks [J/OL]. Computers & Security, 2006, 25(6): 459-468. http://www.researchgate.net/profile/Rasool_Jalili/publication/222674819_RT-UNNID_A_practical_solution_to_real-time_network-based_intrusion_detection_using_unsupervised_neural_networks/links/0c960526139d16334f000000.
- [47] Gaddam S R, Phoha V V, Balagani K S. K-means + ID3: A Novel Method for Supervised Anomaly Detection by Cascading K-means Clustering and ID3 Decision Tree Learning Methods [J/OL]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2007, 19(3): 345-354. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TKDE.2007.44>.
- [48] Meng J, Shang H, Bian L. The Application on Intrusion Detection Based on K-means Cluster Algorithm [C/OL]. International Forum on Information Technology and Applications. IEEE Computer Society, 2009: 150-152. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/IFITA.2009.34>.
- [49] Muniyandi A P, Rajeswari R, Rajaram R. Network Anomaly Detection by Cascading K-means Clustering and C4. 5 Decision Tree algorithm [J/OL]. Procedia Engineering, 2012, 30: 174-182. <http://www.mysciencework.com/publication/show/4592424/network-anomaly-detection-by-cascading-K-means-clustering-and-c4-5-decision-tree-algorithm>.

- [50] Casas P, Mazel J, Owezarski P. Unsupervised Network Intrusion Detection Systems: Detecting the Unknown without Knowledge[J/OL]. Computer Communications, 2012, 35(7) : 772-783. <http://pdfs.semanticscholar.org/aa72/d14bb1aea743424215dd7143a56de7037c9c.pdf>.
- [51] Papalexakis E E, Beutel A, Steenkiste P. Network Anomaly Detection Using Co-clustering [J/OL]. 2017, 40 (6) : 403-410. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/Web/People/epapalex/papers/ASONAM2012.pdf>.
- [52] Miškovic V, Milosavljević M, Adamović S, et al. Application of hybrid incremental machine learning methods to anomaly based intrusion detection[J/OL]. methods, 2014, 5 : 6. https://www.researchgate.net/profile/Vladislav_Miskovic/publication/266946420_Application_of_Hybrid_Incremental_Machine_Learning_Methods_to_Anomaly_Based_Intrusion_Detection/links/543fa90f0cf21227a11a4c12/Application-of-Hybrid-Incremental-Machine-Learning-Methods-to-Anomaly-Based-Intrusion-Detection.pdf.
- [53] Hosseinpour F, Amoli P V, Farahnakian F, et al. Artificial immune system based intrusion detection: innate immunity using an unsupervised learning approach[J/OL]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2014, 8 (5) : 1. https://www.researchgate.net/profile/Farhoud_Hosseinpour/publication/270276153_Artificial_Immune_System_Based_Intrusion_Detection_Innate_Immunity_using_an_Unsupervised_Learning_Approach/links/54a9125e0cf2eecc56e55394/Artificial-Immune-System-Based-Intrusion-Detection-Innate-Immunity-using-an-Unsupervised-Learning-Approach.pdf.
- [54] Xiao L, Chen Y, Chang C K. Bayesian model averaging of bayesian network classifiers for intrusion detection[C/OL]. Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW), 2014 IEEE 38th International. IEEE, 2014 : 128-133. http://web.cs.iastate.edu/~yetianc/files/BMAIntrusionDetection_2014.pdf.
- [55] Lin W C, Ke S W, Tsai C F. CANN: An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors[J/OL]. Knowledge-based systems, 2015, 78 : 13-21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705115000167>.
- [56] Greggio N. Anomaly detection in idss by means of unsupervised greedy learning of finite mixture models [J/OL]. Soft Computing, 2018, 22 (10) : 3357-3372. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-017-2581-z>.
- [57] 江颉, 王卓芳, 陈铁明, 朱陈晨, 陈波. 自适应 AP 聚类算法及其在入侵检测中的应用[J/OL]. 通信学报, 2015, 36 (11) : 118-126. http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=txxb201511014.
- [58] 高妮, 高岭, 贺毅岳, 王海. 基于自编码网络特征降维的轻量级入侵检测模型[J/OL]. 电子学报, 2017, 45 (3) : 730-739. <http://www.ejournal.org.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=10133>.
- [59] 许勐璠, 李兴华, 刘海, 钟成, 马建峰. 基于半监督学习和信息增益率的入侵检测方案[J/OL]. 计算机研究与发展, 2017, 54 (10) : 2255-2267. <http://crad.ict.ac.cn/CN/Y2017/V54/I10/2255>.
- [60] 唐成华, 刘鹏程, 汤申生, 谢逸. 基于特征选择的模糊聚类异常入侵行为检测[J/OL]. 计算机研究与发展, 2015, 52 (3) : 718-728. <http://crad.ict.ac.cn/CN/Y2015/V52/I3/718>.
- [61] Bernardo F, Agustí R, Pérez-Romero J, et al. Distributed spectrum management based on reinforcement learning [C/OL]. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2009. CROWNCOM'09. 4th International Conference on. IEEE, 2009 : 1-6. <https://upcommons.upc.edu/>

- bitstream/handle/2117/8783/NovelFramework.pdf.
- [62] Enami N, Moghadam R A. Energy based clustering self organizing map protocol for extending wireless sensor networks lifetime a coverage[J/OL]. Canadian Journal on Multimedia and Wireless Networks, 2010, 1(4): 42-54. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.468.8347&rep=rep1&type=pdf>.
- [63] Liang X, Chen M, Xiao Y, et al. MRL-CC: a novel cooperative communication protocol for QoS provisioning in wireless sensor networks[J/OL]. International Journal of Sensor Networks, 2010, 8(2): 98-108. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.617.876&rep=rep1&type=pdf>.
- [64] Przylucki S. Assessment of the QoE in Voice Services Based on the Self- Organizing Neural Network Structure[C/OL]. International Conference on Computer Networks. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: 144-153. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-21771-5_16.
- [65] Mushtaq M S, Augustin B, Mellouk A. Empirical study based on machine learning approach to assess the QoS/QoE correlation [C/OL]. Networks and Optical Communications (NOC), 2012 17th European Conference on. IEEE, 2012: 1-7. https://www.researchgate.net/profile/Msajid_Mushtaq/publication/261427466_Empirical_study_based_on_machine_learning_approach_to_assess_the_QoSQoE_correlation/links/58eca236a6fdcc43baf89b12/Empirical-study-based-on-machine-learning-approach-to-assess-the-QoS-QoE-correlation.pdf.
- [66] Li C, Xie X, Huang Y, et al. Distributed data mining based on deep neural network for wireless sensor network[J/OL]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(7): 157453. <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2015/157453>.
- [67] Testolin A, Zanforlin M, De Grazia M D F, et al. A machine learning approach to QoE-based video admission control and resource allocation in wireless systems[C/OL]. Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET), 2014 13th Annual Mediterranean. IEEE, 2014: 31-38. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.717.3471&rep=rep1&type=pdf>.
- [68] Kapoor G, Rajawat K. Outlier-aware cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J/OL]. Physical Communication, 2015, 17: 118-127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490715000427>.
- [69] Geurts P, Khayat I E, Leduc G. A machine learning approach to improve congestion control over wireless computer networks[C/OL]. IEEE International Conference on Data Mining. IEEE Computer Society, 2004: 383-386. <http://www.computer.org/csdl/proceedings/icdm/2004/2142/00/01410316-abs.html>
- [70] Zhang M, Diao M, Guo L. Convolutional neural networks for automatic cognitive radio waveform recognition[J/OL]. IEEEAccess, 2017, 5: 11074-11082. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7949002>.
- [71] 熊伟, 李兵, 陈军, 周华昱. 一种基于预测控制的SaaS系统自适应方法[J/OL]. 计算机学报, 2016, 39(2): 364-376. http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%288d5c93115bcfbd8157228ac76172f266%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2Fwww.cqvip.com%2Fqk%2F90818x%2F201602%2F668051726.html&ie=utf-8&sc_us=10878735635661813336.
- [72] 吕晨, 姜伟, 虎嵩林. 面向动态环境的复合服务自适应方法[J/OL]. 计算机学报, 2016, 39(2): 305-322. [http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%288d5c93115bcfbd8157228ac76172f266%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2For.nsfc.gov.cn%2Fhandle%](http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%288d5c93115bcfbd8157228ac76172f266%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2For.nsfc.gov.cn%2Fhandle%2F)

- 2F00001903-5%2F481582&ie = utf-8&sc_us = 10878735635661813336.
- [73] 周彧聪, 刘轶, 王锐. 互补学习: 一种面向图像应用和噪声标注的深度神经网络训练方法 [J/OL]. 计算机研究与发展, 2017, 54 (12) : 2896-2906. <http://crad. iet. ac. cn/CN/10. 7544/issn1000-1239. 2017. 20170637.>
- [74] Winston K, Balakrishnan H. TCP ex machina: computer-generated congestion control [C/OL]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. ACM, 2013, 43 (4) : 123-134. <https://dspace. mit. edu/openaccess-disseminate/1721. 1/79837.>
- [75] Thaseen I S, Kumar C A. Intrusion detection model using fusion of PCA and optimized SVM [C/OL]. Contemporary Computing and Informatics (IC3I), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 879-884. <http://www. academia. edu/download/36455838/07019692. pdf.>
- [76] Cordero C G, Hauke S, Mühlhäuser M, et al. Analyzing flow-based anomaly intrusion detection using Replicator Neural Networks [C/OL]. Privacy, Security and Trust (PST), 2016 14th Annual Conference on. IEEE, 2016: 317-324. [http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7906980/.](http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7906980/)
- [77] Chen Z, Yeo C K, Lee B S, et al. A novel anomaly detection system using feature-based MSPCA with sketch [C/OL]. Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2017 26th. IEEE, 2017: 1-6. [http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7928975/.](http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7928975/)
- [78] Ansari Z, Azeem M F, Babu A V, et al. A fuzzy approach for feature evaluation and dimensionality reduction to improve the quality of web usage mining results [J/OL]. arXiv preprint arXiv: 1509. 00690, 2015. <https://arxiv. org/pdf/1509. 00690.>
- [79] Matsuda T, Morita T, Kudo T, et al. Traffic anomaly detection based on robust principal component analysis using periodic traffic behavior [J/OL]. IEICE Transactions on Communications, 2017, 100(5) : 749-761. https://search. ieice. org/bin/summary. php? id = e100-b_5_749.
- [80] Almusallam N Y, Tari Z, Bertok P, et al. Dimensionality reduction for intrusion detection systems in multi-data streams—A review and proposal of unsupervised feature selection scheme [J/OL]. Emergent Computation. Springer, Cham, 2017: 467-487. https://link. springer. com/chapter/10. 1007/978-3-319-46376-6_22.
- [81] Maaten L, Hinton G. Visualizing data using t-SNE [J/OL]. Journal of machine learning research, 2008, 9 (Nov) : 2579-2605. <http://www. jmlr. org/papers/volume9/vandermaaten08a/vandermaaten08a. pdf.>
- [82] Patwari N, Hero III A O, Pacholski A. Manifold learning visualization of network traffic data [C/OL]. Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Mining network data. ACM, 2005: 191-196. <http://www. academia. edu/download/33258/2osj2e4oxkofvllh2ia1. pdf.>
- [83] Cherubin G, Nouretdinov I, Gammerman A, et al. Conformal clustering and its application to botnet traffic [C/OL]. International Symposium on Statistical Learning and Data Sciences. Springer, Cham, 2015: 313-322. <http://s2lab. isg. rhul. ac. uk/papers/files/slids2015. pdf.>
- [84] Liao Q, Stanczak S. Network state awareness and proactive anomaly detection in self-organizing networks [C/OL]. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2015: 1-6. [http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7414141/.](http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7414141/)
- [85] Chernov S, Petrov D, Ristaniemi T. Location accuracy impact on cell outage detection in LTE-A networks [C/OL]. Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2015 International. IEEE, 2015: 1162-1167. [http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7289247/.](http://ieeexplore. ieee. org/abstract/document/7289247/)
- [86] Akojwar S G, Patrikar R M. Improving life time of wireless sensor networks using neural network based

- classification techniques with cooperative routing [J/OL]. International Journal of Communications, 2008, 2 (1): 75-86. <https://pdfs.semanticscholar.org/daab/2ce621826bdc062c741088393495cd0d2ad0.pdf>.
- [87] D Hoang, R Kumar, S Panda. Fuzzy C-Means clustering protocol for wireless sensor networks [C/OL]. in Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on, IEEE, 2010: 3477-3482. https://www.researchgate.net/publication/224195747_Fuzzy_C-Means_clustering_protocol_for_Wireless_Sensor_Networks.
- [88] A Zoha, A Saeed, A Imran, M A Imran, A Abu-Dayya. A learning-based approach for autonomous outage detection and coverage optimization [J/OL]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, vol. 27, no. 3, 2016: 439-450. http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%28c257cd6baa97aacd3bb7ba80db53e181%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2Fdli.acm.org%2Fcitation.cfm%3Fid%3D3035419%22&ie=utf-8&sc_us=9587793435109100362.
- [89] H Tiansi, F Yunsi. QELAR: a machine-learning-based adaptive routing protocol for energy-efficient and lifetime-extended underwater sensor networks [J/OL]. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, no. 6, 2010: 796-809. http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%286aace42eb17cde9ac5a911ebe9ed6610%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fdocument%2F5408367%2F&ie=utf-8&sc_us=17182611328128271147.
- [90] Barabas M, Boanea G, Bogdan R A, et al. Congestion control based on distributed statistical QoS-aware routing management [J/OL]. Przeglad Elektrotechniczny, 2013, 89(2b): 251-256. <http://www.pe.org.pl/articles/2013/2b/60.pdf>.
- [91] Kato N, Fadlullah Z M, Mao B, et al. The deep learning vision for heterogeneous network traffic control: proposal, challenges, and future perspective [J/OL]. IEEE wireless communications, 2017, 24 (3): 146-153. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7792369/>.
- [92] Huang W, Song G, Hong H, et al. Deep architecture for traffic flow prediction: deep belief networks with multitask learning [J/OL]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15 (5): 2191-2201. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6786503/>.
- [93] Mao B, Fadlullah Z M, Tang F, et al. Routing or computing? the paradigm shift towards intelligent computer network packet transmission based on deep learning [J/OL]. IEEE Transactions on Computers, 2017, 66(11): 1946-1960. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7935536/>.
- [94] 卜超, 王兴伟, 黄敏. 自适应路由服务合成: 模型及优化 [J/OL]. 软件学报, 2017, 28 (9): 2481-2501. <http://www.jos.org.cn/html/2017/9/5299.htm>.
- [95] 卜超, 王兴伟, 李福亮, 黄敏. 大数据驱动的自适应路由服务定制机制 [J/OL]. 计算机学报, 2016, 39 (1): 65-79. <http://ejc.ict.ac.cn/online/onlinepaper/bc-20151228130547.pdf>.
- [96] 黎阳, 王哲, 张楚文, 戴惠辰, 徐文俊. 面向车载自组织网络路由的轨迹预测算法 [J/OL]. 计算机研究与发展, 2017, 54 (11): 2421-2433. http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%28e788c7946957df8eb75b56ced71e00c2%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.7544%2Fissn1000-1239.2017.20170359&ie=utf-8&sc_us=13194270993841363899.

作者简介

邬江兴 男，中国工程院院士，国家数字交换系统工程技术研究中心主任，教授，博士生导师，主要研究方向为信息网络与交换、先进防御技术等。主持研制成功我国第一台、具有国际先进水平的大型程控数字交换机（HJD04）并迅速实现产业化；作为国家863计划“中国高速信息示范网”总体组长，主持研制成功我国第一个高速宽带信息示范网；作为国家863计划“高性能宽带信息网”重大专项总体组组长，在长江三角地区主持建成了全球规模最大、支持宽带流媒体业务的高性能宽带信息示范网；主持完成多项国家科技重大专项实施方案论证以及总体设计工作。荣获国家科技进步一等奖3项、二等奖3项、三等奖1项，荣获国家有突出贡献的中青年专家、全国优秀科技工作者、何梁与何利基金科学与技术成就奖等荣誉，并带领团队获得国家科技进步奖创新团队奖。



胡宇翔 男，国家数字交换系统工程技术研究中心副研究员，博士，长期从事宽带信息网络理论与技术研究、核心设备开发工作。先后参加了7项国家或军队重点课题，作为课题负责人主持国家973计划课题“网络组件模型与聚类机制”、国家自然科学基金课题1项、国家863计划子课题2项。近五年累计发表论文40余篇，其中SCI、EI检索20余篇，获得国家科技进步二等奖1次，省部级科技进步奖1次，申请国家发明专利20余项，出版专著4部。



兰巨龙 男，国家数字交换系统工程技术研究中心教授，博士生导师，长期从事宽带信息网络理论与技术研究、核心设备开发工作。先后主持或参与了多项国家和军队重大工程的建设，作为项目首席科学家主持国家973计划项目“可重构信息通信基础网络体系研究”，国际上首次提出了柔性可重构网络体系架构，主持了4项国家863计划重大课题，同时作为课题组副组长或主要贡献者参加了10余项国家或军队重大课题，主持研制成功我国第一台全部核心技术拥有自主知识产权的高性能IPv6路由器，先后获得国家科技进步二等奖1次，省部级科技进步一等奖3次，军队科技进步一、二等奖各1次，申请国家发明专利30余项，发表学术论文70余篇，出版专著4部。



面向云端融合的分布式计算技术研究进展与趋势

CCF 分布式计算与系统专业委员会

叶保留^{1,2} 陈贵海¹ 陈道蓄¹ 廖小飞³ 过敏意⁴ 郭嵩⁵

¹南京大学，南京

²河海大学，南京

³华中科技大学，武汉

⁴上海交通大学，上海

⁵香港理工大学，香港

摘要

近年来，随着复杂智能化应用服务的兴起和边缘互联网规模的不断扩大，我们面临的各类数据处理的规模呈现爆炸式的增长趋势，这导致传统的云中心式数据处理框架产生了计算、存储、带宽等多维资源瓶颈，难以保证服务质量。为了缓解云计算中心的负载，面向云端融合的分布式计算模型充分利用终端设备的自有资源，有机地结合了云服务器构成的集中化计算环境和边缘设备构成的泛在化计算环境，其相关领域的研究已经成为计算机网络领域的热点。为了更好地回顾近年来云端融合领域相关的工作，本章将以云端融合的理论、技术、平台应用等方向的高水平科研成果为基础，从体系架构、资源优化技术、网络互联机制、资源管理与调度、软件架构设计等研究热点对国内外的研究进展进行综述和客观对比，并对各个方向上的研究趋势和面临的挑战进行了详细的分析和说明。最后，本章针对该方向未来的发展趋势和主要的科学问题进行了展望。

关键词：云端融合，云计算，边缘计算，计算/数据迁移，资源共享，服务协同

Abstract

In recent years, with the emerging computational complex and intelligent applications, and meanwhile the continuous expansion of the edge networks, the scale of various types of data processing faced by human beings has exploded. This leads to multidimensional resource bottlenecks, such as computing, storage, and bandwidth, in traditional cloud-centric data processing frameworks, and such that the service quality is difficult to guarantee. In order to alleviate the load of the cloud computing centers, the distributed computing model based on fusion of cloud and end-devices has become a hot topic in the domain of computer networks. The main idea of the fusion of cloud and end-devices is efficient utilization of own resources on terminal devices, which organically combines the centralized computing environment composed of cloud servers and the ubiquitous computing environment composed of edge devices. Aiming to better review the related work in the field of the fusion of cloud and end-devices, and based on the high-level scientific research results of theories, technologies and platform applications in the fusion of cloud and end-devices, in this chapter we summarize and objectively

compare the research progresses at home and abroad in aspect of system architecture, resource optimization technology, network interconnection mechanism, resource management and scheduling, and software architecture design. Then, we conclude and present the research trends and challenges in all these directions. Finally, we summarize the main development and the scientific research topics to address in the future.

Keywords: Fusion of Cloud and End-Devices, Cloud Computing, Edge Computing, Computation/Data Migration, Resource Sharing, Service Collaboration

1 引言

伴随着互联网规模的不断扩大和大数据的兴起，云计算^[1]技术快速发展，为互联网用户提供了可随时随地随需访问的共享化资源池，具备快速接入、灵活部署等特点，在教育、社交、存储、电子商务等方面得到广泛使用，深刻改变了人们日常工作方式和IT运维模式。例如软件即服务（SaaS）被微软、Salesforce等软件服务提供商广泛采用，以租赁的形式为消费者提供应用程序的服务。与此同时，基于云计算的分布式可拓展基础设施与数据处理框架日趋成熟，如通用分布式计算框架MapReduce模型^[2]、分布式文件系统Hadoop^[3]、新型分布式系统Apache Spark内存计算框架^[4]等，被广泛应用到亚马逊、阿里、华为、Facebook等知名IT企业，对应用程序的开发与运行方式产生巨大影响，使得基于云计算的大规模分布式处理与海量数据存储易于编程实现。

然而，近年来随着移动互联网和物联网应用的蓬勃发展，智能终端设备不断泛在普及，感知能力不断增强，感知数据规模呈现爆炸式增长趋势。据思科的云指数预测^[5]，到2021年，全球范围将有超过500亿的终端设备，每年产生的数据将达到847ZB，其中约10%的数据需要通过计算处理。相比而言，全球数据中心的存储能力预计仅能达到2.6ZB，而网络流量为19.5ZB。现有云计算采用“中心交付”服务模式，即所有数据均交由云计算中心处理。因此，云端之间通信、计算、存储资源供需的巨大差距使得云计算中心负载正逐渐达到瓶颈，严重影响云服务质量，如云端往返时延，网络拥塞等问题，使得云计算面临“传不畅、算不动、存不下”的挑战，难以满足终端环境爆炸式增长的数据处理需求。

实际上，终端设备飞速增长也为终端环境聚集了大量可用资源。如图1所示，根据摩根斯坦利的预测，互联网终端、移动互联网终端以及可穿戴设备等终端设备预计在2020年将达到200~500亿。而根据贝尔定律，每十年将产生新一代计算机，其计算及存储能力呈现倍数级增长。因此，终端设备的广泛部署在提升数据感知能力的同时，也使终端环境的资源能力大规模增长。从这个角度来看，相对于云计算提供了以软硬件资源管理和服务化为核心的集中化计算环境，终端设备则形成了以互联网及其延伸网络为基础的泛在化计算环境。因此，通过利用终端设备自有资源可有效缓解云计算中心的负载。为此，业界提出了，基于云端融合理念，试图通过融合以云计算为核心的集中化资源及以终端设备为核心的泛在化资源，为支持超大规模数据处理提供分布式计算支撑平台。

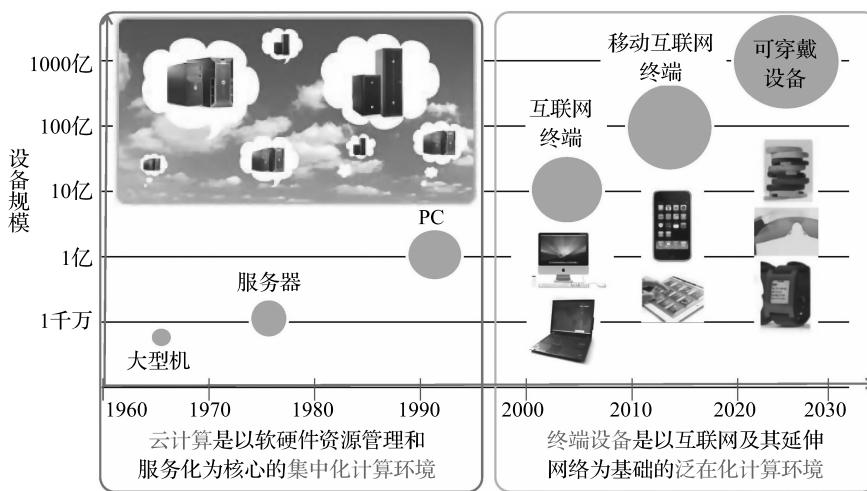


图 1 终端设备规模发展趋势

为了缓解云计算中心处理压力、消除计算与通信瓶颈、提升系统服务质量，学术界和工业界基于“将计算交付到数据感知源、就近提供智能服务”的思想，从不同角度对云端融合相关技术开展了研究，先后提出了边缘计算 (Edge Computing)^[6]、移动边缘计算 (Mobile Edge Computing)^[7]、雾计算 (Fog Computing)^[8]、分散计算 (Dispersed Computing)^[9] 等分布式计算范型及微数据中心 (Micro Data Center)^[10]、朵云 (Cloudlet)^[11] 等具体实现架构。从技术角度来看，云端融合的核心思想是计算/数据在云端资源体系下的协同迁移，即根据云端资源状态，建立有效的任务/数据动态迁移和资源协同机制，在保证用户 QoS 需求的基础上实现“就近”服务，平滑系统负载。实际上，“计算/数据迁移”并不是云端融合面临的新挑战。研究者在自组织无线网络中的任务迁移和云平台中的虚拟机迁移等领域曾展开深入的研究。但云端融合场景中呈现出边缘设备数量庞大化、设备类型异构化、网络拓扑动态化、数据海量增长化、应用多样化等特征，迁移环境更为开放、松散、动态、复杂，云端融合环境中的计算/数据协同迁移更具挑战，面临以下三个基本问题：

- 1) 迁移谁？是计算迁移还是数据迁移或是计算和数据同时迁移？需要根据云端环境的可用资源能力做动态决策；
- 2) 迁哪里？由于云计算中心和终端设备资源的差异性及动态性，需要根据系统可用资源状态做动态调度；
- 3) 如何迁？由于云端软件环境不同，需要提供软件使能支持，支撑计算/数据的自适应迁移。

围绕上述问题，业界从多个层面展开深入了研究。为更好地理解面向云端融合的分布式计算支撑技术相关工作，本报告将分析面向云端融合的体系设计、基础理论、软件架构等方面的研究进展，从体系架构模型、资源优化技术、网络互联机制、资源管理与调度、软件架构设计等角度分析国内外相关研究热点和关键技术挑战，并对未来发展态势和前景进行展望，以期能为我国的云端融合相关领域的研究提供参考。

2 国际研究现状

2.1 云端融合体系架构

终端设备感知能力的不断增强使得核心网络边缘聚集着大量数据，然而受制于传输带宽和能源消耗等问题，以数据中心为代表的云计算数据处理模式越来越难以满足需求。与此同时，移动智能终端设备的发展普及使得云端融合的基础设施环境及计算模式发生深刻变化，云端融合场景从“调整或优化基础设施设计”向“动态融合终端设备资源能力”延伸迁移。云端融合环境中基础设施多样性、复杂性日趋明显，呈现出终端设备数量众多、种类繁多、位置松散、资源异构等特点。针对上述变化趋势，学术界和工业界针对面向云端融合的计算模型及分布式体系架构进行了探索，提出边缘计算、雾计算、分散计算等多种分布式计算范型和相应的实现架构，如图 2 所示。

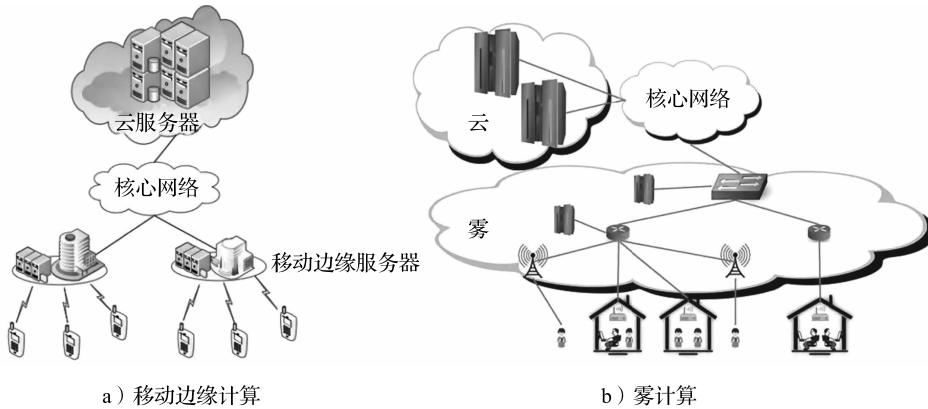


图 2 移动边缘计算和雾计算的基本架构

边缘计算^[6-7]作为一种分布式计算范型，其理念起源于 P2P(Peer-to-Peer) 计算和内容分发网络 (Content Distribution Network, CDN)，其基本思想与云端融合的目标不谋而合，即在数据感知源建立资源供给机制，为用户提供就近服务，以期缓解服务器/数据中心压力、降低网络传输带宽消耗，并加快数据处理效率、增强服务响应能力。移动边缘计算 (Mobile Edge Computing, MEC) 将计算能力下行到分布式基站，在无线基站设备层增加计算、存储、处理等功能，将传统无线基站升级为智能化基站。此外，根据白皮书^[12]，MEC 正式纳入 5G 标准架构中，支持在 5G 时代实现数据中心与移动网络的融合。移动边缘网络时延更低，能有效抑制网络拥塞，提供更多的网络信息及网络控制功能给开发者，可有效打破云和端的界限。Tran^[14]等人提出一种位于移动边缘网络的实时上下文感知框架，包括 MEC 服务器和移动设备，并将边缘的异构资源合并在一起，在移动边

缘编排、协作缓存和处理以及多层干扰消除三个样例中证实能有效将 MEC 整合到 5G 生态系统中。雾计算^[8]由思科提出，并于 2015 年 11 月联合戴尔等成立了非盈利性组织开放雾联盟。雾计算是云计算的延伸，其主要由各种性能相对较弱、更为分散的计算设备组成，具有低延时、位置感知、广泛的地理分布、适应移动性应用、支持更多的边缘节点。与云计算相比，雾计算主要依赖的不是位于中心位置的远程服务器，而是在终端和数据中心之间新增一个网络边缘层，使得边缘网络成为云，通过使用距本地端设备较近的分布式计算资源，将不需要或者不急需放到云上的数据在边缘层直接处理和存储，从而大大减少云计算中心压力，同时提升传输速率、降低延迟性。针对雾架构最为关键的最大化工作负载和降低延迟需求，Ali 等人^[13]提出了联合云端选择和延迟最小化，转化成多对一匹配游戏问题，提供了分布式和自组织的解决方案。

从具体的实现架构角度。微数据中心（Micro Data Centers, MDC）概念首先出现在文献 [10] 关于云计算的一篇综述文献中，微数据中心着眼于降低物联网和内容分发网络的通信延迟和带宽成本，将小型化的数据中心部署到更靠近利用点的地方，通过对硬件和软件的整合，实现端到端的计算、存储和网络连接。通常，微数据中心的一个独立机架级系统包含传统数据中心的所有组件。其中由荷兰政府资助的 IBM 和 ASTRON 合作的 DOME 项目^[15]成功应用了由 2U 19 机架单元组成的微数据中心，专注于世界上规模最大的射电望远镜阵列项目。微数据中心是一种融合架构，首次引入了边缘的概念，部分解决了时延敏感性应用的性能问题。朵云（Cloudlet）^[11]是更具有移动性的小型数据中心，位于互联网边缘，可以被附近的设备使用。Cloudlet 目标是支持资源密集型和实时交互的移动应用，例如增强现实应用中所需要的不超过 16ms 的端到端延迟。与云计算相比，朵云侧重于实时交互，提供了一个资源门户，用于实时更新移动设备，使其具有访问远程云的能力。当移动设备用户从他当前使用的朵云移动到另一朵云附近时，需要将前一朵云上的服务卸载到后续朵云上，以其保持端到端的网络质量。其过程与云计算的动态迁移类似，但此时的虚拟机迁移发生在广域网上。利用朵云可以构建分布式的移动云计算平台，拓展了用户可用资源，进而打破了云和端的隔阂，提高了服务质量。考虑到无人驾驶飞行器可在有或无基础设施的无线系统中向移动终端用户提供增强覆盖或中继服务能力，为充分利用无人驾驶飞行器所具有的计算能力，Jeong 等人^[16]考虑移动端的计算卸载问题，通过联合优化链路比特分配和 Cloudlet 轨迹，最小化移动能量的消耗。随着边缘设备日益多样，对跨不同计算平台构建无缝衔接的应用程序体验提出了巨大挑战，而 Cloudlet 的出现能有效解决此类问题，在边缘网络中平衡多个 Cloudlet 之间的工

作负载，可以优化移动应用程序性能，减小时延，提升用户体验^[17]。

此外，多云平台协作及多层次云平台架构也成为近期研究者关注的热点。围绕如何在云平台之间建立协作机制来缓解地理位置分散的任务处理压力、提高数据处理效率这一问题，Jinlong 等人^[18]提出了 CoCloud 原型系统，通过融合多个云存储服务，设计相应的代理部署、协同传输、基于文件相似性的协作分发以提高用户服务体验。Han 等人^[19]面向分布式文件存储，设计并实现 MetaSync 系统，通过多个云平台提供的同步服务实现安全可靠的文件同步。针对多数据中心任务调度问题，Chen 等人^[20]结合数据的位置属

性及数据中心间的带宽特征，设计出一种保证公平性的作业调度算法。

2.2 云端融合资源优化技术

云端融合下的数据处理通常需要由云计算中心和边缘设备基于分布式协作完成，其核心是如何根据计算、存储、通信资源动态部署任务和实施数据迁移，从而在减少资源开销的前提下满足用户 QoS 需求。移动智能终端设备的快速普及虽丰富了边缘侧资源，但其数据感知能力的不断增强也导致边缘侧数据爆炸式增长，对任务处理提出更高要求。与此同时，边缘网络基础设施的弱连接特征（infrastructure-less）也日趋突出，加剧了分布式协同的复杂度。在运行过程中，受限于设备异构性、系统动态性、任务高并发性及应用类型多样性等诸多因素，计算、存储、通信等资源极易出现失衡状态，从而产生计算缓慢、网络受限等性能瓶颈。本节将总结云端融合体系中计算、存储、通信资源的优化技术最新的研究进展。

面向云端融合的分布式计算任务的执行依赖于计算、存储、网络资源，对三类资源的消耗并非相互独立，而是存在密切的关联关系。人们期望在多个节点上进行分布式计算的速度能够与计算节点规模同步增长。然而，通过对实际分布式系统的观察发现，当计算节点规模增长到数十上百个时，系统表现出加速饱和现象，即计算速度的增长远远落后于计算节点规模的增长速度，从而严重影响了整体计算性能。产生上述现象的原因主要有以下两个方面：

1) 通常面向云端融合的大规模分布式系统中的终端节点由不可靠的低端商用硬件构成，常会出现节点突然失效的现象。与此同时，由于共享资源竞争、网络环境变化、节点负载失衡、系统维护、功率受限等诸多原因，节点在执行计算任务的时候，任务完成时间难以预测且表现出较大的波动，从而存在部分节点计算任务完成时间远远大于平均完成时间，严重拖累整体计算。

2) 在分布式计算过程中，一方面，节点之间常需要进行大量的数据交换。例如，在面向计算集群的 MapReduce 框架中，Map 阶段与 Reduce 阶段之间需要进行数据洗牌；在面向边缘网络及分散终端的 Master-Node 框架中，终端 Node 之间以及终端与 Master 之间同样存在大量的数据交换。但在分布式系统中，带宽资源较为受限，因此大量的数据通信会构成整个分布式计算任务的性能瓶颈。另一方面，对同一计算任务而言，可通过不同的分布式计算方法获得相同的性能，但在资源需求及开销方面存在较大差异，因此通过结合终端设备与云计算中心之间存在的资源差异性，变更调整计算任务的分布式计算方法，能够实现不同资源的等效转换，从而消除资源瓶颈，进而提升系统整体性能。然而，这种等效转换并非无限制的，而是受限于计算、存储、通信之间的内在权衡关系。

为解决面向云端融合的分布式计算环境中节点失效/计算落后问题、通信瓶颈等问题，国外学者从计算、存储、通信三个方面研究资源的内在权衡理论模型以及针对具体分布式计算问题的优化方法。现有的研究成果表明，结合适当的编码方法能够大幅度提升分布式计算的性能。

在冗余存储方面，传统的分布式系统中通常通过存储冗余来应对失效节点，保证数据的可用性。为了降低存储开销同时提升系统的容错能力，近年来学术界提出了基于编码的分布式容错存储机制^[21-23]，通过对数据进行一定量的冗余编码保证数据在部分节点失效时的可用性。为有效对抗节点失效或计算落后，通常采用对计算任务克隆的方式，将数据副本分散到多个节点上执行相同的计算任务，其中任意的节点完成计算即可保证最终计算结果的获得^[24-26]。然而，由于云端融合环境中节点的失效或者计算能力难以预测，这种方式通常会面临过高的计算成本。

在冗余计算方面，近期研究者发现，针对节点失效/计算落后问题，可以采用适当的编码方法生成冗余计算任务，并保证最终计算结果能够从任意足够数目节点上的计算结果获得。由于不需要等待最慢的节点完成计算，适当的编码能够以较小的计算代价保证在部分节点失效/计算落后的情况下，依然能快速完成计算任务。针对矩阵计算问题，Lee 等人^[27]提出了基于最大距离可分码（Maximum-Distance-Separable code, MDS code）的编码方法，从理论上证明在节点计算耗时服从平移指数分布的情况下，该方法完成矩阵乘法的平均速度比无编码方法快 $\Theta(\log n)$ 倍，其中 n 为计算节点个数；Ferdinand 和 Draper^[28]面向分布式计算框架，基于矩阵的奇异值分解提出了任意时间编码方法，在同等计算时间内有效地提高矩阵相乘计算的近似质量。当面临高维度的矩阵相乘问题时，相关的计算数据需要分散在多个计算节点上，Yu 等人^[29]则提出 polynomial 码，分析了计算冗余量对失效节点的容忍关系，保证在相同的计算负载情况下容忍最多数目的计算落后节点。

针对通信瓶颈问题，近期研究发现可借助计算节点上富余的存储或计算能力，通过存储冗余数据或进行冗余计算，使得计算节点拥有其他节点的部分数据，然后将自身数据与冗余数据进行编码，并将编码后的数据广播给其他节点，而其他节点在收到编码数据后结合本地的数据即可解码出所需要的数据。通过这种方式，能够以较小的额外存储或计算代价换取通信负载的大幅度减少，从而在一定程度上解决通信瓶颈问题。Lee 等人^[27]首次发现，分布计算场景中可通过缓存冗余数据、对数据编码并以广播方式发送编码数据能够极大降低数据的通信开销。Li 等人^[30]则从信息论角度揭示了理想环境下计算负载与通信负载呈反比关系，在此基础上，提出改进 TeraSort 的大数据分布式排序算法。针对三类资源之间的关系，Li 等人^[30-32]进一步将编码思想引入分布式计算，提出冗余的计算开销与传输开销之间的权衡模型，以及冗余的计算开销与计算完成时间之间的权衡模型。Chung 等人^[33]针对分布式计算环境中机器学习任务面临的通用的随机梯度下降问题，提出了基于编码的洗牌方法，能够极大减少数据通信的时间开销。

上述研究工作从计算、存储、通信三种资源的角度构建分布式计算环境中资源间的相互作用机理及内在权衡模型，虽然大多数是面向云平台计算集群内部相对理想的同构节点环境，但其涉及的编码思想以及部分理论结果可以拓展到云端融合的分布式计算环境中。特别是针对云端融合环境下终端设备的高度异构性以及边缘网络基础设施的弱连接特性，国外学者也从资源优化理论角度开展研究并取得了一定的进展。考虑到雾计算环境中存在大量的计算及存储冗余，Li 等人将最小带宽编码（Minimum Bandwidth Code）

和最小延迟编码（Minimum Latency Code）拓展并在雾平台中实现，证明其优良的性能表现^[34]。针对移动终端向边缘网络中计算节点的计算任务卸载问题，Li 等人提出一般化的边缘计算编码模型 UCEC（Universal Coded Edge Computing），可以容忍高度动态的无线信道状态，在最小化边缘终端计算负载的同时最优化传输性能^[35]。Yang 等人围绕分散计算环境中异构分散的资源状态，考虑基于通信感知的任务迁移模型，其提出的网络容量区域模型和虚拟化队列模型很好地刻画了分散网络的资源状态，极大降低了任务迁移产生的通信开销^[36]。类似地，考虑雾计算环境中资源的区域性差异，Lyu 等人提出基于最小化完成时间的资源协同模型^[37]。在面向物联网和雾计算的云端融合环境中，围绕终端设备感知的海量数据，Wang 等人提出 MSaaS（Multimedia Sensing as a Service），通过一个一般化的基于 QoE 优先级的通信模型，极大地降低海量感知数据传输的通信开销^[38]。

2.3 云端融合网络互联机制

面向云端融合环境的网络体系结构一方面与资源优化理论紧密相关，另一方面为上层的具体应用提供基础支撑，是各项具体任务得以高效完成的基础设施保障。与传统的网络环境相比，云端融合体系具有规模大、异构性强、复杂度高等特点。面对设备异构的接入方式、多样性的网络协议及传输模型、高度动态的网络拓扑结构，国外研究者主要从三个方面取得富有成效的研究成果。首先，研究者针对异构网络体系结构的可扩展性展开深入广泛的研究，设计出面向海量异构设备的拓扑网络管理与维护机制，支持拓扑结构的渐进式可扩展；其次，结合 5G 网络的通信标准，设计云端融合环境下移动边缘网络中的网络协议，同时研究高效的协同传输技术；最后，为更好地保护隐私数据，降低终端敏感数据隐私泄露的风险，研究者从设备接入安全、数据传输安全以及数据隐私保护等方面展开研究。

面向云端融合环境的网络体系架构方面的研究主要集中在异构多样性接入方式的支持和动态拓扑网络的管理与维护。研究人员在早期就发现通过融合设备间多样性的通信方式以及构建混合网络，如设备到设备（D2D）链路和蜂窝网链路协同、异构无线网络等，可有效提高网络资源的利用率。这一理念在边缘计算的环境中同样得到广泛的应用。针对 D2D 通信实现的机会网络在边缘计算中的应用，Floires 等人^[39]通过在野外实际环境分析和评估 D2D 通信研发了一个软件传感器 Detector。考虑边缘设备异构的接入方式，Li 等人^[40]构建了个性化的移动云平台，通过屏蔽异构软硬件的移动操作系统接口，设计实现异构设备之间数据共享的中间件架构。此外，针对 Cloudlet 的位置问题，Ceselli 和 Xu 等人^[41-42]以最小化移动用户到微云之间的平均时延为导向，构建了动态的云 - 微云 - 设备间的拓扑架构，并实现相应的网络管理与维护机制。

在边缘网络的协同传输方面的研究主要集中在通信协议的支持与拓展，以及高效的协同传输。5G 网络的迅速发展和推广为万物互联环境以及异构设备之间的联通性和链路质量保证提供了基础的协议支撑^[43]。契合于 5G 的通信标准，边缘计算成为解决物联网环境中设备互联以及进一步融合远端云计算中心的有效方式^[44]。2014 年欧洲电信标准协

会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 提出移动边缘网络的思想, 将计算与存储资源部署在蜂窝网基站, 以支持低时延、高数据率、实时性的数据传输^[42]。Higashino 等人^[45]进一步提出面向灾难预测的智慧城市模型, 并设计了基于蜂窝网基站的数据定位与采集, 以及数据传输协议。Bilal 和 Dutta 等人^[46-47]则提出了交互性视频流媒体在边缘网络中的高效传输模型。在基于网络编码的协同传输中, Jeong 等人^[48]采用系统化 MDS 编码方法极大地降低了边缘节点的通信负载。Li 等人^[30]针对边缘计算中 MapReduce 框架下密集型的传输模式, 设计基于编码数据块的系统传输机制, 能够保证通信负载不会随着网络用户数目增加而增加。

在数据与通信的安全性与隐私保护方面, Shirazi 等人^[49]进一步针对移动边缘计算/雾计算中的设备软件、硬件、数据安全问题提出解决方案, 保证部分设备失效时的服务可靠性。对于延迟敏感型服务, 边缘侧很容易感知到用户的移动轨迹, He 等人^[50-51]提出用户位置隐私保护机制。Dang 等人^[52]在雾计算框架下, 基于区域性的信任感知, 设计面向高度动态的边缘雾节点及移动设备的数据安全保护机制。Bhardwaj 等人^[53]将边缘节点上的服务抽象为边缘函数, 基于此提出并实现了 AirBox 平台, 该平台可以实现边缘函数装载的高效性和可拓展性, 同时保证边缘函数拥有者的私密信息不被泄露。

2.4 云端融合环境中的资源管理与调度

面向云端融合的分布式计算环境中, 应用的多样性要求对计算、存储、通信等多维度的资源进行建模与管理, 以满足不同应用服务与用户的资源请求, 同时针对具体的应用, 结合应用所涉及的任务与数据的迁移模式, 对可用的资源进行高效的分配, 提高资源利用率以及保证任务的执行效率。近期研究一方面集中于多维资源的建模理论, 发现云端融合环境中影响具体应用服务质量的资源瓶颈, 实现资源的协同分配以及调度负载均衡, 另一方面研究任务和数据迁移过程中优化资源需求描述, 实现资源调度的灵活控制。

传统云计算中, 研究主要集中在资源分配、资源调度负载均衡以及云中心之间的协作调度。在拓展单个数据中心性能方面, Gandhi 等人^[54]提出利用数据中心中的高性能交换机实现软件负载均衡器来代替专用负载均衡设备, 以提升负载均衡的可扩展性。虽然软件负载均衡器提供低成本、高可用性和高灵活性, 但受到每个负载均衡器高延迟和低容量的影响, 使其难以适用于要求高吞吐量或低延迟的应用。由于网络性能缺乏严格的保证, 导致不可预测的作业执行时间, 在实际的云环境中应用程序需求本质上是不可预测的, Fuerst 等人^[55]基于这种情况提出了一种面向任务的资源动态预约机制, 尽可能保证计算任务的按时完成。该方法通过在线资源预订方案实现这一目标, 它具有可证明的最优保证。此外, 针对多个数据中心的协同调度模式也取得了一定的进展。Roh 等人^[56]设计数据中心之间的资源定价规则, 优化计算资源的价格达到收敛平衡, 讨论了影响设计的几个特征平衡点, 并以此为基础构建资源协同调度方法。Coady 等人^[57]对多数据中心资源协同调度的挑战进行了总结, 重新审视分布式云计算的愿景, 确定不同的用例并

研究挑战。Chen 等人^[20]针对大规模数据分析中数据中心间的资源共享问题提出了解决方案。

面向云端融合的分布式计算场景中的计算资源具有更高的动态性和异构性。针对这些特性，近年来云端融合环境中的资源感知、管理与调度工作也引起了学术界的关注。Liu 等人^[58]借鉴 P2P 研究中覆盖网络的概念进行资源的感知，提出了分布式资源发现架构（DRD）用于机器到机器（M2M）应用。该 DRD 利用 P2P 覆盖来分配工作负载和避免单点故障。Salem 等人^[59]提出了一个边缘计算资源感知框架 Kinaara，该框架提供了资源的标识与检索方案。Kinaara 首先使用多层结构用于组织地理上近端边缘设备的集群并通过可信中介实体提供其资源；其次，它使用一种新颖的资源表示来命名，并根据用户宣称的资源对设备进行编码；随后，它基于资源相似性，使用一种新颖的分布式索引方案来组织集群中基于环形逻辑结构的设备。从边缘网络设备的移动性考虑，Wang 等人^[60]讨论了一种在线实时计算资源动态分配方法，并基于真实世界数据和仿真数据的深入实验来验证所提出算法的有效性。从边缘计算的网络接入考虑，Yang 等人^[61]针对多样性的网络接入方式提出合适的资源的分配方法。最后，面对多任务竞争，Laredo 等人^[62]基于 Bak-Tang-Wiesenfeld 沙堆理论描述了一种自适应负载均衡方案，假设了处理器可以根据工作负载的状态打开和关闭，从而最大化利用资源。

2.5 云端融合软件架构设计

对于云端融合场景，云计算中心是解决服务能力的根本方法，边缘节点是解决响应时延问题的关键。因此可通过将运行在云计算中心的服务下放到边缘节点上，以满足实时性要求较高的应用需求，综合权衡达到云端融合的效果，以最小的成本提供最佳的服务。但受终端设备处理能力的限制，面向云计算中心的虚拟机技术难以适用于终端设备，并使得建立基于轻量级容器的云端融合软件架构机制成为提高终端设备可编程能力和服务协同能力、实现数据和任务动态迁移的重要使能支撑。云端融合的两个关键点就是新兴的边缘计算和传统的数据中心之间的协同问题，学术界和工业界针对该问题进行了一系列研究工作。

在应用服务化分解方面，研究工作主要集中于应用的分解原则和形式化验证方面。单体应用微服务化的第一个问题就是微服务的适用性研究。为决定是否采用微服务以及采用何种微服务，Christoforou 等人^[63]提出了通过确定微服务架构迁移的关键概念和主要驱动因素，进而组织成多层模糊认知图，然后基于图的智能计算模型捕获领域知识的节点中给定问题的行为，研究这些因素间的影响力和相互关系。在上述研究的基础上，进而需要确定任务向微服务的分解方式。针对微服务自身的系统复杂性而产生的服务质量保证问题，Kitajima 等人^[64]提出了一种通过外部观察通信日志，如发送方、接收方和时间戳等，来推断服务之间的调用关系方法，构建服务流程，并对微服务设计模式以及是否存在正确性进行形式化的验证；Zdun 等人^[65]使用约束条件和度量标准来自动化验证微服务模式分解的质量，主要的方法是基于共享依赖的约束算法和基于独立部署的评估

对比；Panda 等人^[66]则从分布式系统的角度通过自动化验证保障微服务全局行为的正确性，提出了一个微服务中基于应用程序强制执行的不变量构建的形式化验证系统。

为提升服务迁移和服务质量，业界对服务部署、虚拟机迁移和服务动态选择进行了研究。针对边缘环境下节点动态性特点，Wang 等人^[67]提出了一个具有多项式时间复杂度的在线逼近算法，用以找到服务的最佳配置位置，以最大限度减少平均响应时间，并充分利用精度可控的预测未来成本的优势。针对移动设备资源受限的场景，Rodrigues 等人^[68]提出了通过虚拟机迁移来控制处理延迟并通过传输功率控制来改善传输延迟问题，同时综合考虑计算和通信代价，从而使用户可以将他们无法运行的任务卸载到网络边缘的云服务器上，最小化服务间的延迟。针对移动云计算的移动性特点，Zhou 等人^[69]提出了代码卸载框架，可以通过上下文感知决策算法来研究移动设备上下文（如网络条件）对卸载决策的影响，该算法提供了无线媒介和云资源的动态选择决策，提高服务的可用性。针对移动云计算网络动态拓扑和服务可用性不稳定的特点，Guerrero-Contreras 等人^[70]提出了考虑上下文感知的可靠服务软件架构，该架构基于服务复制方案以及根据移动系统的上下文信息选择激活或者休眠服务的自动配置方法，自适应地保持服务的可用性。此外在工业界，为支撑实际系统构建，微软对面向基础架构和 Web 应用开展了研究，发布了一个名为 CloudBuild 的服务架构，持续集成构建、测试和代码分析等云上服务组件^[71]。考虑到日益增长的数据驱动的 Web 应用程序中存在大量的微服务但却没有统一的管理体系，Viennot 等人^[72]提出了 Synapse 架构，提供易于使用的、强大的语义系统，允许独立服务以独立和可扩展的方式干净地彼此共享数据。

3 国内研究进展

当前，云计算、物联网、大数据已成为我国信息产业发展的战略需求。其中云计算已成为国家新兴产业发展的基础支撑，国务院在《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》中提出要推进基于云计算的信息服务公共平台建设，在《“十三五”国家科技创新规划》中明确将“云端融合”列为新一代信息发展技术。为支持云端融合技术研究，国家高技术研究发展计划“云计算关键技术与系统（三期）”、国家重点研发计划“云计算和大数据”重点专项、国家自然科学基金重点项目资助领域中纷纷设置云端融合主题资助领域，推动对云端融合开展前瞻性研究。

北京大学黄罡等人在国家高技术研究发展计划（863 计划）资助下，对云端和终端资源自适应协同与调度平台开展研究，试图构建应用软件按需消费云端和终端资源的自适应软件体系结构、应用代码及其执行在云端和终端之间的动态迁移、应用数据在云端和终端的分离访问、存储及一致性保障、云端和终端资源协同管理、遗产应用的自动化重构与混合组装等关键技术，并进一步研制运行支撑平台和工具，可自动重构 Java 应用。

东南大学的宋爱国等人在国家重点研发计划“云端融合的自然交互设备和工具”的资助下，聚焦基于云计算的多种感知通道信息交互融合问题，研制笔、触控、手势、体

态、语音、生理等自然交互设备和中间件，建立用户意图理解云计算框架，制定远程交互、桌面交互和多移动设备间跨设备的自然交互解决方案和用户界面规范，开发云端融合的人机交互套件，并在教育、办公、医疗等领域进行应用示范。该项目中拟研发的触摸屏技术将提供一种与虚拟环境交互的新方法，通过对在触摸屏上的力触觉交互，研制一种能够同时向用户传达力信息和触觉信息的力触觉设备，以增强交互的真实感和沉浸感。与此同时，该项目从人的生理感知机制出发，基于有源和无源执行器研制一种具有便携、小型化和功耗低特点的笔式力触觉接口装置，实现对图像信息的多模式力触觉再现。同时还将建立一种综合反映表面形状、柔軟性和纹理等物理特性的力触觉模型及实时再现算法。在人机交互过程中，力触觉笔能够将图像中虚拟物体的形状、纹理、柔軟度等力触觉特征实时地用力反馈和振动触觉反馈来表达，可实现人与虚拟物体的动态交互和人对虚拟环境的主动探索。研究成果有望提高人机交互的真实感，并拓宽移动设备的应用范围和受众人群，对于视障患者来说，力触觉反馈为他们与移动设备的交互提供了一条重要途径。

东南大学罗军舟等人承担了“云计算和大数据”重点专项“面向工业互联网的智能云端协作关键技术及系统”，该项目重点研究面向工业互联网的智能云端协作关键技术及系统，将推进智能云端协作关键技术在大规模工业互联网中的应用，打破制约智能制造发展的人才瓶颈和技术壁垒。通过项目实施，实现新兴信息通信技术在工业全要素、全领域、全产业链的深度融合与集成应用。

在研究思路上，国内云端融合技术研究主要聚焦于以下几个方面：

- 1) 利用云平台丰富的软硬件资源，解决终端设备计算、存储、显示等资源多样异构且相对有限的问题，研究移动终端软件自适应、虚拟桌面异构终端接入与管理、终端服务与云服务混合组装、遗产分布式系统自动迁移等关键技术；
- 2) 针对移动互联网应用形态与软件，研究移动终端计算任务在云平台和终端之间的按需迁移、应用数据的云 - 端按需访问和存储、应用界面的移动终端屏幕尺寸自适应等关键技术；
- 3) 针对多样异构的终端设备，研究终端自适应的虚拟个人工作台配置、普适接入、弹性传输、状态管理、数据管理、资源管理、安全可信保障等关键技术，研制大规模、高并发、可伸缩、易部署的虚拟个人工作台环境的支撑平台与系统；
- 4) 针对移动互联网和云计算的有机融合，研究移动终端本地资源和应用服务化、云服务终端接入与展现、本地服务和云服务的个性化推荐、本地服务和云服务的混合组装和运行。

国内围绕云端融合环境中的分布式计算范型及体系架构、资源协同调度、微服务调度等开展了富有成效的工作，并取得了积极进展。为了缩小 IoT 应用的服务质量要求与 IoT 设备有限的计算资源之间的差距，提高设备与基站能源利用率，于博文等人^[73]设计了基于超密集网络的移动边缘计算框架 COMED，提出了一个结合任务卸载、设备-基站关联以及基站睡眠调度的在线优化问题，旨在最小化设备和基站的整体能量消耗，同时满足 IoT 应用的服务质量要求。郭延超等人^[74]考虑手机的能耗问题，在不同的网络状况

环境中，根据手机当前电量以及用户刷新频率，通过本地移动边缘计算层完成数据处理，在 Markov 决策过程生成的决策表中选择最优策略，动态选择最佳的网络接入以及刷新下载最佳的图片格式，不仅减少刷新时间，而且能够降低移动平台的能耗。在面向极端实时性保证的应用时，华中科技大学 Niu 等人^[75]提出一种聚合私有云及公共云的混合网络架构，设计高效的私有云之间任务调度算法以及公共云的容量开销评估调整机制。台湾科技大学 Jiang 等人^[76]在分布式移动云计算环境中，设计并实现了基于隐私感知的安全性鉴权模型。香港大学 Mao 等人^[77]针对多样性的网络接入方式提出合适的资源的分配方法。重庆大学的 Wang 等人^[78]针对无线蜂窝网构建了一个联合优化计算迁移、资源分配以及缓存策略的模型，将原始问题转换为凸问题并分解它，以便以分布式和有效的方式解决它。最后，随着分布式凸优化的最新进展，开发了一种基于乘数的交替方向法算法以解决优化问题。王子勇等人^[79]提出一种基于执行轨迹监测的微服务故障诊断方法，利用动态插桩监测服务组件的请求处理流，对请求处理的执行轨迹进行刻画，评估性能异常程度并采用主成分分析方法分析其中的关键方法调用。北京大学提出了一个基于微服务架构的公共在线编程系统，通过对 Docker 资源的合理调度管理，使得在线编程系统在部署、调试和运行各类应用时能够更加节省资源和时间^[80]。

4 国内外研究进展比较

云端融合是随着互联网、万物互联、大数据、云计算等相关技术与应用的发展而出现的一种新型的分布式计算环境，与边缘计算、移动边缘计算、雾计算等领域关系紧密。以美国为主要代表的学术界，以及美国军方主导的分散计算和以思科为首的工业界一直引领着相关技术与应用平台的发展。根据上述分析可以看出，无论是在云端融合的平台体系架构、关键理论优化方法，还是资源的协同管理、迁移的协同调度、软件体系架构等方面，国外的研究工作相对更为系统。从云端融合体系架构的设计角度来看，国外已经形成较为完整的基础设施系统架构。研究者们通过多层次的云计算中心架构，充分利用异构、多样性移动终端构成的边缘网络中的丰富资源，在一定程度上解决了云端融合的系统扩展性问题，为迁移技术提供了基础的设施支撑。而从云端融合资源优化理论角度，针对具体的通用型计算任务，国外已经基本形成了分布式网络环境中计算、存储、网络三维资源的权衡模型。并在此基础上，以服务的 QoS 需求为驱动，以分布式网络编码为途径，基于资源的理论模型建立资源协同调度机制。而国内在体系架构和资源优化理论方面尚处于起步阶段，研究方法和研究成果相对局限，相关关键技术成果及原型系统架构都明显少于国际学术界。在异构网络接入、资源协同调度以及软件架构层面，国际学术界从网络拓扑管理、传输通信协议、数据隐私保护、多维资源管理、动态协同调度、微服务粒度控制，微服务自适应协同迁移等方面展开研究，并取得了一定的进展。而国内学术界在这些领域的研究工作的广度和覆盖度还有所不足。

尽管在云端融合研究领域国内外的差距相对较大，但近年来国家对于科研和产业的

支持力度不断增大，对国际学术界关注的热点问题也在快速跟进。特别是“十三五”国家战略性新兴产业发展规划提出推进基于云计算的信息服务公共平台建设，以及国务院在“十三五”国家科技创新规划中明确将云端融合列为新一代信息发展技术。进而有一系列与云端融合相关的863项目、重点研发、重点专项项目跟进。在这些科研计划与国家项目的支持下，国内学者组建了高水平的科研团队，围绕面向云端融合的分布式计算环境中的体系结构、理论模型、关键技术和示范平台开展系统的工作。相信未来国内学术界和工业界一定能在该领域取得长足的进展。

5 发展趋势与展望

为了支持云端融合，业界基于“将计算、通信、存储和控制部署在网络边缘，实现数据的就近处理，从而缓解云计算中心负载”理念，从体系架构、资源优化理论、网络接入、资源调度、软件架构支持等方面开展了广泛研究，并取得了一定的进展。并提出了边缘计算、雾计算、分散计算等新型分布式计算范型和技术方案。从图3中可以看出，现有工作大多采用“下行”方式，将计算从云迁移到端，忽略了对云资源的融合与协同。现有研究的主要不足主要包括以下几个方面：

1) 在云端融合体系架构方面，现有的工作大多基于边缘计算环境的体系架构，对基于云端融合的服务模式还缺乏深入的探讨，对云端一体化数据处理的体系架构，以及相关的云端混合网络融合、数据及任务的迁移、协同服务等关键技术缺乏系统的研究。

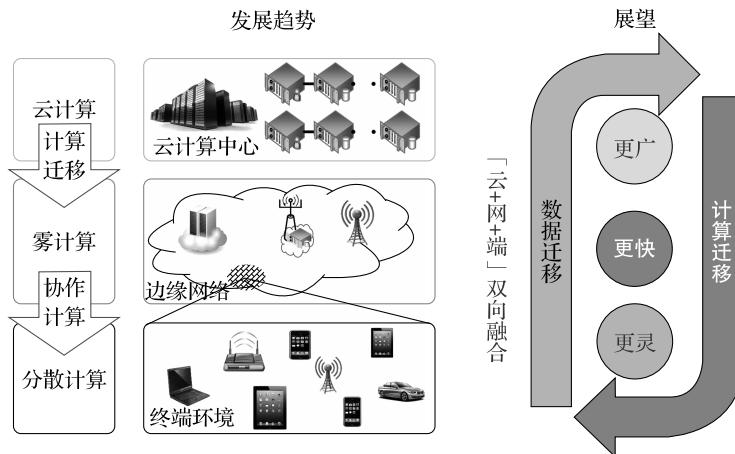


图3 云端融合的发展趋势与展望

2) 在云端融合资源优化方面，现有工作虽然在存储、计算和通信之间模型的研究上取得一些进展，但一般是针对单一的资源模块考虑或者是考虑理想环境中的模型，与基于边缘计算的云端融合环境不尽相符。在云端融合环境中，需进一步探索面向异构节点的计算、存储、网络内在关系，并针对多样性的任务需求给出资源决策的定量、定性理

论支持。

3) 在云端融合网络互联机制方面,尽管针对边缘计算环境下的设备互联、传输优化以及数据隐私保护和安全性等方面的研究取得了一定的进展,并为网络层面之上的资源分配和协同服务调度奠定了一定的协议基础,但海量边缘设备间高度动态的松散式互联特性导致网络拓扑维护极度复杂,边缘设备网络性能受限也为数据的传输优化带来新的挑战,目前还缺乏针对云端融合环境的高效、低成本、易扩展的网络结构。此外,还需继续探索适用于边缘感知数据的传输协议,充分挖掘边缘数据共性的结构特征,以较小的通信负载实现海量边缘数据的高效传输。

4) 在云端融合环境中的资源管理与调度方面,现有工作从不同角度讨论了数据中心和边缘网络中的资源管理与调度工作,但缺乏对云端资源融合的深入分析。具体而言,数据中心相关研究虽然讨论了数据中心之间的协作,但没有将资源的协同管理与调度扩展到边缘网络中;而针对边缘计算场景中资源管理、调度的研究则相对处于起步阶段,也没有考虑联合数据中心进行资源管理。同时,云端融合环境的资源一体化管理还缺乏一套完善的理论模型进行指导。

5) 在云端融合软件架构设计方面,尽管目前在边缘计算、数据中心和微服务上有各自的一些研究进展,且为云端协作奠定了一些理论基础和实际应用范例,但并没有从根本上形成一个体系,系统化地解决云端融合环境下的服务编排、感知和协作中的诸多问题,还缺乏对全局行为的效率检测。在服务层面还须从体系架构上保证微服务应用的服务质量。

未来针对云端融合的研究需要在“云+网+端”的双向融合机制上取得突破,建立面向云端双向融合的“模型-理论-方法”技术体系,从而在更广范围内实现资源协同,使得计算效率更快、服务机制更为灵活,进而满足用户多样性应用需求。未来工作可包括以下几个方面。

1) 从云端融合体系架构设计角度,建立基于软件定义的云端融合基础设施系统架构模型,屏蔽异构性,突破现有通过“调整或优化基础设施设计”云端融合方法对终端设备资源融合能力不足的问题,支持边缘网络数据、存储、网络体系结构的渐进式扩展,解决云端资源难融问题,为计算/数据动态迁移提供基础设施支撑。

2) 从云端融合资源优化理论角度,揭示多维资源动态关联机理,建立基于计算、存储、通信三元融合的云端融合资源优化调度理论,在此基础上,构建将计算逻辑融入通信的任务感知的资源调度机制,解决调度难优问题,为计算/数据动态迁移提供决策依据。

3) 从云端融合软件实现方法角度,建立新型云端融合软件架构方法,突破虚拟机技术对终端支撑的不足,对终端设备提供可编程支持,实现云端自适应服务协同,解决服务难迁问题,为任务/数据动态迁移提供使能支持。

另外,云端融合的发展离不开重要应用的推动及产业界的支撑。近年来,在国内外产业界的共同努力下,国内外产学研机构围绕云端融合环境开展了广泛的合作,涌现出大量的分布式计算应用与产业联盟。Google 提出面向云端融合的新型机器学习方法 Federated

Learning，它使多台智能终端设备能够以协作的形式，学习共享的预测模型，这与传统的机器学习方法相比，大量的训练数据不需要存储在云端。英特尔公司提出的显卡虚拟化技术（GVT），将图形处理单元（GPU）和集成的视频转码加速器引擎全部或部分指定给虚拟机，在远程处理、桌面即服务和在线游戏等领域有广泛的应用前景。为推动云端融合相关技术的发展及产业化，美国思科公司联合 ARM、戴尔、英特尔、微软和普林斯顿大学等知名企业和高校于 2015 年联合成立了开放雾计算联盟（OpenFog）。国内中科院、华为、中国信通院等科研院所与英特尔、ARM、软通动力等知名厂商于 2016 年在北京联合成立边缘计算产业联盟（Edge Computing Consortium，ECC）。2017 年，日本 NTT 和丰田与 IT 厂商英特尔、爱立信成立了汽车边缘联盟（Automotive Edge Computing Consortium，AECC），致力于开展车辆互联和智能驾驶方面标准化的研究。在产业界投入和国内外科研人员的共同努力下，我们有理由相信面向云端融合的分布式计算环境的研究有非常美好的发展前景，必将在相关研究方向产生突破性的进展，在经济、科教、民生等多个方面做出突出贡献。

6 结束语

面向云端融合的分布式计算已经成为支撑互联网大数据处理以及边缘应用服务的一种重要计算模式。为了解决传统云计算的“中心交付式服务”模式难以满足爆炸式增长的数据处理需求这一问题，云端融合的核心思想是在包含云中心和边缘网络更广的范围内实现资源协同，通过计算和数据的迁移使得计算更广更快，服务机制更灵活。海量的终端设备以及异构、复杂的边缘网络为科研人员带来压力的同时也带来了新的机遇和更加广阔的发展前景。针对云端融合的技术趋势和研究热点，我们总结、分析并比较了国内外相关领域的研究现状。我们认为，尽管国际上较早在这一领域开展相关的研究工作，并且在云端融合的平台系统、体系架构、理论技术等方面取得一定的进展，相对于国内占据了一定的领先优势，但是近年来国家非常重视云端融合相关理论、技术、平台的规划和布局，对学术界和工业界的持续增加。我们相信经过科研人员的不懈努力，国内也将产生突破性和颠覆性的科研成果，将云端融合相关领域的研究推向世界前列。

致谢

本报告的撰写得到南京大学、河海大学、华中科技大学、上海交通大学和香港理工大学相关研究团队研究人员的大力支持，屈志昊、骆克云、王成等同志参加了整理工作，在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Q Zhang, L Cheng, R Routaba. Cloud Computing: State- of- The- Art and Research Challenges [J]. Journal of Internet Services and Applications, 2010, 1(1) : 7-18.
- [2] J. Dean, S Ghemawat. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters [C]. USENIX Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI), 2004 : 137-150.
- [3] K. Shvachko, H Kuang, S Radia, R Chansler. The Hadoop Distributed File System[C]. IEEE MASS Storage Systems and Technologies (MSST) , 2010 : 1-10.
- [4] M Zaharia, M Chowdhury, M J Franklin, S Shenker, I Stoica. Spark: Cluster Computing With Working Sets[C]. USENIX Workshop on Hot Topic in Cloud Computing (HotCloud) , 2010.
- [5] Cisco. Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021, White Paper [OL]. www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html.
- [6] W Shi, J Cao, Q Zhang, Y Li, L Xu. Edge Computing: Vision and Challenges[J]. IEEE Internet of Thing Journal , 2016, 3(5) : 637-646.
- [7] P Mach, Z Becvar. Mobile edge computing: A survey on Architecture And Computation Offloading[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3) : 1628-1656.
- [8] F Bonomi, R Milito, J Zhu, S Addepalli. Fog Computing And Its Role in The Internet of Things[C]. ACM First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, 2012 ; 13-16.
- [9] Darpa. Dispersed Computing[OL]. <https://www.darpa.mil/program/dispersed-computing>.
- [10] M Armbrust, A Fox, R Griffith, A D Joseph, R Katz, A Konwinski M Zaharia. A View of Cloud Computing[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4) : 50-58.
- [11] K Gai, M Qiu, H Zhao, L Tao, Z Zong. Dynamic Energy-Aware Cloudlet-based Mobile Cloud Computing Model for Green Computing[J]. Journal of Network and Computer Applications , 2016, 59 : 46-54.
- [12] Y C Hu, M Patel, D Sabella, N Sprecher, V Young. Mobile Edge Computing—A key Technology towards 5G. ETSI White Paper, 2015[R].
- [13] Ali M, Riaz N, Ashraf M I, et al. Joint Cloudlet Selection and Latency Minimization in Fog Networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics , 2018.
- [14] Tran T X, Hajisami A, Pandey P, et al. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(4) : 54-61.
- [15] [DOME2017][OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/DOME_project
- [16] Jeong S, Simeone O, Kang J. Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2018, 67 (3) : 2049-2063.
- [17] Jia M, Liang W, Xu Z, et al. QoS- Aware Cloudlet Load Balancing in Wireless Metropolitan Area Networks[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing , 2018.
- [18] E Jinlong, Y Cui, P Wang, Z Li, C Zhang. CoCloud: Enabling Efficient Cross-Cloud File Collaboration Based on Inefficient Web APIs [C]. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM),

- 2017: 1-9.
- [19] S Han, H Shen, T Kim, A Krishnamurthy, T Anderson, D Wetherall. MetaSync: File Synchronization Across Multiple Untrusted Storage Services[C]. USENIX Annual Technical Conference (ATC), 2015: 83-95.
 - [20] L Chen, S Liu, B Li, B Li. Scheduling jobs across geo-distributed datacenters with max-min fairness [C]. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2017: 1-9.
 - [21] A G Dimakis, P B Godfrey, Y Wu, M J Wainwright, K Ramchandran. Network Coding for Distributed Storage Systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(9): 4539-4551.
 - [22] N Silberstein, A S Rawat, S Vishwanath. Error Resilience in Distributed Storage via Rank-Metric Codes [C]. 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), 2012: 1150-1157.
 - [23] A S Rawat, O O Koyluoglu, N Silberstein, S Vishwanath. Optimal Locally Repairable And Secure Codes for Distributed Storage systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(1): 212-236.
 - [24] G Ananthanarayanan, A Ghodsi, S Shenker, I Stoica. Effective straggler mitigation: attack of the clones [C]. USENIX Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI), 2013: 185-198.
 - [25] K Gardner, S Zbarsky, S Doroudi, M Harchol-Balter, E Hyytia. Reducing latency via redundant requests: exact analysis[C]. ACM SIGMETRICS, 2015: 347-360.
 - [26] G Joshi, E Soljanin, G Wornell. Efficient redundancy techniques for latency reduction in cloud systems [J]. ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems, 2017, 2(2).
 - [27] K Lee, M Lam, R Pedarsani, D Papailiopoulos, K Ramchandran. Speeding up distributed machine learning using codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2018, 64(3): 1514-1529.
 - [28] N S Ferdinand, S C Draper. Anytime Coding for Distributed Computation[C]. 54th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), 2016: 954-960.
 - [29] Q Yu, M A Maddah-Ali, A S Avestimehr. Polynomial codes: an optimal design for high-dimensional coded matrix multiplication[C]. Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), 2017: 4406-4416.
 - [30] S Li, M A Maddah-Ali, Q Yu, A S Avestimehr. A Fundamental Tradeoff Between Computation And Communication in Distributed Computing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2018, 64(1): 109-128.
 - [31] S Li, Q Yu, M A Maddah-Ali, A S Avestimehr. Coded Distributed Computing: Fundamental Limits And Practical Challenges [C]. IEEE 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2016: 509-513.
 - [32] S Li, Q Yu, M A Maddah-Ali, A S Avestimehr. A Scalable Framework for Wireless Distributed Computing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(5): 2643-2654.
 - [33] J Chung, K Lee, R Pedarsani, D Papailiopoulos, K Ramchandran. UberShuffle: communication-efficient data shuffling for SGD via coding theory [C]. Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), 2017.
 - [34] S Li, M A Maddah-Ali, A S Avestimehr. Coding for Distributed Fog Computing[M]. IEEE Press, 2017.
 - [35] S Li, M A Maddah-Ali, A S Avestimehr. Communication-Aware computing for edge processing[C] IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2017: 2885-2889.
 - [36] C S Yang, R Pedarsani, A S Avestimehr. Communication-Aware Scheduling for Serial Tasks for Dispersed

- Computing [C]. arXiv, 2017.
- [37] X Lyu, C Ren, W Ni, H Tian, R P Liu. Distributed Optimization of Collaborative Regions in Large-Scale Inhomogeneous Fog Computing [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 3(36) : 574-586.
- [38] W Wang, Q Wang, K Sohraby. Multimedia Sensing as a Service (MSaaS) : Exploring Resource Saving Potentials of at Cloud-Edge IoTs and Fogs [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(2) : 487-495.
- [39] H Flores, R Sharma, D Ferreira, C Luo, V Kostakos, S Tarkoma, P Hui, Y Li. Social-Aware Device-to-Device Communication: A Contribution For Edge And Fog Computing [C]. ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp), 2016: 1466-1471.
- [40] Y Li, W Gao. Interconnecting Heterogeneous Devices in The Personal Mobile Cloud [C]. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2017: 1-9.
- [41] A Ceselli, M Premoli, S Secci. Mobile Edge Cloud Network Design Optimization [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(3) : 1-14.
- [42] Z Xu, W Liang, W Xu, M Jia, S Guo. Efficient Slgorithms for Capacitated Cloudlet Placements [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2016, 27(10) : 2866-2880.
- [43] Department for Culture, Media & Sport, Next Generation Mobile Technologies: A 5G Strategy for The UK [OL]. <https://www.gov.uk/government/publications/next-generation-mobile-technologies-a-5g-strategy-for-the-uk>, Policy paper, 2017.
- [44] Y Jararweh, A Doulat, O AlQudah, E Ahmed, M Al-Ayyoub, E Benkhelifa. The Future of Mobile Cloud Computing: Integrating Cloudlets and Mobile Edge Computing [C]. IEEE 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), 2016: 1-5.
- [45] T Higashino, H Yamaguchi, A Hiromori, A Uchiyama, K Yasumoto. Edge Computing and IoT Based Research for Building Safe Smart Cities Resistant to Disasters [C]. IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2017: 1729-1737.
- [46] K Bilal, A Erbad. Edge Computing for Interactive Media and Video Streaming [C]. IEEE Second International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC), 2017: 68-73.
- [47] S Dutta, T Taleb, P A Frangoudis, A Ksentini. On-The-Fly QoE-Aware Transcoding in The Mobile Edge [C]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2016: 1-6.
- [48] H Jeong, T M Low, P Grover. Coded FFT And Its Communication Overhead, manuscript [R]. 2018.
- [49] S N Shirazi, A Gouglidis, A Farshad, D Hutchison. The Extended Cloud: Review and Analysis of Mobile Edge Computing And Fog from A Security and Resilience Perspective [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 35(11) : 2586-2595.
- [50] T He, E N Ciftcioglu, S Wang, K S Chan. Location Privacy in Mobile Edge Clouds: A Chaff- Based Approach [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(11) : 2625-2636.
- [51] T He, E N Ciftcioglu, S Wang, K S Chan. Location Privacy in Mobile Edge Clouds [C]. IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2017: 2264-2269.
- [52] T D Dang, D Hoang. A Data Protection Model for Fog Computing [C]. IEEE Second International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC), 2017: 32-38.
- [53] K Bhardwaj, M W Shih, P Agarwal, A Gavrilovska, T Kim, K Schwan. Fast, Scalable And Secure Onloading of Edge Functions Using Airbox [C]. IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC),

- 2016: 14-27.
- [54] R Gandhi, H H Liu, Y C Hu, G Lu, J Padhye, L Yuan, M Zhang. Duet: Cloud Scale Load Balancing With Hardware And Software [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 44(4): 27-38.
 - [55] C Fuerst, S Schmid, L Suresh, P Costa. Kraken: Online And Elastic Resource Reservations for Cloud Datacenters[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(1): 422-435.
 - [56] H Roh, C Jung, W Lee, D Z Du. Resource Pricing Game in Geo- Distributed Clouds [C]. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2013: 1519-1527.
 - [57] Y Coady, O Hohlfeld, J Kempf, R McGeer, S Schmid. Distributed Cloud Computing: Applications, Status Quo, And Challenges[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2015, 45(2): 38-43.
 - [58] M Liu, T Leppanen, E Harjula, Z Ou, M. Yliantila, T Ojala. Distributed Resource Discovery in The Machine-to-Machine Applications[C]. IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS) , 2013: 411-412.
 - [59] A Salem, T Salonidis, N Desai, T Nadeem. Kinaara: Distributed Discovery And Allocation of Mobile Edge Resources [C]. IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS) , 2017: 153-161.
 - [60] L Wang, L Jiao, J Li, M Mühlhäuser. Online Resource Allocation for Arbitrary User Mobility in Distributed Edge Clouds [C]. IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS) , 2017: 1281-1290.
 - [61] C Yang, S Jordan. A Novel Coordinated Connection Access Control And Resource Allocation Framework for 4G Wireless Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(4): 1328-1341.
 - [62] J L J Laredo, F Guinand, D Olivier, P Bouvry. Load balancing At The Edge of Chaos: How Self-Organized Criticality Can Lead to Energy-Efficient Computing [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(2): 517-529.
 - [63] A Christoforou, M Garriga, A S Andreou, L Baresi. Supporting The Decision of Migrating to Microservices Through Multi- Layer Fuzzy Cognitive Maps [C]. International Conference on Service-Oriented Computing (ICSO), 2017: 471-480.
 - [64] S Kitajima, N Matsuoka. Inferring Calling Relationship Based on External Observation for Microservice Architecture[C]. International Conference on Service-Oriented Computing (ICSO), 2017: 229-237.
 - [65] U Zdun, E Navarro, F Leymann. Ensuring And Assessing Architecture Conformance to Microservice Decomposition Patterns[C]. International Conference on Service-Oriented Computing (ICSO), 2017: 411-429.
 - [66] A Panda, M Sagiv, S Shenker. Verification in The Age of Microservices[C]. ACM 16th Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS) , 2017: 30-36.
 - [67] S Wang, R Urgaonkar, T He, K Chan, M Zafer, K K Leung. Dynamic Service Placement for Mobile Micro-clouds With Predicted Future Costs[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(4): 1002-1016.
 - [68] T G Rodrigues, K Suto, H Nishiyama, N Kato. Hybrid method for minimizing service delay in edge cloud computing through VM migration and transmission power control[J]. IEEE Transactions on Computers, 2017, 66(5): 810-819.

- [69] B Zhou, A V Dastjerdi, R Calheiros, S Srivama, R Buyya. mCloud: A Context-Aware Offloading Framework for Heterogeneous Mobile Cloud [J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2017, 10(5): 797-810.
- [70] G Guerrero-Contreras, J L Garrido, S Balderas-Díaz, C Rodríguez-Domínguez. A Context-Aware Architecture Supporting Service Availability in Mobile Cloud Computing [J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2017, 10(6): 956-968,.
- [71] H Esfahani, J Fietz, Q Ke, A Kolomiets, E Lan, E Mavrinac, W Schulte, N Sanches, S Kandula. CloudBuild: Microsoft's Distributed And Caching Build Service[C]. ACM 38th International Conference on Software Engineering Companion (ICSE), 2016: 11-20.
- [72] N Viennot, M Léchner, J Bell, R Geambasu, J Nieh. Synapse: A Microservices Architecture for Heterogeneous- Database Web Applications [C]. Tenth European Conference on Computer Systems (EuroSys), 2015.
- [73] 于博文,蒲凌君,谢玉婷,徐敬东,张建忠.移动边缘计算任务卸载和基站关联协同决策问题研究[J].计算机研究与发展,2018,55(03): 537-550.
- [74] 郭延超,高岭,王海,郑杰,任杰.移动边缘计算中基于内容动态刷新的能耗优化[J].计算机研究与发展,2018,55(03): 563-571.
- [75] Y Niu, F Liu, X Fei, B Li. Handling Flash Deals with Soft Fuarantee in Hybrid Cloud [C]. IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2017: 1-9.
- [76] Q Jiang, J Ma, F Wei. On The Security of A Privacy-Aware Authentication Scheme for Distributed Mobile Cloud Computing Services[J]. IEEE Systems Journal, 2016.
- [77] Y Mao, J Zhang, S H Song, K B Letaief. Stochastic Joint Radio And Computational Resource Management for Multi-user Mobile-Edge Computing Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 5994-6009.
- [78] C Wang, C Liang, F R Yu, Q Chen, L Tang. Computation Offloading And Resource Allocation in Wireless Cellular Networks With Mobile Edge Computing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(8): 4924-4938.
- [79] 王子勇,王焘,张文博,等.一种基于执行轨迹监测的微服务故障诊断方法[J].软件学报,2017,28(6): 1435-1454.
- [80] 胡星,王泽瑞,李砾,杨楠,张知凡,王巧,王千祥. POP:一个基于微服务架构的在线编程系统[J].计算机科学,2017,44(04): 8-11.

作者简介

叶保留 南京大学计算机科学与技术系教授、博士生导师,河海大学计算机与信息学院院长。主要研究方向为云计算、边缘计算、无线网络。CCF理事、分布式计算与系统专业委员会秘书长。Email: yebl@nju.edu.cn。



陈贵海 南京大学计算机科学与技术系教授、博士生导师。主要研究方向为云计算、边缘计算、计算机网络。CCF 会士、分布式计算与系统专业委员会主任。



陈道蓄 南京大学计算机科学与技术系教授、博士生导师。主要研究方向为分布式计算与系统。CCF 会士、首届 CCF 杰出教育奖获得者。



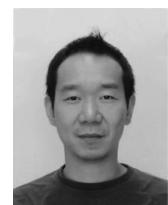
廖小飞 华中科技大学计算机学院教授、博士生导师。主要研究方向为计算机体系结构、系统软件、大数据处理。CCF 青工委执行委员，CCF-IEEE CS 青年科学家奖获得者。



过敏意 上海交通大学计算机科学与工程系教授、博士生导师。主要研究方向为并行与分布计算，嵌入式与普适计算。CCF 会士、常务理事。



郭嵩 香港理工大学计算机系全职教授、博士生导师。主要研究方向为云计算、大数据处理、社会网络、无线网络通信、信息物理系统。IEEE 高级会员，ACM 高级会员。



自主可控抗恶劣环境计算技术 及应用的研究发展与趋势

CCF 抗恶劣环境计算机专业委员会

马 中¹ 陈敬东¹ 戴新发¹ 代 征¹ 夏 静¹

¹中船重工第七〇九研究所，武汉

摘要

在国家自主可控和军民融合的政策背景下，随着新一代信息技术和信息产业的同步发展，抗恶劣环境计算技术的应用范围从最初的野外勘探、海上作业、高原作业、军事等领域，逐渐拓展到工业控制、智慧社会、通信、交通、能源等国民经济各个行业和新兴产业。抗恶劣环境空间要素的内涵从传统的振动、冲击、高低温、潮湿、沙尘、盐雾、霉菌等特殊物理环境，向电磁空间、网络空间、太空空间、深海空间等多维度空间拓展。本文根据国家自主可控发展战略要求，对自主可控抗恶劣环境计算技术及应用的最新发展开展研究，重点分析了若干国内外抗恶劣环境共性基础技术及典型应用的发展现状与趋势，简要总结了国内外研究进展差距，并结合我国的发展现状和不足，对未来自主可控抗恶劣环境计算技术及应用的发展趋势进行总结展望。

关键词：自主可控，恶劣环境，体系结构，国产化

Abstract

Under the background of autonomous control policy and the civil-military inosculation policy, the new generation of information technology and information industry have achieved synchronous development. The application range of the anti- severe- environment computing technology has been gradually expanded from the fields of outdoor exploration, offshore operation, plateau operation, military, etc to the fields of industrial control, intellectual society, communication, transportation, energy and other various industries of national economy and emerging industries. The connotation of the anti-severe-environment space elements is expanded from the traditional vibration, shock, high-low temperature, humidity, dust, salt fog, mold and other special physical environment, to multidimensional expansion including the electromagnetic space, network space, Space space, saltwater room. In accordance with the development requirement of autonomous control policy, the report gives a survey to the state of the art development of the anti- severe- environment computing technologies and applications. This report further focuses on the developing status and tendency of some general basic technologies and typical applications in severe environment at home and abroad. Also the report summarizes the research progress gap at home and abroad. Moreover, combined with the present situation and shortage of China's development, the development trend of anti- severe- environment

computing technologies and applications are summarized from the point of the autonomous control policy.

Keywords: autonomous control, severe environment, computer architecture, localization

1 引言

在十九大报告中，习近平总书记强调指出要加快推进国家自主可控和军民融合战略，构建安全可控的信息技术体系，在若干关键领域必须实现安全可靠和自主可控。抗恶劣环境计算技术与国民经济关键领域尤其密切相关，其技术发展和应用将在某种程度上体现基础研究水平和综合集成能力，该领域科研人员同时担负着国家责任和历史使命。近期美国商务部发布对中兴通信零部件、商品、软件和技术的出口禁令风波，无疑再次敲响了警钟。近年来，有关抗恶劣环境技术的内涵深化与拓展研讨日趋活跃，对恶劣环境的理解不尽一致。但一个基本的共识是：环境空间要素的内涵从传统的振动、冲击、高低温、潮湿、沙尘、盐雾、霉菌等特殊物理环境，向电磁空间、网络空间、太空空间、深海空间等多维度空间拓展；抗恶劣环境计算，即采取综合性技术手段，解决多维度条件（资源）受限环境下的计算与应用问题。抗恶劣环境计算技术，是指将恶劣环境下公用异构的计算、存储、传输、显控等国产硬件设备和基础服务软件，按照成熟的技术和标准进行有机集成，形成的“逻辑大计算机”，作为恶劣环境下公共信息基础设施平台，支撑特殊行业和特殊应用的运行；其应用范围从最初的野外勘探、海上作业、高原作业、军事等特殊领域，逐渐拓展到通信、汽车、工业控制、能源、交通、智慧社会等国民经济各个行业和新兴产业。

近年来，抗恶劣环境计算技术的研究和应用呈现出三个方面的特点和趋势。一是与云计算、大数据、深度学习、物联网、人工智能、北斗定位、卫星互联网、5G 通信等新一代信息技术和产业形态同步发展，跨专业跨学科深度融合的特点更加突出；二是全面涉及国家基础建设规划、国家信息安全等相关重要应用领域，作为综合性基础信息技术的战略支撑作用更加凸显；三是切合国家自主可控和军民融合的顶层设计要求，在目前复杂严酷的中美科技与产业竞争背景下，立足核心基础技术的自主可控自主创新的挑战和形势更加紧迫严峻。因此，开展和加强自主可控抗恶劣环境计算技术与应用的研究具有十分重要的意义。未来，自主可控抗恶劣新型计算技术将向智能化、无人化、轻量化、高性能、高可靠、低功耗等多元化方向发展。随着移动云计算、海上物联网、无人平台、微电子网电空间、工业控制的迅猛发展，抗恶劣环境计算技术正逐渐渗透到地球深海大洋、南北两极、外太空等多个区域。

自主可控抗恶劣环境计算技术及应用体系简图如图 1 所示，底层属于核心共性基础技术，中间层属于智能应用技术，上层是恶劣环境下的典型应用。其中，恶劣环境下的各类典型应用，依赖于多个智能应用技术的支撑作用，而智能应用技术则依赖多个共性基础技术的融合。伴随着核心共性基础技术的发展和深度融合，一系列智能应用技术得到进一步的发展，并为各类领域和行业的应用服务。我国在核心共性技术研究领域经历了

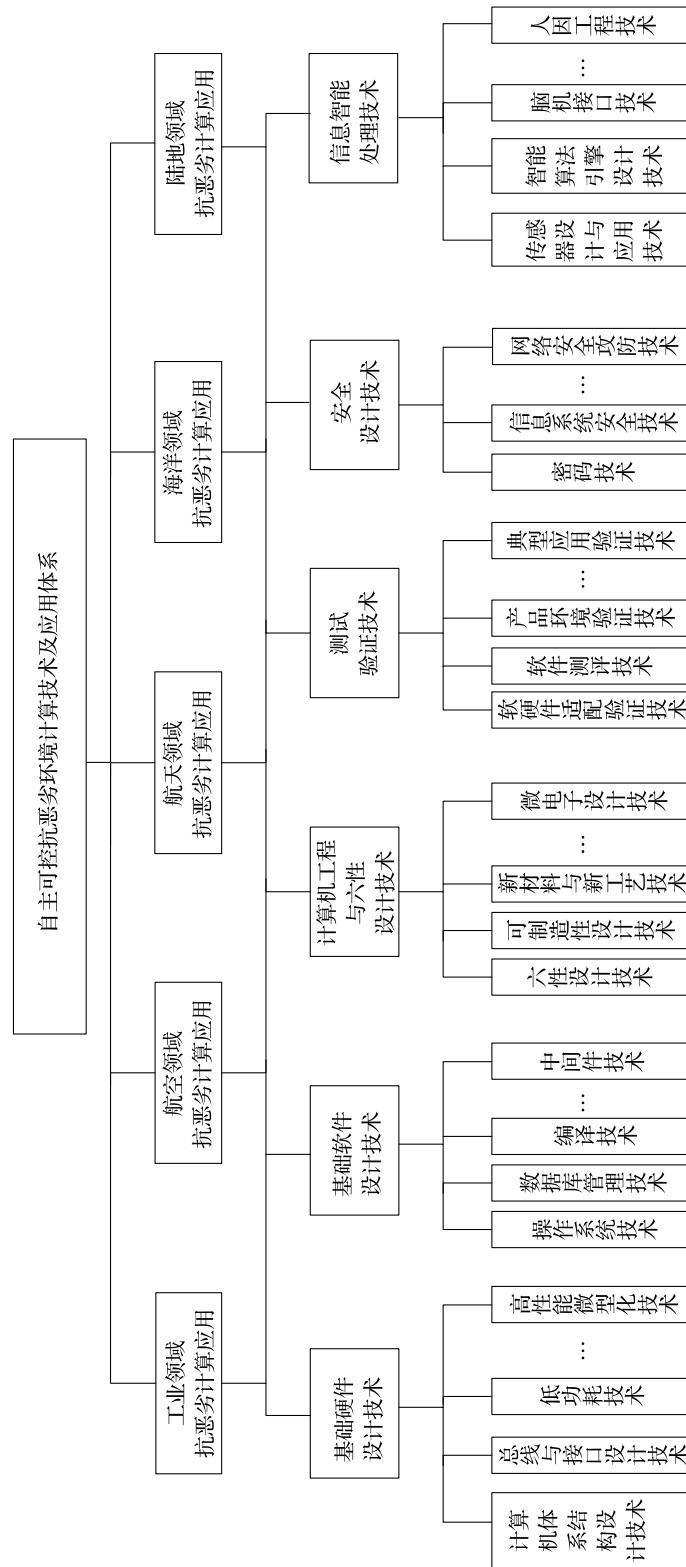


图1 抗恶劣环境计算技术与应用体系图

30 余年持续的探索，从国家重点研发计划到科技部最新发布的国家技术创新工作指引，都引导着核心共性技术向更加专业化和更加高效的方向发展。自主可控抗恶劣环境计算技术的技术体系主要体现在基础硬件设计技术、基础软件设计技术、计算机工程与六性设计技术、测试验证技术、安全设计技术以及信息智能处理技术等方面。其中，基础软硬件设计技术与计算机工程与六性设计技术的融合，增强了对恶劣环境下典型应用的支撑作用。同时，在自主可控新形势和新目标的驱动下，自主可控技术将融入基础软硬件设计、安全设计等核心共性基础技术中，全面提升我国核心技术的自主可控能力。本报告选取了计算机体系统结构设计、基础软硬件设计、计算机工程与六性设计、安全设计以及信息智能处理等技术的若干核心共性技术进行国内外研究现状的分析。在典型应用方面，选取了属于工业领域抗恶劣计算应用的工业物联网、属于陆地领域抗恶劣计算应用的地面无人指挥平台、属于海洋领域抗恶劣计算应用的海上精确导航定位平台和深海空间站云计算平台共四个恶劣环境下的应用，对其应用进展情况分析。

综上所述，在新时代、新形势、新需求、新技术的牵引和推动下，抗恶劣环境计算技术正处于自主可控的快速发展窗口期，通过跨专业跨学科的融合创新和务实安全的应用创新，逐步实现从“芯”到“平台”全方位基础核心技术和应用的自主可控，构建安全可信的信息技术与产业生态环境，并推进自主可控抗恶劣环境计算技术及应用的跨越式发展。本报告旨在根据国家战略和产业规划的指导思想和战略目标，以自主可控技术体系为着眼点和立足点，选取若干抗恶劣环境核心共性基础技术和抗恶劣环境典型应用进行国内外研究现状和发展趋势的分析，进而对国内外的研究进展进行比较，对其发展趋势进行总结展望。

2 基础技术研究现状

本节对计算机体系统结构设计、基础软硬件设计、计算机工程设计、传感与交互设计、测试可靠性与保障性设计以及工控安全设计相关基础技术的国内外研究现状和趋势进行介绍和分析。

2.1 计算机体系统结构设计技术

抗恶劣环境计算机体系统结构设计技术是以增强嵌入式计算机可靠性、安全性、环境适应性等效能为目标的体系结构设计技术，主要涉及高可靠容错体系结构设计、空间与资源受限的高效能异构体系结构设计、高安全体系结构设计等技术，从而使嵌入式计算机能够在恶劣的气候、力学、电磁环境中正常工作，能够适应野外、海上、高原、天空等作业场所，能够在空间、重量、供电等条件受限环境以及振动、冲击、潮湿和信息威胁等恶劣环境下长时间稳定工作。

(1) 高可靠容错体系结构技术

高可靠容错计算机体系结构包含“上”“下”两个部分：“上”是指重视软件在容错系统中的作用，采用软件进行容错管理、对操作系统进行容错化改造等；“下”是指采用冗余硬件结构或内部集成容错功能的集成电路进行设计，如 ARM Cortex-R 系列嵌入式核心内部集成了带锁步的双核处理器和带 ECC 纠错的存储控制器等部件。

在航空航天领域，系统容错技术伴随着第二代航天器的应用得到了很大发展。在我国航天器工程中，“资源一号”是国内真正开始实施容错方案的第一颗卫星。为了满足航天领域应用的高可靠性需求，要求无故障运行的面向航天应用的分布式计算机系统提供容错平台的支持。西北工业大学提出的航天分布式实时容错平台理论模型，为构建航天分布式实时容错平台奠定了基础^[1]。北京航天飞行控制中心设计的二维容错体系结构可以实现进程级的冗余以及进程间的数据容错能力^[2]。哈尔滨工业大学卫星技术研究所和北京航空航天大学分别从不同的角度对航天器进行了姿态容错控制的研究^[3-5]。南京航空航天大学一直致力于航天器容错处理技术的研究，包括时滞系统的容错控制研究^[6]，飞行器融合容错控制技术的研究^[7]，飞行器容错制导研究^[8]等。以上研究表明，我国航空航天领域的高校和科研机构已基本具备自主研究该领域容错技术的能力。

(2) 空间与资源受限的高效能异构体系结构

针对空间与资源受限的恶劣环境下的应用场合，高效能异构计算架构在性能、能耗、资源利用及重构性等方面具有较好优势，已被广泛研究和采用。针对空间受限的恶劣环境，将异构核心集成设计在单个晶圆上或封装在单个芯片之中从而形成异构融合处理架构，既能克服空间受限的约束，又可解决不同结构处理器之间的任务调度、数据共享、通信带宽和延迟等问题，已成为一种高效的解决方案。IBM 公司的 Cell 处理器是此类异构融合处理器的代表，基于 Cell 处理器的 Roadrunner^[9]也成为最先突破 PFlops 性能的高性能计算系统。APU (Accelerated Processing Unit) 是 AMD 公司推出的整合了 x86/x64 CPU 处理核心和 GPU 处理核心的新型“融聚”(Fusion) 处理器，其主要特点是它内含由标量和矢量硬件构成的全部处理能力。Intel 公司和 UIUC 公司的 Runnemede^[10]，Nvidia 公司和 Stanford 的 Echelon^[11]等，其设计目标是单芯片性能可达 8-16TFlops。日本学术界和产业界联合设计的 PACS-G 加速众核芯片的结构，采用了主从异构的超长 SIMD 结构，集成 4096 个核心，峰值性能达到 16TFlops^[12]。国内上海高性能集成电路设计中心也提出了 4 个主核与 256 个从核的异构融合设计，在 1.5GHz 主频下双精度浮点峰值达到 3TFlops。

另一方面，基于 FPGA 的可重构计算技术是解决资源受限恶劣环境计算问题的优选方案。可重构计算采用的是一种将指令流驱动处理器的功能灵活性和数据流驱动处理器的高能量效率（即性能功耗比）结合在一起的计算方式，其在性能、功耗和功能灵活性等关键指标之间具有更好的平衡。可重构计算处理器可以在运行时通过配置流来动态改变运算单元的功能，然后通过数据流来驱动运算单元进行计算，因此是一种由配置流和数据流来共同驱动的计算方式。基于 CPU + FPGA 的异构计算系统可以加速多种计算密集型任务，在此计算模式下，采用传统并行计算方式实现粗粒度的任务并行，直接通过

FPGA 上的硬件逻辑实现细粒度的任务并行，硬件可编程性通过改变硬件逻辑来适应底层的计算问题，从而使 CPU + FPGA 的异构计算系统在性能、功耗、体积、资源利用等方面和传统嵌入式计算机相比获得显著提升，具有灵活性高、功能适用性强等优势。国内的科研院所也对异构计算体系结构开展了深入研究，国防科技大学的严明等人开展了面向领域应用的异构多核 SoC 系统结构设计与优化技术研究，结合粗粒度可重构体系结构与应用定制指令集处理器，对可重构异构计算系统的定制设计方法展开研究，设计了一款异构多核 SoC 芯片；武汉大学的肖汉等人基于 CPU + GPU 异构计算技术开展了面向影像匹配方面的若干问题研究，提出了异构群核架构的影像处理共通解决方案；哈尔滨工程大学的邓臻等人基于 DSP 和 FPGA 的多处理器信号处理平台，研究了声呐多波束相干测深算法的高效实现方法^[6]。

(3) 高安全体系结构技术

恶劣环境并不仅仅指物理环境，随着工业 4.0、物联网和云计算技术的发展，大量计算与控制系统暴露在网电信息空间的恶劣环境中。因此，提升计算机系统的安全性，使其能够抵抗黑客攻击、病毒感染、逻辑炸弹等多方面安全威胁，已成为抗恶劣环境计算机领域不可忽视的问题。目前，国外主要利用可信计算理论、安全体系架构、动态度量技术等来构建高安全的计算机体系结构。其中，动态度量技术作为计算机动态安全启动最新的关键基础技术之一，其研究以及基于动态度量技术的安全体系和应用设计是当前的重点和热点。在安全体系结构设计方面，国外的 Microsoft 公司的 NGSCB 项目通过研究三层安全体系架构，进行了大量安全计算机原型系统的开发工作^[13]。

我国中科院计算所利用高安全体系结构技术自主研发了具备高安全性的龙芯系列处理器，以安全可控为目标，为我国安全战略需求提供自主、安全、可靠的处理器，为信息产业及工业信息化的创新发展提供高性能、低成本、低功耗的处理器。这表明我国利用体系结构的设计技术开始实现独立发展并日臻成熟，形成了以龙芯为代表的处理器系列产品，并在一些应用领域可以实施国产化替代。

2.2 基础软硬件设计技术

自主可控基础软硬件技术是指依靠国内自身的力量，全面掌握基础软件和基础硬件产品的核心技术，在党政办公、金融系统、工业控制、能源交通以及舰载、机载、弹载、车载、星载等军事应用领域，可实现核心基础设施的国产化替代；然而由于信息技术全球化产业分工的复杂性，目前对“自主可控”或“国产化”没有统一、明确的定义。卢锡城院士从安全可控的角度间接地对自主可控的内涵进行了阐述：一是产品制造安全可控，即产品设计生产全过程不存在被人为植入安全“陷阱”的可能；二是产品供给安全可控，即无论平时或战时，都能做到产品货源充足、价格合理；三是技术发展安全可控，不存在受制于人的技术“命门”，能自主修补产品缺陷和进行产品升级换代^[13]。

世界各国都十分重视自主可控基础设施对国家安全的战略意义，各国都非常重视研制自主可控的基础软硬件。例如：俄罗斯国防部积极推进国产 Astra Linux 操作系统和国

产尼尔布鲁斯-8S、贝加尔湖 T1 处理器的试点应用^[14]。全球信息技术发展情况表明，在移动互联网、物联网、人工智能等浪潮的推动下，以基础软硬件为核心的电子产品呈现高性能、低功耗、微型化、碎片化、低成本等多维度发展态势。在以芯片为核心的基础硬件方面：①芯片半导体制造工艺达到 22 纳米、14 纳米甚至 7 纳米；②CPU、GPU、FPGA 等多核、异构的融合加速处理成为高性能计算的主流技术体制；③网络服务和移动计算驱动芯片设计技术向支持微型化、专用化、低功耗以及多交互方式的应用方向发展；④基于 ARMIP 核的低功耗 SOC 仍为集成电路设计遵循摩尔定律发展的重要方向；⑤SIP 封装成为超越摩尔定律^[15]实现低功耗、小型化、异质化、低成本的系统级电子产品的主要技术途径。在以操作系统为核心的基础软件方面：①由于生态体系的稳定、共生、演化特性，在传统服务器和桌面操作系统领域，以产品的迭代进化为主，微软 Windows 系列产品分别在服务器和桌面操作系统方面占据 88% 和 91.4% 的市场份额，在高端服务器领域 Linux 占有率稳步上升；②在移动互联网爆发式增长的十年，Android 和 iOS 基本垄断智能终端市场，生态体系也趋于完善；③物联网操作系统成为各主流操作系统厂商角逐的重要战场，而可兼容桌面计算机、智能平板、智能手机、车载娱乐、穿戴设备以及物联网设备应用程序的一体化操作系统平台将是冲出重围的重要突破口。

为确保国防安全和信息安全，强化信息基础设施能力建设，在工信部等部委政策引导以及国家重大科技专项的支持下，历经多年的探索发展，国内已经形成了一批自主可控的关键基础软硬件产品，在一定程度上可以实施国产化替代。

在通用微处理器方面，国内呈现 MIPS、Alpha、ARM 和 x86 多种指令集架构技术路线并行发展的产业格局。由于知识产品壁垒，国内企业只能以商业合作的形式进行 x86 处理器产品及相关技术的研发，上海兆芯公司与台湾威盛公司合作主推国产 x86 通用处理器和嵌入式处理器，桌面整机平均无故障时间（MTBF）≥10 万小时^[16]，嵌入式解决方案已在网络安全、智能交通、物联网、工业控制等领域广泛应用。ARM 指令集通过技术授权方式开展商用芯片研制工作，华为海思、上海展讯、大唐联芯、科大讯飞等国内企业已积累多年的 ARM 芯片研发经验，但主要以低端市场为主，上海展讯具备自主设计 CPU 内核的能力，可在功耗、性能方面实现定制化。目前我国是推动 MIPS 技术发展和维持产业生态的主要力量，龙芯中科在 MIPS 精简指令集的基础上扩展了指令集 loongISA，并自主研发微架构和编译器，具有里程碑意义的龙芯 3A3000 处理器^[17]实测主频突破 1.5GHz，芯片整体性能大幅提高，通过加入芯片衬底偏压调节支持，可有效平衡性能与功耗，拓宽了芯片适用范围。上海高性能集成电路设计中心对 Alpha 架构进行了自主深化升级，在双核 Alpha 基础上拓展了多核架构，构建了基于 Alpha 架构的自主扩展指令集，主要面向高性能计算和服务器领域，形成了申威系列处理器。在 DSP 方面，我国尚处于起步阶段，国内目前已形成了“华睿”“魂芯”两个系列的国产自主数字信号处理芯片，打破了国外高端数字信号处理芯片对我国高性能计算领域的绝对垄断，但其在设计能力、制造工艺、整体性能等方面与国外数字信号处理芯片仍有较大差距，目前仅应用在特定的军事领域。以紫光同创、复旦微电子、安路信息等为代表的企业，积极投入具有自主知识产权的 FPGA 芯片研制及产业推广，目前国产 FPGA 普遍采用 55 纳米和 40

纳米低功耗工艺^[18]，最高可达千万门级，广泛应用于通信网络、数据中心、人工智能、视频编解码等领域；同时，国内研究机构已具备提供宇航级抗辐照 FPGA 整体解决方案的能力，可满足小型化、定制化的封装需求。

随着国产化应用推广，国内基础软件产品谱系逐渐完备。百傲、昆仑等厂商均推出了基于 UEFI 标准的国产平台 BIOS，支持主流国产处理器和操作系统，能够有效解决软硬件兼容性和国产基础平台产业化问题，同时在固件中融入国家、军用可信计算架构，为国产基础平台提供安全、可信的运行环境。国产通用操作系统主要基于 Linux 内核二次开发，具备主流软硬件适配、应用支撑、开发调试等基础能力，其中，中标麒麟结合可信计算技术和安全技术，针对国防、保密、机要等领域的高安全性需求推出了安全增强型操作系统，并可提供安全评估、安全优化、安全加固等安全服务和系统安全定制化。以满足军事应用需求为主，国内已有 DeltaOS、reworks 等多款国产化嵌入式实时操作系统产品，支持优先级抢占、实时进程、对称多处理等特性，兼容 x86、PowerPC 及国产龙芯等多款处理器，并在舰载电子、飞行控制、兵器装备、航天电子等领域展开示范应用。

2.3 计算机工程设计技术

抗恶劣环境计算机工程技术，包括面向气候环境、机械环境、电磁环境以及生物环境等方面的加固防护技术，是保证计算机设备在各类恶劣环境下安全可靠正常使用的重要途径。国内外计算机工程设计技术研究主要集中在新型散热技术、减振技术、新材料与新工艺技术、可制造性设计技术等方面。

(1) 新型散热技术

在热设计技术方面，国外重点开展散热新技术研究和新型散热器件的研制。美国杜克大学和英特尔公司的研究团队借鉴清洁蝉翼所用物理机制，研制出“跳跃水滴”技术，应用在高性能电子器件中冷却动态热点（局部过热的点）^[19]。美国普渡大学开发出了一套可用于计算机降温，称为“纳米闪电”的新技术，其利用电极电离芯片周围的气体，自产源源不断的小股冷风，带走芯片产生的热量^[20]。美国专业散热器制造商Iceotope 研制出一款专为解决高集成度服务器高温问题的新型散热器产品，该散热器将服务器主板包裹在一种惰性液体中，通过主机后泵使液体流经每个主板并带走热量，新技术将为用户节省 93% 的散热费用^[21]。美国科学家将微管道刻蚀在 VLSI (Very Large Scale Integration) 硅芯片的背部并在其顶部装上盖板，冷却液则密封在微管道内，以此来构造一种新型的微管道散热器，而且提出了一种微管道几何尺寸的优化算法^[22]。

国内在热设计技术方面，重点开展了气室散热技术、液体冷却技术、微通道冷却技术、蒸汽压缩制冷技术等新型散热技术的研究工作^[23]。其中气室散热技术是利用相变材料加翅片散热器实现热交换，与热管技术相似但效率更高；液体冷却技术又称冷板技术，是除了正常风冷以外最常见的一种冷却技术，适用于大型的电气设备，可以方便快捷地转移消耗大量的工作产热；微通道冷板具有结构紧凑、换热效率高、质量轻、运行安全可靠等特点，它在微电子、航空航天及其他一些对换热设备的尺寸和重量有特殊要求的

场合中广泛使用，特别是在微型化的换热装置作为相应系统的配套设备情况下发挥了举足轻重的作用；而大型的服务器和工作站应用蒸汽压缩制冷技术来降低 CMOS 处理器的温度，从而达到提高系统性能的目的。广东合一新材料研究院自主研发的 HEART 超导热技术基本摸索完成热管理产业化应用，表明我国在热设计技术方面的研究已经相对成熟，并且逐步在实际工程中得到了广泛应用^[25]。还有一些前沿创新技术如离子风散热技术、CO₂ 气体节流散热技术等目前还处于理论研究阶段。

（2）减振技术

主流的减振技术分为被动减振技术、半主动减振技术以及主动减振技术^[24]。相比传统的被动减振技术，半主动减振技术和主动减振技术是当前国际减振技术研究的重点。在半主动减振技术方面，美国德尔福（Delphi）公司和 Lord 公司在磁流变液及其器件的研究和普及方面取得了丰硕成果，设计并制造了多种型号的磁流变减振器^[26-28]，应用于机械、土木、医疗等多个领域。军事方面，美国宾夕法尼亚州立大学将磁流变液减振器用于直升机水平旋翼叶片的振动控制，实验结果表明能大大减小叶片震颤，提高其稳定性。美国内华达大学为美国陆军开发研制了采用磁流变减振器的半主动悬架系统，并用于“HMMWV”（悍马）轻型支援车上，具有极高的机动性，在实战中发挥了极大的作用。在计算机技术和测控技术发展的推动下，国际上振动主动控制技术也有了长足发展，已在航空、航天、机械和土木工程领域得到了一些成功应用^[29]。美国开发的主动噪声和振动控制系统，采用船用高速网络技术，对全艇设备 100Hz 以下的低频振动实施主动隔振。韩国专家将四个电磁线圈作动器应用到主动减振系统，有效解决了柔性板模态频率附近控制问题，取得较好的减振效果。日本研究者介绍了一种利用电流变液阻尼器改变阻尼力来调节系统刚度的减振结构，应用到单激励主动隔振系统，并通过一定的控制算法，使得系统刚度能在一定范围内可调。

国内主要在可变阻尼半主动减振技术和动力机械主动隔振降噪技术等方面开展研究。我国多所高校和研究院所在磁流变半主动减振器的研究方面卓有成效，主要应用在航空航天、车辆、桥梁、机械和土木工程等领域。重庆大学针对现有的登月着陆缓冲装置的不足，提出了一种基于磁流变的着陆减振缓冲技术，实验结果表明具有良好的可控性，落地缓冲中控制效果显著。武汉理工大学用自制的磁流变液和阻尼器，制造了世界上最大的磁流变阻尼器（600kN 阻尼力），并应用于武汉天兴洲公铁两用长江大桥的减振防震。上海交通大学设计了一款磁流变弹性体半主动式动力吸振器，对舰艇推进轴系纵向振动进行振动控制，设计的磁流变弹性体动力吸振器经试验验证，具有较宽的移频范围和较好的吸振效果。国内主动减振技术的研究主要从三个方面展开：主动减振系统结构优化研究，主动减振控制研究，主动减振器（作动器）研究。山东大学针对柴油机等船载动力机械的隔振降噪问题，研究了不同控制策略下各种控制形式的主动减振系统的功率流传递特性，给出了主动减振系统设计的基本准则。哈尔滨工程大学研究了舰船主机辅机的主动减振及系统建模问题。上述研究不论是主动还是半主动减振技术，都存在减振器产品体型大精度低等不足，针对计算机等小型电子设备的减振产品仍处于实验室阶段。

(3) 新材料与新工艺技术

在新材料与新工艺技术方面，国际上计算机新材料与新工艺技术的研究主要集中在电子封装和散热材料开发、环保耐蚀表面防护工艺技术等方面。美国工程院电子封装材料创新科研团队开发出一种新型导热材料氮化硼微米球（BNMS）^[30]，相比于纯聚合物，这种新型热界面材料作为填料的导热系数提高了大约5倍。德国弗劳恩霍夫制造工程和应用材料研究所、德国西门子和奥地利攀时集团共同研发了一种新材料，这种材料是在铜中加入掺杂金属铬的钻石粉末，其导热能力是纯铜的1.5倍，满足了小型多功能电子产品快速散热的需要。日本科学家采用高度取向的聚酰亚胺薄膜（kapton）为原料^[31]，经过裁切、层叠、压制、炭化、石墨化制得了热导率高达1800W/(mK)的块状材料。

我国在导热材料和表面防护工艺技术的研究与应用方面较为深入和成熟。由哈尔滨工业大学技术团队研发的适合压铸的高导热压铸镁合金以及可高速挤压的变形镁合金，其散热速率显著优于铝合金及铜合金，已应用在LED筒灯、管灯、泛光灯以及路灯等高热传导要求场合^[32]。李海英等人采用双向拉伸的LED聚酰亚胺薄膜，经层叠、压力下炭化、石墨化后制得导热率接近1000W/(mK)的高定向石墨块体材料。宁波研发的新型散热材料高频声子散热铝，可使电脑CPU散热器体积缩小到现在的一半。中国科学院理化技术研究所科研人员提出以低熔点金属或其合金作为冷却流动工质的计算机芯片散热方法，最大限度地解决了高密度芯片的散热难题。华南理工大学赵杰、中山大学崔国峰采用电沉积的方法，通过对添加剂的选择与优化，获得了高硬度、低热阻的致密铜层，具有良好的导电性、导热性和机械延展性^[33]。表面防护工艺方面，国内多家公司利用中频反应磁控溅射技术在铝合金、镁合金表面制备TiN薄膜，其光亮度高、硬度高、结合强度高，显著改善铝合金、镁合金表面的防护性、装饰性、功能性等性能。上海尚思通表面技术有限公司将镁合金AZ91电镀新工艺成功地投入了批量生产，电镀质量通过了中科院上海冶金所、法国Fr-metal公司的检测，生产合格率达到了90%以上。导热材料和表面防护工艺技术的研究及商用化为计算机在恶劣环境下应用提供了技术保障。

(4) 可制造性设计技术

在可制造性设计技术方面，其研究目的是在计算设备研制生产过程中获得较好的制造技术与制造资源，经过性能、周期、质量、成本等要素的综合平衡，降低研制成本和规避研制风险^[34]。可制造性设计（DFM）技术基于设计阶段的可制造性研究主要有两个重点方向：一是设计可制造性研究方向，研究在设计阶段的可制造性增强措施，分析对性能、成本及风险的影响；二是制造成熟度研究方向，研究制造风险量化评估理论和方法。针对计算机产品，国外正在研究开发基于Web的板级电路CAD/CAPP/CAM/CAT设计、制造、测试一体化技术。美国TecnomaticUnicam公司已经开发出应用于板级电路的设计、组装、组装测试、质量监控、物料追踪管理及虚拟工厂等贯穿整个生产流程的eMPower模块集成应用软件^[34]。在板级电路二维设计和组装方面，以色列VALOR公司的DFM软件是一个包括CAD设计（DFM），电路板检查和工程制造（CAM），以及装配检查和新产品导入（NPI）的软件系统，从而实现了基于Web的板级电路CAD/CAPP/CAM/CAT一体化技术^[35]。

国内各个大学和研究院所在可制造性建模与分析技术领域都进行了大量的基础研究工作，并开展了大量的可制造性分析技术的研究与工程应用。将以可制造性建模与分析技术为核心的数字化产品建模技术作为基础，并在计算机设备关键件研制和小批量生产中取得了明显的效果。针对计算机行业，在CPCA（中国印制电路板行业协会）支持下，深圳金百泽电路板技术有限公司与IPC（美国电子电路及电子互连行业协会）合作举办了“PCB可制造性设计”研讨会，协助客户提高设计规范、降低未来的制造成本和提高产品可靠性。但总体上，国内可制造性评价技术依然处于研究、开发和试验阶段，对于部件和整机的应用，还有较大距离，而且所取得的效果有限。

2.4 传感及交互设计技术

近年来，随着无人平台、机器人技术广泛应用于野外勘探、海上作业、高原作业、军事、城市交通等特殊领域，提升计算机在恶劣气候、力学、电磁等环境下的“人-机-环境”交互能力正成为研究热点之一。其中传感技术的主要研究热点包括微型电子机械系统（MEMS）和多传感器融合技术：MEMS技术以其体积小、成本低、集成化高等特点，对各种传感装置的微型化起着巨大的推动作用，被广泛应用于太空卫星、运载火箭、航空航天设备、飞机、车辆、生物医学及消费电子产品等领域；在恶劣环境下，单一传感数据往往会面临易受干扰、采集数据无法全面体现环境特征等不足，需要多种传感器进行数据采集并利用数据融合技术更准确地感知周围环境状况。人机交互的主要研究热点包括眼动追踪、手势识别、语音合成、自然语言理解、表情识别、手写识别以及虚拟现实和增强现实技术等新型人机交互技术，可以通过丰富的信息通道实现高效率的自然交互，突破恶劣环境对传统交互方式的局限。

（1）MEMS技术

从全球MEMS传感器专利申请情况来看，韩国三星电子、日本爱普生、美国应用化学、德国博世等公司掌握了MSMS传感器的核心技术，并占据全球MEMS传感器市场主要份额，从专利核心技术来看，主要涉及MEMS传感器工作原理、制造工艺、封装材料等方面，这些均与抗恶劣环境适应性设计有关联。在学术研究方面，Yamazaki H等人提出了一种新型钯基MEMS电容式氢气传感器，具有倒T形电极和环形钯合金层，可实现高灵敏度和低功耗^[36]；Sonker等人将陶瓷Al₂O₃-SiO₂复合材料的隔热层喷溅覆盖压电材料BaTi₃，以提高压电温度传感的高温适应能力，通过仿真分析，该温度传感器在2100K的温度范围正常工作^[37]；Jindal等人认为作为MEMS传感器主导材料的硅并不适用于恶劣环境，而碳化硅具有坚固耐用和耐高温的特性，可以作为硅的替代品，并介绍了一种基于碳化硅和氮化铝的双触摸模式电容式压力传感器^[38]；Rogers J E等人采用基于蓝宝石的膜片和结构体，以及基于铂的电容元件，设计了一种可工作在1000℃恶劣环境下的MEMS电容性无源无线压力传感器^[39]。

国内从事MEMS传感器研究的科研机构有中国电科13所、中国电科49所、东南大学MEMS教育部重点实验室、微米/纳米加工技术国家级重点实验室、北京大学微电子学

研究院等，为提高 MEMS 传感器在恶劣环境中的适应能力，主要从新型材料、工艺设计等方面开展了大量研究工作。一方面，采用 SiC、蓝宝石、金刚石、SOI^[40]等新型材料制造各类新型高可靠性 MEMS 传感器，在具备耐高温、耐腐蚀、防辐照等特性的同时进一步提高了 MEMS 传感器的精度与可靠性，卞玉民等人利用绝缘体上 SOI 技术研制了一种高精度 MEMS 电容式压力传感器^[41]；另一方面，采用先进的 MEMS 设计和封装技术，使 MEMS 传感器体积更小、功耗更低且性能更高，并具备耐振动和抗冲击的能力，王伟忠等人利用硅通孔（TSV）技术对传感器抗冲击、防水、可靠性等进行优化设计，结合硅微 MEMS 工艺完成动态压力传感器芯片的超薄封装，传感器的基本性能、耐冲击、防水特性均满足测试要求^[42]，针对电场环境中由于存在电荷附着的影响，清华大学研究人员提出了一种基于 MEMS 的双电位独立差分 EFS，可准确地测量空间中的电场，并具有良好精准度和线性^[43]。

针对 MEMS 器件的可靠性问题，国内学者在冲击、振动、湿度、温变、辐照和静电放电（ESD）等不同环境应力条件下，对 MEMS 器件的声学性能、机械性能和电学性能等关键参数进行检测分析，结合传统的半导体物理失效分析手段来分析其失效模式和失效机理，以指导 MEMS 器件的失效分析、可靠性设计和工艺改进^[44-46]。

我国 MEMS 传感器技术创新资源主要集中在科研院所，未完全形成的良好的“产学研”互通机制，实际技术能力和应用水平与国外相比差距较大。由于传感器是涉及光、电、磁、力、热、声以及化学和生物医学等多学科的复合型产品，我国需加强多学科的协同仿真设计能力，一方面丰富 MEMS 传感器的产品谱系，另一方面提升 MEMS 传感器的灵敏度、可靠性以及恶劣环境适应性。

（2）多传感器融合技术

国外已经将多传感器数据融合技术应用到太空、水下、城市交通等多种环境中。美国国防高级研究计划局（DARPA）构建空间态势感知网络服务体系，用于提升其空间态势感知（SSA）能力。其研究的“轨道瞭望”项目拟研究快速获取和处理多源异构、异质海量空间态势感知数据的有效技术。截至 2016 年 7 月，“轨道瞭望”项目已集成融合处理了 7 家空间态势感知数据提供商的实时数据，首次组建了全球最大的 SSA “网络之网络”服务体系。该网络体系的建成，将颠覆美军现有空间目标监视领域收集和处理 SSA 数据的方式，大幅缩短其空间事件预报与预警时间，并使空间信息使用的精确性与经济可承受性呈指数级提高^[47]。

美国林肯实验室把多声呐综合信息系统、波束形成对信号特征的影响作为研究的重点，将信息融合作为水中目标识别研究的一个重要发展方向。俄罗斯的 GMG516 水下分类系统，也是利用综合声呐系统上的多信息综合处理提取分类特征，其提取特征包括声频、声源级和声场分布特征等，在水中目标识别研究过程中也是利用多种丰富特征进行综合判别，并且其对特征的研究较为精细，找出了声信号特征随跃变层不同的变化规律^[48]。

在自动驾驶环境感知技术上，美国特斯拉公司提出以视觉主导的多传感器融合方案，采用将毫米波雷达、摄像头、激光雷达等传感器数据融合的技术，保证车辆对周边环境的全局定位和理解。特斯拉在其量产车上部署的传感器由 8 个摄像头组成单目环视，有 1 个毫米波雷达和 12 个超声波雷达，目前已经完成了将路测大数据从 Mobileye 单目视觉技

术过渡到基于 Nvidia Drive PX2 计算硬件平台的特斯拉 Vision 软件系统上，采用深度学习的技术在短期内基本达到了 Mobileye 的技术水平^[49]。

我国的信息融合技术起步较晚，20世纪80年代开始关注到现在国家大力支持下也获得了一些先进的科研成果。清华大学推出 THERV 机器人，集成了多种先进传感器如 CCD 技术，具有较强的环境适应能力，能够进行有效的轨迹跟踪^[50]。中科院开发的图像数据融合软件，包括与传感器数量相应的图像数据采集装置和多特征图像数据处理装置及数据融合装置，提取图像数据采集装置存储的图像数据，完成目标的多特征运算，并生成待匹配图像^[51]。同济大学中德学院为改善恶劣天气条件下机场跑道异物检测技术（FOD）的性能，在详细分析了可见光及红外图像的优劣之处基础上，基于亮度色调饱和度（HIS）变换及小波-轮廓（Contourlet）变换提出了一种可见光与红外图像的融合算法，能更有效地满足恶劣天气下 FOD 检测需求^[52]。

（3）新型人机交互技术

在国外，英国皇家空军率先将眼动操作系统成功应用于飞机空中打击的军事作战中，当雷达探测到敌机时，飞行员头盔内部的护目镜就会显示敌机的具体位置，飞行员只需注视敌机，就可通过声控装置发出摧毁敌机的导弹发射指令；美军从20世纪80年代“超级座舱”计划开始，就将眼动跟踪技术作为其主要的关键技术之一，目前已被美军试用于如 F16、YF23、F22、F104、F/A18、F111 等新型战机上^[53]。美国宇航局艾姆斯研究中心正在开发一套无声语音识别系统，通过在人体下巴和喉结两侧固定纽扣大小的特殊传感器，可以捕获大脑向发声器官发出的指令并将这些信号“阅读”出来。这套系统最终将会整合进宇航员的舱外活动航天服上，宇航员可以通过它向仪器或机器人发送无声指令^[54]。美国洛马公司 F-35 的座舱，采用大块柔性触摸屏是人机新交互方式的技术前提之一，提高人机协同能力，提高在诸如运输、消防、搜索、救援等高风险任务场景中的飞行安全性。美军将柔性显示器用于战场，美国通用显示公司也正为美军应用柔性有源矩阵 OLED 技术，该技术将用于集成多种通信能力的护腕式通信设备，实时观看视频和图形信息^[55]。

在国内，天宫二号于2016年10月开启人类史上首次太空脑机交互实验，将航天员的思维活动转化为操作指令，并监测航天员的脑力负荷等状态。航天员在太空环境中完成复杂任务受到极大限制，脑机交互可不依赖外周神经和运动系统，将航天员的思维活动转化为操作指令，同时又能监测航天员的脑力负荷等神经功能状态，实现人机相互适应，减轻作业负荷，是最理想的人机交互方式^[56]。中科院沈阳自动化研究所开发出基于视觉的智能手势控制无人机系统，该系统由手势控制工作站、被控无人机和图像采集相机三部分构成，它将基于视觉的智能手势识别技术同无人机飞行平台相结合，使无人机可以根据人的意图来完成不同的飞行任务，实现了飞行平台上的人机协同作业功能^[57]。2016年初，解放军空降兵跳伞训练已经用上了VR全套虚拟现实设备，空降兵某部引进了能够对跳伞中的视觉、听觉、触觉等进行真实模拟的虚拟现实训练系统。作战人员戴上特制的仿真眼镜，穿上电脑控制的背带系统，配合软件模拟，不仅可以同步看到在空中的真实场景，还能随着操纵感受空中姿态的改变^[58]。

2.5 测试性、可靠性及保障性设计技术

为实现抗恶劣环境计算技术自主、可控、可持续的发展，同时消除软硬件安全隐患，形成自主式保障体系，需从体系结构、系统设计、开发、调试、集成、运行、维护等各个环节，开展测试性、可靠性和保障性设计等技术研究。通过在设计阶段提出功能及性能测试方法和设计要求，并贯穿于整个全寿命周期，构建自主可控的集成验证环境，依据智能化和层次化分析方法，形成效能评估模型，建立自主可控抗恶劣环境计算技术指标评估体系，最终实现“有基准可循、有尺度可量、有效能可评”的目标，推动自主可控抗恶劣环境计算技术关键软硬件生态环境的良性发展。

(1) 测试性设计技术

测试性一词最早在《设备制动测试性设计》中提出^[59]，从测试性这一术语提出的时间开始算起，到目前为止国外大致经历了四个发展时期。近年来，要求在系统的全寿命周期各阶段都要并行地开展测试性 BIT 的设计与分析工作，美国康涅狄格等大学、ARINC 等研究机构在并行设计思想指导下，结合系统功能模型，开展了基于信息流模型和多信号流图模型的测试性 BIT 技术研究。并且随着数字电子设备测试性研究的逐渐深入，测试性总线开始出现，主要表现在：测试性和 BIT 的设计理论进一步丰富和完善，芯片的高层次测试性设计技术开始发展和完善。测试性总线逐渐完善，并在实际系统中得到成功应用^[60]。近 20 年，专家系统、模糊逻辑、神经网络等智能理论相继在模式识别与故障诊断等领域得到了快速发展，引导着 BIT 技术也向着智能化方向稳步推进。

同国外相比，国内的测试性技术研究虽然起步较晚，但近些年进步速度较快，陆续开展了较为系统的研究。①从国内研究实践看：国内测试性设计技术研究主要集中在大型武器装备系统，对机内测试的研究多集中在具体的 BIT 设计及降低虚警技术等方面。国内外学者提出了许多方法来解决常规 BIT 存在的不足，其中以将神经网络、专家系统、模糊理论、信息融合等在内的智能理论和方法应用到 BIT 的设计、检测、诊断、决策等方面而产生的智能 BIT 技术最为有效。②在技术应用与系统开发方面：国内相关单位针对航空机载设备和雷达系统上的应用，开发了具有针对性的 BIT 系统。近年来国内 BIT 在雷达等一些机载电子设备上应用较多，对故障诊断与虚警问题的研究已经逐步开始。并且国内学者对智能 BIT 技术的产生、原理、技术特点、国外的发展及应用前景也开始深入研究。③在工具研发方面：我国的国防科学技术大学、北京航空航天大学、电子科技大学、北京长城航空测控技术研究所、航天测控公司、北京联合信标测试技术有限公司等单位都开发了测试性分析与设计软件。

(2) 可靠性设计技术

在可靠性设计技术方面，从首次提出可靠性概念至今，国外可靠性技术的发展，以建立保证产品可靠性的管理制度，形成质量保证系统，建立电子元件、器件可靠性认证制度为目标，发展可靠性试验技术和改进可靠性标准。近年来，为了提高目标系统可靠性，美国国防部联合工业界出台了一系列的标准指南，以确保目标系统设计、开发、试

验、生产、部署和保障等一系列可靠性工程活动的实施。

同国外相比，我国可靠性技术研究起源于电子工业部门组织开展的可靠性工作^[61]。随着相关技术发展，有关工业部门以及军事应用领域越来越重视可靠性管理，以及加强可靠性信息数据和学术交流活动。当前无论是从可靠性工程管理、型号工程还是从技术预先研究各方面都加强了可靠性共性技术预研，开辟了我国该项技术发展的新领域，取得较大进展和显著效果。重点型号系统中均制定可靠性设计准则，开展了故障模式影响分析及故障树分析等工作，对部分关键设备开展了可靠性试验。通过“暴露－分析－改进”，有效消除了设计中的隐患，贯彻和推进“有效技术最少项目清单”，较普遍地应用了“大纲及评审”“元器件控制”“分配及预计”“RMS 设计准则”“故障模式影响分析及故障树分析”“环境应力筛选”和“故障报告、分析和纠正措施系统”等。并且全国军用电子设备可靠性数据交换网，全国性和专业系统性的各级可靠性学会相继成立，进一步促进了我国可靠性理论技术研究的深入展开并使其取得了初步成效，主要表现在：①观念不断地转变，制定了适当的政策和规范，管理和技术队伍逐渐发展壮大；②施行了适合我国国情的定性和定量设计方针，并不断开辟新的领域，使可靠性工程应用到航空、航天等各种设备的设计和研制中；③重视可靠性设计的同时，广泛开展可靠性试验，如环境应力筛选、可靠性增长试验、可靠性强化试验、加速寿命试验等；④从电子设备的可靠性研究开始，发展到重视机械设备、光电设备及其他非电子设备的可靠性研究，全面提高各行业领域的可靠性等。

(3) 保障性设计技术

在保障性设计技术方面，国外的保障性技术是伴随着综合后勤保障（Integrated Logistics Support, ILS）而发展的。近年来，由于故障诊断技术、故障预测技术的发展，美国国防部两次修订采办文件，提出了“基于性能的后勤”（Performance Based Logistics, PBL）和“基于性能的保障性”（Performance Based Supportability, PBS）。PBL 强调了以用户为中心，以系统战备完好性和任务持续能力为驱动，以用户核心保障能力建设为重点，以承包商保障能力为重要补充的装备保障系统建设新思路。

同国外相比，我国装备保障性技术的研究和应用起步于引进和吸收美军“维修工程”概念及有关的理论，并进行了相关推广应用^[62]。随着综合后勤保障概念的引入，国内组织研究了大量国外有关综合后勤保障方面的资料，包括美国国防部和三军的指示、指令、标准、条例，以及其他一些指导性技术文件，积极跟踪国外综合后勤保障的发展动态，并大力宣传在目标系统研制过程中同步规划保障问题的理念，开展综合保障工程的重要性日益为人们所接受，主要体现在如下两个方面。①在保障资源建设方面：出版了《备件供应规划要求》《保障设备规划与研制要求》《装备用户技术资料规划与编制要求》等一系列国家标准，用于规划备件供应、保障设备研制、技术资料编写等。同时，国防工业、航空工业、航天工业和运输行业等众多领域也利用 OmegaPS、EAGLE、Extend 等软件进行保障系统建模，以生成贴近实际需求的装备保障方案。②在科研探索方面：根据保障的迫切需求，安排了大量的技术攻关项目，已经取得了一些有价值且可以应用的成果，初步建立了综合保障应用技术体系，进一步明确规定了全寿命周期各阶段的保障性工作内容、要求和考核标准，要素齐全、要求明确、责任清晰，具有很强的

指导性和操作性，为在全寿命过程中开展保障性工作提供了强有力的保证。

2.6 工控安全设计技术

工业控制系统（ICS）是指用于操作、控制、辅助自动化工业生产过程的设备、系统、网络以及控制器的集合，包括数据监控与采集系统（SCADA）、分布式控制系统（DCS）、可编程逻辑控制器（PLC）、智能终端、人机交互接口（HMI）等系统^[63]。

美国、欧盟工控安全研究起步早，取得较大成果。尤其是美国，研究内容全面，发布的标准文献、指导性文献大都出现第3代更新版；国土安全部成立 ICS-CERT（工控安全应急小组），建设有包括爱达荷国家实验室、桑迪亚国家实验室、太平洋西北国家实验室等六家工业控制系统安全研究重点实验室，NIST 制定标准 NIST SP 800-82、NIST 800-53 等，并且在不断地更新标准以适应新的安全局势。欧盟网络与信息全局制定专刊《保护工业控制系统》，被称为是欧盟工控安全研究的集大成者^[64]；国际电工委员会（IEC）制定标准 IEC62443，用以指导 ICS 安全建设。

随着工业4.0、物联网和工业云安全进一步发展，为了适应不断变化的信息安全新形势，各大厂商在近几年推出了众多的信息安全新技术新产品，帮助用户抵御各种信息安全威胁。工业控制系统杀毒软件、云安全、可信计算、控制内网安全、统一威胁管理（UTM）等成为市场热点。不论是新技术还是新应用，业内众多主流安全厂商都在向工业云、物联网等概念靠拢，一些实质性产品也相继发布。工业控制系统网络环境日益复杂，融合发展趋势明显^[65]。信息安全技术朝着构成一个完整、联动、快速响应的防护系统方向发展，采用系统化的思想和方法构建信息系统安全保障体系成为一种趋势。工业控制系统信息安全技术逐步由传统的被动防御向主动式预防和防护发展，可信计算、软件安全、主动式恶意代码防护等技术日益受到重视。网络和信息系统性能的不断提高，需要安全产品不断提高性能以满足高速、高性能环境下的安全保护需求。

卡巴斯基实验室与文献[66]强调以工控系统为目标的攻击才是真正的威胁，根据威胁源是否以破坏工控系统目标，分为“无意识威胁”与“恶意威胁”。“无意识威胁”指不以工控系统为攻击目标的威胁源，如自然灾害、意外事故和机械仪器老化等。ICS 威胁指的是可能给 ICS 资产造成损失的来源，威胁分五大类，具体如下^[67]：①环境和自然威胁：供电不足、电磁干扰、静电、恶劣的温度湿度条件、粉尘等，地震、雷电、台风、洪涝、火灾等；②内部无意威胁：操作失误、软件故障、硬件故障老化、网络过载、隐藏信道（covert channel）；③内部有意威胁：蓄意破坏、非授权篡改、非授权使用、窃取窃听内部重要信息；④外部攻击：普通攻击、商业窃密、信息战、恐怖袭击等；⑤第三方人员：留有后门，第三方人员在对系统进行维护时，可能会未授权对系统进行更改或安装非法软件。当前最常用的安全技术是入侵检测、漏洞扫描与纵深防御技术。漏洞扫描技术对零日漏洞攻击无能为力；纵深防御防火墙只能防御来自外部的攻击，对跨防火墙的行为无能为力，也不能防御内部的攻击；入侵检测只能单纯地检测异常行为，不能提高工控系统的“恢复能力”^[68-69]。文献[70]中指出社会工程学攻击、钓鱼攻击，

浏览器中的脚本攻击和注入攻击、邮件扫描攻击等大量攻击都利用了员工无意泄露的敏感信息，员工缺乏安全意识是安全的一大漏洞。文献 [71] 提出将严格的基于角色的访问控制机制与网络分区、审计技术、白名单策略结合，可以达到很好的防护效果。Conpot 在 GitHub 发布开源工控蜜罐系统 Conpot，该系统是工业控制系统服务器端的低交互的蜜罐技术，设计易于布置、修改和扩展，通过提供各种通用的工业控制协议，可以构建需要的系统，能够模拟构建基础设施，以假乱真，使不安好心的人成功发现一个巨大的工控系统。趋势科技在美国一小镇上建立一个模拟各种 ICS/SCADA 的蜜罐设备，并且与互联网连接，蜜罐中包含了 ICS/SCADA 系统的典型安全漏洞，在 18 小时后被攻击。文献 [72] 提出移动蜜罐，该蜜罐可以布置在网络系统中的任何位置，将当前网络的状态提供给工控安全管理员。国外将蜜罐技术用于研究工控系统的威胁源、攻击途径以及探索防御手段，技术应用成熟，取得了很多成功。文献 [73] 提出基于 Conpot 的远程数据入侵检测技术 (Telemetry Analysis Intrusion Detection System)，可适用于各类的工控协议。

工业控制系统逻辑范围广，应用软件多，涉及硬件复杂，生产设备与生产环境多样，一旦遭到破坏，可能对物理世界造成直接的巨大伤害，研究其架构和所涉资产 (ICS Asset Inventory)，对工控安全的研究具有重要意义。无论是 ICS-CERT 还是国内的工控安全企业，都提出精确的工控设备清单是工控安全的基础。设备清单用于登记工控系统中的资产及其所处的安全状态。文献 [74] 指出工业控制系统包括“硬件资源”“软件资源”“存储其中的数据资源”以及“与工控系统相连的生产设备”与“生产环境”。

不同于传统 IT 安全需求 CIA 特性排序，工控安全的安全需求排序是 AIC (Availability, Integrity, Confidentiality)，将攻击分为三类：可用性攻击，如拒绝访问；完整性攻击，如 SQL 注入攻击、修改关键数据；机密性攻击，如未授权获取数据等。针对工控系统的攻击往往不是单一形式，往往有效率、破坏性大的攻击是多步骤的，糅合多种技术。具体的攻击表现形式：重放攻击、中间人攻击、远程修改 RTU 逻辑、DoS 攻击、零日漏洞攻击、APT (Advanced Persistent Threat) 高级持续性威胁、挂马、漏洞攻击、恶意软件攻击、网络钓鱼、间谍软件、SPAM、SQL 注入攻击、端口扫描、脆弱性扫描、信息泄露、社会工程学攻击等。使用工业控制系统的行业普遍存在上文讨论的安全威胁，而对于特定的工控领域，也存在其典型的危险。基于现存单一安全技术的不足，提出完善的工控安全防御模型。完善的工控系统安全防御模型应具备四个层次功能：①阻挡外部入侵；②检测内部异常；③快速恢复功能正常、稳定的生产环境；④智能化地实现以上三个防御过程^[75]。

我国工控安全研究起步晚，呈现出点状发展、底子薄弱的特点。点状发展表现为研究机构及企业分散，近年来虽有很多企业和机构开始专门研究 ICS 安全，但都是孤军奋战；底子薄弱表现为核心设备全靠进口，工控安全研究起步较晚，大部分靠参考国外的标准，如文献 [76] 提出的纵深防御可在 NIST SP 800-82 中找到原型。虽然，近两年出现一些工控安全的研究单位和企业，但都没有形成权威性的机构，还不能与国际顶尖的研究团队比肩。

3 技术应用进展

自主可控抗恶劣环境计算技术已渗透到航空、航天、海洋、陆地以及工业控制等应

用领域，本报告对工业物联网、地面无人指挥平台、海上精确导航定位平台以及深海空间站云计算平台四个典型应用的相关技术进展情况进行分析，并着重对所涉及的自主可控相关共性基础技术的发展进行介绍。

3.1 工业物联网

随着物联网技术的快速发展，中国制造 2025、美国先进制造伙伴计划、德国工业 4.0 等一系列国家工业能力提升战略相继提出并进入实施阶段，融合 OT 和 ICT 技术的工业物联网应运而生^[77]，成为驱动全球工业体系智能化变革的核心力量。工业物联网将智能感知、控制技术、泛在网络、人工智能、大数据、云计算等技术融入工业生产过程各环节，实现制造原料精准配置、生产过程实时控制、工业现场全局感知、工艺流程持续优化以及按需定制的柔性制造，有效提升产品品质、降低产品成本、优化资源消耗，从而构建服务驱动的新型工业生态体系，并具备智能感知、泛在连通、精准控制、数字建模、实时分析和迭代优化六大典型特征。然而在传统工业体系向工业物联网演变进程中，面临着诸多挑战：①工业物联网边缘感知控制设备需要能够适应复杂恶劣的工业生产环境；②传统工业现场总线和工业以太网标准难以互联互通^[78]，缺乏满足工业生产高安全、高实时和高可靠需求的新型工业总线标准；③云计算模式下服务实时响应能力较弱，无法满足工业物联网边缘侧海量数据处理的实时性要求；④工业物联网打破了传统 OT 和 ICT 界限，攻击面大大增加，需综合考虑网络、设备、数据、控制、应用等多个方面的安全问题。

为推进工业物联网的有序健康发展，工业发达国家纷纷结合国内工业行情展开工业物联网顶层设计。2015 年 3 月，德国正式提出了《工业 4.0 的参考架构模型 (RAMI4.0)》；2016 年 12 月，日本工业价值链促进会 (IVI) 推出了智能工厂的基本架构《工业价值链参考架构》；2017 年 1 月，美国工业互联网联网 (IIC) 发布最新的《工业物联网参考架构 v1.8 版本》；2017 年 9 月，中国电子技术标准化研究员发布了《工业物联网白皮书》。尽管各国制定的工业物联网参考架构各具特色，但功能域划分基本一致，包括感知控制域、运维管控域、信息处理域、业务逻辑域以及用户接口域，工业物联网典型架构如图 2 所示。从工业物联网技术体系来看，主要技术包括：智能感知控制技术、泛在网络通信技术、数据协同处理技术和安全管控技术^[79]。

(1) 智能感知控制技术

传感器作为工业物联网数据流动的起点，感知数据的质量直接决定了效用价值，在恶劣工业环境下对传感器的功耗、精度、体积及防护能力要求更为苛刻；工业控制以 PLC、SCADA、DCS 为主，我国 PLC 市场被国外厂商垄断，国产 PLC 产品主要集中在中低端市场，随着工业物联网的推进实施，会进一步增强工业控制系统的开放性，届时国产 PLC 也将迎来发展机遇。以传感器、工控系统为主的工业物联网边缘设备，本身具备很少甚至完全不具备智能性，在传统“云 - 管 - 端”模式下，使用长距离链路的往返控制环来管理边缘设备，存在可靠性差、复杂度高的问题，而边缘计算^[80]可使边缘侧设备具备充分的自主性、实时性和智能性。

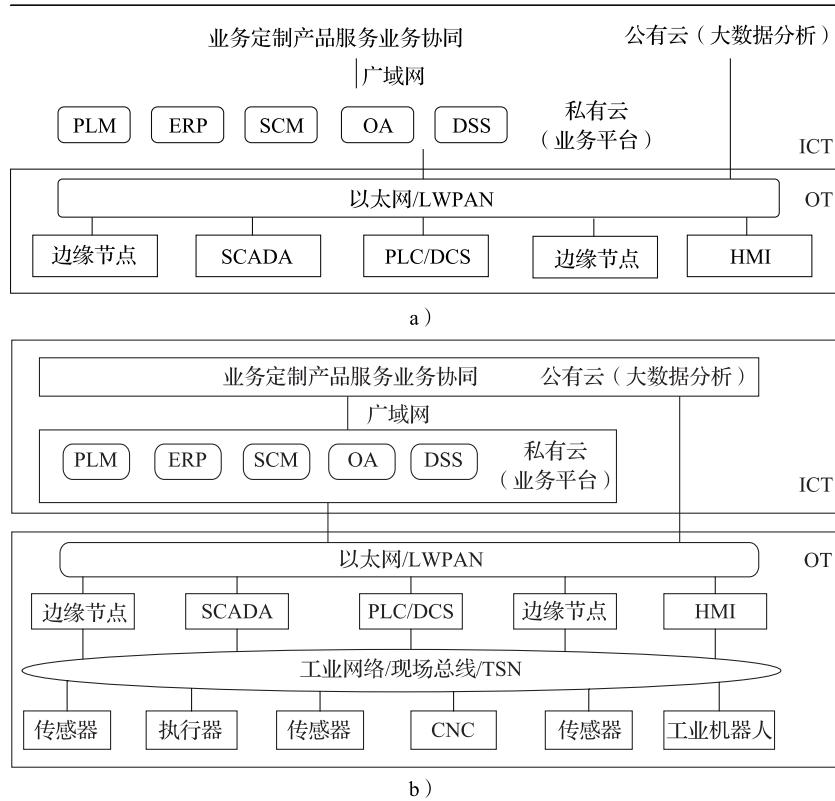


图 2 工业物联网典型架构

(2) 泛在网络通信技术

为使 HMI、SCADA、DCS、PLC 等工控设备，生产现场的各种传感器、变送器、执行器、伺服器，CNC 数控机床、工业机器人和成套生产线等生产设备，ERP、MES、SCM 等企业信息系统以及工业云平台互联互通，一方面需要解决感知、控制等边缘设备硬件资源受限，以及无法运行完整网络协议栈的问题，另一方面需要解决现场总线、工业以太网和工业无线网等多种工业网络的整合问题。具备高可靠、低功耗、强实时、高安全的短距无线通信、低功耗广域网、时间敏感网络以及 SDN 的组合应用是解决工业物联网泛在互联的重要途径。

(3) 数据协同处理技术

工业物联网终端设备采集的海量“小”数据经过整合与分析，并最终通过聚集生成携带丰富信息的“小数据流”，由此产生的小数据流继续“向上”渗透，最终汇聚成大数据信息，这种数据流动过程正是工业物联网应用的核心价值驱动力；工业控制系统负责实时控制，边缘计算设备执行智能分析，工业云平台开展决策支持，在“云-边-端”这条链路上实现一体化协同计算^[81]，提供全生命周期的数据服务，异构计算体制、时序数据存储是满足工业物联网实时、高效、智能数据处理需求的核心技术。

(4) 安全管控技术

目前工业物联网信息安全防护能力处于建设阶段，面对严峻的潜在安全威胁，2018

年2月，工业互联网产业联盟发布了《工业互联网安全框架》^[82]，旨在为应对工业互联网日益增长的安全威胁，指导相关企业部署安全防护措施，提升工业互联网企业整体安全防护能力。构建多层次的工业物联网安全防护体系，增强网络、设备、数据、控制与应用的安全保障能力，主动识别、抵御内外部的安全威胁，打造工业智能化发展的安全可信环境，将是工业物联网安全管控的重点工作。

3.2 地面无人指挥平台

当前，抗恶劣环境计算技术研究的热点应用包括以工业机器人、无人车/机/艇、无人指挥系统等为代表的各种无人平台设计技术。地面无人指挥平台具有持续行动能力强、成本低、隐身性好等特点，特别是不需要人员参与驾驶，避免了人员伤亡的危险。除了军事应用外，在矿业、制造业、物流行业都有着广阔的发展和应用空间。但由于地面环境复杂，不确定性较多，给无人车和地面机器人的行为决策带来了严峻挑战。20世纪80年代以前，因受当时恶劣环境下图像处理、数据融合等关键技术的限制，地面无人指挥平台的进展缓慢，发展重点为遥控地面无人指挥平台。近年来，随着环境感知、数据融合及其他抗恶劣计算机关键技术突破性的进展，地面无人指挥平台得以进一步发展，出现各种半自主地面无人平台和自主地面无人平台。

地面无人指挥平台是指无人驾驶的、完全按遥控操作或者按预编程序自主运作的、进行任务的一类无人平台，它主要包括无人车和地面机器人。在一个典型的自主式地面无人车系统中，操作人员只需要预先在控制终端上选定运行路线，通过通信系统下达给地面无人车。环境感知、车辆定位、任务规划、避障路径规划、运动控制等功能由车上携带的计算机自主完成，操作人员不需要直接参与。操作员通过遥控终端对无人车的运动情况进行监控，必要时给予协助，从而使系统对通信的依赖程度和操作员的劳动强度大大降低^[83]。

为了适应未来复杂应用场景和环境的需求，提高地面无人作战平台的智能性、机动性和生存能力，地面无人指挥平台的建设需要考虑系统架构设计、环境感知、安全与防护等关键技术。下面从抗恶劣环境的角度对以上技术点在地面无人作战平台的应用情况进行分析。

(1) 系统架构设计技术

地面无人指挥平台系统架构设计技术包括三个方面的内容。首先是充分利用无人平台内“无人”的优势，借鉴有人平台的总体设计特点和突破有人平台的总体设计模式，对有人平台的动力、传动、行动以及其他分系统的结构跨越式地优化布局，使无人平台具有更小的体积、更大的承载能力、更高的恶劣环境承受能力和更小的被敌方探测概率。其次是从总体上考虑平台底盘如何满足无人化的基本需求，例如平台底盘上的所有分系统都能够由计算机系统来调度、管理、监控，平台的行驶操纵控制方式尽量简单等。第三是从提升平台的智能化、自主化出发，考虑如何配置平台的安全冗余设计、平台的人工智能系统以及平台与指挥控制中心之间的协作，克服平台无人的劣势，使其延伸、扩展甚至倍增有人平台的威力。目前美国已开发了基于SAE AS5684协议的模块化架构、自

主协同无人系统联合架构（JAUS）、4D/RCS 参考架构以及组队智能架构方式。JAUS 架构作为标准化无人信息系统架构，提供了多平台系统的互通兼容和共享，具有很强的协同能力^[84]。美军目前发展的大多数地面无人系统都兼容无人系统联合架构，因此装备之间的互操作性得到提高，并有助于实现协同作战。美陆军预计，到 2020 年自主地面无人系统可以在部队初步应用于运输、巡逻、检测等简单任务；到 2030 年，可以实现有人 - 无人系统的智能编队和协同行动以及车队自主护送任务。

（2）环境感知技术

通过地面无人平台配备的环境感知传感器来获取周边环境及交通地理信息，并使综合决策控制系统能够理解环境，是地面无人平台进行自主路径规划与智能决策的前提。地面无人平台一般采用多传感器融合的方法来获取环境信息，使用的传感器包括激光雷达、毫米波雷达、可见光摄像机、红外摄像机，根据传感器的性能指标进行优化组合，获得能够满足复杂场景感知建模需求的传感器组合方案。美国“黑骑士”和“粉碎机”等地面无人平台的感知系统配置都采用了该种方案^[85]。陕西雷神智能装备公司的新型智能无人侦察攻击平台在车体上方的四角安装有全向的光电探头，可以实现 360 度无死角监控周围情况。以激光雷达为例，Velodyne、Quanergy 等国外公司推出了系列化激光雷达产品，用于地面无人系统的复杂环境感知。国内速腾聚创、禾赛光电、北科天绘等公司也推出了面向无人驾驶的激光雷达产品。在障碍检测方面，美国 JPL 实验室开发的基于双目视觉检测技术能在 10 米远处检测到宽度为 60 厘米的壕沟。

（3）安全与防护技术

地面无人平台安全与防护技术用于保障地面无人平台在运行过程中的自身安全，避免陷入危险境地，包括如何阻止未授权访问和使用地面无人平台及其有关信息的技术，以及研究如何设计地面无人平台的综合防护措施，提高综合防护等级，增强环境生存能力。国外这一技术领域研究较早，目前已经积累了较为丰富的经验。在信息安全方面，主要借鉴通信技术领域的安全技术，如加密技术、抗欺骗技术、抗劫持技术等。中国“ASENDRO EOD”模块式排爆机器人采用 2400MHz 通信频率，同时具有 433MHz 的安全数据无线通信功能，可进行视频传输^[85]。在防护方面地面无人平台主要借鉴坦克装甲车辆的综合防护技术。俄罗斯“乌兰” - 9 武装无人战斗车全车装有 8 ~ 10mm 钢装甲，其中发动机舱等关键部位的防护经特别加强，整车能够防护 7.62mm 口径枪弹攻击。陕西雷神智能装备公司的新型智能无人侦察攻击平台整体外观为低 RCS 隐身设计、低红外特征设计和反劫持设计，提高了地面无人平台的隐身性和生存能力。

综上所述，我国政府一直非常重视地面无人指挥平台技术的研究与开发，以中国兵器工业集团为代表的各科研单位在陆地无人平台方面也开始崭露头角。但是，与国外先进技术对比，在自主控制技术中的智能事态感知、复杂线路规划、运动仿真、真实环境模拟以及设计制造技术等方面还存在一定的差距。随着微电子、光电子、纳米材料、微机电、计算机、动力装备等基础核心技术的自主可控发展，国产化地面无人系统执行任务的领域将不断扩大、完成各种复杂任务的能力不断提高，在未来信息化战争以及民用行业中的作用将日趋突显。

3.3 海上精确导航定位平台

基于北斗定位增强的海上精确导航定位平台主要由北斗卫星系统、北斗地基增强系统、测量船、数据处理中心、高精度用户终端、北斗浮标、水下定位终端、水上目标及水下目标等组成，如图 3 所示。海上精确导航定位平台是以北斗卫星系统及北斗地基增强系统为核心，并通过水面动平台及部署浮标阵方式，实现动目标之间高精度的相对位置信息，从而实现水上/水下目标的高精度定位，为我国开展海洋活动提供强有力的技术支撑，为国家高精度时空信息安全提供了根本保障^[86]。海上精确导航定位平台不仅可以应用于交通导航、旅游、应急救援等大众领域，更广泛应用于测绘勘探、石油勘探、精准农业、监测控制、航空航天等恶劣环境领域。海洋资源大开发时代，国内海上精确定位技术长期依赖于 GPS，缺少自主可控权，不能满足我国加快海洋强国建设的重大需求。今年的中兴事件告诉我们，核心技术必须国产化，才能不受制于人。而直到今年，国内海上精确定位技术长期对于 GPS 的依赖，才由哈尔滨工程大学研制的北斗海洋广域差分高精度定位终端打破，这个终端是目前国内第一个具有完全自主知识产权的海上专业级导航定位终端，可充分支持石油开采、管道铺设、搜救打捞、海上风力发电等恶劣环境下的应用^[87]。由此可见，研究具有自主知识产权的基于北斗定位增强的海上精确导航定位平台具有重要的意义。下面从抗恶劣环境的角度对海上精确导航定位平台中的数据处理中心相关技术的应用情况进行分析。

数据处理中心主要实现海量北斗定位信息的数据处理、通信、存储及显示等功能。从世界范围看，美国相继建设多个 GPS 增强系统，形成了区域和全国、地基和天基、公益和商业竞相发展的局面，因此，各项技术一直位于世界前列。近年来，我国研制了具有完全自主知识产权的数据处理中心。其中，通信处理模块采用国产处理器为核心，控制模块内部的北斗高精度定位单元、北斗增强高精度辅助定位单元等功能单元，实现导航定位等功能；大容量存储模块采用基于 FPGA 为核心固态盘控制器的全自主设计架构，充分发挥 FPGA 的可重构、集成度高的优点，运用模块化、高扩展性等方法，使数据处理中心拥有良好的产品适应性；数据处理模块采用以国产高性能申威多核处理器与国产套片为核心的高性能计算平台，搭载大容量内存、高速总线、高速网络等功能单元；显控模块采用以龙芯处理器、龙芯套片和我国自研的显示芯片为核心的计算平台，研制具有完全自主知识产权的高性能显控平台；在体系结构设计方面，海上精确定位平台的数据中心采用了 PCI-Express(PCIe) 总线，其数据传输率可以达到 PCI 总线所不能提供的高带宽。具体而言，数据处理中心的各个标准功能模块，借助 PCIe 总线高带宽、低延迟的优势，通过配置不同的功能模块，数据处理中心可根据不同实际应用需求，通过 PCIe 总线交换模块扩展数据处理模块、大容量存储模块和显示控制模块等功能模块，对于海洋空间多个目标采集的海量数据进行实时高速处理，实现海量数据挖掘、海量数据存储和海洋态势融合等应用。这些产品和技术的应用都表明了我国在海上精确导航定位平台研制方面具备很强的自主可控性。

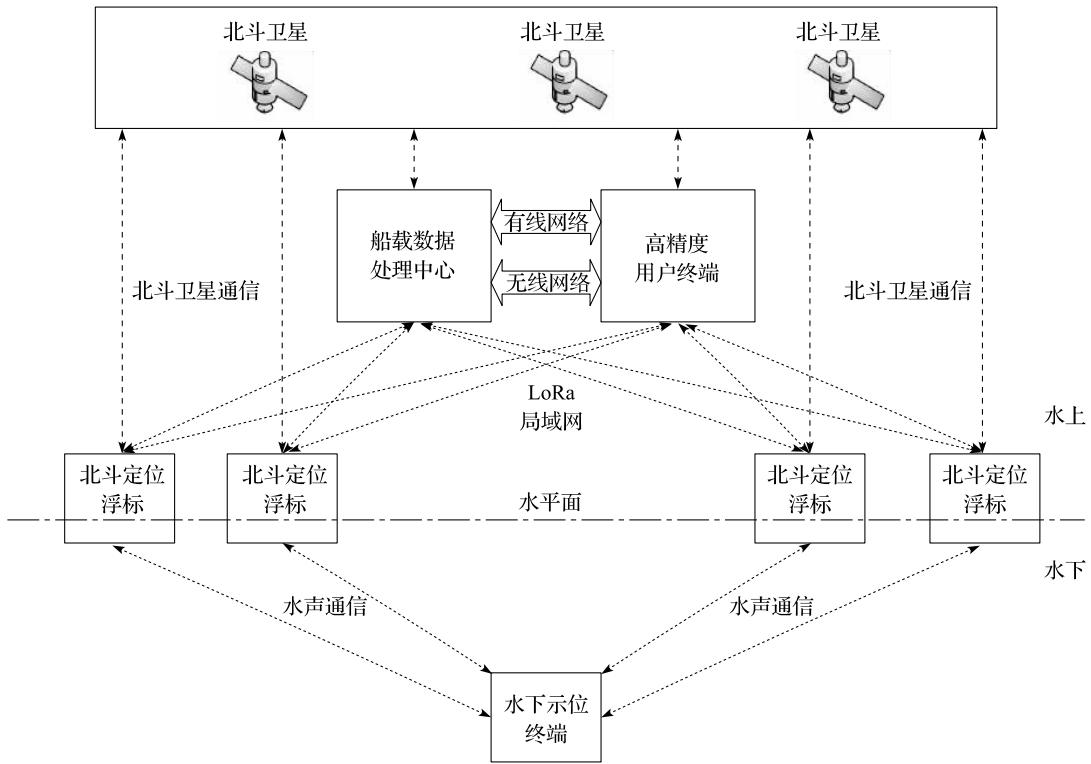


图3 基于北斗定位增强的海洋高精度定位系统示意图

综上所述，基于北斗增强的海上精确导航定位平台的研究成果，避免了面临国外GPS核心技术的封锁，在软硬件设计方面，以及元器件供应、配套算法、成熟模块适配等方面都有较好的国产化技术支持，将为抗恶劣环境海洋活动提供强有力的技术支撑，为国家高精度时空信息安全提供根本保障，同时也积极促进了全球导航系统的共同发展，推动形成资源共享、优势互补的世界卫星导航发展格局。

3.4 深海空间站云计算平台

深海空间站主要用于进行海洋科学探索，被喻为海洋里的“天宫一号”。2013年11月，由中国船舶重工集团承担研制的我国首个实验型深海移动工作站完成总装，并展开水下试验。这也标志着我国在海洋领域的前沿核心技术方面具备一定的自主研发能力。中国将是继美、法、俄、日后，第五个掌握大深度载人深潜技术的国家。深海空间站作为深海装备技术发展的前沿，包括水下生活区、水下电站、水下热站和水下云计算中心等多个模块。其中，深海空间站云计算平台的建设需要在深海的恶劣环境下考虑节能、低功耗、小型化、容错等核心技术，并考虑对建立深海空间站所起的作用，最终实现深海空间站的实际建造与应用。下面对以上技术点在深海空间站云计算平台的应用情况进行分析。

(1) 节能技术

如今的深海载人潜航器的续航时间大约是 12 小时。未来，研究具备更长周期的深海空间站是一个具有挑战性且必须攻克的技术难点。根据我国透露的相关计划，未来建造的深海空间站可在水下“驻扎”两个月。因此，在深海空间站中建立绿色云计算平台势在必行。国外在云计算中心节能方面，致力于建立一种自适应的能耗计算模型，达到节能的目的。在具体的研究方法上，侧重于利用数据资源管理、分布式机器学习、虚拟机迁移、虚拟机放置算法等以提高资源利用率，达到建设绿色数据中心的目的^[88-92]。国内在绿色云计算中心建设方面，主要采用基于虚拟技术的资源管理手段以提升数据中心服务器的能耗效率，并取得了许多有研究价值的成果^[93-95]。其中，比较典型的例子就是国内的商业化公司阿里巴巴，利用虚拟化技术整合数据中心，成功减少了数据中心的服务器能耗，达到了节能的目的。这也表明我国在节能技术方面具备一定的自主研发能力。

(2) 低功耗技术

在深海空间站的云计算平台中，嵌入式技术的应用必不可少。在嵌入式系统中，电路与系统的低功耗设计一直都是电子工程技术人员设计时需要考虑的重要因素。而低功耗技术属于建立绿色云计算中心的硬件技术范畴。因此，低功耗技术是海洋恶劣环境下的深海空间站建设必须攻克的技术难点。国外的 ADI 公司、NXP、德州仪器、MicroShip 等其他半导体厂商都拥有独特的低功耗设计技术^[96]。例如：动态电压频率调整技术，可依据不同处理需求动态调整功耗，达到节能的目的。国内的中科院微电子所、清华大学微电子所、中国电子科技集团相关院所为代表的研究机构针对低功耗技术展开了深入研究。特别地，由我国自主建造的位列世界第一的超级计算机“神威·太湖之光”的节电节能水平，都是可以跟国际上最新的芯片相比，具体来讲，太湖之光运算控制核心与运算核心位于一个芯片内，成功地避开了传统的插卡形式的费电问题，整体上达到了节能的目的。近年来，国内的灵动微电子、致象科技、兆易科技等在低功耗控制器的研究方面有了较大的突破。并且，国内各商业化公司相继自主研发的一系列低功耗技术产品，都表明我国具备一定的自主研发低功耗产品的能力，这为将来建立更长周期深海空间站奠定了硬件技术基础。

(3) 小型化技术

目前的深海载人潜航器体积约 1200 立方米，因此，深海空间站的云计算中心的建设需要小型化技术的支持。这里以 SIP 封装技术为例，探讨国内外在小型化技术方面的研究情况，为海洋恶劣环境下的深海空间站建设提供一定的小型化技术应用参考。美国、欧洲、日韩、新加坡等地得益于完善的产业结构、先进的半导体工艺与机械加工技术，在系统级封装方面的研究比较领先^[97]。例如：苹果公司一直将 SIP 技术列为提升产品竞争力的重要封装架构，并在多款产品中成功应用。IBM 研制的最小计算机仅 1mm^2 ，紧接着密歇根大学研制出了面积仅 0.3mm^2 、体积为 0.04mm^3 的计算机。国内很多骨干企业在国家政策的大力支持下，在先进封装技术方面取得了长足进步，以江苏长电科技、南通富士通等为发展 SIP 封装业务的典型代表。并且在宇航、航空、星载、弹载、雷达、电子对抗等军事应用领域，国内相关研究机构主要针对系统级封装的军事应用方向和恶劣环境适应技术进行了探索^[98]。例如，目前基于 SIP 技术的军用计算机已经在诸多军事

装备中取得应用，可大幅降低计算机系统的体积、重量以及功耗，比如某研究所研制的耐高温、抗辐照的 SIP 已装备于型号任务，某弹体项目也成功应用基于 SIP 技术的小型化弹载计算机。总的来讲，三维高密度系统级封装技术将成为实现高性能、低功耗、小型化、异质化、低成本的系统集成电子产品的重要技术途径，将为未来的深海空间站建设奠定坚实的技术基础。

在自主可控的深海空间站建设方面，“蛟龙号”属于海洋装备科技领域的典型符号。相信不久的将来，伴随着以上技术的不断进步和融合，深海空间站将实现跨越时代意义的发展。正如中国船舶重工集团公司表示，中国正在研发可以抵达地球任何大洋洋底的载人潜水器，若能获得胜利，将标志着中国向海底资源探究又迈进一大步。

4 国内外研究进展比较

通过对自主可控抗恶劣环境计算技术及应用的国内外研究现状及国内自主可控研究进展的分析，在抗恶劣环境计算机体系结构设计、基础软硬件设计、计算机工程设计、传感及交互设计、测试性可靠性及保障性设计、工控安全设计等共性基础技术方面，国内外的研究进展各不相同，研究方向也略有不同。整体上，国外的抗恶劣环境核心共性基础技术研究更先进、更成体系，而国内的相关研究整体起步较晚，距离国际领先水平有一定的差距，但是，在自主可控的技术应用进展方面，国内也有领先的技术和产品，例如中国的超级计算机“神威·太湖之光”，以及由中船重工集团公司研制的中国首艘深海载人潜水器“蛟龙号”等都表明了我国对自主可控技术深入研究的重视和决心。国内外研究进展对比如表 1 所示。

表 1 国内外研究进展对比

对比内容	国内研究进展	国外研究进展	备注
计算机体系结构设计	容错体系以冗余架构为主；异构融合架构以 CPU 少量大核 + 众多小核、CPU + FPGA 为代表	支持处理器锁步、冗余等容错技术；异构融合架构已形成 Cell、APU、MIC、Zynq 等多种产品	国内主要应用于军事领域
基础软硬件设计	自主可控基础软硬件产品谱系趋于完备，产品在性能、可靠性和环境适应性方面有待加强，自主可控生态体系缺失，产品商业化程度不够	各国都在积极投入建设自主可控的信息技术体系，并取得了突破性进展，但美国仍在全球信息技术体系中保持主导优势	技术手段基本一致，但在技术性能方面与国外还有一定的差距
计算机工程设计	研究的重点方向与国际基本一致，其发展主要由军工等项目推进	相关技术已经成功应用到计算机硬件设备中，且有成体系的设计技术	国内正针对抗恶劣环境进行工程设计体系化研究，尤其在军事领域有相关政策和经费的支持
传感及交互设计	在应用和产品层面的发展较快，但对于基础核心技术的自主化程度不高，某些核心框架和技术尚需依赖国外现今技术	对基础软硬件和核心算法架构的研究比较深入，注重平台化发展，市场化程度较高，应用不局限于军事领域	国内在军事应用领域有较大的政策支持和发展空间

(续)

对比内容	国内研究进展	国外研究进展	备注
测试性可靠性及保障性设计	相比国外虽然起步晚，但是近年来由于有国家电子工业部门的支持，陆续开展了系统的研究，且进步较快	美国制定了一系列标准指南，在世界范围内处于领先地位	相关技术在国内航空领域应用较多
工控安全设计	起步晚，底子薄弱，没有形成权威性的机构，还不能与国际顶尖的研究团队比肩	拥有成熟的权威研究机构	国内跟踪国际

5 发展趋势与展望

自主可控抗恶劣环境计算技术从总体上向智能化、无人化、轻静化、高性能、高可靠、低功耗等多元化方向发展。本报告对阐述的以上六个核心基础技术的发展趋势总结如下：

(1) 计算机体系结构设计技术

抗恶劣环境体系结构目前多在军事领域开展了研究和应用，主要解决复杂电磁与辐射环境、温度与湿度环境、振动与冲击环境下的信息系统可靠性问题。随着无人化、智能化及物联网设备的发展，空间受限、供电受限、资源受限的恶劣环境对嵌入式计算机体系结构的影响进一步加大，恶劣环境的内涵也已由物理环境进一步延伸至网电信息环境，因此对抗恶劣环境计算机小型化、低功耗、安全性的需求进一步提升。未来需进一步加强异构融合架构和动态安全架构的研究，并实现不同抗恶劣环境体系结构在嵌入式计算机中的有机融合，从而满足未来多样化信息设备对抗恶劣环境的综合需求。

(2) 基础软硬件设计技术

云计算、大数据、移动互联、物联网、人工智能等新型应用催生出了多种形态的软硬件产品需求，具体表征为高性能、低功耗、微型化等特性的组合应用，异构融合与软硬件协同设计是满足此种应用需求的重要方法，在万物智联的时代，应用场景更加复杂多样，对基础软硬件的多维度需求也将更加显著。我国信息技术基础产业发展仍比较滞后，需进一步增强自主可控基础研发能力：在 DSP、FPGA、射频、光通信芯片、数模转换器/模数转换器等冷门领域补齐短板；提升国产处理器的性能、可靠性及工艺水平，并强化恶劣环境下的适应性设计；构建安全可控的信息技术生态体系，推进国产基础软硬件的深度替代。

(3) 计算机工程设计技术

计算机工程设计技术是融合热、力、电磁、材料与工艺等多学科的综合性设计技术。随着电子信息技术、控制技术、新材料新工艺技术的应用，抗恶劣环境计算机朝小型化、轻静化、智能化方向发展，计算机工程设计技术将重点围绕高效散热技术（液冷、微通

道散热等)、智能减振技术(磁流变、压电式、电磁式等)、电磁主动防护、轻质导热复合材料和三防工艺技术开展研究。

(4) 传感及交互设计技术

目前国家加速推进智能化发展，未来大数据技术、人工智能、多源数据融合处理、多通道多媒体交互等技术将成为抗恶劣环境计算机传感及交互技术的热点问题，加强国际与商业合作将成为发展的主流。此外，开展军民融合，通过整合来自政府、军事部门、商业团体组织和科研单位的传感数据，实现数据的全面、高效利用也是值得重点关注的方向。

(5) 测试性可靠性及保障性设计技术

测试性可靠性及保障性技术对自主可控抗恶劣环境计算的功能性能实现具有基础性、全局性的战略地位和作用，之前在军事领域等恶劣环境应用领域长期采用X86架构计算技术，在计算性能、可用性、可靠性方面得到较大提升的同时，各应用领域均面临着较大的软硬件安全隐患。为实现抗恶劣环境计算技术自主可控、可持续发展，形成自主式保障体系，需要从体系结构、系统设计、开发、调试、集成、运行、维护等各个环节，开展测试性、可靠性和保障性设计等技术研究。

(6) 工控安全设计技术

未来我国工控安全设计行业标准逐步完善，产业联盟进一步促进信息安全资源整合。工信部最新出台的《工业控制系统信息安全行动计划(2018-2020)》中提出2020年前要实现“工控安全管理工作体系”等目标，进一步规范标准体系建设。我国工控安全研究起步较晚，需大力开展基于大数据分析和人工智能的动态安全防御体系结构、网络虚拟化安全、计算环境可信增强、多域跨域安全防护、网络自动恢复、快速同态加密、网络空间靶场、区块链等关键技术研究，研制运行统一化、安全可视化、处理联动化、决策智能化的工控安全防御体系。

6 结束语

根据工信部提出的加快推进国产自主可控计划、中国制造2025、军民融合计划以及各部委关于促进新一代人工智能产业发展的规划，全面推进自主可控技术在恶劣环境领域的应用研究至关重要。因此，在新的形势下，抗恶劣环境计算技术是在响应自主可控发展战略的背景下，通过对各类国产化的材料、工艺设计及条件、微电子技术、计算机技术以及工程技术等基础技术进行超融合而产生的跨学科的创新型计算技术。目前，国内外在计算机体系结构、基础软硬件、工程设计、测试性可靠性及保障性设计、工控安全设计等方面开展了研究，并取得了一批有影响力成果，促进了各类计算技术在军事、航空、航天、冶金、化工等领域的应用。

对国内外研究进展比较分析，国内在核心共性基础技术方面的研究投入和产出相比国外还远远不够，原创性的方法、资源、系统以及产品相比国外还较匮乏。但是，国家

相关政策的大力支持和技术的飞速发展也带来了新的机遇。因此，进一步提升我国抗恶劣环境计算技术及应用的自主可控能力已成为近期最受关注的研究内容之一，并将对我国产生重大而深远的影响。

致谢

本报告受中国计算学会抗恶劣环境计算机专委会委托撰写。因时间及能力所限，报告中对相关进展和趋势的介绍难免挂一漏万，敬请指正。衷心感谢中国计算机学会抗恶劣环境计算机专委会在选题及编写过程中的建议和指导，同时感谢参与本报告撰写、编辑与审校的所有人员。

参考文献

- [1] 姜洁. 航空发动机控制系统传感器故障诊断与容错控制 [D]. 南京：南京航空航天大学，2015.
- [2] 车畅畅，王华伟，倪晓梅，等. 基于深度学习的航空发动机故障融合诊断 [J]. 北京航空航天大学学报，2018，44(3)：621-628.
- [3] 耿云海，金荣玉，陈雪芹，等. 执行机构故障的航天器姿态容错控制 [J]. 宇航学报. 2017, 38 (11)：1186-1194.
- [4] 马广富，于彦波，李波，胡庆雷. 基于积分滑模的航天器有限时间姿态容错控制 [J]. 控制理论与应用，2017，34(8)：1028-1034.
- [5] 张福桢，金磊. 使用 SGCMGs 航天器滑模姿态容错控制 [J]. 北京航空航天大学学报，2017，43 (4)：806-813.
- [6] 潘旭. 一类时滞系统的容错控制及其在四旋翼飞行器中的应用 [D]. 南京：南京航空航天大学，2017.
- [7] 翟荣宇. 高超声速飞行器再入段舵面与 RCS 融合容错控制研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2017.
- [8] 杨鹏宇. 高超声速飞行器再入轨迹优化与容错制导研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2017.
- [9] Radu G, Balan I, Ungurean I. Tuning Fuzzy Perceptron using Parallelized Evolutionary Algorithms[J]. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2015(1) : 1392-1215.
- [10] Carter N P, Agrawal A, Borkar S, et al. Runnemede: An architecture for Ubiquitous High-Performance Computing[C]. IEEE, International Symposium on High Performance Computer Architecture. IEEE, 2013:198-209.
- [11] Keckler S W, Dally W J, Khailany B, et al. GPUs and the future of parallel computing[J]. IEEE Micro, 2011, 31: 7-17.
- [12] Feasibility Study on Future HPC Infrastructure[OL] . <http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/files/ex-review/FS-ccseval-2014.pdf>. 2014.
- [13] 卢锡城. 聚焦安全可控——核心信息技术自主可控发展思考 [J]. 中国信息安全, 2018(3) :

- 46-50.
- [14] Telezhnikov V Y. System state transformation rules in DP-model of access control in computer networks based on operating systems of Linux[J]. Applied Discrete Mathematics, 2016(1) : 67-85.
 - [15] Kai H, Gruenwald A, Busch R, et al. Microtechnology management considering test and cost aspects for stacked 3D ICs with MEMS[C]. SPIE Nanophotonics Australasia, 2018 : 176.
 - [16] 兆芯 x86 产品与解决方案[OL]. <http://www.zhaoxin.com/solution.aspx?id=3>.
 - [17] 龙芯 3A3000/3B3000[OL]. <http://www.loongson.cn/product/cpu/3/3A3000.html>.
 - [18] Titan 系列可编程逻辑器件[OL]. <http://www.pangomiero.com/procenter/detail3.html>.
 - [19] 中电五十五所. 美国杜克大学和英特尔公司联手研制出新型“跳跃水滴”散热技术应对电子器件中不可预知的动态热点的散热需求 [J]. 半导体信息, 2017(2) : 23-25.
 - [20] 杨敏, 毛宇, 陈奋, 等. 硅氧碳纳米镶嵌复合薄膜的氧空位形成与散热基板封装 [J]. 功能材料, 2017, 48(6).
 - [21] Chinabyte. 数据中心液体冷却新技术: 节省 93% 的散热费用 [EB/OL]. 2009-11-24. http://m.chinabyte.com/35/11040535_mi.shtml.
 - [22] Prakash, Shashi, Kumar, Subrata. Fabrication of microchannels: A review [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2015, 229(8).
 - [23] 侯春宝, 侯瑀, 李晓明. 舰船电子设备的热设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2017(6) : 108.
 - [24] 周林, 范欣欣. 整星减振技术的发展趋势 [J]. 科技风, 2018(3) : 184.
 - [25] 广东合一超传热材料[OL]. <http://www.he-one.com/news/>.
 - [26] 冯占宗, 张进秋, 刘峻岩. 军车磁流变半主动悬挂关键部件研制概述 [J]. 车辆与动力技术, 2014(3) : 58-64.
 - [27] 张进秋, 王兴野, 孙宜权, 等. 自传感自供能磁流变减振器研究现状综述 [J]. 液压与气动, 2017(4) : 96-101.
 - [28] Mehdi Eshaghi, Ramin Sedaghati, Subhash Rakheja. Vibration analysis and optimal design of multi-layer plates partially treated with the MR fluid[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82.
 - [29] 杨铁军, 石慧, 李新辉, 等. 一种基于智能减振器的舰船机械设备主动减振系统研究 [J]. 振动工程学报, 2017, 30(2) : 167-176.
 - [30] Yanming Xue, Ammar Elsanousi, Ying Fan. N-Dimethyl formamide facilitated formation of hexagonal boron nitride from boric acid[J]. Solid State Sciences, 2013.
 - [31] 张立彬, 王金清, 杨生荣. 石墨烯 - 聚酰亚胺复合薄膜的制备及性能表征 [J]. 高分子学报, 2014(11) : 1472-1478.
 - [32] 周海萍. Ti 弥散强化超细晶 AZ31 镁合金制备与组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
 - [33] 康志新, 张俊逸, 刘秦. 镁合金仿生超疏水表面的制备及展望 [J]. 中国有色金属学报, 2018(1) : 1-11.
 - [34] Bei Yu, Xiaoqing Xu, Subhendu Roy. Design for manufacturability and reliability in extreme-scaling VLSI[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59 (6) .
 - [35] 胡少华. 微电子组装和封装技术的类型 [C]. 第九届中国高端 SMT 学术会议, 2015 : 9.
 - [36] Yamazaki H, Hayashi Y, Masunishi K, et al. A high sensitivity MEMS capacitive hydrogen sensor with inverted T-shaped electrode and ring-shaped palladium [C]. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, IEEE, 2017: 226-229.

- [37] Sonker M K. Design and simulation of Tri-morph based MEMS thermal sensor for harsh environment[C]. International Conference on Computer, Communication and Control, IEEE , 2016: 1-7.
- [38] Jindal S K, Varma M A, Thukral D. Comprehensive assessment of MEMS double touch mode capacitive pressure sensor on utilization of SiC film as primary sensing element: Mathematical modelling and numerical simulation[J]. Microelectronics Journal, 2018 , 73: 30-36.
- [39] Rogers J E, Yoon Y K, Sheplak M, et al. A Passive Wireless Microelectromechanical Pressure Sensor for Harsh Environments[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018 , 27(1): 73-85.
- [40] 陈俊, 王学毅, 谭琦, 等. 键合 SOI 材料应力的控制技术 [J]. 微纳电子技术, 2017, 54(5): 304-310.
- [41] 卞玉民, 杨拥军. 一种基于 SOI 技术的 MEMS 电容式压力传感器 [J]. 微纳电子技术, 2018, 55(5): 345-350.
- [42] 王伟忠, 张建志, 何洪涛, 杨拥军. MEMS 超薄动态压力传感器 [J]. 微纳电子技术, 2016, 53(4): 249-254.
- [43] Mou Y, Yu Z, Huang K, et al. Research on a Novel MEMS Sensor for Spatial DC Electric Field Measurements in an Ion Flows Field[J]. Sensors, 2018 , 18(6): 1740.
- [44] 陈俊光, 谷专元, 何春华, 等. MEMS 惯性器件的主要失效模式和失效机理研究 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 1-5.
- [45] 谷专元, 何春华, 陈俊光, 等. 真空封装 MEMS 陀螺高温老化失效机理研究 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(11): 1637-1642.
- [46] 秦丽, 王孟美, 何蕴泽, 等. 振动环境下 MEMS 加速度计的可靠性评估 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(5): 670-674.
- [47] 王璐菲. DARPA “轨道瞭望”项目集成史上最大规模空间传感器网络 [J]. 防务视点, 2016(10): 62-63.
- [48] 李明. 多源信息融合技术发展简述 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37(6): 5-9.
- [49] 刘健. 基于三维激光雷达的无人驾驶车辆环境建模关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [50] 汤莉莉, 王金勇, 黄伟. 物联网智能机器人设计 [J]. 现代电子技术, 2017, 40(8): 73-76.
- [51] Jian-ru XUE, Di WANG, Shao-yi DU, 等. 无人车自主定位和障碍物感知的视觉主导多传感器融合方法 (英文) [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017(1).
- [52] 张思睿, 葛万成, 汪亮友, 等. 恶劣天气下可见光和红外图像融合算法设计 [J]. 信息技术, 2016(6): 33-36.
- [53] 程时伟, 蔡红刚, 曹斌. 基于群智感知服务的眼动数据众包计算 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(5): 1103-1112.
- [54] Kim M, Cao B, Mau T, et al. Speaker-Independent Silent Speech Recognition From Flesh-Point Articulatory Movements Using an LSTM Neural Network[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio Speech & Language Processing, 2017, 25(12): 2323-2336.
- [55] Hayk K, Kim K H, Kim S H, et al. Flexible display device and manufacturing method thereof[J]. Journal of Statistical Mechanics-Theory and Experiment, 2018, 10(10): 125-152.
- [56] 航天五院. 航天五院电子产品助力天宫二号发射成功 [J]. 中国航天, 2016(11).
- [57] 杜壮. 救援机器人: 小市场大空间 [J]. 中国战略新兴产业, 2016(17): 43-45.
- [58] 赵志宏, 孙姝, 郭志. VR 眼镜: 引领视觉沉浸训练新时尚 [J]. 环球军事, 2016(6): 48-49.

- [59] 刘萌萌, 苏峰, 宋成军. 装备电子设备边界扫描系列标准及测试性设计技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(2): 8-11.
- [60] Schrepel T. The' Enhanced No Economic Sense Test' : Experimenting With Predatory Innovation [J]. Social Science Electronic Publishing, 2018.
- [61] 尹丽丽, 寇力, 范文慧. 基于多 Agent 的装备保障体系分布式建模与仿真方法 [J]. 系统仿真学报, 2017(12): 3185-3194.
- [62] 王波, 沈耀程, 关静. 舰船装备保障性设计方法探讨 [J]. 中国水运月刊, 2016, 16(9): 12-14.
- [63] Berhe A B, Kim K H, Tizazu G A. Industrial control system security framework for ethiopia[C]. Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks, IEEE, 2017: 814-817.
- [64] 冉鹏. 面向大规模数据的安全多方计算协议的设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [65] 陈明奇, 洪学海, 王伟, 等. 关于网络安全和信息技术发展态势的思考 [J]. 信息网络安全, 2015(4): 1-4.
- [66] Casati L, Visconti A. The Dangers of Rooting: Data Leakage Detection in Android Applications [J]. Mobile Information Systems, 2018(4).
- [67] Bezukladnikov I I, Kon E L. Method to counter the threat of covert channels in LonWorks-based industrial control systems[C]. Proceedings of the 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT) , 2015: 173-177.
- [68] Genge B, Haller P, Kiss I. Cyber-security-aware networkdesign of industrial control systems[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 1932(8184): 1-12.
- [69] 李佳玮, 郝悍勇, 李宁辉. 工业控制系统信息安全防护 [J]. 中国电力, 2015, 48(10): 139-143.
- [70] Water ISAC Security Information Center, ICS-CERT, The FBI, et al. 10 basic cybersecurity measures bestpractices to reduce exploitable weaknesses and attacks [R]. Washington: Water ISAC Security Information Center, 2015.
- [71] Kuman S, Groš S, Mikuc M. An experiment in using IMUNES and Conpot to emulate honeypot control networks[C]. International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, IEEE, 2017: 1262-1268.
- [72] Vasilomanolakis E, Srinivasa S, Mühlhäuser M. Did you really hack a nuclear power plant? An industrial control mobile honeypot[C]. Proceedings of IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS) , 2015: 729-730.
- [73] Ponomarev S, Atkison T. Industrial control system network intrusion detection by telemetry analysis[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2016, 13(2): 252-260.
- [74] 王婷. 安全多方计算理论研究综述 [J]. 信息安全与技术, 2014, 5(5): 41-44.
- [75] 陶耀东, 李宁, 曾广圣. 工业控制系统安全综述 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(13): 8-18.
- [76] Jillepalli A A, Sheldon F T, Leon D C D, et al. Security management of cyber physical control systems using NIST SP 800-82r2[C]. Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IEEE, 2017: 1864-1870.
- [77] Yonemura K, Sato J, Komura R, Matsuoka M. Practical Security Education on Combination of OT and ICT using Gamification Method [C]. Proceedings Of 2018 IEEE Global Engineering Education Conference, 2018; 746-749.
- [78] Costa M S, Amaral J L M. Analysis of wireless industrial automation standards: ISA- 100. 11a and

- WirelessHART[S]. 2012.
- [79] 中国电子技术标准化研究院: 工业物联网白皮书 [OL]. <http://www.cesi.cn/201709/2919.html>.
- [80] 周悦, 芝张迪. 近端云计算: 后云计算时代的机遇与挑战 [J]. 计算机学报, 2018.
- [81] Mortazavi S H, Salehe M, Gomes C S, et al. CloudPath: A multi-tier cloud computing framework[C]. In proceeding of the Second ACM/IEEE Symposium on Edge Computing, ACM, 2017: 1-13.
- [82] 工业互联网安全框架(讨论稿) [OL]. <http://www.aii-alliance.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=23&id=210>.
- [83] 程子阳, 任国全, 李冬伟. 地面无人作战平台对陆作战影响研究 [J]. 飞航导弹, 2017(12): 31-35.
- [84] 余青松. 国内外地面无人系统发展与关键技术研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2018, 160: 142-143.
- [85] 李玉玺, 李正宇, 徐宏斌, 等. 地面无人作战平台“作战机器人”国内外研究现状 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 124-130.
- [86] 王冬霞, 辛洁, 刘春霞, 等. 卫星导航系统故障诊断及容错技术探讨 [J]. 导航定位学报, 2018(2).
- [87] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 72.
- [88] Yang Y, Chang X, Liu J, et al. Towards Robust Green Virtual Cloud Data Center Provisioning[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2017, 99: 168-181.
- [89] Chen T, Zhang Y, Wang X, et al. Robust Workload and Energy Management for Sustainable Data Centers [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(3): 651-664.
- [90] Manousakis I, Sankar S, McKnight G, Nguyen TD, Bianchini R. Environmental Conditions and Disk Reliability in Free-Cooled Datacenters[C]. 14th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST '16), 2016: 53-65.
- [91] Chaudhry M T, Ling T C, Manzoor A, et al. Thermal-Aware Scheduling in Green Data Centers[J]. ACM Computing Surveys, 2015, 47(3): 1-48.
- [92] Xu L, Pavlo A, Sengupta S, et al. Reducing replication bandwidth for distributed document databases [C]. ACM, 2015: 222-235.
- [93] 彭成磊. 云数据中心绿色节能需求的虚拟机负载均衡技术研究 [D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [94] 陈黄科, 祝江汉, 朱晓敏, 等. 云计算中资源延迟感知的实时任务调度方法 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(2): 446-456.
- [95] 周景才. 云数据中心软件节能关键技术的研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [96] Shafique M, Theocharides T, Bouganis C S, et al. An Overview of Next-Generation Architectures for Machine Learning: Roadmap, Opportunities and Challenges in the IoT Era[C]. Design, Automation and Test in Europe, 2018.
- [97] Wachmann E, Saponara S, Zambelli C, et al. ATHENIS_3D: automotive tested high-voltage and embedded non-volatile integrated SoC platform with 3d technology[C]. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, IEEE, 2016: 894-899.
- [98] 高兰志, 谭超, 伍攀峰, 等. 基于 SiP 封装技术的宇航计算机研究与设计 [C]. 微处理器技术论坛, 2017.

作者简介

马 中 中船重工第七〇九研究所，研究员，主要研究方向为计算机系统结构、加固技术等，mazh@public.wh.hb.cn。



陈敬东 中船重工第七〇九研究所，研究员，主要研究方向为信息工程、物联网等，cjdong27@sina.com。



戴新发 中船重工第七〇九研究所，研究员，主要研究方向为容错技术、虚拟化技术等，daixinfa@sina.com.cn。



代 征 中船重工第七〇九研究所，研究员，主要研究方向为测试诊断、计算机系统结构等，whdzheng@163.com。



夏 静 中船重工第七〇九研究所，博士，主要研究方向为虚拟化技术、并行计算等，673718032@qq.com。



关键词索引

- 交互式定理证明 1, 3-5, 22, 30-31, 34, 66, 67
SMT 1-4, 6-7, 12, 15-16, 18-19, 21, 23, 27, 31, 34, 37, 40, 48, 49, 54, 56, 62, 397
自动机 1-3, 7-9, 11-14, 20-21, 23-25, 27, 30-31, 33-35, 66
形式语义 1-3, 11, 25, 31-32, 35
分离逻辑 1, 3, 12-13, 15-16, 26, 32
时序逻辑 1, 8-9, 12-14, 22, 24-26, 32, 66
演绎推理 1, 14-16, 26, 32, 36, 162
抽象解释 1, 14-21, 27, 29, 30, 32-33, 36, 64
模型检测 1, 6, 8-9, 12-15, 17-20, 22-31, 33-34, 36, 66-67
符号执行 1, 14-15, 18-19, 28-29, 33, 36
量子程序的分析与验证 1, 33
大规模图数据 71, 85, 87, 90, 92
查询处理 69-72, 74, 80-81, 85, 87-88, 90-92, 99, 166, 167
数据挖掘与分析 69, 75, 88, 90-91
图数据管理系统 69
AI 100-102, 110-112, 114, 121-123, 125, 127-129, 131-135, 150, 157-158, 173, 311, 314
系统软件 64-65, 68, 100-101, 108, 112, 114-115, 128-129, 131-132, 134, 146, 368
深度学习 5, 34, 100-103, 106-107, 110-114, 118-119, 122, 125-127, 129-131, 134, 150, 153, 172, 183, 288-289, 307, 314, 317-319, 331, 333-337, 370, 381, 396
语义网 74, 92, 147-150, 155-157, 159, 172, 181-182
知识图谱 69-70, 75, 145, 147-160, 162-173, 178, 181-182
知识表示 65, 147-152, 155, 158-159, 163, 170-171, 207
关系抽取 147-148, 151-153, 171
关系推理 147-148, 162
语义搜索 147-148, 151, 154, 171, 173
智能问答 147-148, 151, 154-155, 158, 160, 173
描述性数据分析 147, 154, 171
图数据库 71, 73-75, 77, 82, 92, 147, 155-156, 163-164, 167-168, 171, 182
生成对抗网络 183-196, 201-207, 304
产生式模型 183
数据生成 111, 183, 196
等几何分析 215-224, 227-234, 237-242, 244-245, 248-249, 251-257, 264-270, 273, 277, 282, 285-286
几何计算 215-216, 227, 229, 241, 257, 264-267, 271, 285-286
计算域参数化 215, 217, 221-222, 227-228, 241-245, 256, 266-268
适合分析的样条 215, 220-222, 236, 245
等几何配点法 215, 224, 252-253, 264, 269
CAD 模型结构简化 215, 217, 224, 257, 267, 270
六面体网格生成 215, 217, 222-223, 245-249, 266-267, 269
记忆驱动 287, 289, 298, 304, 308
知识引导 287
媒体学习 287, 289, 308
媒体创意 287
互联网 109, 140, 148, 150, 155-158, 168, 172-173, 216, 313-314, 318, 320-322, 328, 337, 347-348, 351, 358-359, 362, 370, 375, 385-386, 388, 400
人工智能 6, 35-36, 75, 101, 107, 121, 123, 125, 127-128, 132, 132-133, 146, 148-150, 155, 173, 181, 183, 196, 202, 214, 287-288, 300, 306-308, 311-314, 316-318, 335-337, 370, 375-376, 386, 388, 394-395

- 网络智慧化 313-315, 317-318, 321, 324, 330, 336-337
路由优化 313-314, 319-320, 333, 335
资源适配 313
服务质量 313, 319, 321, 328-329, 333-334, 347-349, 351, 355-358, 361
云端融合 347-350, 352-362
云计算 20, 35, 36, 70, 80, 98, 101, 129, 318, 320, 347-352, 354-360, 362, 367-368, 370, 372, 374, 386, 391-392, 394, 400
边缘计算 133, 347, 349-350, 354-356, 358-362, 367-368, 387
计算/数据迁移 347, 349
资源共享 347, 356, 391
服务协同 347, 356, 361
自主可控 33, 131, 369-370, 372, 374-375, 382, 386, 389-390, 393-396
恶劣环境 369-370, 372-374, 376, 378-380, 382, 386, 388, 390-396
体系结构 16, 114-116, 132, 354, 357, 360-361, 368-369, 372-374, 382, 390, 393-395
国产化 369, 374-376, 389-391, 395

作者索引

- 卜 磊 1, 28-29, 64
陈立前 1, 27, 29, 55, 64
陈 哲 1, 65
陈振邦 1, 28-29, 65
冯新宇 1, 65
冯 元 1, 22, 26, 65
贺 飞 1, 27-28, 65
李国强 1, 65
刘万伟 1, 26, 28, 48, 66
马菲菲 1, 40, 66
宋 富 1, 26, 28, 66
田 聪 1, 28, 48, 66
王淑灵 1, 66
薛 白 1, 67
杨鹏飞 1, 67
尹良泽 1, 67
詹博华 1, 67
张 民 1, 67
张立军 1, 23, 26, 30, 67
张兴元 1, 52, 68
赵永望 1, 68
袁 野 69, 98
王一舒 69, 99
王国仁 69, 99
陈海波 100, 145
刘 杰 100, 145
顾 荣 100, 145
张悠慧 100, 146
陈 恺 100, 125-126, 146
孟国柱 100, 126, 146
周 嵩 100, 146
李武军 100, 114, 146
李 睿 100, 146
陈华钧 147, 178, 181
王昊奋 147, 181
漆桂林 147, 181
王 鑫 147, 182
顾进广 147, 182
霍 静 183, 214
兰艳艳 183, 214
高 阳 183, 214
徐 岗 215, 230, 241-243, 245, 254, 256, 264-
266, 277, 285
李 新 215, 238, 240, 265, 285-286, 397
雷 娜 215, 249, 266, 269, 286
李 明 215, 261, 267, 283, 286, 398
黄章进 215, 282, 285-286
吴 飞 287, 311
韩亚洪 287, 312
廖彬兵 287, 312
于俊清 287, 312
邬江兴 313, 346
胡宇翔 313, 346
兰巨龙 313, 346
叶保留 347, 367
陈贵海 347, 368
陈道蓄 347, 368
廖小飞 347, 368
过敏意 347, 368
马 中 369, 401
陈敬东 369, 401
戴新发 369, 401
代 征 369, 401
夏 静 369, 401