

边缘计算技术研究报告

洪学海 汪洋 郭树盛

hxx@ict.ac.cn, wangyang@cnic.cn, guoshusheng@ict.ac.cn

中科院计算机网络信息中心信息化发展战略与评估中心

中科院计算技术研究所信息技术战略研究中心

2018 年 2 月

目 录

1 边缘计算的兴起	1
1.1 时代背景	1
1.2 信息技术发展规律	4
1.3 技术成熟度预测	5
1.4 产业发展背景	5
1.5 “多云时代”来临	6
2 边缘计算战略地位	7
3 各国战略计划和项目部署	9
3.1 美国	9
3.2 欧盟	10
3.3 英国	11
3.4 日本	11
3.5 德国	12
3.6 法国	13
3.7 中国	14
4 边缘计算的定义与内涵	14
4.1 基本内涵	14
4.2 计算模型	16
5 边缘计算问题描述	18
6 国内外研究现状	20
6.1 计算模型	20
6.1.1 雾计算	20
6.1.2 移动边缘计算	21
6.1.3 三元计算	22
6.1.4 海计算	23
6.1.5 海云计算	23
6.1.6 共享计算	23
6.1.7 智能边缘计算	23
6.2 体系结构	24
6.2.1 ETSI 参考架构	24
6.2.2 Intel MEC 架构	24
6.2.3 ECC 参考架构	25
6.2.4 雾计算参考架构	26
6.2.5 SWoT 架构	29
6.2.6 AI-EC 架构	29
7 应用领域和重点发展方向	30
7.1 云基础设施 2.0	30

7.2 第四次工业革命.....	30
7.3 5G 网络.....	31
7.4 内容网络 CDN/ICN	32
7.5 物联网.....	32
7.6 车联网.....	33
7.7 SDN/NFV	33
7.8 VR/AR 穿戴设备.....	34
7.9 智能家居.....	34
7.10 P2P	35
7.11 区块链.....	35
8 产业界与标准化动态.....	36
8.1 边缘计算产业联盟.....	36
8.2 工业互联网联盟.....	36
8.3 汽车边缘计算联盟.....	36
8.4 OpenFog 联盟.....	37
8.5 Linux 开源社区	37
8.6 标准化组织.....	37
8.7 电信运营商.....	37
8.8 微软.....	38
8.9 亚马逊.....	38
8.10 Zenlayer	38
8.11 网宿.....	39
8.12 中兴.....	39
8.13 其他.....	39
9 机遇与挑战.....	39
9.1 边缘计算面临的机遇.....	40
9.2 边缘计算面临的挑战.....	40
10 未来发展方向.....	42
10.1 对现有技术的影响.....	42
10.2 对信息化建设的推动.....	42
10.3 学术研究思路.....	44
11 结论.....	45
12 参考文献.....	46

边缘计算技术研究报告

1 边缘计算的兴起

1.1 时代背景

1) 基础设施云化速度放缓

随着云计算、大数据、移动互联网、物联网、人工智能等技术的蓬勃发展，计算在朝着两个方向不断的延伸和发展：一是资源的集中化、一是资源的边缘化，前者发展趋势有所下降，而后者的发展势头更加迅猛、方兴未艾。以云计算、超算为代表的集中式计算模式给产业界带来了深刻的变革，IT 基础设施云化减少了企业投资建设、运营维护的成本，但也出现了诸多问题，如：资源闲置、PUE 过高、安全隐私等。根据 IDC 统计的数据显示，全球数据中心数量在 2015 年达到了 855 万座，2016 年开始下降，预计 2017 年可能会下降到 840 万座；到 2021 年，这一数字可能会变为 720 万座，比 2015 年降低 15%。在经历了多年爆炸式增长后，全球范围内的数据中心在规模和数量上首次缩减。因此，诸如数据中心、云计算中心、超算中心等 IT 基础设施的过于集中，导致了若干问题，使得其建设规模和体量正在放缓，相对而言，上述问题可以在边缘计算模式下得到有效避免，这也是数据中心建设放缓的一大诱因。

2) 物联网技术的蓬勃兴起

物联网技术的发展催生了大量智能终端的涌现，物理位置上处于网络的边缘侧，而且种类多样。据 Gartner 预测，到 2020 年，智能终端设备规模将达到 250 亿台，思科估计是 750 亿台，IDC 预测是 500 亿台，并且有超过 50% 的数据需要在网络边缘侧分析、处理与储存。物联网的诞生产生了一种新型的网络模式，可以独立于互联网、蜂窝移动网、卫星通信网，达到人与物、物与物、物与网之间的更广泛连接。物联网进一步延伸了互联网的物理和逻辑边界，符合“人机物”三元计算模型^[1,2]。物联网设备的连接数量正在以指数级的规模增长，原因在于云计算模型不能完全满足所有应用场景，海量物联网终端设备趋于自治，若干处理任务可以就地解决，节省了大量的计算、传输、存储成本，使得计算更加高效。物联网发展的基石是处于网络边缘侧的海量终端设备，其本身往往具有计算、存储等能力，而且要求处理时延较低，就近、尽快是这一类应用的典型需求，例如：工业互联网、车联网等。因此，物联网的兴起，催生了边缘计算技术的发展，给

云计算模式带来了新的挑战。

3) 移动互联网的发展

蜂窝移动通信网络和互联网二者有机地结合起来构成了移动互联网，4G 技术的出现为其注入了巨大的能量。例如在国内，目前中国互联网用户基数已超过 7.3 亿，移动互联网用户规模达到 11.2 亿，手机用户 12.5 亿，智能手机用户 7 亿，排名世界第一。大量智能手持终端的联网，给骨干网络带来了前所未有的压力，特别是网络直播、网络游戏、短视频、语音交互、VR/AR 等应用会消耗大量的计算、网络、存储资源，由此产生了 CDN、直播云、游戏云等特有的内容分发、行业云来满足日益增加的载荷需求。然而，随着应用种类的日益广泛，用户群体访问服务过于集中，服务连接数异常庞大，只通过云计算模式提供的算力往往捉襟见肘，宕机、卡顿、死屏、延迟等问题日益凸显，服务质量（QoS）得不到保障，造成频发的系统故障，影响用户体验。海量用户过于集中、爆发式的应用服务，使得云计算模型资源过于集中的弊端日益加剧，虽然可通过扩容来增加资源，但终究不是一种高效的解决方案。因此，云计算模型有待于进一步优化和补充，各种资源可以协同并进，把盲目集中化的发展趋势向扁平化、边缘化方向发展，使得计算、处理、网络等资源更加全局化部署，打破资源集中化带来的弊端。

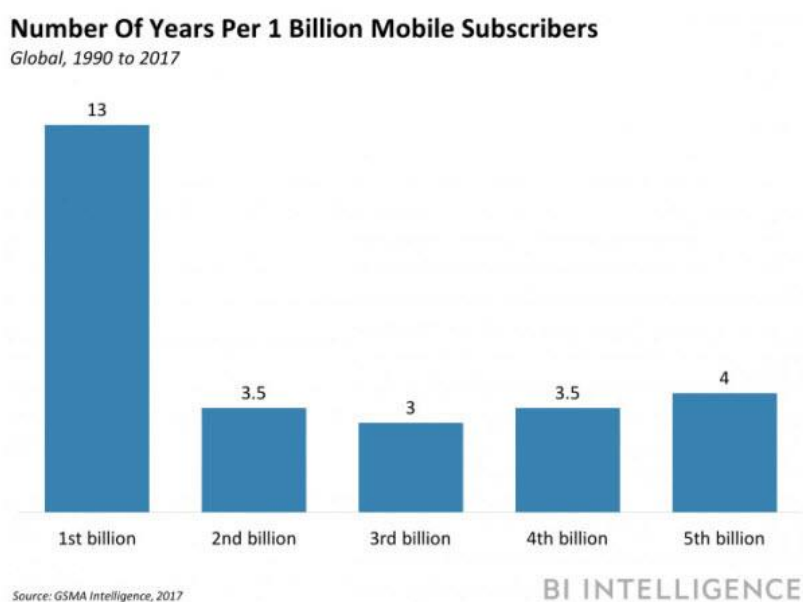


图 1 每增长 10 亿移动用户所需时间

2014 年，中国移动互联网接入流量同比增长了 71.3%，基于移动 APP 的数据流量首次超过了 PC 的数据流量。2015 年夏季，谷歌来自移动设备的搜索量已首次超过了 PC 搜索。根据 GSMA（全球移动通信系统联盟）的统计报告，目前全世界有三分之二的人通过移动设备上网。2017 年第二季度，全球移动用户数量达到了 50 亿，到 2020 年，预计全球将有 75% 的人口都会通过移动设备上网。如图 1 所示，从 2003 年起，全球移动用户数量增长迅猛，每增长 10 亿用户大约

需要 3-4 年左右时间。2016-2017 年，中国移动游戏在整体网游中的所占比重首次超过 PC 客户端游戏。根据电通安吉斯集团发布了《2017-2018 广告支出预测报告》，预计 2017 年全球广告支出总额达 5,634 亿美元，数字媒体持续发力，预计全球手机广告支出将超过电脑广告。根据艾瑞咨询数据，2015 年在网购总交易额中的占比首次超越 PC 端达到 55%，网购的移动渗透率将持续提升，到 2017 年超过七成网购将通过移动端完成。美国网络分析公司 StatCounter 报告显示，2016 年 10 月，全球网站来自移动端（包括手机和平板）的访问量首次超过了桌面端（包括台式机和笔记本），如图 2 所示。

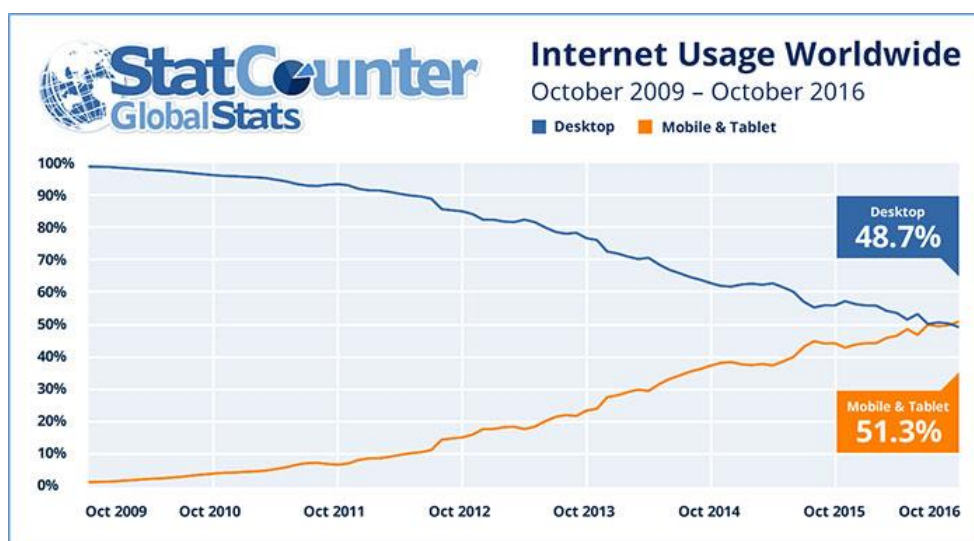


图 2 全球网站访问量移动端首超桌面端

从手游、移动广告、网购、设备数量、网络流量等各个角度，持续迅猛发展的移动端给互联网发展带来了新的变革和机遇，移动终端的角色越来越重要，承担着越来越多的任务，计算、存储、网络等资源需要向用户侧供给。因此，移动互联网的发展给边缘带来了机遇，很大程度上推动了边缘计算的发展。

4) 大数据时代

大数据已成为目前互联网行业发展的基础，单一、隔离、信息孤岛式的信息系统发展模式已不再适用当前的应用需求。IT 正在向 DT 方向发展，数据成为企业发展不可或缺的基础资源。数据的来源多种多样，比如：多源、异构、异地，而数据的集成、迁移、汇聚、融合、处理、分析等环节在不断地影响着云计算模型的发展方向。数据在趋于集中的过程中，产生了一系列问题，如：数据过分集中要求系统的可靠性、安全性、可访问性等指标日益苛刻。此外，大数据本身的意义在于挖掘价值，而不是盲目的数据集中和汇聚，杂乱无章的数据给数据处理带来了额外的处理负担。大数据的产生使得数据存储过于集中，而不是优化存储布局，忽视了分散数据的重要性和灵活性。数据完全可以在边缘侧的小型数据中心或者在前端缓存中进行预处理，随后把结论性的数据放到云端，供后续进一步使用。因此，大数据的发展不能完全依赖集中式的处理模式，还可以通过部署边

缘侧的数据中心或由边缘节点进行预处理，减少数据迁移、网络传输、数据备份等过多的带宽和资源消耗。

5) 人工智能技术的发展

人工智能技术经历了近 60 年的发展之路，在云计算、大数据、深度学习等技术的推动下，正迎来第三次浪潮。一般认为人工智能分为三个阶段：计算智能、感知智能和认知智能。计算智能与人类比拼的指标是计算、存储、记忆等能力，这一阶段机器显然远远超越了人类。感知智能涉及人脸识别、语音识别、图像识别等领域，也是当前学术和产业界研究的热点。认知智能就是让机器具有独立思考 and 决策的能力，目前还有待深入研究。边缘计算与感知智能息息相关，大量的感知特征需要通过海量终端来获取数据，并且需要前端进行预处理，进而再回传结论性的数据到后端。人工智能依赖这些具备存储能力、计算能力、分析能力的前端智能化设备来进行处理，例如：智能硬件、深度学习芯片、离线分析模型、离线语音识别库等，以减少数据的传输延迟、缩短处理时间、增强用户体验等。因此，边缘计算作为人工智能的一种计算模式，将伴随着海量前端智能设备的涌现而不断发展。

1.2 信息技术发展规律

信息技术发展符合“天下大势，分久必合，合久必分”的“三国定律”。1946 年世界第一台通用电子计算机“ENIAC”诞生，主要应用于军事领域，用来执行庞大的计算任务。在经历了第二代、第三代、第四代计算机的发展，计算模型已经发生了若干改变，从原来的集中式大型计算机到 C/S 结构的网络计算、个人 PC 计算，从 C/S、PC 计算到资源集中的云计算、再到目前更加分散的智能、边缘终端计算，如图 3 所示。

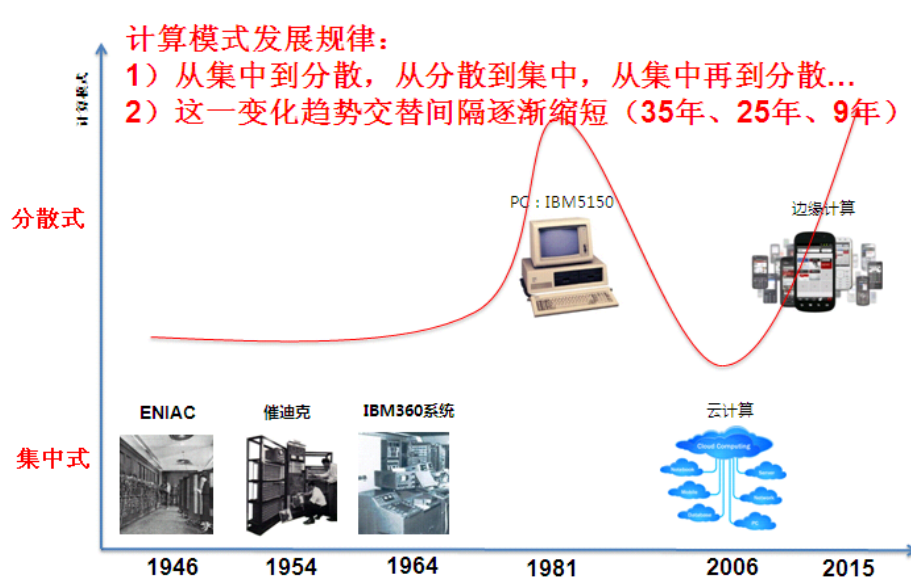


图 3 计算技术发展规律

从信息技术发展规律来看，体现了两条基本规律。其一，计算能力经历了从集中到分散、从分散到集中、又从集中到分散的变化规律和趋势，而且循环交替；其二，这一变化趋势的时间间隔再逐步缩短，由原来的 30、20 年左右缩短到 10 年左右。因此，从计算技术发展的历史规律来看，边缘计算正处于算力趋于分散的阶段，将引领若干技术发展趋势，影响目前基础设施建设的投资方向。

1.3 技术成熟度预测

根据 Gartner 发布 2017 年度新兴技术成熟度曲线，如图 4 所示，边缘计算从“触发器”进入“期望膨胀期”，公众对该技术的产生寄予了很高的期望，是未来技术发展趋势，如下图所示。因此，边缘计算正迎合当下需求，以无处不在的人工智能、透明化身临其境的体验、数字平台三大发展趋势为契机，作为其中必要的技术影响着未来技术的走向和发展。

边缘计算目前是当前学术和产业界的研究热点，各大厂商、科研机构正在制定标准和规范，还没有达成统一的共识，国内外形成了多个产业联盟，力争推动边缘计算的标准、技术的进步。因此，边缘计算正处于技术的研究热点期，拥有很大的技术爆发潜力，是未来的发展和不可错失的发展趋势。

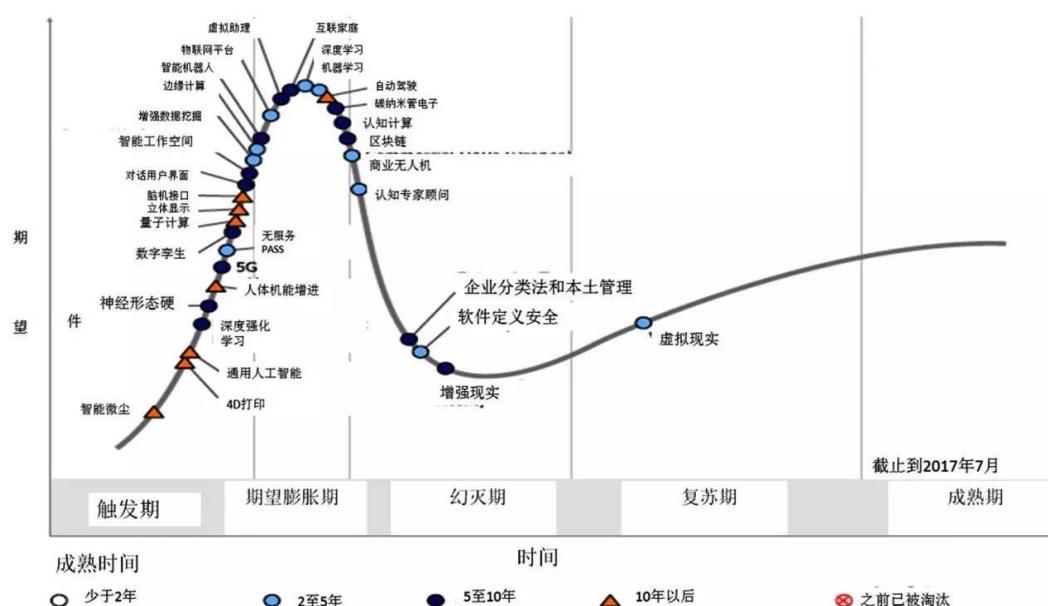


图 4 技术成熟度曲线

1.4 产业发展背景

根据 Gartner 发布的 2017 年十大战略技术趋势，指出了在未来 5 年拥有显著颠覆潜力的技术，本质上以智能为中心，通过数字化实现万物互联，如图 5 所示，包括：AI 和高级机器学习(AI and Advanced Machine Learning)、智能应用

(Intelligent Apps)、智能对象(Intelligent Things)、虚拟现实和增强现实(Virtual and Augmented Reality)、数字孪生(Digital Twin)、区块链和分布式分类账(Blockchain and Distributed Ledgers)、对话系统(Conversational Systems)、网格应用和服务体系架构(Mesh App and Service Architecture)、数字技术平台(Digital Technology Platforms)、自适应安全架构(Adaptive Security Architecture)。



图 5 2017 年十大战略技术趋势

特别是在 AI 和高级机器学习智能应用、智能对象、虚拟现实、增强现实和数字孪生技术趋势体现了智能化、快速化、数字化。这些技术的应用领域很大程度上依赖服务的可靠性、高效性，具有较低的网络延迟、较快的反应速度，比如，聊天机器人、VR/AR 头盔、工业互联网。边缘计算可以为这些应用提供高质量的服务，是这些技术趋势的重要基础。

1.5 “多云时代”来临

公有云市场领头羊 Amazon、Alphabet、Microsoft 公司近些年来纷纷加快了对共有云基础设施建设的投入，根据华尔街时报报道，2016 年第四财年，这三家公司分别追加了\$40 亿、\$29 亿、\$20 亿的投资，如图 6 所示。在这场投资浪潮和价格战中，没有赢家，各自都在寻找出路，从 Microsoft 投资开始下降可以看出，该公司的云战略正在做出重大战略转变，并在 2017 年开发者大会上宣布推出 Azure IoT Edge，聚焦智能边缘计算。并在 2017 年 7 月，正式发布混合云应用服务 Azure Stack。



图 6 公有云资本投入

2017 年 6 月，谷歌与 Nutanix 建立合作伙伴关系，将谷歌云平台与 Nutanix 环境结合在一起，并为对方客户提供统一的公有云服务，此举意味着双方就混合云部署的达成战略联盟。于此同时，亚马逊推出 AWS Greengrass，将 AWS 无缝扩展至设备端，以便于用户更加轻量的在本地操作其产生的数据，制造商仍然可以使用云端进行管理、分析以及展开其他应用服务，涵盖公有云、边缘云、IOT 设备。并在 VMworld2017 年大会上，亚马逊与 VMware 宣布 VMware Cloud on AWS 初步可用，全面部署混合云环境。今年 8 月，阿里云与 Zstack 达成混合云战略合作，无缝连接混合云服务。

因此，公有云、私有云、混合云、边缘云形成共存的局面，单一架构模式很难满足市场的多样化的需求，相互融合、互为补充将是云部署的未来趋势，而且边缘云越来越重要，也是云计算服务商竞争的出路和新的主战场，是云计算模式发展的重要趋势，云服务进入“多云时代”。

2 边缘计算战略地位

根据市场研究公司 Research and Markets 近日发布的报告，边缘计算的市场规模复合年均增长率高达 35.2%。边缘计算是将计算、网络、存储、带宽等能力从云延伸到网络边缘侧的新型架构模式，万物互联的智能社会脚步临近，OT 与 ICT 深度融合的趋势不断加强，以物联网、人工智能、VR/AR、区块链、SDN、5G 等为代表的先进 ICT 技术发展正在推动着产业的变革。边缘计算以其所具备的实时、敏捷、智能、安全等特性，正在创造新的价值与生态体系。在边缘计算产业联盟暨 2016 首届边缘计算产业峰会上，国内专家探讨了边缘计算技术深层次的战略意义，具体如下^[27]：

（1）网络边缘智能化是未来产业发展方向

对于如何理解边缘计算，中国工程院院士邬贺铨表示，边缘计算实际上是在最靠近物理实体数据端的地方，就网络边缘处进行网络数据的处理、分析、存储、计算。其目的是在最靠近实际的工作物体的网络边缘侧来实现信息技术和产业技术的融合，使得处理数据更实时、更安全、更快捷，从而满足新兴技术和工业技术的深度融合，更好地为实体产业提供更加深度的智能化服务和实时性处理。边缘计算将是今后产业发展的一个方向。

（2）边缘计算将重新定义“云网端”关系

沈阳自动化研究所所长于海斌指出，中国在“十三五”规划中提出的两化融合、《中国制造 2025》等国家战略，对 ICT 与 OT 的融合提出了迫切的需求。边缘计算是 ICT 与 OT 融合的支撑与使能技术，产业发展将进入重要机遇期。工业自动化技术体系将从分层架构、信息孤岛向物联网、云计算、大数据分析架构演进，而边缘计算将是实现分布式自治控制工业自动化架构的重要支撑。

（3）边缘计算将推动物联网实现

中国通信标准化协会秘书长杨泽民指出，如果说物联网的核心是让每个物体智能连接、运行，那么边缘计算就是通过数据分析处理，实现物与物之间传感、交互和控制。它是物联网从概念到应用的一把钥匙，更是制造业从“笨拙”变得“智慧”的重要途径。此次边缘计算产业联盟的成立，意义非常重大。首先，它将使得物联网、云计算这些宏大的概念和梦想，落实到一个实实在在的行业上来实现。

（4）边缘计算产业联盟成立正当其时

中国工程院院士王天然表示，信息技术的涌现和高速发展正在推动全球产业格局的碰撞、变革、调整。继美国提出“制造业回归”和德国提出“工业 4.0”后，中国也提出了《中国制造 2025》。这一轮信息技术推动的产业革命，依靠的是制造技术、自动化技术与计算技术、通信技术的深度融合。技术产业革命是我国制造业由大变强的一个重要机遇，我国的信息制造技术、自动化技术，与国际强国相比还存在差距。引领我国制造业变革的基础还比较落后，需要我们从各个方面去努力。

（5）边缘计算将重新定义“云网端”关系

数字化革命正在引起大量行业数字化转型，其中，OT 与 ICT 技术是提升行

业自动化水平的关键，从而满足用户个性化产品与服务需求，推动从产品向服务运营全生命周期转型，触发产品服务及商业模式创新，并对价值链、供应链及生态系统带来影响。对此，中国信息通信研究院技术标准研究所教授级高级工程师续合元表示，在“万物互联”的新时代，ICT 产业发展将开辟新的空间，对高效低成本数据的处理、工业互联网的需求也将使得边缘计算越来越重要。

3 各国战略计划和项目部署

第四次工业革命，是以互联网产业化，工业智能化，工业一体化为代表，以人工智能，清洁能源，无人控制技术，量子信息技术，虚拟现实以及生物技术为主的全新技术革命^[31]。全球各国都在为这一次机遇而加紧布局，而边缘计算虽没有单独列在各国计划当中，但其计算模型在各领域无不发挥着重要的作用。边缘计算可以加快“工业 4.0”落地，为其助力，是智能制造的新机遇。“工业 4.0”本质上是以智能制造为主导的“第四次工业革命”，其核心是信息物理系统（CPS,Cyber-Physical Systems）。而融合了网络、计算、存储、带宽、应用等核心能力的边缘计算，显然又是 CPS 的核心。因此，边缘计算在“工业 4.0”进程中，意义重大。

3.1 美国

“工业互联网”的概念最早是由美国通用电气公司（GE）于 2012 年提出的，随后联合另外四家 IT 巨头组建了工业互联网联盟(IIC)，将这一概念大力推广开来。“工业互联网”主要含义是，在现实世界中，机器、设备和网络能在更深层次与信息世界的大数据和分析连接在一起，带动工业革命和网络革命两大革命性转变。工业互联网基于互联网技术，使制造业的数据流、硬件、软件实现智能交互。未来的制造业中，由智能设备采集大数据之后，利用智能系统的大数据分析工具进行数据挖掘和可视化展现，形成“智能决策”，为生产管理提供实时判断参考，反过来指导生产，优化制造工艺。当工业互联网的三大要素——智能设备、智能系统、智能决策与机器、设施、组织和网络融合到一起的时候，工业互联网的全部潜能就会体现出来。生产率提高、成本降低和节能减排所带来的效益将带动整个制造业的转型升级。^[33]

此外，施巍松教授，（美国韦恩州立大学 Charles H. Gershenson 杰出教授，移动与互联网系统结构实验室主任，Intel Internet of Things 创新实验室主任）是边缘计算这一研究领域的主要倡导者，并长期致力于边缘计算在工业界的推广。他联合主持了美国 NSF Workshop on Grand Challenges in Edge Computing，同时也是 ACM/IEEE 国际边缘计算研讨会（SEC）的创始人。在美国国家科学基金会(NSF)的资助下，在 2016 年 10 月 26 日举办边缘计算重大挑战研讨，旨在携

手学术界、政府、产业界专家明确边缘计算的发展愿景、最新趋势、最先进的研究成果、未来挑战、政产学合作机制,促进边缘计算技术的发展。2017 年 2 月,美国计算机社区联盟(CCC)发布《边缘计算重大挑战研讨会报告》,阐述了边缘计算在应用、架构、能力与服务方面的主要挑战。据估算,美国 2017 年至 2026 年间边缘计算方面的支出将达到 870 亿美元,欧洲则为 1850 亿美元^[27]。

3.2 欧盟

随着全球开始对工业 4.0、先进制造以及工业互联网等代表第四次工业革命的概念投以关注,欧盟也开始系统的梳理其成员国的新工业计划,包括德国的工业 4.0 (Industrie 4.0)、法国的新工业法国 (Nouvelle France Industrielle) 以及斯洛伐克的智能工业 (Smart Industry) 等,期望通过一个概念来把欧盟成员国的努力统一起来,这个概念就是“数字化欧洲工业”(Digitalising European Industry, DEI), 如下图所示。^[29]

欧盟各国都在根据本国的情况进行发展,由于技术路径等范式认识的差异,差异比较大,其计划的先进性、前瞻性甚至不如一些成员国的发展计划(如德国的工业 4.0),它们之间缺乏协同,这导致了整个欧洲的竞争力受到了影响。但是,这一趋势不可逆转地向前发展,“数字化欧洲工业”主要强化了三种技术对欧洲工业的影响,即:物联网、大数据和人工智能。而边缘计算是打开物联网应用的钥匙,是解决海量数据处理的又一新型计算模型,是人工智能的神经末梢,因此边缘计算在具体实现“数字化欧洲工业”进程中,将发挥其重要的作用。

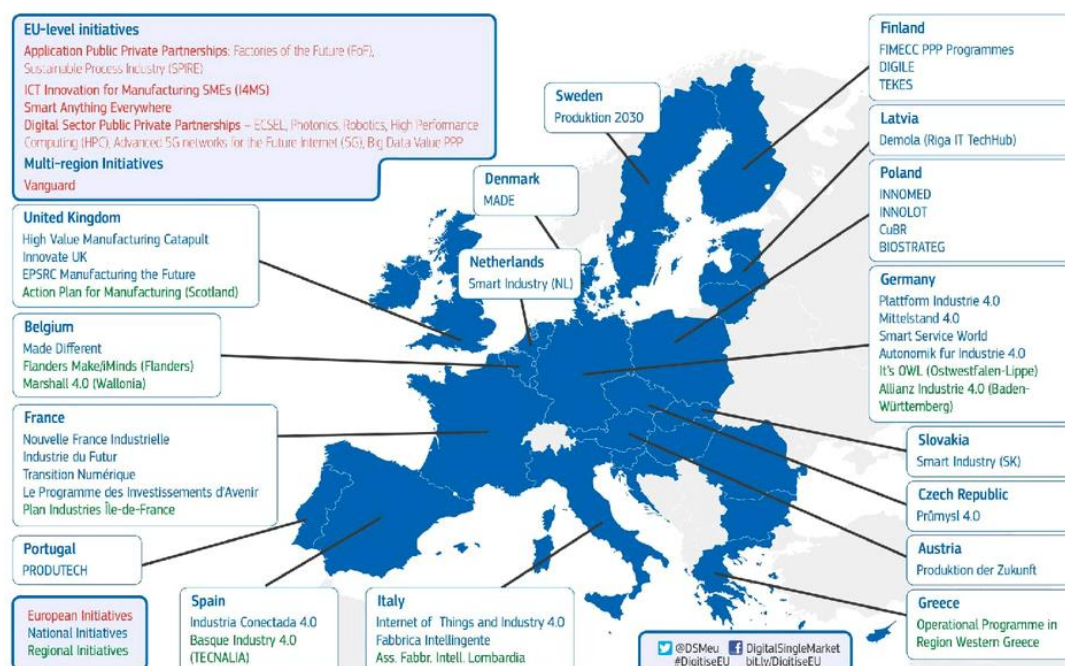


图 X 欧盟各国发起的数字化工业化全景图^[29]

3.3 英国

“英国工业 2050 战略”研究于 2012 年 1 月启动，2013 年 10 月形成最终报告《The future of manufacturing: a new era of opportunity and challenge for the UK》（制造业的未来：英国面临的机遇与挑战）。报告认为制造业并不是传统意义上“制造之后进行销售”，而是“服务加再制造（以生产为中心的价值链）”。^[34] 报告的主要观点是科技改变生产，信息通讯技术、新材料等科技将在未来与产品和生产网络的融合，极大改变产品的设计、制造、提供甚至使用方式。报告认为，未来制造业的主要趋势是个性化的低成本产品需求增大、生产重新分配和制造价值链的数字化。这将对制造业的生产过程和技术、制造地点、供应链、人才甚至文化产生重大影响。^[35]

3.4 日本

日本政府在 2015 年 1 月 23 日公布了该国“机器人新战略”，提出了 3 大核心目标，即：“世界机器人创新基地”、“世界第一的机器人应用国家”、“迈向世界领先的机器人新时代”。为了实现以上 3 大核心目标，该战略为此制定了 5 年规划，旨在确保日本机器人在该领域的世界领先地位。《机器人新战略》与中国的“中国制造 2025 规划”、“美国工业互联网”、“德国的工业 4.0”等计划有很多共同性，有异曲同工之妙。

此外，2015 年 7 月 1 日，日经新闻报道，紧跟德国率先推进的“工业 4.0”计划，日本三菱电机等约 30 家日企组建“科技工业联盟”机制，共同探讨工厂互联的技术标准化，并争取使其成为国际标准。该联盟的名称为“产业价值链主导权（Industrial Value Chain Initiative，简称：IVI），成员包括三菱电机、富士通、日产汽车和松下等日本电子、信息、机械和汽车行业的主要企业。联盟的发起者是研究将 IT 技术应用于制造业的日本法政大学教授西冈靖之。联盟的主要议题为工厂与工厂、设备与设备互联的通信技术和安全技术标准化。西冈靖之表示，虽然日本企业此前一直在推进自身和业界内企业相连接的网络化，但此次将“跨越业界，构筑包括中小企业在内的工厂互联机制”。^[36]

通过不断调整和聚焦，日本政府应对工业 4.0 的战略方向趋于明晰，提出今后要更加突出未来制造系统的协调性，强调以机器人等智能硬件为基础，以物联网、云计算等为手段，对制造业的生产服务系统和运营模式进行改造，日本应对工业 4.0 的重点领域，如表 1 所示^[37]。

表 1 日本应对工业 4.0 的重点领域及其主要内容

重点领域	主要内容
机器人革命	以机器人技术创新带动制造业、医疗、护理、农业、交

	通等领域的结构变革，继续保持日本机器人大国的领先地位；机器人与信息技术、大数据、互联网深度融合，建立世界机器人技术创新基地
物联网在制造业的运用	开发适应“日本制造”的软件工具；建立通信和安全技术的标准化；构建跨行业的互联机制
大数据发现创造新附加值	开发开放性软件平台，提高数据收集的全面性和分析的准确性
构建新的产品制造系统	构建运用物联网和大数据、人工智能、机器人等多样化需求的新型制造系统，2020 年实现产业化

2016 年 1 月，日本公布《第五期科学技术基本计划（2016-2020 年）》（简称：计划），随后，内阁会议于 2016 年 5 月通过《综合战略 2016》，并于 2017 年 6 月通过了《综合战略 2017》，该计划最为重要的战略目标是实现“超级智能社会”（Society 5.0）。《综合战略 2017》推出三项创新政策举措，旨在密切产学研之间的创新合作，通过“推进费”来优先保证实施对象，2018 年主要针对（1）人工智能、物联网、大数据等网络空间基础技术；（2）机器人、探测等物理空间基础技术；（3）创新防灾、减灾技术及建设、基础设施维护管理技术三大目标领域进行重点培育。

《第 5 期科学技术基本计划（2016-2020 年）》提出了“超智能社会 5.0”战略，该战略是继德国工业 4.0、美国工业互联网、韩国制造业创新 3.0 战略、英国高科技创新战略、新工业法国之后又一重大战略。在同年 5 月底颁布的《科学技术创新战略 2016》中对其做了进一步的阐释，该计划认为，超智能社会是继狩猎社会、农耕社会、工业社会、信息社会之后，又一新的社会形态，也是虚拟空间与现实空间高度融合的社会形态。^[38]

所谓超级智能社会 5.0，是指继狩猎社会、农耕社会、工业社会、信息社会之后的一种新型经济社会形态，即“通过最大限度活用信息通讯技术、融合网络世界和现实世界，把给每个人带来富足生活的“超级智能社会”作为未来社会的形态，并使之成为共同目标，通过深入实施一系列举措，强力推进超级智能社会 5.0，把日本建成世界领先的“超级智能社会”。^[39]

不管是“机器人新战略”、“科技工业联盟”，还是“超智能社会 5.0”战略都是日本政府为了迎接“工业 4.0”带来的机遇与挑战的努力和尝试。其本质上依然希望在其主导领域继续保持领先的国际地位，占据科技的最前沿，对传统的优势技术进一步提升。

3.5 德国

2010 年 7 月，德国政府正式通过了《德国 2020 高技术战略》，这是德国对未来发展新探索。工业 4.0(Industrie 4.0)是德国政府在该战略中确定下来的十大未来项目之一，并已上升为国家战略，旨在支持工业领域新一代革命性技术的

研发与创新。德国学术界和产业界认为，“工业 4.0”概念即是以智能制造为主导的第四次工业革命，或革命性的生产方法。该战略旨在通过充分利用信息通讯技术和网络空间虚拟系统—信息物理系统（CPS，Cyber-Physical System)相结合的手段，将制造业向智能化转型。^[32]“工业 4.0”在德国被认为是第四次工业革命，其实质是德国凭借制造业根基，借助互联网升级制造业，如下图所示。^[33]“工业 4.0”本质上是物联网、云计算、边缘计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术与制造业的深度融合和产业落地。边缘计算作为 CPS 的核心，同时也作为新型计算模型，将对“工业 4.0”产生深刻的影响和变革。



图 X 工业 4.0=第四次工业革命^[33]

3.6 法国

法国在 2013 年 9 月推出了“新工业法国”战略，旨在通过创新重塑工业实力，使法国重回全球工业第一梯队。并在 2015 年 5 月 18 日，法国政府对“新工业法国”计划进行了大幅调整，形成“新工业法国 II”，这标志着法国“再工业化”开始全面学习“德国工业 4.0”战略。“再工业化”总体布局为“一个核心，九大支点”，其中，一个核心，即“未来工业”，主要内容是实现工业生产向数字制造、智能制造转型，以生产工具的转型升级带动商业模式变革；九大支点，包括大数据经济、环保汽车、新资源开发、现代化物流、新型医药、可持续发展城市、物联网、宽带网络与信息安全、智能电网等，一方面旨在为“未来工业”提供支撑，另一方面同时提升人们日常生活的新质量。^[30]边缘计算与“一个核心，九大支点”布局关系密切，是实现其落地的重要动力和技术支撑。

3.7 中国

2014 年 12 月，“中国制造 2025”这一概念被首次提出。2015 年 3 月 5 日李克强总理在全国两会上作《政府工作报告》时首次提出“中国制造 2025”的宏大计划。2015 年 5 月 8 日，国务院正式印发《中国制造 2025》，提出，坚持“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针，坚持“市场主导、政府引导，立足当前、着眼长远，整体推进、重点突破，自主发展、开放合作”的基本原则，通过“三步走”实现制造强国的战略目标：第一步，到 2025 年迈入制造强国行列；第二步，到 2035 年中国制造业整体达到世界制造强国阵营中等水平；第三步，到新中国成立一百年时，综合实力进入世界制造强国前列。工信部与国家发改委也先后在“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项及“互联网+、人工智能创新发展和数字经济试点重大工程”中设立了边缘计算相关的技术研发、试验验证与示范工程建设等重点项目，用于支持边缘计算产业的发展。

边缘计算横跨 CT、OT、IT 多个领域，涉及网络联接、数据聚合、芯片、传感、行业应用等多个产业链。边缘计算产业联盟理事长、中国科学院沈阳自动化研究所所长于海斌指出：“中国在‘十三五’规划中提出的两化融合、中国制造 2025 等国家战略，对 ICT 与 OT 的融合提出了迫切的需求，而边缘计算是 ICT 与 OT 融合的支撑与使能技术，产业发展将进入重要机遇期。工业自动化技术体系将从分层架构、信息孤岛向物联网、云计算、大数据分析架构演进。而边缘计算将是实现分布式自治控制工业自动化架构的重要支撑。边缘计算产业联盟将重点关注体系架构的制定与技术路线的选择，并通过推动标准化来带动产业化发展。同时，将充分关注生态系统的构建。”^[29]

4 边缘计算的定义与内涵

4.1 基本内涵

目前对边缘计算的认识存在差异，针对的往往是特定应用领域，如：雾计算、移动边缘计算、边缘计算，本质上描述的是同一个计算模型。对于边缘计算的定义，不同组织给出了不同的定义。根据边缘计算产业联盟 ECC 的定义，边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的开放平台，就近提供边缘智能服务，满足行业数字在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求。根据 OpenFog 联盟的定义^[24]，边缘计算、雾计算、云计算具有差异性，如图 5 所示，雾计算将云计算无缝扩展到边缘，实现安全控制和管理域内特定硬件、软件、标准计算、存储

和网络功能，并确保安全、丰富的跨域数据处理应用能力。文献[施巍松]认为，1) 边缘计算是指在网络边缘执行计算的一种新型计算模型，其边缘是指从数据源到云计算中心路径之间的任意资源和网络资源，即边缘计算是一个连续统（continuum），除“云”之外皆是“边缘”；2) 边缘计算更多地聚集在边缘设备本身，而雾计算则更多关注基础设施，从作用范围角度讲，边缘计算包含雾计算，即雾计算是边缘计算的一部分；3) 边缘计算的基本原理是将计算任务迁移到产生源数据的边缘设备上。

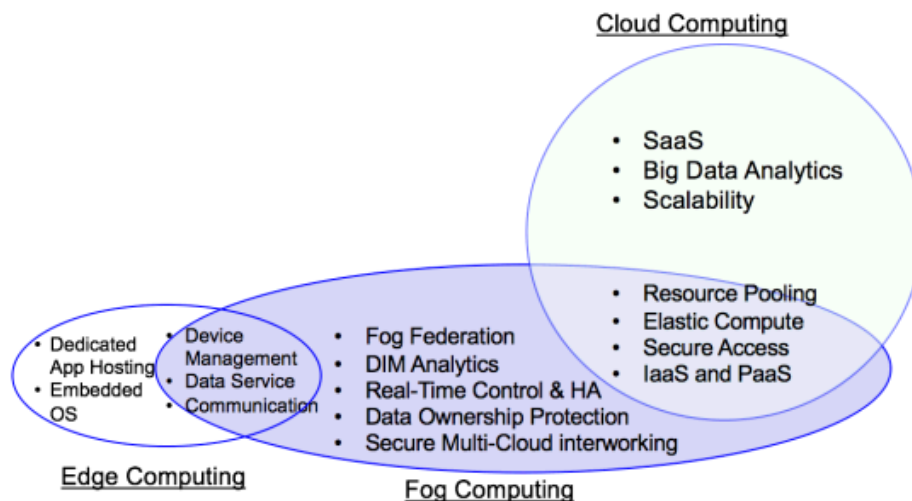


图 5 边缘计算、雾计算、云计算的区别

边缘计算是继分布式计算、网格计算、云计算之后的又一新型计算模型。我们认为边缘计算是以云计算为核心，以现代通信网络为途径，以海量智能终端为前沿，通过优化资源配置，使得计算、存储、传输、应用等服务更具智能，具备优势互补、深度协同的资源调度能力，是集云、网、端、智四位一体的新型计算模型，其概念蕴含丰富，以下从多个方面解析内涵。

(1) 边缘计算是一种全局性的计算模型，涵盖中心和边缘。

边缘计算的构成包括两大部分：一是资源的边缘化，具体包括计算、存储、缓存、带宽、服务等资源的边缘化分布，把原本集中式的资源纵深延展，靠近需求侧，提供高可靠、高效率、低时延的用户体验；二是资源的全局化，即边缘作为一个资源池，而不是中心提供所有的资源，边缘计算融合集中式的计算模型（例如：云计算、超算），通过中心和边缘之间的协同，达到优势互补、协调统一的目的。

(2) 边缘计算需要全局协同，以便得到高效的计算性能。

边缘计算应从全局考虑问题，不仅仅局限于网络的边缘侧，而是与处于中心位置的云计算中心、数据中心、超算中心等一道进行协同计算的模型，它们之间的协同计算、并行处理、网络传输优化等都需要全局考虑，以便获得最优的处

理效率。

(3) 边缘计算是一种智能化的计算模型，会动态根据需求提供动态服务。

边缘计算是对云、网、端三级结构的一种升级，是迈向智能化的重要一步。边缘计算通常会具有情景感知能力，通过上下文感知业务场景、用户需求、计算规模、存储大小等，这样才能有的放矢，根据用户需求动态配置资源，使得该计算模型更具智能化。

(4) 边缘计算具有物理边界、逻辑边界、网关节点、边缘节点、边缘侧、云侧等概念。

边缘计算的物理边界是指处于边缘设备的一端，在网关的边缘侧，靠近用户。逻辑边界是指在功能上处于边缘，相对于集中式的云计算功能。网关节点是指承担边缘设备级联、应用服务、任务分发等功能的服务端，权责上属于服务的提供方，而不是最终功能的使用者。边缘节点是指海量的智能终端设备，是真正靠近用户的边缘侧设备，为用户提供直接的计算、存储、带宽等服务。边缘侧是指海量终端侧，靠近用户，并且处于网关节点的外侧。云侧是指靠近云计算、高性能计算、大数据中心的一侧，是处于功能核心位置的基础设施。

(5) 边缘计算使得中心智能向前端智能扩展，智能协同将是未来发展趋势。

边缘计算一定程度上是把智能移动到边缘，很多前端智能终端已经可以单独处理复杂的处理任务，并可实时处理设备收集的、有价值的原始数据。边缘网络智能化的实现，是通过智能的管控手段对业务、性能、安全等指标进行统一的优化、协同、配置和管理。此外，前端智能是边缘计算的一种表现形式，使得人工智能的感知距离、感知种类、处理速度、传输时延等关键参数得到极大优化和提升。

4.2 计算模型

边缘计算模型区别于传统的云计算模型、网格计算模型、分布式计算等模型，是一种新型的计算模型。

(1) 从资源配置看

边缘计算是调动全局的资源为其所用，是集中心侧、边缘侧资源整体优势进行相应的处理，完成全局的最优。也就是说，边缘计算并不是孤立的计算模型，需要整体考虑资源的配置和调度。

（2）从协同模式看

边缘计算具备中心侧和边缘侧两方的资源，因此需要进行协同，本地能处理好的事情，就近处理，解决不了的事情交予中心侧或其他协同方的资源进行处理。因此，边缘计算模型是一种协同计算模型，与各个边缘侧、中心侧都有关联，需要统一的协调和资源调配，达到资源利用的最大化。

（3）从智能程度看

边缘计算需要优势互补，需要协同并进、需要感知用户场景、需要优化配置资源，而这些势必需要机器智能，因此边缘计算涵盖一种智能化的、自动化的资源配置方式。事前简单的用户配置、参数定义，不能有效满足用户侧的效用需求。用户侧需要实时得感知配置资源，以便就近提供高带宽、高可靠、高性能的服务。

（4）从体系结构看

边缘计算是在靠近网络边缘侧大规模部署智能终端设备，和传统的云、网、端三层模型具有一致性，但是亦有区别。原因在于，云、网、端只是基础设施的布局，是静态的一种结构，而边缘计算本质是一种动态的、自动化的资源配置方式，从而区别于以上静态结构。更确切的讲，边缘计算是云、网、端、智四位一体的模型，智能纵向涵盖云、网、端，从上到下均涵盖。因此边缘计算是一种具备智能的云、网、端结构，智能化是其重要的特征之一。

（5）从异构处理看

参与边缘计算的设备众多，设备的异构是边缘计算的一大特征。传统的云计算往往通过设备的虚拟化、形成众多的虚拟机来进行统一管理。而边缘计算的设备异构型不能简单的虚拟化来解决，其复杂程度要远远高于云计算。例如：不同类型、不同指标、不同参数、不同用途、不同厂商、不同功能的设备需要互联，需要统一处理相应的问题。设备间的互联互通将是边缘计算模型中不可或缺的部分，是目前该技术面临的一大挑战。

（6）从服务模式看

云计算具有三层服务模式，即：IaaS、PaaS、SaaS，而边缘计算将对此模式进行改变或补充。边缘计算不具有典型的三层模式，边缘计算无需统一屏蔽底层的差异，而是根据应用需求进行把控。边缘计算模型不具备云计算典型的三层服务模式。边缘计算模型需要考虑问题是如何和云计算三层模型进行有效的对接

和协同，而不是进行统一。因此，边缘计算具有其差异性和特殊性，不是典型的三层服务模型。

5 边缘计算问题描述

本章节将介绍边缘计算需要处理的问题，划定边缘计算重点需要研究的内容，以便清楚地认识为什么需要边缘计算，并定义了边缘计算的物理边界，以明确问题的本质，如图 4 所示。

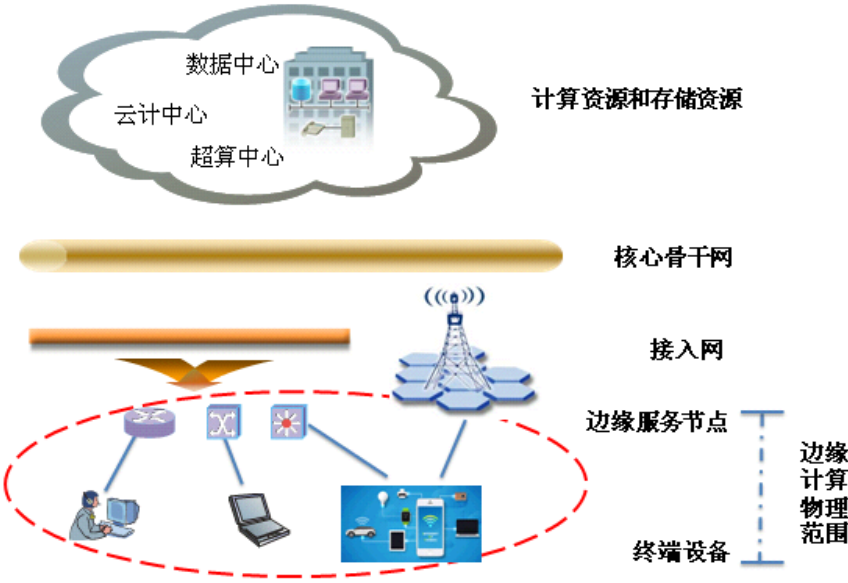


图 4 边缘计算物理边界

(1) 高可靠、低延迟计算能力的需求

大数据的传输、分析、处理与存储对网络带宽提出了巨大的挑战，而边缘计算的诞生，为解决这一问题提供了必要的技术手段。大量的海量终端设备是数据收集的第一站，而把大量的数据传输到云计算中心去处理，将导致数据处理的不及时，甚至造成系统事故，尤其在工业互联网、VR/AR 等要求可靠性、实时性比较高的应用场景下。

(2) 数据中心能耗过大问题

云计算、超算需要依托计算中心、数据中心为其提供支撑，而过于集中的资源消耗了大量的电力，由于资源利用率不高，造成了大量的资源闲置。PUE 数值往往过高，国外数据中心一般小于 2，而国内大多数数据中心介于 2 和 3 之间。为此，集中式的计算模型将导致资源的极大浪费，同时也带来了过大的电力消耗。边缘计算可通过分担数据中心的存储和计算任务，无需建立大规模数据中

心，一定程度上可以减少能耗。

（3）大数据处理的压力

根据 IDC 报告，80%的数据是非结构化数据，预计到 2020 年全球数据总量将达到 35ZB。而物联网的蓬勃发展使得终端设备呈现指数级增长，无疑又进一步加剧了这一趋势。如果大数据处理方法还是依赖云计算、超算计算模型，无疑不切实际。过于集中的处理方式消耗了大量收集、汇聚、处理的成本，而且效率得不到保证。同时，很多处理任务没必要进行集中处理，可以分担在前端进行预处理，减少不必要的传输、存储资源消耗。因此，边缘计算将会减轻云计算模型的处理压力，分担大量的前端数据处理任务。

（4）云计算资源利用率不高

企业对 IT 基础设施的需求受多种因素制约，比如：时间段、应用类型、地理区域等，特别是在私有云环境下，在很多时间段、应用场景下资源是浪费的。为此，需要发挥边缘云、边缘计算的优势，避免大量资源的过于集中，减少数据中心的资金投入，而应把处理设备部署到网络的边缘，发挥集中式和分散式计算的双重优势。

（5）智能前端

随着人工智能技术的发展，众多智能终端设备自身可以完成部分、甚至全部处理任务，无需立刻回传到云端进行处理，而是有进一步处理需求后，才进行数据的回传。因此，边缘设备可以分担云计算部分处理任务，开启“云网端智”四位一体的处理模式。

（6）安全隐私问题

数据安全和个人隐私问题是目前数据中心面临的一大挑战，目前数据泄露事故、黑客攻击事件频发，给企业、个人的信息安全带来了严峻的考验。因此，把一些隐私的数据上传到数据中心，将大大增加了信息泄露的风险。在边缘设备上存储相关的数据，相对而言，将有利于数据隐私的保护。

因此，基于以上六个方面，云计算存在着亟待解决的问题，边缘计算的某些特质可以对云计算相应功能进行有效的补充和完善，这也是边缘计算需要解决的若干问题和技术挑战。

6 国内外研究现状

目前国内外关于边缘计算的研究领域主要集中在计算模型，体系结构、信息安全等，文献[3]从融合计算、缓存、通信角度对移动边缘网络做了介绍，文献[4]介绍了从云计算向用户侧推进的小云计算模型。从雾计算概念角度研究较多，文献[5]主要讨论了雾计算在物联网中所扮演的重要角色，文献[6]介绍了如何通过雾计算来降低云计算的能耗，文献[7]主要探讨了雾计算是否是云计算发展的未来，文献[8]主要介绍了雾计算的概念、应用及面临的问题，文献[9,10]主要讨论雾计算的安全、隐私和管控方法，文献[11]介绍了雾计算平台及其上层应用，文献[12]介绍了边缘计算的原理、体系结构及其上层应用。文献[13]介绍了边缘计算在扩展企业应用到网络边缘发挥的作用，其延迟、效能分析在文献[14]中做了介绍。文献[15]介绍了边缘计算的兴起、定义、体系结构、研究领域、技术挑战等方面内容。此外，边缘计算产业联盟 ECC 也对边缘计算的定义、体系结构、产业生态等方面进行了论述^[16-17]。移动边缘计算是迈向 5G 的关键技术之一^[18]，更是一种针对大规模物联网应用的新型编程模型[19]，其白皮书对相关技术做了较为详细的描述^[20]。

6.1 计算模型

边缘计算是去中心化的、分布式的计算模型，从目前相关研究看主要涉及雾计算、移动边缘计算、三元计算、海计算、海云计算、共享计算、智能边缘计算等，涵盖物联网、移动蜂窝网、车联网、互联网、移动互联网等众多领域，是 IT 资源设施的优化配置解决方案，包括计算、存储、网络、软件、IO 等资源，是算法上的改进、算力上的优化、数据的重新布局。

6.1.1 雾计算

雾计算是云计算的延伸，其概念在 2011 年由思科(Cisco)提出。根据 OpenFog 计算联盟的定义，雾计算是一种水平的、系统级的体系架构，沿着云到物的统一体向用户分配就近的计算、存储、控制、网络等功能服务。雾计算不需要强大的计算能力，只需要一些性能较差、分布零散的计算设备。雾计算介于云计算和个人计算之间，是半虚拟化的服务计算架构模型。雾计算从物联网作为切入口，目前从这一角度切入的研究较多。其中，文献[5]主要讨论了雾计算在物联网中所扮演的重要角色，文献[6]介绍了如何通过雾计算来降低云计算的能耗，文献[7]主要探讨了雾计算是否是云计算发展的未来，文献[8]主要介绍了雾计算的概念、应用及面临的问题，文献[9,10]主要讨论雾计算的安全、隐私和管控方法，文献[11]介绍了雾计算平台及其上层应用。文献[12]介绍了雾计算产生背景、计算模

型、体系结构及其上层应用，认为雾计算是一种延伸云服务到网络边缘侧的分布式计算模型，如下图所示。

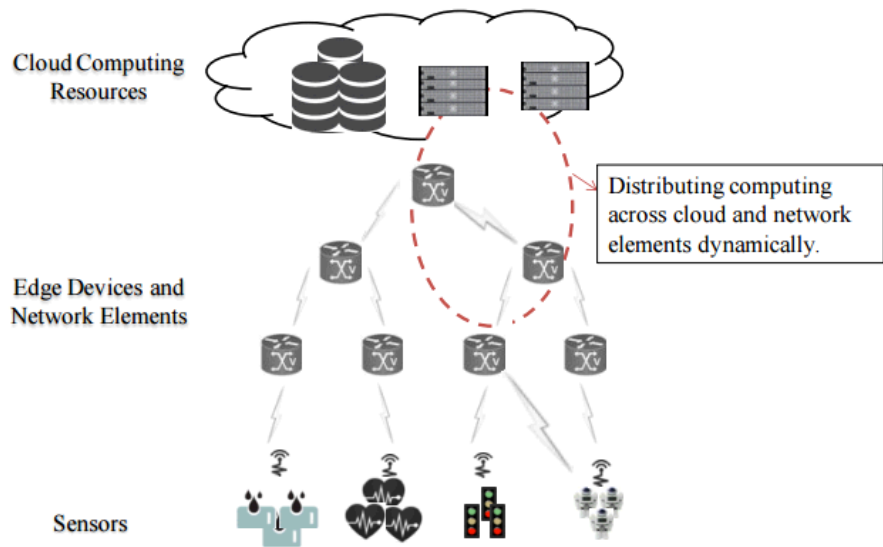


图 5 雾计算计算模型^[12]

OpenFog 雾计算计算模型分为 5 个层次，从下到上依次是：端点层、网关层、访问层、核心网络层、互联网层，如下图所示。

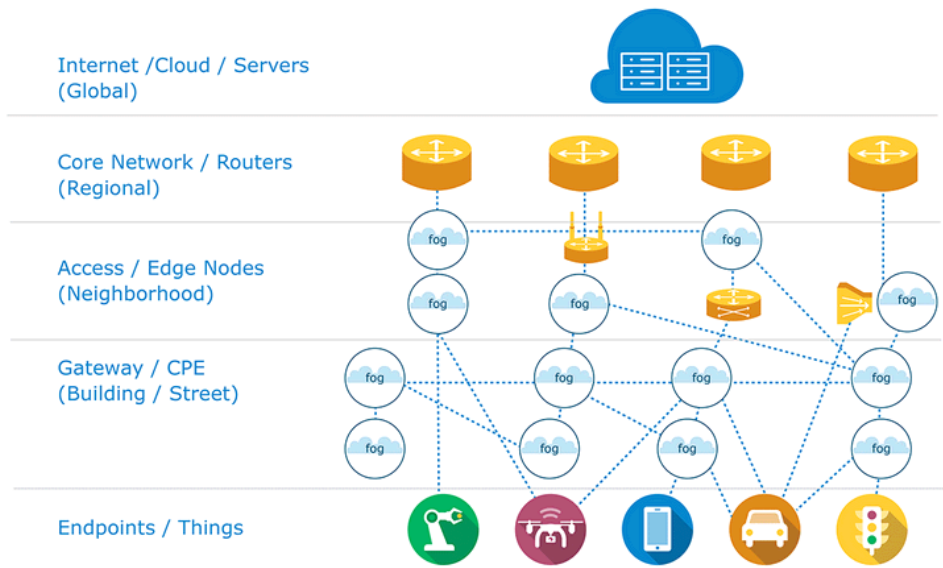


图 6 OpenFog 雾计算计算模型

6.1.2 移动边缘计算

欧洲电信标准化协会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 提出移动边缘计算 (Mobile Edge Computing, MEC)，该技术基于 5G 演进架构，是将移动接入网与互联网业务深度融合的一种技术。边缘计算最早于 2013 年 IBM 与 NokiaSiemens 共同推出的一款计算平台出现的技术，之后各大电信标准组织开始推动边缘计算的规范化工作，目前是技术研发和产业的发展初期，但作

为 5G 的核心技术之一，前景广阔。移动边缘计算可利用无线接入网络就近提供电信用户 IT 所需服务和云端计算功能，而创造出具备高性能、低延迟与高带宽的电信级服务环境，加速网络中各项内容、服务及应用的快速下载，让消费者享有不间断的高质量网络体验^[xxyy]。为了避免网络“被管道化”问题，电信标准组织和运营商都在研究 5G 技术，探索移动互联网和物联网业务如何深度融合机制，进而提升移动网络带宽的价值。

[xxyy]<https://baike.baidu.com/item/%E7%A7%BB%E5%8A%A8%E8%BE%B9%E7%BC%98%E8%AE%A1%E7%AE%97/19741462?fr=aladdin>

根据 ETSI 的 GS MEC 003 规范，提出的 MEC 框架，如下图所示，由三个层次组成，即：网络层、移动边缘主机层、移动边缘系统层。

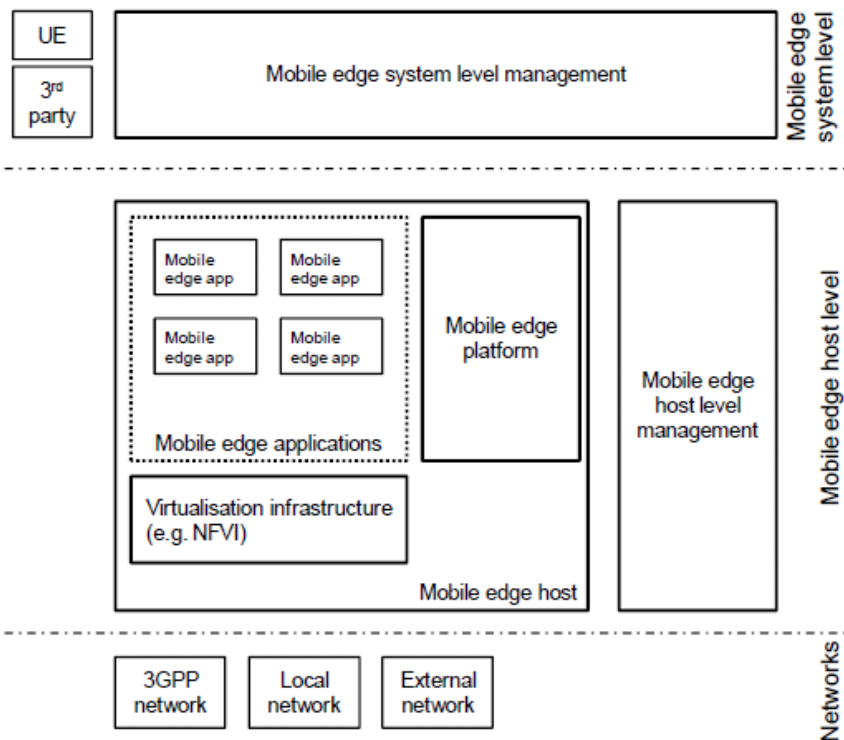


图 6 ETSI 定义的移动边缘计算框架图^[9090]

6.1.3 三元计算

“三元计算”是。。。。。

软件定义网络（SDN）是一种新型的网络架构，它的设计理念是将网络的控制平面与数据转发平面进行分离，并实现可编程化控制。SDN 由应用层、控制层和基础设施层组成，其三大特征是控制转发分离、控制层进行逻辑集中控制、控制层向应用层开放 API。符合这 3 个特征的 SDN 架构可能影响和改变运营商网络的方方面面，是目前通信产业非常关注的技术。

6.1.4 海计算

海计算这个概念是由中国科学院江绵恒副院长在 2010 年 4 月 12 日在中国科学院战略高技术十二五规划研讨会上提出来的，云计算是服务端的计算模式，而海计算代表终端的大千世界的万物，海计算是物理世界的物体之间的计算模式^[25]。海计算这一计算模式与物联网的发展的密不可分，涵盖了物联网多个层次，包括物理世界感知层、自组织层、分布式智能处理层，如下图所示。从物联网技术体系中可以看出，海计算所涉及的设备，存储能力在 TB 级及以下，计算能力在 10^3 MIPS 级及以下，更高的存储资源和计算能力依托上层的云计算基础设施，通过泛在接入层打通云计算和海计算之间的连接。

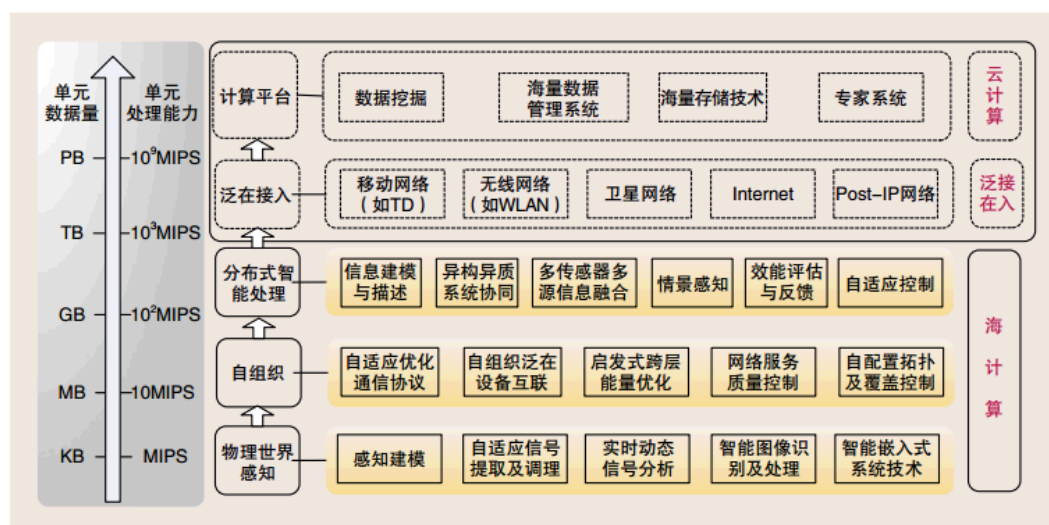


图 7 海计算在物联网技术结构中所在的位置^[25]

6.1.5 海云计算

文献[25]将海云计算定义为海量智能物体交互中(围绕)物体产生但发生在数据中心的计算，物理世界的物体统称为海设备。

6.1.6 共享计算

海云计算定义为海量智能物体交互中(围绕)物体产生但发生在数据中心的计算。

<http://cloud.zol.com.cn/662/6629736.html>

<http://www.vsharing.com/k/vertical/2017-1/719513.html>

http://www.eeworld.com.cn/IoT/article_201711173543.html

6.1.7 智能边缘计算

智能边缘计算（AI-EC, AI over Edge Computing）是指在 5G 边缘（可理解在

基站端) 提供各类 AI 推理算法资源和相应的可编程 AI 计算资源的公共平台。其中的算法资源, 主要以客观世界目标的视觉识别, 音频识别以及自然语言处理为代表的通用类的 AI 推理算法软件。[66]

[66]<http://www.ccf.org.cn/c/2017-10-20/617329.shtml>

6.2 体系结构

6.2.1 ETSI 参考架构

根据 ETSI 的 GS MEC 003 规范, 移动边缘系统参考架构, 如下图所示, 由两个层次组成, 即: 网络层、移动边缘主机层、移动边缘系统层。

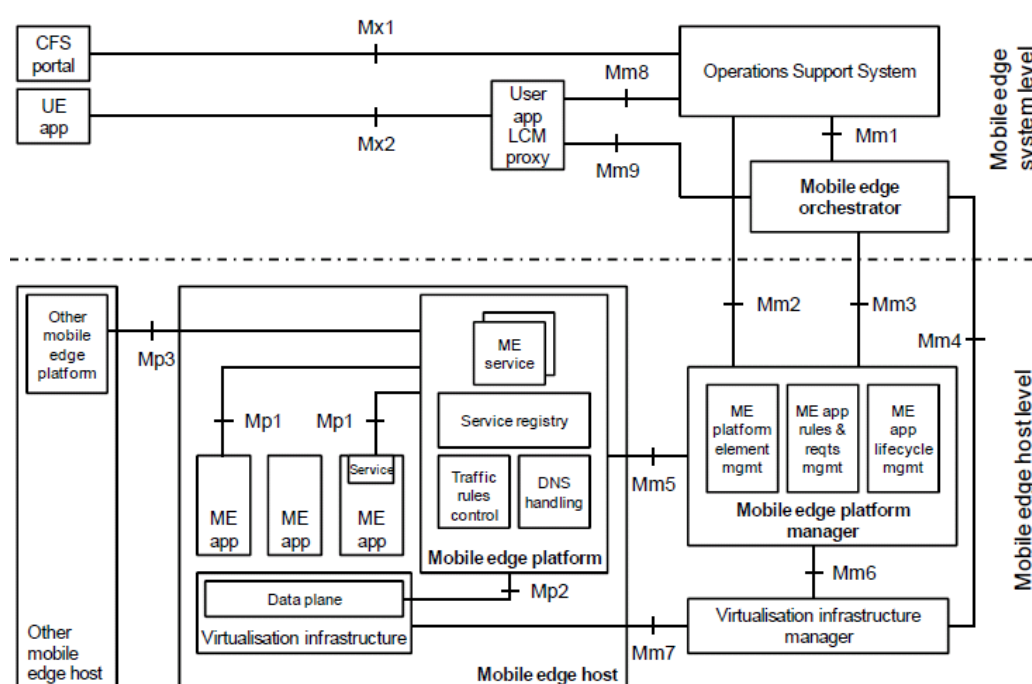
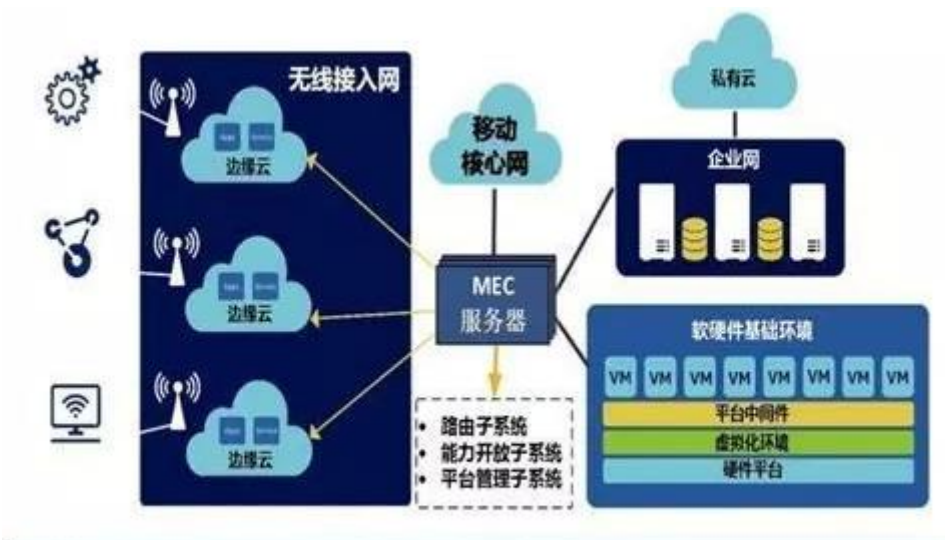


图 7 ETSI 移动边缘系统参考架构

6.2.2 Intel MEC 架构

根据 Intel MEC 架构, 如下图所示, 移动边缘计算位于无线接入点与有线网络之间, 其系统组成包括路由子系统、能力开放子系统、平台管理子系统、边缘云基础设施。前三个子系统部署在 MEC 服务器内, 而边缘云基础设施则由部署在网络边缘侧的小型或微型数据中心构成。边缘侧, 通过构建多个边缘云和移动基站构建无线接入网, 连接移动终端设备和核心网络。用户通过无线基站内部设施或边缘云获得本地化的公有云服务, 并可连接其他企业的私有云实现混合云服务。MEC 系统是一开放性的平台, 基于云平台的虚拟化环境平台, 支持第三方应用在边缘云内部的虚拟机 (VM) 上运行。



资料来源: Intel, 中信建投证券研究发展部

图 6 Intel 定义的移动边缘计算架构图

6.2.3 ECC 参考架构

边缘计算产业联盟（ECC, Edge Computing Consortium）提出的边缘计算参考架构 1.0，采用层次化设计，共分为 4 个功能域，如图 8 所示：

1) 应用域

基于设备、网络、数据功能域提供的开放接口，实现边缘行业应用，支撑边缘业务运营。

2) 数据域

提供数据优化服务，包括数据的提取、聚合、互操作、语义化以及分析与呈现的全生命周期服务，并保障数据的安全与隐私性。

3) 网络域

为系统互联、数据聚合与承载提供联接服务。

4) 设备域

通过贴近或嵌入传感、仪表、机器人和机床等设备的现场节点，支撑现场设备实现实时的智能互联及智能应用。

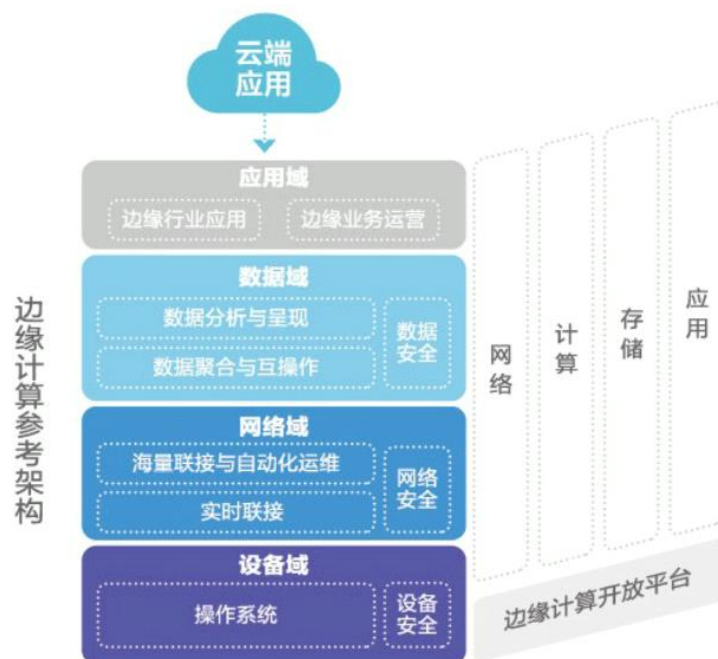


图 5 ECC 边缘计算参考架构

2017 年 11 月，ECC 发布了边缘计算参考架构 2.0，如图 5 所示。从横向上分为四个层次，包括：边缘计算节点层、联接计算 Fabric 层、业务 Fabric 层、智能服务层。多视图呈现，概念视图、功能设计视图、部署视图。

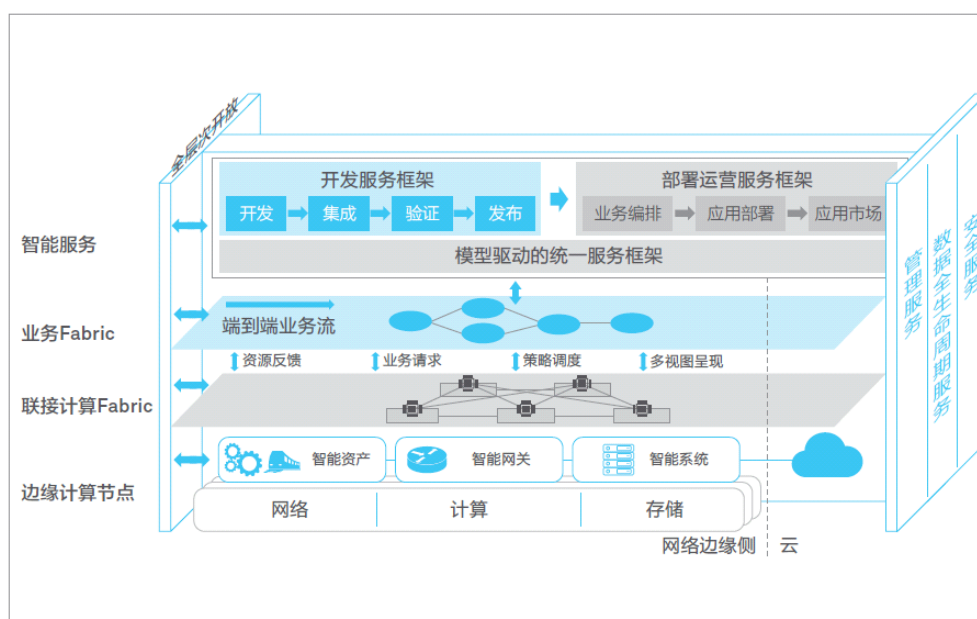


图 5 ECC 边缘计算参考架构

6.2.4 雾计算参考架构

2017 年 2 月，OpenFog Consortium 发布 OpenFog 参考架构(RA)，旨在支持物联网、5G、人工智能等数据密集型需求而形成的通用技术框架。OpenFog 参

考架构的关键是该架构所基于的八个核心技术原则，每个被称为支柱，分别是安全性、可扩展性、开放性、自主性、RAS(可靠性、可用性、可维护性)、敏捷性、层次性架构和可编程性。

Pillars of OpenFog Reference Architecture

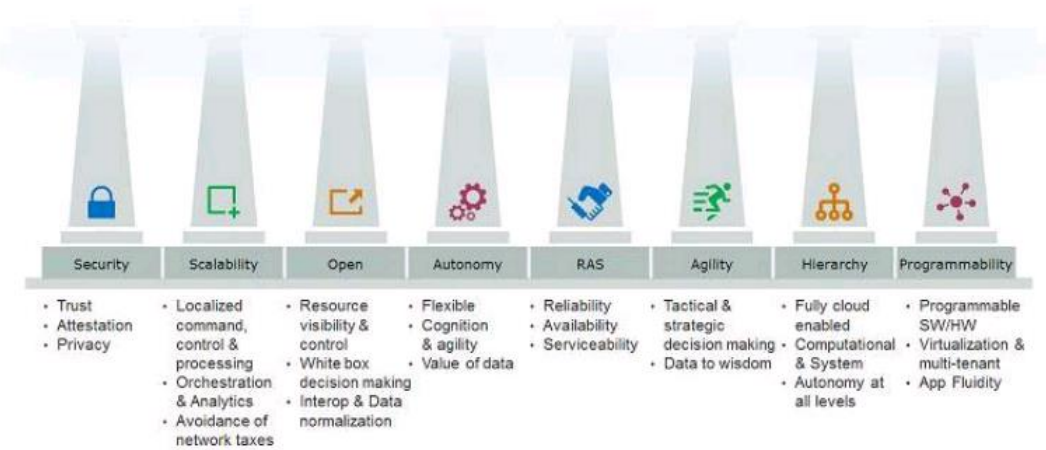


图 5 OpenFog 参考架构的八大支柱

OpenFog 参考架构包括多个水平层次、透视面、垂直视角来进行描述，如下图所示。水平层次包括：硬件平台基层设施层、硬件平台虚拟化层、节点管理与软件背板层、应用支持层、应用服务层。垂直视角包括：性能、安全、管理、数据分析与控制、IT 业务与跨雾应用。

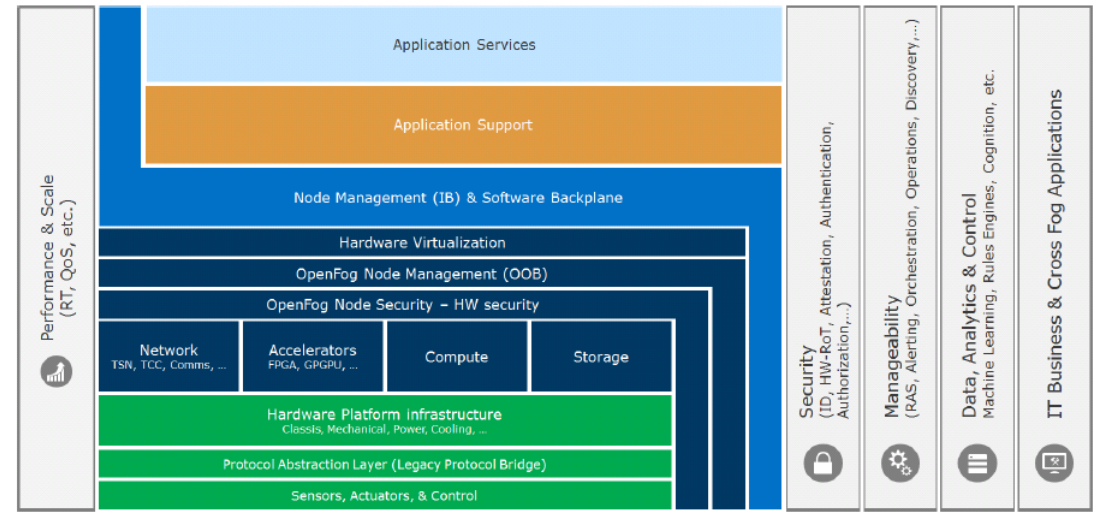


图 5 OpenFog 参考架构

文献【12】提出了一种雾计算参考体系架构，包括 5 个层，从上到下依次是：物联网应用和解决方案层、软件自定义资源管理层、云服务和资源层、网络层、传感/边缘设备/网关/Apps 层，如图 7 所示。

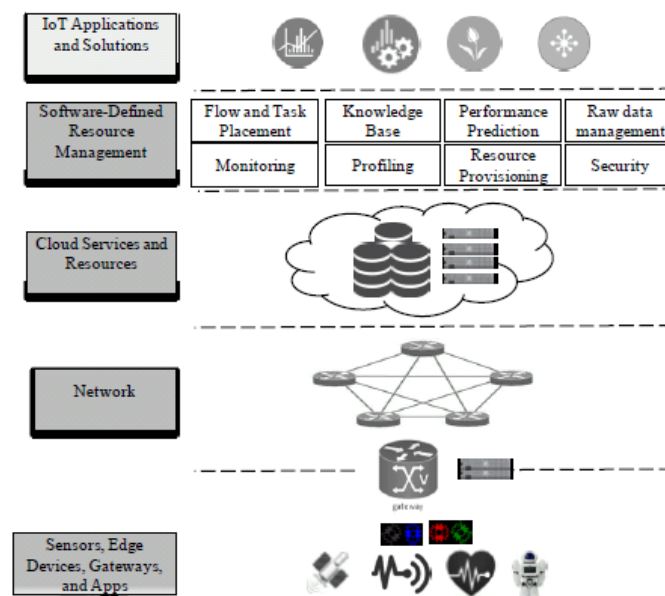


图 6 雾计算参考架构

1) 物联网应用和解决方案层

该层主要面向物联网的相关应用，以满足用户侧的实际需求，通过提供多种应用软件和解决方案来提供服务。

2) 软件自定义资源管理层

该层主要通过软件自定义方式对资源进行相关定义和管理，包括：数据流和任务配置、知识基础、性能预测、源数据管理、监测、分析、服务供应、安全。

3) 云服务和资源层

该层主要提供云资源，如：计算、存储、带宽等。

4) 网络层

该层主要提供网络服务，是数据的传输途径。

5) 传感/边缘设备/网关/Apps 层

该层处于参考架构的最低层，主要包括传感器、边缘设备、网关、Apps 等。

6.2.5 SWoT 架构

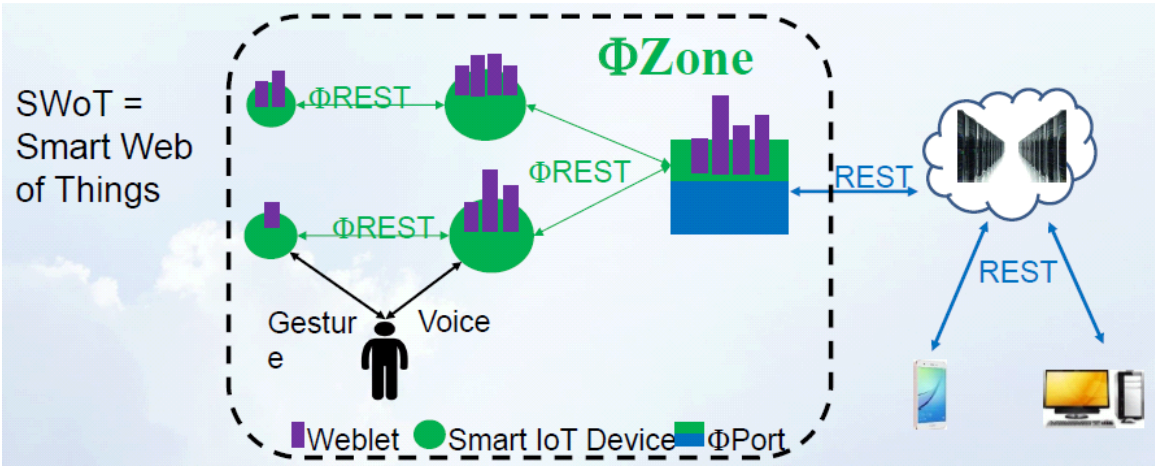


图 5 SWoT 架构

随着智能物联网的出现，碎片化越来越严重，为了解决这一问题，文献[16]提出了 SWoT 体系结构，认为从互联网到物联网，REST 已经被验证是合理的体系架构风格，而先前此方面的研究却比较少见。此外，该文献中提出了一种新型软硬件一体化协议栈，被称之为 Φ -Stack，原生地支持 WEB 和人工智能，例如：模式识别、深度学习等，具有低成本、低延迟、节能等特点。该 Φ -Stack 协议栈是一个开放的体系架构，支持用户创新，满足物联网多样性的内在本质。

6.2.6 AI-EC 架构

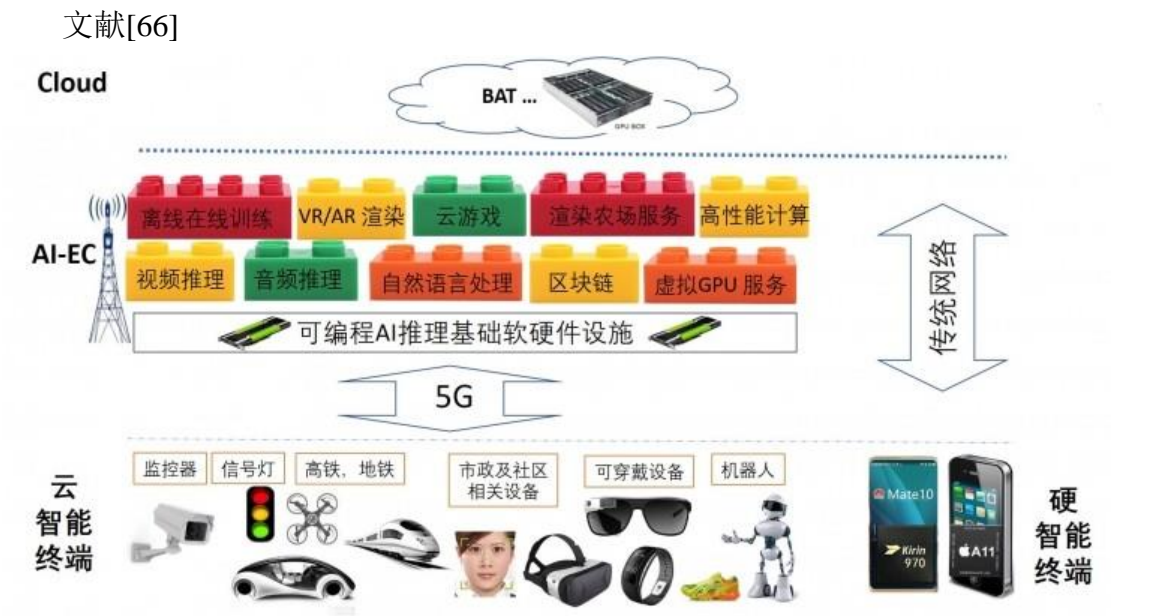


图 8 AI-EC 体系架构^[66]

7 应用领域和重点发展方向

边缘计算面对目前需求，适用于多种应用场景，该节主要就边缘计算的应用领域进行阐述。目前边缘计算研究热点应用领域包括内容缓存、场景感知、负载均衡、云基础设施架构等，对延迟敏感、实时性要求比较高的场景，比如：云基础设施 2.0、5G、VR/AR、CDN、车联网、工业 4.0、物联网等，通过智能化部署边缘节点来满足应用，提供不同服务质量的可靠服务，提升服务质量。

7.1 云基础设施 2.0

以国际亚马逊 AWS、Salesforce、微软 Azure、谷歌 GCE、IBM Softlayer 等为引领，国内奋起直追的阿里云、百度云、腾讯云、金山云等通用云基础设施 1.0 模式正悄然发生改变，以“云计算+边缘计算”2.0 模式方兴未艾。大而全、兼容并包的云基础设施 1.0 不能够提供低延迟、高质量的服务，云模式走向垂直化，细化成各个领域，形成了众多行业云，如：金融云、游戏云、直播云、教育云等。当然，私有云也在为满足政府、企事业单位、科研机构需求而不断努力。然而除了为了隔离风险、信息安全考虑外，混合云是业界发展趋势，背后的原因在于有限的资源难以达到需求，资源需要互通、操作需要协同。

根据 IDC 2016 年云视点调查报告显示：73% 的调查对象声称已经部署混合云战略。根据中国信息通信研究院调查统计，2016 年我国企业采用混合云比例为 11.8%，RightScale 调查报告显示，采用混合云的企业较 2015 年上升了 9%。IDC 预测，未来混合云将占整个市场份额的 67%。这一趋势表明混合云正被越来越多的企业所采纳，甚至对大多数企业来讲，混合云将是云战略的出路。单一的云模式已经很难满足需求，因此，从整体考虑，“云计算+边缘计算”2.0 是一种新型云架构模式，兼备公有云、私有云、混合云特点，打通了核心侧、骨干侧、用户侧得关联，保留了公有云方便、私有云的安全、混合云的灵活，又具备更接近用户侧的特点，并且能够满足了教育、游戏、金融、直播等行业云的应用需求，提供高效的、高质量、低延迟的服务，从而为云基础设施的建设提供了新思路。共有云、私有云、混合云、边缘云将在一段时间内共存、互补、协同，这一趋势昭示着 IT 基础设施建设进入了“多云时代”。

7.2 第四次工业革命

物联网在工业上广泛应用，制造车间、物流系统、环境监测等，都会有成千上万个温度、湿度、视频、音频等传感器持续不断得产生高速数据。这一趋势目前正加剧工业领域信息的变革，如“德国工业 4.0”、“美国工业互联网”、“中国制造 2025”都以不同的发展思路对工业全生命周期进行升级、改造、优化、

升级，外延根据各国国情有所区别，但本质上异曲同工、殊途同归。“工业 4.0”被认为是以智能制造为主导的“第四次工业革命”，其核心理念是信息技术与工业技术的高度融合，通过信息物理系统（CPS）实现产品全生命周期中各制造单元间相互独立地自动交换信息、触发动作和实现控制，将传统制造业向智能化转型。“工业 4.0”强调生产过程的智能化，“工业互联网”强调生产设备的智能化，“中国制造 2025”更强调两化深度融合，即信息化和工业化。

在这场工业化革命浪潮中，本质上需要工厂设备的智能化、信息化，需要实现生产设备的智能化、信息化，使得设备方便联网、管控，其目标和本质是建立一个具有高度灵活的、个性化的、数字化的产品与服务的生产模式，实现人、机、物“三元计算”。边缘计算作为“三元计算”的具体计算模型，大有用武之地。

“工业 4.0”的核心是 CPS，就近提供网络、计算、存储、应用核心服务能力的边缘计算，显然是 CPS 的核心，边缘计算可以认为是“工业 4.0”核心中的核心。通过边缘计算提供的软硬件资源和服务能力，可将信息空间（C）和物理实体（P）紧密融合在一起。因此，在新兴工业制造领域，要实现数字化制造、智能化转型、信息化协同，离不开云计算、大数据、物联网，更需要边缘计算作为支撑。

边缘计算将“物”纳入智能互联当中，依托 OT 与 ICT 的深度融合，可显著提升行业自动化水平，满足用户侧对个性化产品和服务的需求，从而推动产品向服务运营全生命周期进行转型，引发产品服务和商业模式创新，并对生产环境、供应链、价值链、生态系统都会带来深远的影响。

7.3 5G 网络

国际标准组织 ETSI 认为 MEC（Mobile Edge Computing，移动边缘计算）是基于 5G 演进架构，将基站与互联网业务深度融合的一种技术。5G 标准化组织提出的基站演进目标是：基于 SDN/NFV 进行资源的虚级化；架构上采用扁平化扩展，网络存储和内容分发下沉到接入网；核心骨干网的用户面功能可以下沉到基站。SDN/NFV 技术可以快速的把管理平面和用户平面分离，实现网络的切片。物联网时代终端种类暴涨、数量难以计数，应用异构性差异明显，例如，在 5G 发展的大趋势下，在某些类上层应用不需要传统的宽带业务，无需为每类应用建立单独的处理网络，可以通过独立的物理网络切分出若干逻辑网络来满足不同的需求。

7.4 内容网络 CDN/ICN

内容分发网络(CDN, Content Delivery Network)本质上是优化资源的存储位置,把一些内容进行分散、分拆、缓存,从而为用户提供高质量的、就近的、低延迟的服务。CDN 与边缘计算技术理念上有很大交集,主要作为内容资源方的分发平台存在。从技术发展的角度上看,CDN 不能完全依托云计算,原因在于云计算是把大量 IT 基础设施集中到一起,而不是分布在各地,从目前看来,把过多的服务器集中部署到某一地方,形成数据中心、云计算中心,所有的通信网络过度集中在一起,从技术上就不能称之为 CDN。从 CDN 的本质是一种靠近用户侧、需求侧的内容边缘分发,根据实时请求,选择最佳的路径选择 IT 资源为用户提供内容分发服务。

随着用户规模的继续攀升,未来的 CDN 会需要更多的边缘设备,以为其提供高可靠的连接、低时延的服务。从目前看,CDN 的定位一直是通信网的辅助网络,随着通信量的提升,将有机会成为信息通信的基础设施。因此,边缘计算作为 CDN 发力的抓手,随着技术的不断发展,性能带来的优越性,可通过大规模部署边缘节点、边缘网络、边缘存储、边缘缓存等资源,在资源的供应侧提供有力的资源储备和性能优化条件,以增强用户的体验。

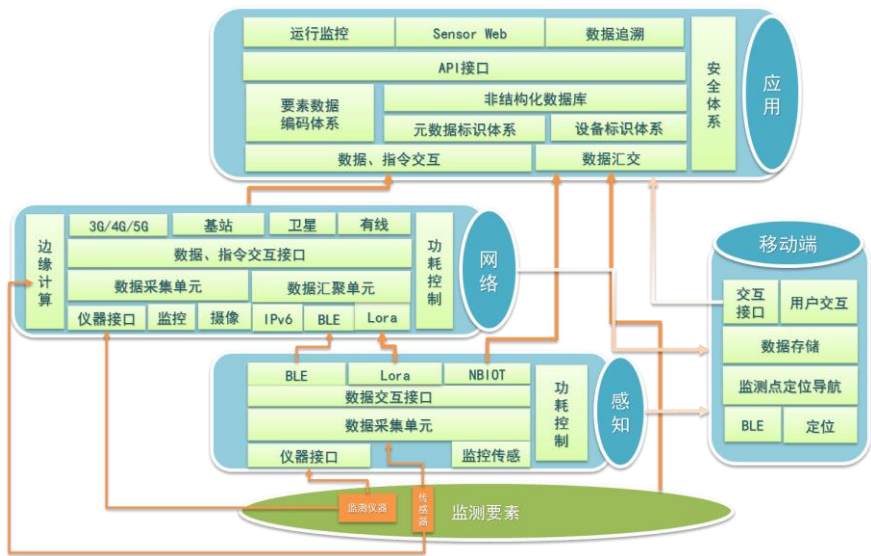
ICN (Information Centric Network) 是 CDN 的未来演进形态。ICN 通过设计以全新的以内容为中心寻址路由方式,将 CDN 在应用层实现的内容缓存分发能力放到网络层实现,并在网络设备中增加缓存能力,从而更加高效的实现内容在网络中的传输与分发。目前 ITU 已经在 5G 的标准框架中正式引入 ICN 的内容,并将 ICN 与 MEC 的结合作为一种演进过渡的方案开展研究。

中国科学院计算机网络信息中心早在 2013 年就基于 ICN 及边缘计算理念,研发实现了内置缓存加速能力的智能无线路由器,在此方向开展了大量有益的探索工作。

7.5 物联网

根据 IDC 的预测,到 2019 年,IoT 产生的数据将有 45% 需要通过边缘计算来存储、处理、分析和操作。而这些物联网设备有一个共性就是,自身具备前端智能,能够独立处理、存储、分析一部分数据,通过智能芯片、本地算法库、本地存储介质进行一些简单常规处理或预处理,把处理结果或需要进一步处理的数据上传到云端,待后续处理。因此,物联网技术的发展,催生了前段智能行业,也为边缘计算提供了众多物理设备,必将相互促进,共同发展。

其中，科考野外台站作为一种特殊的物联网应用场景，边缘计算技术也大有用武之地。中国科学院计算机网络信息中心将边缘计算技术与野外科考结合，实现海量数据的边缘处理及传输优化，大大提升了科研数据处理效率，降低科研数据传输成本。



7.6 车联网

车是移动的智能终端设备，目前随着车的大量普及和应用，车需要连接互联网的需求越发强烈，自动驾驶、无人车等都需要较低的处理延迟，CAN、FlexRay等总线需要和互联网进行互联互通，如：车与车、车与RSU（路侧单元）、车与网。同时，随着车辆越来越智能，车联接到网上的需求日益强烈，过多的负载会加重目前的互联网服务压力，因此需要其本身的处理能力就近处理视频、音频、信号数据。边缘计算可以为这一需要提供相应的架构、服务、支持能力，缩短端到端延迟，使数据更快的被处理，避免信号处理不及时而造成车祸等事故。

目前，丰田汽车、英特尔、爱立信等正式成立汽车边缘计算联盟，以帮助实现了从网到车再到端的整体解决方案。中国科学院计算机网络信息中心也将移动边缘计算技术引入高铁通信网络，通过基站MEC节点和车载MEC节点的配合，解决高速移动环境下车地数据传输、信号控制难题。

7.7 SDN/NFV

当前，云计算和边缘计算都不能把对方所取代，可以互为补充、协同发展，可以通过软件定义网络(Software Defined Network, SDN)管理云计算和边缘计算之间的交互。随着移动智能终端设备的增加，给云计算传输网络带来了巨大的挑

战和压力，而这种现状随着物联网设备和移动终端的骤增将进一步加剧。为此，创建云计算和边缘计算资源统一、协同、管控平台，是应对高负荷和高延迟的有效方式。SDN 可作为统一云计算和边缘计算的技术，可在动态的、实时的、不可预测的场景下为负载配备资源，利用开放编程接口高效完成工作任务。NFV 在平台支撑上具有的灵活性、适配性和解耦性，都会给边缘计算带来相关便利和支持。因此，边缘计算和 SDN/NFV 技术结合将是未来应用落地的一个重要趋势。

7.8 VR/AR 穿戴设备

据市场研究机构 Strategy Analytics 最新全球虚拟实境头戴式装置预测报告显示 2016 年全球虚拟现实 (VR) 头戴式装置的出货量约为 1,280 万台。庞大行业需要规模，造成该类设备良莠不齐、关键参数模糊不明、形态各异、体验较差、价格两极分化等。在应用 VR/AR 设备时，往往要求较低的处理延迟，目前往往虚拟现实的体验资源部署在云端或后台服务器中，传输延迟比较高。AR/VR 应用要求时延小于 20ms，以消除用户的眩晕感，MEC 通过将优化网络功能的部署在靠近用户的边缘侧为其较好的体验。例如：要获得更好的用户体验无论哪类形式的 VR，对 GPU 的性能要求都非常高，GPU 决定了是否能满足 20ms 毫秒以内延时及是否支持 75Hz~90Hz 屏幕刷新率，这是 VR 两项关键指标。边缘计算技术的出现，可以为 VR/AR 设备提供附近的处理中心，以及 5G 的高速能力，可就近解决数据回传带来的延迟问题。同时，VR/AR 本身硬件升级也可以更加贴近应用，为用户提供优质的用户体验。

2017 年 10 月 10 日，VR/AR 初创公司 GridRaster，宣布已筹集近 200 万美元的种子融资，以加强移动 VR/AR 渲染基础设施建设。该公司声称通过边缘计算优化云计算的方式来提供高清图像的性能，从而解放移动端的图形渲染负担，提高十倍性能的同时减少延迟。其本质上是用部分分散的计算终端协助云端来降低延迟，因此，VR/AR 等智能穿戴设备可以在“边缘计算+云计算”的模式下成为具备高性能、低功耗的移动设备。

7.9 智能家居

在智能家居行业，以智能硬件、云服务、手机应用金三角架构模式，究其原因家庭里往往没有共有 IP 地址，要实现远程操控，必须通过云端来辅助完成网络的透传。智能家居在业务实现的原理是，通过手机连接或控制家里的智能家居设备，首先通过连接到云端，修改云端状态参数，然后在通过云端向智能设备下发策略、状态、指令等，从而实现了内网和外网的透传。正是由于云计算在网络透传的重要性，越来越多的手机 App 通过云计算来控制家庭智能设备，而且家

庭智能设备之间的数据传输也是通过云计算来完成的。这一模式带来便利的同时，也存在多种弊端，比如断网、端到端延迟等。因此，边缘计算可把任务在家庭区域内进行，可降低端到端延迟，通过边缘计算和云端的协同，达到较高的可靠性，较低的访问时延，增强用户体验。目前，国外主流互联网厂商纷纷对智能家居领域展开争夺，推出多款产品，例如：苹果的 HomeKit、谷歌 Home、亚马逊 Alexa/Echo、三星的 SmartThings、百度 DuerOS/Apoll、阿里 AliGenie/天猫精灵 X1、腾讯云小微/亲见 H2、京东 O2O 平台、小米盒子/中控路由器/台灯等。在这场智能家居设备的争夺战中，核心是用户网络入口的竞争，通过用户和智能家居的粘度增强，使得很多计算、存储、交互的功能得以在家庭区域内完成，逐渐使这些产品成为家庭的中控系统，使各种设备得以互联互通，并通过外网逐步和各家的云服务互联，形成完整的生态系统。

7.10 P2P

P2P 是分布式计算的一个典型应用场景，分布在各处的计算机有相同的功能，无主从之分，一台计算机既可作为服务器，设定共享资源供网络中供其他计算机所使用，又可以作为工作站使用资源。就去中心化这一计算模型来看，P2P 与边缘计算是一致的，P2P 更强调的是节点之间的合作、共享、激励机制，而边缘计算强调的更多的是协同和就近计算。边缘计算的架构为 P2P 提供了基础的 IT 资源池，通过运行其上的 P2P 系统来发挥边缘节点的计算优势，利用闲置资源、优质资源来为用户提供更高质量的服务。

7.11 区块链

区块链是分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等计算机技术的新型应用模式。区块链是一种去中心化的数据库，它包含一张被称为区块的列表，有着持续增长并且排列整齐的记录。每个区块都包含一个时间戳，和一个与前一区块的链接，设计区块链使得数据不可篡改，一旦记录下来，在一个区块中的数据将不可逆。随之物联网时代的到来，复杂的计算任务或者大规模的计算任务会在云平台上处理，而简单的业务边缘计算完全可以胜任，不需要上传到云端，即物联网去中心化发展趋势。但边缘计算目前的在推进有一问题，海量的、分布式的计算结果不用上传到云平台上，但云平台后期要追溯某个计算的数据，就没有办法实现。区块链技术有望突破边缘计算这一技术瓶颈，如果这个问题得以有效解决，将加速物联网中心化这一趋势。

8 产业界与标准化动态

8.1 边缘计算产业联盟

边缘计算产业联盟（Edge Computing Consortium，简称 ECC）由华为、中国科学院沈阳自动化研究所、中国信息通信研究院、英特尔、ARM 和软通动力联合倡议成立的边缘计算产业联盟，2016 年 11 月份在北京正式成立，首批成员单位共 62 家，涵盖科研院校、工业制造、能源电力等不同领域。截至 2017 年 10 月底，成员数量已经达到了 136 家，又吸纳了大量国际知名企业加入，如：三菱、博世、迅达、施耐德、菲尼克斯、沃克斯、WindRiver、Infosys、McAfee、ABB 等。该产业联盟目前正在着手制定边缘计算的标准，并提出了边缘计算参考架构 1.0，包括四个功能域：应用域，基于开放的接口实现的行业应用；数据域，主要是数据优化服务，网络域，主要就是联接服务，设备域，数据现场节点。针对行业数字化转型在网络边缘侧面临的挑战问题，ECC 提出了边缘计算产业价值——CROSS，即在敏捷联接(Connection)的基础上，实现实时业务(Real-time)、数据优化(Optimization)、应用智能(Smart)、安全与隐私保护(Security)，为用户在网络边缘侧带来更多行业创新和价值再造机会。

8.2 工业互联网联盟

工业互联网联盟（Industrial Internet Consortium，简称 IIC）是促进工业物联网（IIoT）加速增长的全球成员驱动型组织，旨在实现物联网的标准化。在美国，工业 4.0 被称为“工业互联网”，它是将智能设备、人和数据连接起来，并以智能的方式利用这些交换的数据。在 GE 的倡导下，与 AT&T、思科、IBM、英特尔在美国波士顿宣布成立工业互联网联盟（IIC），以期打破技术壁垒，促进物理世界和数字世界的融合。该组织于 2017 年成立了边缘计算工作组（Edge Computing TG），旨在定义边缘计算参考架构。

8.3 汽车边缘计算联盟

由丰田、爱立信、英特尔等公司发起，于 17 年 8 月成立汽车边缘计算联盟（Automotive Edge Computing Consortium，简称 AECC），旨在利用车联网大数据来创造一个自驾车的生态系统，提升技术水平，同时他们还将增加网络容量来处理汽车数据的增长。该汽车边缘计算联盟成立的宗旨是，利用大数据来支持各种新型态服务，如智能驾驶、即时地图、云辅助驾驶等。据丰田估计，车联网 2025 年每月产生数据达十艾位组（Exabyte），大约是当前数据量的 1 万倍。该联盟将重点工作放在增加网络容量以适应汽车与云计算之间的汽车大数据传输与处理

需求。

8.4 OpenFog 联盟

OpenFog 联盟^[23]由 ARM、Cisco、DELL、Intel、微软、普林斯顿大学边缘（Edge）实验室联合发起，试图定义一个开放、可互操作的雾计算架构，工作重点是为高效可靠的网络 and 智能终端创建框架，并结合基于开放标准技术的云、端点和服务之间的可识别、安全和隐私友好的信息流。

8.5 Linux 开源社区

全球最大开源社群 Linux 于今年 4 月份成立物联项目—EdegX Foundry 来推动边缘计算，以打造可适用于 IoT 边缘计算的通用开放框架为目标，加速构建一个面向企业 IoT 边缘计算互通性的生态体系。目前已经有 50 多家厂商加入，如 VMware、Dell、AMD、Bayshore Networks、Beechwoods Software、Canonical、ClearBlade、CloudPlugs、Cloud of Things 等，涵盖硬件制造商、软件开发者、设备制造商，以及系统整合商。

8.6 标准化组织

2017 年 IEC 发布了 VEI（Vertical Edge Intelligence）白皮书，该书介绍了边缘计算对于制造业等垂直行业的重要价值。此外，ISO/IEC JTC1 SC41 成立了边缘计算研究小组，以推动边缘计算标准化工作。

8.7 电信运营商

移动边缘计算给运营商带来的价值非常明显，主要体现在三方面：一是通过对宽带业务的本地分流，将有效提升运营商网络的利用率；二是通过内容与计算能力的下沉，运营商网络将有效支撑未来时延敏感型业务，以及大计算和高处理能力需求的业务，稳固运营商的入口地位；三是移动边缘作为边缘云计算环境和业务平台，将为运营商构建网络边缘生态奠定基础。

在即将到来的 5G 时代，运营商均在边缘计算方面投入了巨大的力量，将其作为发展的重点方向。中国电信通过试点积累了移动边缘计算的应用经验，希望通过 1~2 年的努力，逐渐解决移动边缘计算部署的问题；中国移动在江苏、上海等地开展了移动边缘计算技术验证测试，初步验证了移动边缘计算的性能表现；中国联通联合诺基亚贝尔、英特尔、腾讯云展示首次面向 5G 网络的 MEC 智能场馆商用部署解决方案，并发布了《中国联通边缘计算技术白皮书》。其中，中国联通在 2017 SDN NFV 世界大会上表示，中国联通将建设数千个边缘数据中

心，以满足未来 5G 业务发展需求。美国运营商 AT&T 也发布了《5G 移动边缘计算白皮书》，AT&T 宣布重构 65000 个基站和 5000 个中心机房为边缘数据中心，用 GPU 芯片、通用硬件设备和软件代替传统基站和接入网设备，全面走向边缘计算时代。

8.8 微软

微软在西雅图举办的开发者大会 Build 2017 (Build developer conference) 上宣布推出 Azure IoT Edge^[22]。虽然“云”可以将计算和数据存储移动到数据中心，但有很多情况下用户更希望避免设备和数据中心之间的转换。现在借助 Azure IoT Edge, Microsoft 现在可以更加便捷得将开发人员的部分计算需求转移到服务器设备上。Azure IoT Edge 使得 IoT 物联网设备能够实时地运行在云服务上，处理数据，并与传感器和其它与之相连的设备进行通信。

8.9 亚马逊

亚马逊近期推出应用于边缘计算的“AWS Greengrass”平台^[21]，将“移动边缘计算”重新定义为“多接入边缘计算”。AWS Greengrass 是一种允许您以安全方式为互联设备执行本地计算、消息收发和数据缓存的软件。借助 AWS Greengrass，互联设备可以运行 AWS Lambda 函数、同步设备数据以及与其他设备安全通信，甚至无需连接互联网。通过使用 AWS Lambda, Greengrass 可确保 IoT 设备快速响应本地事件、运行时采用间歇性连接，并最大程度地降低将 IoT 数据传输到云的成本。

8.10 Zenlayer

Zenlayer 公司在 2017 年 3 月 A 轮融资近亿元，之后全面加速建设步伐，先后在非洲、亚洲、欧洲和美洲新增 10 大海外数据中心节点，至此 Zenlayer 运营着一个以全球 69 数据中心为基础的全球边缘计算及连接平台。Zenlayer 推出边缘计算服务 Zenlogic，旨在将应用、数据与服务推至网络边缘，从而减少成本、降低延迟、提升用户体验。随着以互联网、游戏、视频等行业为代表的第二波出海热潮来袭，海外 IT 资源的需求日益强烈，Zenlayer 加速海外资源建设，进一步提高全球网络的容量与服务能力。2014 年，Zenlayer 开放首个海外数据中心，标志着正式开始提供面向全球企业用户的基于 SDN 技术的全球网络及 IDC 服务。到 2017 年，Zenlayer 在全球运营的数据中心已经超过 69 个，覆盖北美、南美、欧洲、东南亚、中东和非洲等地区，业务增长超过 50%。目前，Zenlayer 的

客户覆盖全球，其中包括知名企业如微软、谷歌、英伟达、Linux Foundation、Dyn、腾讯、乐视、UCloud 和中新网等。Zenlayer 已成为中国企业全球化和海外企业入华的关键平台。^[29]

8.11 网宿

在全球移动边缘计算大会上，网宿科技助理总裁李东表示：“网宿正在构建一张庞大的智能计算网络，重构及优化现有的网络架构。在骨干网建设的云计算中心，在城域网建设边缘计算网络，彼此之间实现互联，提升可扩展性，更加灵活和智能。在网宿边缘计算网络的保障下，未来的无人驾驶汽车一定会更加安全。”

8.12 中兴

在全球移动边缘计算大会上，中兴通讯表示，该公司已拥有完整的边缘计算解决方案，以及包括虚拟化技术、容器技术、高精度定位技术、分流技术、CDN 下沉等核心技术和专利。相关解决方案覆盖业务本地化、本地缓存、车联网、物联网等六大场景，满足 ETSI 标准定义的 MEC Host 架构，并根据实际应用落地需求，综合考虑边缘计算管理系统、边缘计算集中控制系统等方案定制。

8.13 其他

近期，思科和 SAS 公司宣布发布了全球第一个用于物联网分析的边缘计算平台，该平台将思科边缘计算产品与 SAS 的高级分析功能进行结合。戴尔也在积极拓展边缘计算平台产品与行业应用，追加发布专门针对工业领域应用的产品，例如：边缘网关 3000 系列，具有实时智能处理能力，占用空间小，适应恶劣环境等特点。SAP 公司则连续收购了两家物联网边缘计算初创企业：意大利的 PLAT.ONE 和挪威的 Fedem Technology。硅谷雾计算类初创企业 FogHorn Systems 近日宣布完成了 3000 万美元的融资，本轮由 Intel Capital 和 Saudi Aramco Energy Ventures 共同领投，此前的投资方均参与了跟投，包括 GE、Dell、Bosch、Yokogawa、March Capital、Darling Ventures、The Hive，新增投资方有 Honeywell Ventures。

9 机遇与挑战

边缘计算目前发展来看，研究还处于初期，但市场需求依然强劲，很多技术和环节是当前急需处理和研究的重点问题，主要表现为以下几个方面挑战和机

遇：

9.1 边缘计算面临的机遇

（1）技术标准和规范

边缘计算涉及到海量的终端设备、边缘节点，是数据采集、数据汇聚、数据集成、数据处理的前端，而这些设备往往存在异构性，来自于不同的生产厂商、不同的数据接口、不同的数据结构、不同的传输协议、不同的底层平台等，为此统一的技术规范和标准亟待达成一致。

（2）体系结构

边缘技术目前发展看，还没有统一的体系结构，为此需要一种灵活、开放、标准、兼容的体系结构来规范目前的技术体系。体系结构层次的划分、开放接口标准、各层包含的关键技术和协议栈、信息安全等级标准、运维管控规范、智能化管控手段等都需要形成一套完善、完整的技术体系架构。

（3）虚拟化技术

目前边缘设备由于底层的异构差异，需要研究虚拟化技术，以便统一底层的硬件差异，传统的基于 LXC、KVM、XEN 等技术不能完全屏蔽到所有边缘设备的底层差异，甚至针对某些硬件上述虚拟化技术并不适用。为此，需要研究跨平台的智能终端容器技术来进一步解决该问题。

（4）开源生态

边缘计算本身由海量的终端设备构成，而众多智能终端可采用统一的开源操作系统，以便形成开源生态环境，为此这一趋势将会提供各厂商均等的发展机会，利用开源生态来维持核心代码，以便形成业界认可的技术接口、关键功能、发展路径等。

9.2 边缘计算面临的挑战

（1）多源、异构、异地性

边缘设备数量庞大，而且多样，分布广阔，因此具有多源、异构、异地性，同时，造成了其数据存储、数据处理能力也具备上述特性。为此，如何屏蔽多源、异构、异地差异，形成统一的接口规范、传输协议、时钟同步等问题都需要解决，最终才能实现跨厂商、跨应用、跨地域的集成和交互。

（2）服务质量（QoS）保障

边缘计算在一定场景下需要保证一定的服务质量要求才能发挥其优势，比如：高可靠、高吞吐量、低延迟。在云计算模型下，很多应用场景耗费大量的系统资源、网络带宽、处理时延，此时需要边缘计算来进行配合和动态调整策略。因此，在特定场景下，能够动态按照特定需求，完成满足一定服务质量的处理任务将是一项技术挑战。

（3）数据隐私及信息安全

边缘计算和云计算、分布式计算、网格计算等模式一样，同样面临着数据安全等问题，虽然安全性有所提升。例如：数据依然会通过网络传输，而且会涉及跨网域、跨地域、跨应用的数据传送，还是沿用着传统的加密、解密算法，从根本上没有改变。虽然有些数据可以放到本地的数据中心或者靠近用户侧，但信息泄露的风险依然存在，安全等级并不一定比数据中心高，因此，数据安全依然存在，是一项长期需要解决的问题。

（4）分布式协同计算

边缘计算涉及中心与边缘侧设备、中心云与边缘云、数据中心与基站等类似场景的协同，其协同计算能力依然是目前亟待解决的问题。协同计算涉及方方面面，哪些资源需要放在中心，哪些资源需要放到边缘，依然是非常困难的问题，必须依靠识别用户场景，根据用户需求，动态的进行相关计算，这些都需要全局考虑，而不是局部的最优，因此，分布式协同将是边缘计算面临的一大技术挑战。

（5）智能化情景感知能力

边缘计算从诞生之初就是解决效率问题，从根本上讲是智能化，是通过改造原有的基础设施布局来取得全局最优，以便提供高性能、高带宽、高存储、低延迟的服务。而达到这些技术参数，首先需要解决的问题是让服务如何动态的、自适应的去感知，而不是人为的去慢慢尝试。因此，边缘计算需要借助基于无监督的机器学习机制来动态分配资源、配置资源、调配资源，以取得良好的用户体验，但目前来讲，边缘计算还未达到此项智能，还处于定性的分析和尝试阶段，具体提升性能、可度量的算法还未取得实在性的进展。

（6）统一开放平台

边缘计算发展的一大诱因是物联网技术，纷繁多样的终端设备数量异常庞大，技术规范、参数指标、性能功能都千差万别，这些设备的互联互通需要统一、开放的接口和平台。而就目前来讲，物联网技术方兴未艾，很难形成统一的技术

标准，为此需要各方统一接口规范来消除设备的异构，以便这些智能设备能够互联、互通，交换、处理、共享相关数据。边缘计算很大程度上依托这些边缘设备就近解决计算、存储、带宽等问题，满足用户侧的需求，因此，统一开放平台将是未来边缘计算亟待突破的关键技术之一。

10 未来发展方向

10.1 对现有技术的影响

- (1) 物联网、移动互联网、工业互联网的发展，使边缘计算模型逐步打破单一以 IDC 为中心的云计算模型，并最终形成互补的局面。
- (2) “云-网-端”基础设施随着海量智能设备在存储、计算、安全、传输等方面能力的升级，资源配置趋于下沉，与“端”距离更近。
- (3) 边缘计算引起了计算模型“去中心化”的趋势，协同计算将是未来技术的发展方向。
- (4) 海量终端将对人工智能、机器学习等技术产生影响，将促进微内核技术的发展，方便算法、模型等嵌入到海量设备的固件当中，使前端智能更具发展前景。
- (5) 边缘计算平台的开放性、通用性、兼容性、交互性、安全性等将是未来需要解决的问题和技术发展趋势。

10.2 对信息化建设的推动

边缘计算技术目前方兴未艾，从目前发展趋势来看，其中一个关键优势就是承担云计算、高性能计算模型的有效补充。这对目前全球云计算中心、大数据中心、高性能计算中心的建设模式带来深刻变革，主要体现在以下几个方面：

(1) 区域从集中到分散

边缘云是边缘计算在云架构技术体系的表现形式，云计算中心不必把过多的设备统一、集中放到一个区域，而是采用星型结构，多地多中心，把众多的边缘云用中心连接起来，这样分布在其他区域的边缘云可以就近为当地用户提供服务，避免过多的带宽消耗、过多的数据传输、过量的访问压力等。这一模式可以均衡负载，缓解资源消耗过高等问题，有效提高运行效率。

（2） 功能从集中到分散

边缘计算本身需要各个区域的资源进行协同，这样才能优势互补，起到优化资源配置的目的。因此，边缘计算可以把基础设施的功能进行有效的划分，每个区域的资源可以专门承担模块化、定制化、单一化的处理任务，降低了应用、数据、服务的耦合度，把计算模式、能力、功能等进行解耦，这样可以增加运作效率，降低统一化带来的过大管控压力。从全局的计算模式看，逻辑上划分为若干个功能区域，把计算任务进行分派，资源可以得到有效利用。

（3） 设备从同构到异构

边缘计算的基础设施是众多的海量终端设备，相对而言，比面向云计算中心、虚拟化后的同质设备更具多样化，为用户提供了多元化的选择，按需根据计算能力、存储能力进行相应的设备采购，如 FPGA、ARM 芯片、单片机、网络摄像头、无人机、AR/VR 等设备。这些智能终端都可以作为边缘计算的节点进行任务的处理，而很多需求根本就不需要通用计算设备，如：廉价 PC，因此可降低了云计算中心相关设备的采购成本。

（4） 计算从集中到分散

边缘计算本身是化解云计算压力过大、资源利用不高、可靠性不高、可用性差、带宽资源不足等问题的技术手段，把原本集中式的优势在物联网兴起的新形式下的转变成分布式的一种有效途径。因为云计算不能包罗所有的海量智能终端，而且随着边缘设备计算、存储等能力的增强，原本需要在云侧解决的计算任务，现在在终端侧可以方便的就地解决，这样整体来看计算模型就发生了重大变化，从原来的集中式计算变成了分布式计算。这一趋势将影响信息化建设的若干问题，如：云侧的设备投资规模将大大降低、带宽需求降低、存储压力减少等。

（5） 资源从隔离到协同

传统的云计算中心、大数据中心、超算中心等建设规模过于庞大，而且所属用户相互隔离，很难就近使用，这很大程度上浪费了基础设施投资，资源没有得到充分的利用，浪费了过多的资源。为此，边缘计算可以打破各自为政的信息化建设模式，使得某一组织下的各分支能够互联互通，消除信息孤岛，使得原本隔离的资源可以优势互补、协同计算。

（6） 安全从单一到分摊

边缘计算建设模式将打破大而全的信息化建设模式，从而很多风险、隐患可

以分摊到其他部分，例如：信息安全。在传统的集中式建设模式下，往往需要安全等级指标，一旦出现问题，整体云计算中心、数据中心将整体受到影响。而边缘计算建设模式，可以把这些风险分摊，而且很多数据无需保存到云侧，而是用户自己保存数据，这样信息安全泄露的风险将大大降低。

(7) 迁移从复杂到简单

边缘计算建设会涉及多个数据中心的数据迁移，如果总是把数据保存在数据中心中，势必会有大量数据的迁移问题。因此，可以利用边缘节点存储部分数据，减少数据传输带来的压力，使得数据迁移的工作量大大减少。因此，边缘计算使数据迁移工作化繁为简，节约了大量的传输时间和带宽资源。

(8) 云基础设施从 1.0 到 2.0 过渡

传统私有云希望突破自身的瓶颈，在保证信息安全的前提下希望辅助更为强大的资源，公有云在保证中小企业业务发展灵活性的同时，有些关键的数据还是企业还是希望自身保留，为此在这一趋势下，混合云的需求增长迅猛，可兼容两者的优缺点。传统的云基础可认识是 1.0 模式，即以私有云、共有云、混合云为主的建设模式，但很难满足特有行业的需求，比如有低延迟要求的直播云、游戏云、金融云等。为此，云基础设施 2.0 的时代已经来临，在融合 1.0 的基础上，把资源下沉，离用户侧更近，提供更优质的服务，形成以“云计算+边缘计算”为核心的云基础设施 2.0 建设模式。

10.3 学术研究思路

针对上述挑战，现有 MEC 研究提出了许多算法以满足新业务需求。下面从不同的角度分别介绍三种研究思路。

(1) MEC 系统部署

MEC 的首要动机是将云计算的能力迁移到网络边缘以此解决由核心网的拥塞和传播延迟带来的长延迟问题。但是目前还没有研究明确指定 MEC 系统的具体配置和部署位置，因此 MEC 系统部署是一个核心研究问题。总体来看，MEC 系统的部署问题是一个部署成本限制下的最优化问题，它可以分解为三个子问题：服务器位置选择、网络架构和服务器部署密度规划。

服务器位置选择：为了有效降低服务器的部署成本，服务器站点的选择要考虑场地租金和计算需求这两个重要因素。同时要考虑计算热点和通信热点通常不一致对服务器位置选择的影响^[40]。

网络架构：计算资源的最优配置是分层网络架构设计的首要考虑因素^[41,42]。

服务器部署密度规划：MEC 服务器种类多种多样，利用复杂几何理论确定 MEC 服

务器部署密度规划^[43]。

(2) 资源管理与调度

MEC 系统存在计算、存储和通信这三种资源，针对延迟、功耗、可靠性三个优化目标，可以考虑将 MEC 系统的资源管理预调度建模成计算、存储和通信资源的联合调度优化问题。根据 MEC 系统中用户的种类多少，可以分为单用户、多用户和异构 MEC 系统。在单用户 MEC 系统中，可以考虑根据任务模型的差别来考虑资源的管理，二元迁移确定性任务模型^[44]、部分迁移确定性任务模型^[45,46]、复杂任务模型^[47,48]是 MEC 系统中最流行的三种任务模型。在多用户 MEC 系统中，通信和计算资源联合调度^[49,50]、MEC 服务器调度^[51,52]、多用户协同边缘计算^[53,54]是值得研究的三个问题。在异构 MEC 系统中，服务器选择^[55]、服务器合作^[56,57]和计算任务迁移策略^[58]是我们关注的焦点。

(3) 缓存策略

在 MEC 系统中，一些服务或内容请求高度集中，一些流行服务或内容将异步和多次请求，提供有效的缓存策略能大大提高系统的效率。缓存策略可以分为两种：面向资源分配的服务缓存和面向数据分析的内容缓存。

面向资源分配的服务缓存的核心难题是如何解决为服务缓存策略分配异构服务器资源（计算、内存、存储）过程中遇到的需求和提供不匹配的问题。根据用户的兴趣点缓存服务及对应的资源，可以借助于服务器的位置和周围用户的兴趣点缓存服务及对应的资源称此为空间热度的服务缓存；或者从时间维度分析服务器服务的热度称之为时间热度的服务缓存。

在内容缓存方面，现有内容流行度预测方式主要基于大数据分析结果。而在边缘网络中，边缘服务器覆盖用户数目少，用户与大群体分析结果存在较大的差异，无法采用基于大数据的预测方法。目前通常采用基于社交关系内容热度预测和基于经典的传染病模型内容热度预测。基于社交关系内容热度预测利用传播动力学预测小用户数目条件下的文件的流行度，其不需要大数据预测的训练阶段和内容流行度的先验概率获取，能有效预测小用户数目下的内容流行度。基于经典的传染病模型内容热度预测利用用户间的社交关系建立用户间内容传播网络，构建离散时间马尔可夫链方法来预测从个体角度出发的特定内容被访问的概率

11 结论

本文从计算技术发展趋势入手，对边缘计算研究现状和时代背景给出了相关介绍。其次，本文对边缘计算需要解决的问题进行了描述，阐明了边缘计算存在的必然性。再次，本文提出了一个边缘计算的体系结构，并对其相应层次进行了论述。接着，本文介绍了边缘计算技术的若干重点应用领域和产业发展动态。

最后，本文就目前边缘计算存在的机遇与挑战进行了论述，并对该技术对信息化建设产生的影响进行了阐述。总之，伴随着物联网、人工智能等技术的蓬勃发展，作为新型计算模型的边缘计算将是未来技术发展趋势。

12 参考文献

- [1] Zhiwei Xu, Dandan Tu, Three New Concepts of Future Computer Science, Journal of Computer Science and Technology 26(4): 616-624, 2011
- [2] Z. Xu: Ternary Computing for a Human-Cyber-Physical Universe, Keynote speech at US-China Computer Science Leadership Summit, sponsored by NSF and NSFC, 2011.
- [3] Wang S, Zhang X, Zhang Y, et al. A Survey on Mobile Edge Networks: Convergence of Computing, Caching and Communications[J]. IEEE Access, 2017, 5: 6757-6779.
- [4] Verbelen T, Simoens P, De Turck F, et al. Cloudlets: Bringing the cloud to the mobile user[C]//Proceedings of the third ACM workshop on Mobile cloud computing and services. ACM, 2012: 29-36.
- [5] Bonomi F, Milito R, Zhu J, et al. Fog computing and its role in the internet of things[C]//Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. ACM, 2012: 13-16.
- [6] Fatemeh Jalali, Kerry Hinton, Robert Ayre, Tansu Alpcan, and Rodney S. Tucker, "Fog Computing May Help to Save Energy in Cloud Computing," IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 34, no.5, May 2016.
- [7] Firdhous M, Ghazali O, Hassan S. Fog computing: Will it be the future of cloud computing?[C]. The Third International Conference on Informatics & Applications (ICIA2014), 2014.
- [8] Yi S, Li C, Li Q. A survey of fog computing: concepts, applications and issues[C]//Proceedings of the 2015 Workshop on Mobile Big Data. ACM, 2015: 37-42.
- [9] Dsouza C, Ahn G J, Taguinod M. Policy-driven security management for fog computing: Preliminary framework and a case study[C]//Information Reuse and Integration (IRI), 2014 IEEE 15th International Conference on. IEEE, 2014: 16-23.
- [10] Yi S, Qin Z, Li Q. Security and Privacy Issues of Fog Computing: A Survey[C]//WASA. 2015: 685-695.
- [11] Yi S, Hao Z, Qin Z, et al. Fog computing: Platform and applications[C] // Hot Topics in Web Systems and Technologies (HotWeb), 2015 Third IEEE Workshop on. IEEE, 2015: 73-78.
- [12] Dastjerdi A V, Gupta H, Calheiros R N, et al. Fog computing: Principles, architectures, and applications[J]. arXiv preprint arXiv:1601.02752, 2016.
- [13] Davis A, Parikh J, Weihl W E. Edge computing: extending enterprise applications to the edge of the internet[C]// Proceedings of the 13th international World Wide Web conference on Alternate track papers & posters. ACM, 2004: 180-187.
- [14] Malandrino F, Kirkpatrick S, Chiasserini C F. How Close to the Edge?: Delay/Utilization Trends in MEC[C]// ACM Workshop on Cloud-Assisted NETWORKING. ACM, 2016: 37-42.
- [15] Shi W, Cao J, Zhang Q, et al. Edge computing: Vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.
- [16] ECC. 边缘计算产业联盟白皮 .<http://www.eccconsortium.org/Uploads/file/20161208/1481181867831374.pdf>.

-
- [17]史扬.边缘计算参考架构 1.0 分享.<http://www.ecconsortium.org/Uploads/file/20161212/边缘计算参考架构 1.0 分享.pdf>.
- [18] Hu Y C, Patel M, Sabella D, et al. Mobile edge computing—A key technology towards 5G[J]. ETSI White Paper, 2015, 11(11): 1-16.
- [19]Hong K, Lillethun D, Ramachandran U, et al. Mobile fog: A programming model for large-scale applications on the internet of things[C]//Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Mobile cloud computing. ACM, 2013: 15-20.
- [20] Patel M, Naughton B, Chan C, et al. Mobile-edge computing introductory technical white paper[J]. White Paper, Mobile-edge Computing (MEC) industry initiative, 2014.
- [21] [EB/OL].<https://aws.amazon.com/cn/greengrass/>,2017-10-11
- [22] [EB/OL].<http://36kr.com/p/5074526.html>,2017-10-11
- [23] [EB/OL].<http://www.openfogconsortium.cn/>,2017-10-11
- [24][EB/OL].<https://www.nebbiolo.tech/wp-content/uploads/whitepaper-fog-vs-edge.pdf>
- [25]詹剑锋, 明子鉴, 王磊, 等. 海云计算实验系统研究[J]. 网络新媒体技术, 2012 (2012 年 06): 3-8.
- [26]孙凝晖, 徐志伟, 李国杰.海计算: 物联网的新型计算模型[J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 2: 39-43.
- [27] [EB/OL].http://news.xinhuanet.com/2017-09/27/c_1121732535.htm
- [28] [EB/OL].<http://www.ccidcom.com/html/zhuant/fengmian/201612/07-256557.html>
- [28] [EB/OL].<http://it.people.com.cn/n1/2016/1201/c1009-28918235.html>
- [29] [EB/OL].<http://www.innobase.cn/?p=978>
- [30] [EB/OL].http://intl.ce.cn/specials/zxgjzh/201507/09/t20150709_5891275.shtml
- [31][EB/OL].<https://baike.baidu.com/item/%E7%AC%AC%E5%9B%9B%E6%AC%A1%E5%B7%A5%E4%B8%9A%E9%9D%A9%E5%91%BD/2983084?fr=Aladdin>
- [32][EB/OL].<https://baike.baidu.com/item/%E5%B7%A5%E4%B8%9A4.0/2120694?fr=Aladdin>
- [33] [EB/OL].http://news.xinhuanet.com/info/ttgg/2016-02/01/c_135063399.htm
- [34] [EB/OL].<http://www.mofcom.gov.cn/article/i/ck/201606/20160601330906.shtml>
- [35] [EB/OL].http://www.cssn.cn/dzyx/dzyx_llsj/201602/t20160215_2866188.shtml
- [36] [EB/OL].<http://roll.sohu.com/20150710/n416539580.shtml>
- [37] [EB/OL].http://www.casipm.ac.cn/zt/ydkb/201610/t20161025_4685179.html
- [38] 崔成,蒋钦云.日本超智能社会 5.0——大变革时代的科技创新战略[J]. 中国经贸导刊, 2016 (24): 34-36.
- [39] [EB/OL].http://www.sohu.com/a/163244593_115423
- [40] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, and M. C. Reed, “Femtocells: Past, present, and future,” IEEE J. Sel. Areas Commun.,vol. 30, no. 3, pp. 497–508, Mar. 2012.
- [41] L. Lei, Z. Zhong, K. Zheng, J. Chen, and H. Meng, “Challenges on wireless heterogeneous networks for mobile cloud computing,” IEEE Wireless Commun., vol. 20, no. 3, pp. 34–44, 2013.
- [42] T. H. Luan, L. Gao, Z. Li, Y. Xiang, G. Wei, and L. Sun, “Fog computing: Focusing on mobile users at the edge.” [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1502.01815v3.pdf>.
- [43] N. Vastardis and K. Yang, “An enhanced community-based mobility model for distributed mobile social networks,” J. Ambient Intelligence and Humanized Comput., vol. 5, no. 1, pp. 65–75, Feb. 2014.
- [44] K. Kumar, J. Liu, Y.-H. Lu, and B. Bhargava, “A survey of computation offloading for mobile systems,” Mobile Netw. Appl., vol. 18, no. 1, pp.129–140, Feb. 2013.

-
- [45] Y. Wang, M. Sheng, X. Wang, L. Wang, and J. Li, "Mobile-edge computing: Partial computation offloading using dynamic voltage scaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 10, pp. 4268–4282, Oct. 2016.
 - [46] Y. H. Kao, B. Krishnamachari, M. R. Ra, and F. Bai, "Hermes: Latency optimal task assignment for resource-constrained mobile computing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, Hong Kong, China, Apr. 2015, pp. 1894–1902.
 - [47] D. Huang, P. Wang, and D. Niyato, "A dynamic offloading algorithm for mobile computing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 1991–1995, Jun. 2012.
 - [48] J. Liu, Y. Mao, J. Zhang, and K. B. Letaief, "Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, Barcelona, Spain, Jul 2016, pp. 1451–1455.
 - [49] Y. Mao, J. Zhang, S. Song, and K. B. Letaief, "Power-delay tradeoff in multi-user mobile-edge computing systems," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Washington, DC, Dec. 2016, pp. 1–6.
 - [50] S. Guo, B. Xiao, Y. Yang, and Y. Yang, "Energy-efficient dynamic offloading and resource scheduling in mobile cloud computing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, San Francisco, CA, Apr. 2016, pp. 1–9.
 - [51] X. Chen, L. Jiao, W. Li, and X. Fu, "Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing," *IEEE Trans. Netw.*, vol. 24, pp. 2795–2808, Oct. 2016.
 - [52] X. Lyu, H. Tian, P. Zhang, and C. Sengul, "Multi-user joint task offloading and resources optimization in proximate clouds," *IEEE Trans. Veh. Techn.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–13, Jul. 2016.
 - [53] Y. Li, L. Sun, and W. Wang, "Exploring device-to-device communication for mobile cloud computing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Sydney, Australia, Jun. 2014, pp. 2239–2244.
 - [54] M. Jo, T. Maksymyuk, B. Strykhalyuk, and C.-H. Cho, "Device-to-device-based heterogeneous radio access network architecture for mobile cloud computing," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 50–58, Mar. 2015.
 - [55] Y. Ge, Y. Zhang, Q. Qiu, and Y.-H. Lu, "A game theoretic resource allocation for overall energy minimization in mobile cloud computing system," in *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. Low Power Electron. Design*, Redondo Beach, CA, Jul.-Aug. 2012, pp. 279–284.
 - [56] R. Kaewpuang, D. Niyato, P. Wang, and E. Hossain, "A framework for cooperative resource management in mobile cloud computing," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 12, pp. 2685–2700, Dec. 2013.
 - [57] R. Yu, J. Ding, S. Maharjan, S. Gjessing, Y. Zhang, and D. Tsang, "Decentralized and optimal resource cooperation in geo-distributed mobile cloud computing," *IEEE Trans. Emerg. Topics Comput.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–13, Sep. 2015.
 - [58] S. Wang, R. Ugaonkar, T. He, M. Zafer, K. Chan, and K. K. Leung, "Mobility-induced service migration in mobile micro-clouds," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM)*, Baltimore, MD, Oct. 2014, pp. 835–840.