

# 全球工程前沿

2018



中国工程院战略咨询中心  
Center for Strategic Studies, CAE



高等教育出版社



科睿唯安



## 目录

引言	1
<b>第一部分 研究方法</b>	<b>2</b>
1 工程研究前沿的遴选	2
1.1 文献聚类主题的获取和筛选	2
1.2 专家提名研究前沿	3
2 工程开发前沿的遴选	3
2.1 专利地图的获取和解读	3
2.2 专家提名开发前沿	3
3 术语解释	4
<b>第二部分 领域报告</b>	<b>5</b>
<b>一、机械与运载工程</b>	<b>5</b>
1 工程研究前沿	5
1.1 Top10 工程研究前沿发展态势	5
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	9
2 工程开发前沿	15
2.1 Top10 工程开发前沿发展态势	15
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	20
<b>二、信息与电子工程</b>	<b>27</b>
1 工程研究前沿	27
1.1 Top10 工程研究前沿发展态势	27
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	32
2 工程开发前沿	42
2.1 Top10 工程开发前沿发展态势	42
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	46
<b>三、化工、冶金与材料工程</b>	<b>55</b>
1 工程研究前沿	55
1.1 Top12 工程研究前沿发展态势	55
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	59
2 工程开发前沿	67
2.1 Top12 工程开发前沿发展态势	67
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	72
<b>四、能源与矿业工程</b>	<b>79</b>
1 工程研究前沿	79
1.1 Top13 工程研究前沿发展态势	79
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	85
2 工程开发前沿	97
2.1 Top14 工程开发前沿发展态势	97
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	105
<b>五、土木、水利与建筑工程</b>	<b>116</b>
1 工程研究前沿	116
1.1 Top10 工程研究前沿发展态势	116



1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	120
2 工程开发前沿	128
2.1 Top10 工程开发前沿发展态势	128
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	132
<hr/>	
<b>六、环境与轻纺工程</b>	<b>140</b>
1 工程研究前沿	140
1.1 Top10 工程研究前沿发展态势	140
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	144
2 工程开发前沿	151
2.1 Top10 工程开发前沿发展态势	151
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	156
<hr/>	
<b>七、农业</b>	<b>164</b>
1 工程研究前沿	164
1.1 Top10 工程研究前沿发展态势	164
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	167
2 工程开发前沿	175
2.1 Top10 工程开发前沿发展态势	175
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	177
<hr/>	
<b>八、医药卫生</b>	<b>183</b>
1 工程研究前沿	183
1.1 Top9 工程研究前沿发展态势	183
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	187
2 工程开发前沿	195
2.1 Top10 工程开发前沿发展态势	195
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	200
<hr/>	
<b>九、工程管理</b>	<b>209</b>
1 工程研究前沿	209
1.1 Top10 工程研究前沿发展态势	209
1.2 Top3 工程研究前沿重点解读	213
2 工程开发前沿	221
2.1 Top10 工程开发前沿发展态势	221
2.2 Top3 工程开发前沿重点解读	225
<hr/>	
<b>总体组成员</b>	<b>233</b>
<hr/>	

## 引言

2018 年两院院士大会上，习近平总书记强调，要把握好世界科技发展大势，围绕建设世界科技强国，敏锐抓住科技革命方向，大力推动科技跨越发展，勇攀科技高峰。

2017 年以来，中国工程院启动“全球工程前沿”研究。研究围绕中国工程院 9 个学部，依托“1+9+1”系列院刊，凝炼 94 个工程研究前沿和 96 个工程开发前沿，并重点解读其中关键的 27 个工程研究前沿和 27 个工程开发前沿，每年以中英文形式向全球发布年度报告，旨在研判未来科技发展方向，发挥学术引领作用，引导工程科技创新。

全球工程前沿研究以数据分析为基础，以专家研判为依据，遵从定量研究与定性研究相结合、数据挖掘与专家论证相佐证、工程研究前沿与工程开发前沿并重的原则，尤其注重数据与专家的多轮深度交互，综合集成、逐步迭代，凝练出年度全球工程前沿。在数据分析方面，综合利用期刊论文（SCIE 收录）、会议论文和全球专利数据，获得了每个领域工程前沿遴选的基础素材，供专家参考。在专家研判方面，文献情报专家以及领域专家全程参与数据源的补充、前沿方向的提炼和修订，以及重点前沿的解读。

本报告由两部分组成，第一部分对研究采用的方法进行说明；第二部分包括机械与运载工程、信息与电子工程、化工冶金与材料工程、能源与矿业工程、土木水利与建筑工程、环境与轻纺工程、农业、医药卫生和工程管理 9 个领域报告，对每个领域的工程研究前沿和工程开发前沿进行描述和分析，并对重点前沿进行详细解读。

# 第一部分 研究方法

全球工程前沿研究在以数据为支撑、专家为核心的原则下，确定了数据与专家多轮交互、迭代决策的研究方法，实践了定量分析与定性分析的深度融合，共遴选获得 2018 年度 94 个工程研究前沿和 96 个工程开发前沿，9 个领域的前沿数量分布如表 1.1.1 所示。

在定量分析上，研究依托科睿唯安基于共被引聚类方法获取了 9 个领域 702 个文献聚类主题和 9 个领域 53 个专业学科组的专利地图。

在定性分析上，9 个领域分别在数据源确定之前和数据挖掘之后两次征集专家提名前沿，以期对定量分析查漏补缺。各领域专家经过多轮研讨以及问卷调查，最终遴选出 2018 年度本领域 10 个左右工程研究前沿和 10 个左右工程开发前沿，并从中选出 3 个研究前沿和 3 个开发前沿进行重点解读。

## 1 工程研究前沿的遴选

本报告中，工程研究前沿的基础素材主要来自

以下两种途径，一是科睿唯安基于 Web of Science 核心合集的 SCI 期刊论文和会议论文数据，通过共被引聚类方法获得文献聚类主题；二是专家提名备选工程研究前沿。两种途径获得的前沿经过专家论证、提炼得到 482 个备选工程研究前沿，再经过问卷调查和多轮专家研讨，遴选得出每个领域 10 个左右工程研究前沿。

### 1.1 文献聚类主题的获取和筛选

科睿唯安将 Web of Science 学科与工程院 9 个学部领域建立映射关系，获得每个领域对应的期刊和会议列表，经领域专家补充确认，确定 9 个领域分析用数据源共计 12 882 种期刊和 28 626 个会议。此外，对于《Nature》等 67 种综合学科的期刊，采用单篇文章归类的方法，即根据期刊内单篇文章的参考文献主要归属的学科来定义这篇文章的领域学科。在此基础上，检索得到 2012—2017 年上述期刊和会议收录的论文，数据采集时间为 2018 年 2 月。

对于每个领域，根据每篇文章所在的 Web of

表 1.1.1 9 个领域前沿数量分布

领域	工程研究前沿 / 个	工程开发前沿 / 个
机械与运载工程	10	10
信息与电子工程	10	10
化工、冶金与材料工程	12	12
能源与矿业工程	13	14
土木、水利和建筑工程	10	10
环境与轻纺工程	10	10
农业	10	10
医药卫生	9	10
工程管理	10	10
合计	94	96

Science 学科，筛选在所属学科中被引频次位于前 10% 的高影响力论文。并且考虑到期刊与会议的差别以及被引频次受出版年影响等因素，将期刊与会议论文分开筛选，不同年度发表的论文分开筛选，最终获得该领域的数据集。对上述数据集进行共被引聚类分析，得到每个领域的全部文献聚类主题，这是第一步工作。

第二步是从每个领域的文献聚类主题中遴选 50 个左右不相似<sup>1</sup> 的备选工程研究前沿。为体现前沿的新兴性，对平均出版年在 2016 年之后的聚类主题给予更多的关注。对于平均出版年在 2016—2017 年的聚类主题，按照核心论文的数量、总被引频次、常被引论文占比依次筛选，获得 20 个不相似的文献聚类主题；对于平均出版年在 2016 年之前的聚类主题，按照核心论文的数量、总被引频次、平均出版年、常被引论文占比依次筛选，获得 30 个不相似的文献聚类主题。此外，针对没有聚类主题覆盖的学科按关键词进行定制检索。最终得到 9 个领域 702 个文献聚类主题。

## 1.2 专家提名研究前沿

专家提名研究前沿是数据挖掘方法的重要补充。在数据挖掘之前，9 个领域的院士专家提出研究前沿问题，文献情报专家将前沿问题转化为检索式，这是初始数据源的重要组成部分。在数据挖掘之后，针对没有文献聚类主题覆盖的学科，领域专家提供关键词、代表性论文或代表性期刊，用于支撑科睿唯安进行定制检索。

在专家研判阶段，领域专家对照科睿唯安提供的文献聚类结果进行查漏补缺，对于未出现在数据挖掘结果中而专家认为重要的前沿进行第二轮提名，文献情报专家提供数据支撑。

最终，领域专家对数据挖掘和专家提名的工程研究前沿素材进行归并、修订和提炼，获得 482 个

备选工程研究前沿，而后经过问卷调查和会议研讨，遴选出 94 个工程研究前沿。

## 2 工程开发前沿的遴选

工程开发前沿的基础素材也来自两种途径，一是科睿唯安基于 Derwent Innovation 专利检索平台，对 9 个领域 53 个学科组中被引频次位于各学科组前 5000 个的高影响力专利家族进行文本聚类，获得 53 张专利地图，领域专家从专利地图中解读出备选工程开发前沿；二是专家提名备选工程开发前沿。两种方式获得的 415 个备选开发前沿通过多轮专家研讨、问卷调查，获得每个领域 10 个左右工程开发前沿。

### 2.1 专利地图的获取和解读

科睿唯安建立德温特手工代码与工程院学部专业划分标准体系的匹配关系，初步确定 9 个领域的专利数据检索范围及检索策略。领域专家对德温特手工代码删减、增补和完善，确定 53 个学科组的专利检索式。专利检索时间范围为 2012—2017 年，专利引用时间截至 2018 年 2 月。

通过 Derwent Innovation 专利平台检索，综合考虑年均被引频次和技术覆盖宽度指标，筛选获得每个学科组对应的前 5000 个高被引的专利家族。利用专利文本间的语义相似度，获得 53 张能快速直观呈现工程开发技术分布的 ThemeScape 专利地图。

各领域专家在文献情报专家辅助下，从专利地图提炼技术开发前沿、归并相似前沿、确定开发前沿名称，得到每个学科组的备选工程开发前沿。

### 2.2 专家提名开发前沿

在数据挖掘之前，专家根据对领域技术发展

<sup>1</sup> 不相似主题：如果两个聚类主题的核心论文中有 25% 以上不相同，称两个聚类主题不相似。

的认识和见解，提名工程开发前沿的关键问题，文献情报专家将其转化为专利检索式，作为原始数据源的一部分。在数据挖掘之后，专家进行第二轮前沿提名，对照专利地图解读结果进行查漏补缺。

专利地图解读结果与专家提名前沿共同进入专家研判环节，得到 415 个备选工程开发前沿，而后通过问卷调查或专题研讨，获得 96 个工程开发前沿。

在 94 个工程研究前沿和 96 个工程开发前沿中，领域专家从发展前景、受关注程度等角度遴选出 27 个关键的工程研究前沿和 27 个关键的工程开发前沿进行重点解读。

### 3 术语解释

**被引频次：**指论文被科睿唯安 Web of Science 核心合集收录的论文引用的次数。

**文献（论文）：**包括 Web of Science 中经过同行评议的公开发布的研究型期刊论文、综述和会议论文。

**高影响力论文：**指被引频次在同出版年、同学科论文中排名前 10% 的论文。

**文献聚类主题：**对高影响力论文进行共被引聚类分析获得的一系列主题和关键词的组合。

**核心论文：**指与 702 个备选工程研究前沿相关

联的高影响力论文。

**施引核心论文：**指引用核心论文的文献的集合。

**平均出版年：**指对该文献聚类主题中所有文献的出版年取平均数。

**引文速度：**引文速度是一定时间内衡量累计被引频次增长速度的指标。在本研究中，每一篇文献的引文速度是从发表的月份开始，记录每个月的累计被引频次。

**常被引论文：**指引文速度排名前 10% 的论文。

**专利地图：**通过分析专利文献中的语义相似度，将相关技术的专利聚集在一起，并以地图形式可视化展现，是形象地反映某一行业或技术领域整体面貌的主题全景图。

**技术覆盖宽度：**指每一篇专利被分入的不同德温特手工代码的数量。该指标可以体现每件专利的技术覆盖广度。

**论文比例 / 公开量比例：**对于核心论文（专利）中不同国家（地区）或不同机构作者合著的情况，在统计国家（地区）或机构的产出量时，每个国家（地区）或机构都算一次产出，因此论文比例或公开量比例合计超过 100%。

**中国工程院学部专业划分标准体系：**包含中国工程科学技术（含农、医）的 9 个学部所涵盖的 53 个专业学科，按照《中国工程院院士增选学部专业划分标准（试行）》确定。

## 第二部分 领域报告

### 一、机械与运载工程

#### 1 工程研究前沿

##### 1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

机械与运载工程领域（以下简称机械领域）所研判的 Top10 工程研究前沿涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（见表 1.1.1）。其中，“自主水下航行器的自适应跟踪”“多智能体系统的一致性控制”“机械手的自适应神经网络控制”“水下自主导航系统”“全球导航卫星系统优化”和“近海岸波浪能资源评估及利用”是传统研究的深入，“锂离子电池热管理技术”“认知无线网络”“基于触觉的目标识别”和“电 / 磁场强化纳米流体对流传热”是新兴前沿。论文自 2012 年至 2017 年的逐年发表情

况见表 1.1.2，“锂离子电池热管理技术”和“电 / 磁场强化纳米流体对流传热”是近年来论文发表增速最显著的方向。

##### （1）自主水下航行器的自适应跟踪

由于自主水下航行器是一个典型的强耦合非线性系统，易受到水下洋流等时变因素干扰，比一般刚体具有更强的模型、参数不确定性。针对未知参数具有线性化形式的非线性系统，目前一般采用自适应技术，在线预估未知参数；针对参数不具有线性化形式的系统，可采用神经网络方法补偿系统不确定性，保证跟踪误差的稳定性。根据推进器配置不同，自主水下航行器跟踪研究主要分为欠驱动水下航行器跟踪控制、全驱动水下航行器跟踪控制。欠驱动水下航行器跟踪控制系统各运动自由度之间跟踪误差具有很强的非线性耦合，国内外学者主要

表 1.1.1 机械领域 Top10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	自主水下航行器的自适应跟踪	6	75	12.50	2014.67	0.0%	0.00
2	多智能体系统的一致性控制	18	1197	66.50	2014.72	11.1%	0.00
3	机械手的自适应神经网络控制	3	376	125.33	2016.00	66.7%	0.00
4	水下自主导航系统	5	106	21.20	2014.80	0.0%	0.00
5	锂离子电池热管理技术	13	169	13.00	2016.23	15.4%	0.00
6	全球导航卫星系统优化	8	217	27.13	2013.63	0.0%	0.13
7	认知无线网络	22	755	34.32	2014.86	9.1%	0.00
8	基于触觉的目标识别	4	112	28.00	2016.75	50.0%	0.00
9	近海岸波浪能资源评估及利用	32	925	28.91	2014.19	9.4%	0.00
10	电 / 磁场强化纳米流体对流传热	19	801	42.16	2017.00	10.5%	0.00

表 1.1.2 机械领域 Top10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	自主水下航行器的自适应跟踪	0	1	1	3	1	0
2	多智能体系统的一致性控制	1	3	4	3	6	1
3	机械手的自适应神经网络控制	0	0	0	0	3	0
4	水下自主导航系统	0	1	1	1	2	0
5	锂离子电池热管理技术	0	0	0	1	8	4
6	全球导航卫星系统优化	1	4	0	3	0	0
7	认知无线网络	2	4	2	2	11	1
8	基于触觉的目标识别	0	0	0	0	1	3
9	近海岸波浪能资源评估及利用	4	9	4	8	6	1
10	电 / 磁场强化纳米流体对流传热	0	0	0	0	0	19

是利用反步控制方法及级联系统控制方法等来实现跟踪误差的渐近稳定性；由于全驱动水下航行器跟踪控制系统每个自由度均有独立的控制输入，国内外学者主要采用自适应反步控制方法等来获得具有全局线性稳定性的轨迹跟踪控制器。自主水下航行器编队协同跟踪探测效能远优于单体跟踪探测，在逐步完善自主水下航行器自适应单体跟踪控制技术的基础上，对于自适应编队协同控制技术及智能路径规划技术等研究将是该研究方向的发展趋势。

### (2) 多智能体系统的一致性控制

从人群到飞鸟、游鱼、昆虫、细菌、细胞，自然界广泛存在着大规模群体运动。相互联系而不断运动的个体组成的系统涌现出了丰富多彩而高度协调的群集动力学行为。多智能体系统是理解生物和自然群集行为的一个途径，同时在工业多机器人群体协同、无人机编队控制、人类群体行为调控疏导、无线传感网络优化等领域具有可观的应用价值。多智能体系统是由一系列相互作用的智能体构成，各个智能体之间通过通信、合作、协调、调度、管理和控制等方式来表达系统的结构、功能及行为特性，完成单个智能体不能完成的大量而又复杂的工作。多智能体系统具有自主性、分布性、协调性，

并具有自组织能力、学习能力和推理能力，因而采用多智能体系统解决实际问题有很强的鲁棒性和可靠性。由于生物学、计算机科学、人工智能、自动化科学、物理科学等多个学科交叉和渗透发展，多智能体系统已成为工程控制学科的前沿问题。初期多智能体系统协同的研究受自然界广泛存在的群集现象启发，利用数学、计算机仿真和系统科学的方法进行探索。近几十年来出现了大量的多智能体系统协同控制理论的研究。多智能体的协调控制的基本问题包括一致性控制、集聚控制、蜂拥控制和编队控制等。一致性控制是多智能体系统协调控制中一个最基本的问题，其研究可以推广应用到其他协同控制问题。一致性控制是指设计一致性协议使得各智能体之间通过局部信息交互，实现所有智能体的目标状态值一致。一致性控制研究主要从三个方面展开：智能体动力学复杂度、通信拓扑复杂度以及网络信息传输复杂度。当前多智能体系统最重要的应用是群体机器人的协同。特别是传统的多机器人生产线往往采取集中式控制结构，难以适应面向任务的小批量、多品种的生产，缺乏敏捷制造的能力。随着当今国际制造业正在向大型、复杂、动态和开放的方向转变，现代制造的复杂作业需要多机器人协同

完成，因此亟待研制具有更好的顺应性、一致性和优化性能的群体机器人系统。

### (3) 机械手的自适应神经网络控制

多指灵巧机械手是一个复杂的、动态耦合、具有时变特性的非线性系统，存在诸如系统建模误差、高频特性、关节摩擦以及信号检测误差等多种不确定性因素，这些客观存在的实际情况使得控制系统性能变差，以致常规的反馈技术不能满足控制要求。神经网络具有非线性变换特性和高度的并行运算能力，可以有效辨识出机械手系统的参数，但其不能完全解决机械手建模误差和外界干扰等带来的不确定性问题。为了利用神经网络对机械手系统进行自适应控制，往往还需要融合其他算法，包括滑模控制、鲁棒控制和智能控制等方法。目前基于知识规则和学习推理的智能控制算法，如模糊控制、学习控制、专家控制和遗传算法、粒子群寻优算法等，在处理系统不确定性方面具有各自的优势，将多种控制方法相融合、取长补短、有机结合，形成新的控制方法已成为多指机械手自适应控制领域的研究前沿和发展趋势。

### (4) 水下自主导航系统

自主水下航行器广泛应用于水下作业，是许多科学、工业和军事活动的基础，因此实现水下航行器的高精度定位以及多个水下航行器的协同导航已经成为当前国内外的研究前沿。超短基线定位系统在近年来已经得到普遍应用，它是一种以声波为信息载体的水下声学定位技术，由水下航行器的声信标发出声信号、水面上的超短基线基阵接收信号并测算水下方位及距离。该系统由基于卡尔曼滤波器、扩展卡尔曼滤波器或者分散扩展信息滤波器的算法提供软件方案，惯性测量单元、光纤陀螺仪和多普勒计程仪等传感元件则构成了硬件系统。在进行水下定位和导航时，影响其精度的重要因素是针对水下航行器运动的估计算法，该算法不仅在期望路径和执行路径之间的位置误

差方面影响定位和导航的结果，而且还影响由水下航行器获取的地理参考数据，因此自主水下航行器的运动估计算法需要精确且轻量。此外，声学调制解调器作为超短基线基阵的替代方案，在单个自主水下航行器的同步时钟单向行程时间声学导航方面也具有较大的应用潜力。

### (5) 锂离子电池热管理技术

近些年，在能源危机与环境污染的双重威胁下，电动汽车的发展得到了人们广泛关注。锂离子电池因具有能量密度高和功率密度强、循环寿命长以及自放电比率低等优点成为电动汽车动力首选。但锂离子电池在大电流快速充放电循环过程中会产生大量的热量并可能引发热逃逸，倘若处理不当会对电池性能、寿命、安全性等方面产生极大影响。实验和数值模拟通常用来分析电池和电池组的热行为，以便进行更好的热管理。精确的热学模型对于锂离子电池数值模拟至关重要，必须精确表达电池中的能量守恒、热产生以及边界条件，还需配合电化学及等效电路模型进行辅助计算。目前动力电池冷却的研究方法主要集中在风冷、液冷、相变材料冷却、沸腾冷却与热管冷却等。同时，电池加热技术的研究也不能忽视，这决定了锂离子电池能否正常应用于低温和高海拔地区。各类热管理技术各有利弊，实际应用中必须综合考虑成本、复杂度、重量、冷却效果、温度一致性、寄生功率消耗各个方面，方能实现锂离子电池的有效热管理。

### (6) 全球导航卫星系统优化

全球卫星导航定位系统(GNSS)广泛应用于军事、导航、测绘、勘探、交通运输等领域，GNSS技术的可靠性、响应速度及定位精度优化一直是国内外关注的研究前沿。近年来，GNSS技术在汽车导航、智能手机等消费级产品中大量使用，在城市中呈现出广泛的应用前景。GNSS技术是通过从多个导航卫星信号中提取“伪距”参数以实现

位置估算。然而，由于城市内建筑群密集程度高，会形成对卫星信号一定程度的屏障与干扰，从而影响到GNSS的定位精度与响应速度。因此，提升GNSS在城市工况中的鲁棒性并优化定位与导航精度的任务十分艰巨。近年来，GNSS技术针对城市路况，在提升定位精度与相应速度的研究上取得了大量成果。其中，三维建筑模型辅助预测、数字地图辅助识别、阴影匹配定位算法等新型技术为城市中高精度定位的发展起到了重要作用，使得GNSS的可靠性得以巨大提升。此外，GNSS技术还受城市高架、桥梁、隧道等一系列复杂工况影响，依然面临严峻挑战。

### (7) 认知无线网络

认知无线网络是在无线网络的基础上发展出来的先进网络技术，其核心思想是通过频谱感知、自主决策及网络重构，实现频谱动态分配，以提高频谱资源利用效率并适应网络的动态变化。频谱感知是通过检测无线网络中的频谱使用信息，获得空闲的可用频段。自主决策与网络重构是分析可用的频谱资源，根据实时变化的用户需求和频谱利用策略，进行网络参数的调整，实现频谱资源的自适应配置。近年来，认知无线网络出现了若干新的发展方向。其一，认知无线网络与电能传输结合，使网络可以同时传输信息与电能。其二，认知无线电网络中引入了协作中继，次级用户作为中继，帮助主用户协作传输数据，进行信息协作。在未来的物联网与智能交通中，密集的无线传感器与智能车辆将造成通信需求的爆发式增长和无线频谱资源短缺，基于认知无线网络提出的认知物联网与认知车联网在缓解频谱资源压力方面将发挥重要作用。

### (8) 基于触觉的目标识别

机器人通过指尖触觉传感器实现对外部环境或目标物体的感知。触觉传感可以捕获多个对象属性，如物体的纹理、粗糙度、空间特征、柔度或摩擦等，因而成为智能机器人领域非常重要的传感模式。基于触觉的环境感知在需要精细操作的手术、对接触

敏感的海底焊接等领域具有至关重要的作用。在实际的机器人操作中，机械手通常具有多指，不同手指的触觉数据构成序列，利用触觉序列数据集显示优势并考虑多指间的内在关系，开发联合核稀疏编码模型和核字典学习方法，有助于提高基于触觉的物体识别性能。此外，随着智能机器人技术迅猛发展，人们迫切希望赋予机器人类似人类皮肤的触觉感知能力，以提高智能仿生机器人的性能水平，因此柔性触觉传感器的研究也成为触觉传感领域的前沿内容，柔性多维触觉传感器的研制与开发是其中的重点与难点之一。

### (9) 近海岸波浪能资源评估及利用

近海岸波浪能作为一种可再生清洁能源，具有能量密度高和分布面广等特点，其开发和利用将对解决能源危机、环境污染和气候变化等问题发挥巨大的作用。科学界对于近海岸波浪能的研究主要集中在两方面：一是对近海岸波浪能储量和时空分布进行有效评估，以便为波浪能电站的建站选址和波浪能转换装置的设计提供有效的指导；二是对波浪能转换装置的设计、开发和实验。目前，在全球各海域海浪场分析和波浪能资源评估方面，海浪数值模拟是获取海浪参数的主要手段，但是其预报精度受到诸多因素制约，对于复杂海浪场的模拟能力有限，与现场观测数据存在一定的差距，所以仍需寻找一种能获取长时间、大范围海浪结果的现场观测手段来提高评估的准确性，丰富评估手段。此外，由于海洋环境复杂多变，波浪能本身的不稳定、储量大、分布广和利用难等特点，应用于海洋之中的波浪能转换装置还易受到海洋灾害性气候的侵袭。因此，近海岸波浪能资源评估利用与开发，在理论研究与装置研制等方面，尚有诸多艰巨的难题亟需解决，比如提高波浪能资源评估及预测的全面性和准确度、优化波浪能装置设计、提升波浪能装置响应速度和转换效率、提高波浪能装置稳定性和可靠性、降低制造和安装成本等。

### (10) 电 / 磁场强化纳米流体对流传热

纳米流体是在流体中加入纳米颗粒形成的一类新型传热冷却工质，具有较高的导热系数和良好的流体跟随性，将其应用于对流传热能够明显地提高系统的传热效果。近年来，在传统纳米流体的基础上，进一步利用电 / 磁场来强化对流传热逐渐成为国内外研究的前沿。目前，借助理论和数值仿真方法，阐述了在电 / 磁场作用下纳米流体分别作为单相流和多相流的对流传热特性，揭示了颗粒尺寸、形状、表面特性、颗粒和液体的化学性质等以及电 / 磁场特性参数对纳米流体对流传热的影响规律。然而，由于电 / 磁场中纳米颗粒的受力和流动状况相当复杂，提出的理论与仿真模型难以全面考虑对流传热的影响因素。因此，还需采用先进、精确的测试方法对电 / 磁场强化纳米流体对流传热进行实验研究，积累丰富的实验数据，进而完善电 / 磁场作用下纳米流体对流传热的模型。在此基础上，准确阐述电 / 磁场对纳米流体对流传热的作用机理，有望推动其在工业中的应用。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 自主水下航行器的自适应跟踪

随着自主水下航行器在海洋科学调查、水下目标探测等方面的应用，自主水下航行器自适应跟踪技术也得到了国内外学者的广泛关注，并开展了大量的理论研究工作及工程实践工作。

自主水下航行器跟踪控制问题是指为被控对象设计一个控制输入作用，使得水下航行器可以从初始状态出发跟踪惯性坐标系下给定的参考轨迹或路径。其主要包括轨迹跟踪问题和路径跟踪问题等，两者区别主要体现在跟踪参考路径时是否跟时间有关，前者明确有时间上的严格约束，从理论角度出发，轨迹跟踪问题比路径跟踪问题更复杂。

根据推进器配置不同，自主水下航行器跟踪控制研究分为欠驱动水下航行器跟踪控制、全驱动水

下航行器跟踪控制。目前，大多数的水下航行器属于欠驱动水下航行器范畴，其控制系统存在非完整约束，针对具体跟踪控制问题，国内外学者采用李雅普诺夫直接法、反步控制法、级联系统控制法、级联 - 反步联合法等开展了大量研究工作。目前主流的研究趋势主要是根据具体跟踪问题将当前复杂系统分解为若干级联系统，基于级联系统稳定性原理以及自适应反步方法，在获得较为简单的控制律的同时保证控制系统的全局一致渐进稳定性和对参数不确定的自适应性。

对于全驱动水下航行器跟踪控制问题，国内外学者采用滑模控制及反馈线性化等非线性控制方法和模糊控制、神经网络控制及模型预测控制等智能控制方法开展了大量研究工作。目前主流的研究趋势主要是利用自适应反步方法等来保证跟踪误差的全局一致渐进稳定性，利用 BP 神经网络方法等解决自主水下航行器动力学模型中流体动力学参数等不确定项。

另外，在完成单体水下航行器跟踪控制研究的基础上，开展多水下航行器跟踪控制问题研究是未来主要的发展趋势。利用相互耦合的时空分步控制策略，保证单体水下航行器跟踪在其自身期望路径，引入协同控制律，设计路径参数一致性算法，以此完成多水下航行器协同跟踪控制的目标。

“自主水下航行器的自适应跟踪”工程研究前沿中核心论文的发文国家 / 地区分别为中国 (3)、印度 (1)、韩国 (1) 和伊朗 (1)，篇均被引频次排在前三的国家 / 地区为印度 (19)、韩国 (13) 和中国 (11)，见表 1.2.1。从目前样本数据来看，主要发文国家 / 地区间基本不存在合作，见图 1.2.1。核心论文的发文机构分别为 Dalian Maritime Univ (2)、IIT Delhi (1)、NIT Rourkela (1)、Anhui Sci & Technol Univ (1)、Chosun Univ (1) 和 Islamic Azad Univ (1)，篇均被引频次排在前三的机构分别为 IIT Delhi (19)、NIT Rourkela (19) 和 Chosun Univ (13)，见表 1.2.2。在发文机构中，

IIT Delhi 和 NIT Rourkela 存在合作，见图 1.2.2。施引核心论文发文量排在前三的国家 / 地区分别为中国（41）、伊朗（8）和印度（4），见表 1.2.3。施引核心论文的主要产出机构分别为 Harbin Engn Univ (12)、Shanghai Jiao Tong Univ (10) 和 Dalian Maritime Univ (10)，见表 1.2.4。

### 1.2.2 多智能体系统的一致性控制

多智能体系统的一致性控制是指设计一致性协

议使得各智能体之间通过局部信息交互，实现所有智能体的目标状态值一致。一致性控制研究主要可以分为三个方面：智能体动力学复杂度、通信拓扑复杂度以及网络信息传输复杂度。除了理论研究外，多智能体系统一致性研究也陆续地被应用到工业多机器人群体协同、无人机 / 艇编队控制、人类群体行为调控疏导、无线传感网络优化等领域。

#### (1) 智能体动力学复杂度

智能体不同的动力学特性给多智能体系统的一

表 1.2.1 “自主水下航行器的自适应跟踪”工程研究前沿中核心论文的主要产出国 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	3	50.00%	33	44.00%	11.00
2	India	1	16.67%	19	25.33%	19.00
3	South Korea	1	16.67%	13	17.33%	13.00
4	Iran	1	16.67%	10	13.33%	10.00

表 1.2.2 “自主水下航行器的自适应跟踪”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Dalian Maritime Univ	2	33.33%	21	28.00%	10.50
2	IIT Delhi	1	16.67%	19	25.33%	19.00
3	NIT Rourkela	1	16.67%	19	25.33%	19.00
4	Anhui Sci & Technol Univ	1	16.67%	12	16.00%	12.00
5	Chosun Univ	1	16.67%	13	17.33%	13.00
6	Islamic Azad Univ	1	16.67%	10	13.33%	10.00

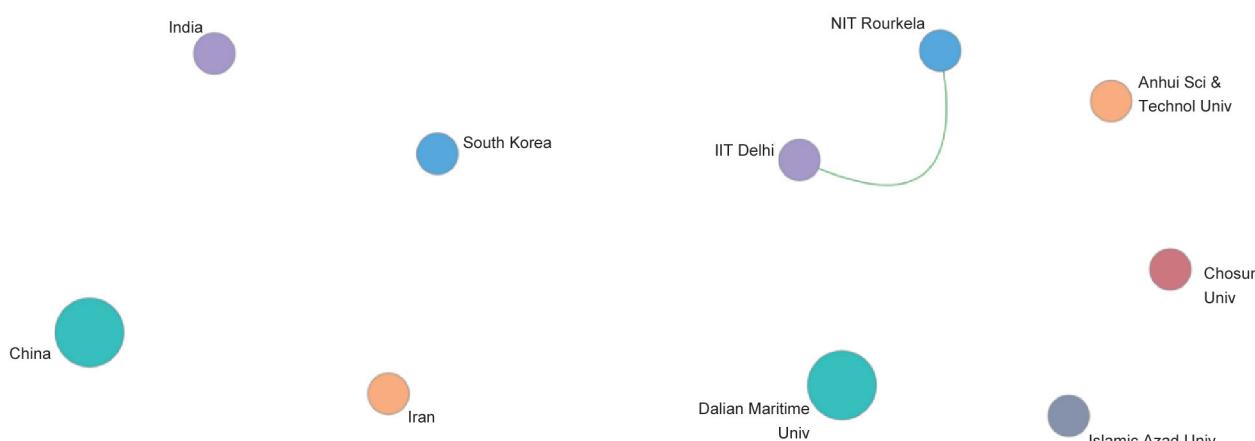


图 1.2.1 “自主水下航行器的自适应跟踪”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

图 1.2.2 “自主水下航行器的自适应跟踪”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “自主水下航行器的自适应跟踪”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	41	62.12%	2016.5
2	Iran	8	12.12%	2016.3
3	India	4	6.06%	2016.5
4	UK	3	4.55%	2015.7
5	South Korea	3	4.55%	2017.0
6	USA	2	3.03%	2017.0
7	Canada	2	3.03%	2017.0
8	Italy	1	1.52%	2015.0
9	Portugal	1	1.52%	2016.0
10	Malaysia	1	1.52%	2016.0

表 1.2.4 “自主水下航行器的自适应跟踪”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Harbin Engn Univ	12	23.53%	2016.50
2	Shanghai Jiao Tong Univ	10	19.61%	2016.70
3	Dalian Maritime Univ	10	19.61%	2017.30
4	Islamic Azad Univ	6	11.76%	2016.17
5	Minist Educ China	3	5.88%	2017.67
6	Northwestern Polytech Univ	2	3.92%	2015.50
7	Ocean Univ China	2	3.92%	2015.50
8	Dalian Univ Technol	2	3.92%	2015.50
9	Natl Inst Technol Rourkela	2	3.92%	2016.50
10	Amirkabir Univ Technol	2	3.92%	2016.50

致性研究带来不同程度的难度。在已有的研究中，同构多智能体系统的研究比较多。近些年来，对于异构多智能体系统的一致性研究越来越多，研究的目标主要是使得所有智能体的输出同步。这里的一致性分析通常包含两个方面：设计一个分布式同构参考多智能体系统并完成其一致性控制；设计输出调节控制器实现每个智能体输出跟踪设计的参考系统。考虑到网络中传输的信息类型，如果网络中传输的是参考多智能体系统的信息，这两个方面可以看作两个相互独立的过程；如果网络中传输的信息只有智能体的输出，这两个方

面是耦合的，需要同步进行，一致性分析将会更加复杂。

## (2) 通信拓扑复杂度

通信拓扑描述了智能体之间的信息交互关系。通信拓扑可以抽象成图，从而可以引入代数图论知识进行相关的分析。按照拓扑是否随时间变化，可以分为固定拓扑和时变拓扑。固定拓扑下多智能体系统的一致性研究已经相对成熟，而时变拓扑下的致性研究尚有一些难题还未解决，研究内容也更丰富。其中联合连通是目前时变拓扑中最弱的一种假设，针对不同类型动力学的多智能体系统，目前

的研究通常对联合连通拓扑添加另外的假设条件，在静态或动态协同控制律下实现一致性，因此还需要进一步的研究。

### (3) 网络信息传输复杂度

多智能体系统的一致性依赖于智能体之间的信息交互。有交互的智能体需要将与自身相关的信息在网络中进行传输。考虑到在实际应用中，信息的传输是不连续的，因此出现了很多设计采样协同控制器实现一致性的研究工作。为了降低网络传输压力以及提高网络通信效率，近些年来很多工作集中于进行事件驱动策略下的一致性控制问题研究。基于事件驱动控制的一个难点在于分析 zeno 现象，特别是对于非线性多智能体系统，目前的研究还存在较大的局限，需要更多的探索。

“多智能体系统的一致性控制”工程研究前沿中核心论文发文量排在前三的国家/地区分别为中国(10)、美国(8)和意大利(3)，篇均被引频次排在前三的国家/地区为澳大利亚(549)、美国(95.13)和中国(82.9)，见表1.2.5。在发文量Top10国家/地区中，中国和美国、荷兰和俄罗斯合作较多，见图1.2.3。核心论文发文量排在前三的机构分别为Chinese Acad Sci(6)、Univ Calif Riverside(4)、Catholic Univ Louvain

(2)、Univ Illinois(2)、Huazhong Univ Sci & Technol(2)、Univ Groningen(2)和Beijing Inst Control Engn(2)，篇均被引频次排在前三的机构分别为City Univ Hong Kong(549)、RMIT Univ(549)和Southeast Univ(549)，见表1.2.6。在发文量Top10机构中，Chinese Acad Sci、Univ Calif Riverside和Beijing Inst Control Engn间合作较多，见图1.2.4。施引核心论文发文量排在前三的国家/地区分别为中国(597)、美国(181)和澳大利亚(75)，见表1.2.7。施引核心论文的主要产出机构分别为Chinese Acad Sci(63)、Southeast Univ(51)和Univ Illinois(34)，见表1.2.8。

### 1.2.3 机械手的自适应神经网络控制

机械手是典型的非线性、时变系统，具有受限的关节空间与任务空间，存在系统建模误差、高频特性、关节摩擦以及信号检测误差等不确定性因素，系统的动态性能很难用精准的数学模型表示出来，这些客观因素会导致机械手的控制系统性能变差，以致常规的反馈控制技术，如鲁棒控制、计算力矩法、独立关节的PID控制、变结构控制和自适应控制等，都不能很好满足控制的要求。近年来，研究

表1.2.5 “多智能体系统的一致性控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	10	55.56%	829	69.26%	82.90
2	USA	8	44.44%	761	63.58%	95.13
3	Italy	3	16.67%	211	17.63%	70.33
4	Belgium	2	11.11%	76	6.35%	38.00
5	The Netherlands	2	11.11%	34	2.84%	17.00
6	Russia	2	11.11%	34	2.84%	17.00
7	Australia	1	5.56%	549	45.86%	549.00
8	Sweden	1	5.56%	25	2.09%	25.00
9	France	1	5.56%	6	0.50%	6.00
10	Saudi Arabia	1	5.56%	28	2.34%	28.00

表 1.2.6 “多智能体系统的一致性控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Chinese Acad Sci	6	33.33%	239	19.97%	39.83
2	Univ Calif Riverside	4	22.22%	634	52.97%	158.50
3	Catholic Univ Louvain	2	11.11%	76	6.35%	38.00
4	Univ Illinois	2	11.11%	52	4.34%	26.00
5	Huazhong Univ Sci & Technol	2	11.11%	48	4.01%	24.00
6	Univ Groningen	2	11.11%	34	2.84%	17.00
7	Beijing Inst Control Engn	2	11.11%	43	3.59%	21.50
8	City Univ Hong Kong	1	5.56%	549	45.86%	549.00
9	RMIT Univ	1	5.56%	549	45.86%	549.00
10	Southeast Univ	1	5.56%	549	45.86%	549.00

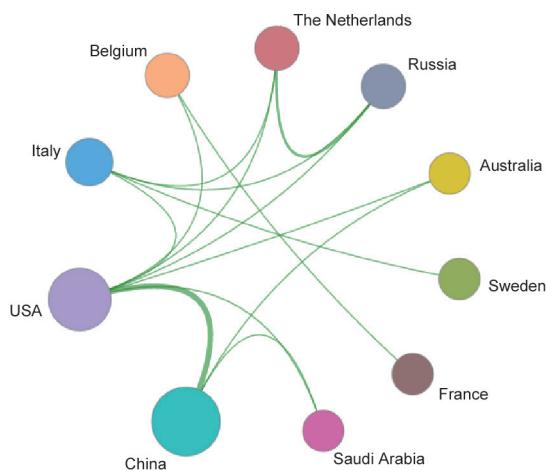


图 1.2.3 “多智能体系统的一致性控制”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

人员利用神经网络所具有一致逼近能力、并行分布式处理、学习以及自适应能力、故障容错能力以及易于硬件实现的结构等特性，开展了非线性系统的控制与辨识研究工作，取得积极的研究结果，为解决机械手建模与控制所遇到的不确定性问题提供了有效的途径。

要实现一个稳定的神经网络控制系统，神经网络在投入到闭环系统之前需要经过充分的离线训练。早期关于神经网络控制的研究主要侧重于仿真和具体实验特例分析，缺乏关于闭环神经网络控制系统稳定性、鲁棒性以及收敛等方面的研究。

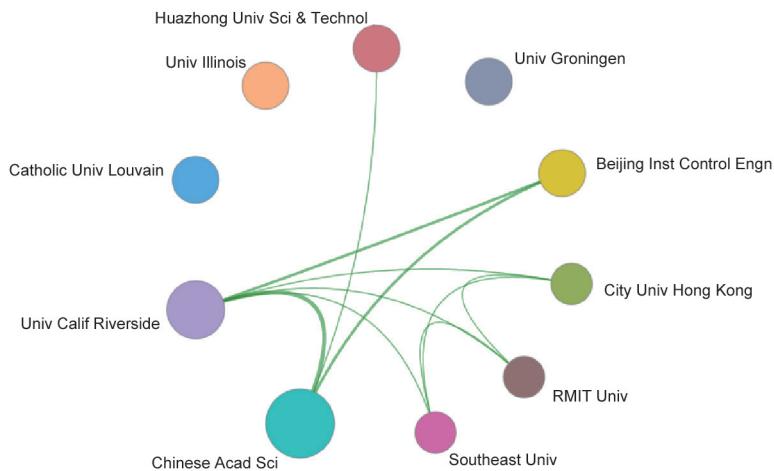


图 1.2.4 “多智能体系统的一致性控制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

## 第二部分 领域报告：机械与运载工程

表 1.2.7 “多智能体系统的一致性控制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	597	54.82%	2015.7
2	USA	181	16.62%	2015.7
3	Australia	75	6.89%	2015.9
4	Singapore	40	3.67%	2015.7
5	Italy	38	3.49%	2015.4
6	The Netherlands	35	3.21%	2015.7
7	Sweden	35	3.21%	2015.7
8	UK	34	3.12%	2015.5
9	France	30	2.75%	2015.8
10	Russia	24	2.20%	2015.6

表 1.2.8 “多智能体系统的一致性控制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	63	19.03%	2015.30
2	Southeast Univ	51	15.41%	2015.39
3	Univ Illinois	34	10.27%	2015.44
4	Nanyang Technol Univ	31	9.37%	2015.81
5	Peking Univ	28	8.46%	2015.46
6	Australian Natl Univ	27	8.16%	2016.19
7	City Univ Hong Kong	25	7.55%	2015.56
8	Shanghai Jiao Tong Univ	25	7.55%	2015.80
9	Huazhong Univ Sci & Technol	24	7.25%	2015.38
10	Univ Elect Sci & Technol China	23	6.95%	2015.30

析，其难点主要在于函数逼近时所采用的非线性参数网络。当初始神经网络权重的选取足够接近于理想权重时，神经网络控制能够保证闭环系统的稳定性与收敛。为了避免离线训练学习这个步骤，诸多基于 Lyapunov 稳定性理论的神经网络控制方法被研究人员相继提出，其最大的优点在于神经网络权重的自适应律是通过 Lyapunov 分析法得到的，在保证闭环系统稳定性的同时不需要离线训练。

尽管自适应神经网络控制已经取得了重大突破和进展，并在机械手的运动轨迹控制方面得到了应用，但其并不能完全解决机械手建模误差和外界干

扰等带来的不确定性问题。近年来，基于知识规则和学习推理的智能控制算法，如模糊控制、学习控制、专家控制和遗传算法、粒子群寻优算法等得到广泛的研究，它们在处理系统不确定性方面具有各自的优势。尽管如此，不同的控制理论与方法在具有相应优点的同时又存在弊端，很难通过某一种方法达到理想的控制效果。为此往往需要将多种控制方法相融合、取长补短、有机结合，进而形成一种新的控制方法，这一策略已成为当今机器人控制的研究前沿，以模糊神经网络控制、神经网络鲁棒控制、模糊滑模变结构控制以及鲁棒自适应控制等为代表的混合方法已经在机械手的控制方法研究中得

到发展和应用。

“机械手的自适应神经网络控制”工程研究前沿中核心论文的发文国家 / 地区为中国(3) , 篇均被引频次为 125.33 , 见表 1.2.9。核心论文的发文机构分别为 Univ Elect Sci & Technol China (3) 、 Univ Sci & Technol Beijing(2) 和 Southeast Univ(1) , 篇均被引频次排在前三的机构分别为 Southeast Univ (138) 、 Univ Elect Sci & Technol China (125) 和 Univ Sci & Technol Beijing (119) , 见表 1.2.10。在发文机构中 , Univ Elect Sci & Technol China 和 Univ Sci & Technol Beijing 合作较多 , 见图 1.2.5。施引核心论文发文量排在前三的国家 / 地区分别为中国(216)、英国(27)和美国(17) , 见表 1.2.11。施引核心论文的主要产出机构分别为 Univ Sci & Technol Beijing (46) 、 Univ Elect Sci & Technol

China (34) 和 South China Univ Technol (31) , 见表 1.2.12。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

机械与运载工程领域的 Top10 工程开发前沿涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向 (见表 2.1.1)。其中 , “MEMS 传感器”“燃气轮机”“海洋探测与定位技术”“无人汽车的自主控制”“海上通信、导航与定位技术”“新一代图像显示技术”“飞行器起降与飞行”和“新型发动机技术”是传统研究的深入 , “船舶新型推进系统”和“无人机”

表 1.2.9 “机械手的自适应神经网络控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	3	100.00%	376	100.00%	125.33

表 1.2.10 “机械手的自适应神经网络控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Elect Sci & Technol China	3	100.00%	376	100.00%	125.33
2	Univ Sci & Technol Beijing	2	66.67%	238	63.30%	119.00
3	Southeast Univ	1	33.33%	138	36.70%	138.00

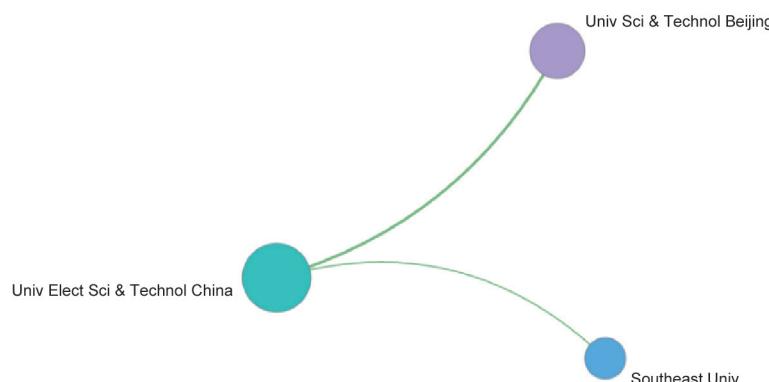


图 1.2.5 “机械手的自适应神经网络控制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

## 第二部分 领域报告：机械与运载工程

表 1.2.11 “机械手的自适应神经网络控制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	216	68.14%	2016.8
2	UK	27	8.52%	2016.9
3	USA	17	5.36%	2016.8
4	Singapore	16	5.05%	2016.7
5	Canada	9	2.84%	2016.9
6	Iran	9	2.84%	2017.1
7	Japan	8	2.52%	2016.5
8	Australia	7	2.21%	2017.0
9	India	5	1.58%	2017.0
10	South Korea	3	0.95%	2016.7

表 1.2.12 “机械手的自适应神经网络控制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Sci & Technol Beijing	46	21.00%	2016.57
2	Univ Elect Sci & Technol China	34	15.53%	2016.50
3	South China Univ Technol	31	14.16%	2016.97
4	Liaoning Univ Technol	19	8.68%	2016.74
5	Chinese Acad Sci	17	7.76%	2016.76
6	Southeast Univ	15	6.85%	2016.73
7	Harbin Inst Technol	15	6.85%	2016.93
8	Natl Univ Singapore	14	6.39%	2016.71
9	Northwestern Polytech Univ	14	6.39%	2016.86
10	Swansea Univ	14	6.39%	2017.00

是新兴前沿。上述各个前沿所涉及的自 2012 年至 2017 年的逐年核心专利公开量见表 2.1.2，“无人机”是近年来论文发表增速最显著的方向。

### (1) MEMS 传感器

微机电系统 (MEMS) 传感器是采用微机械加工技术制造的新型传感器，是 MEMS 器件的一个重要分支。一直是各国大力发展的核心和前沿技术。近年来，智能装备与系统的快速发展再次引起研究机构对新型高性能 MEMS 传感器的高度重视。MEMS 传感器的门类品种繁多，按照被测量可分为加速度、压力、位移、流量、电磁场、图像、温度、

气体成分以及离子浓度等类型传感器。作为获取信息的关键器件，MEMS 传感器对各种传感装备的微型化发展起着巨大的推动作用，已在航空航天、汽车工业、生物医学及消费电子产品等领域得到广泛应用。目前，随着纳米材料、生物材料、智能材料等新材料的引入以及纳米制造技术的不断进步，MEMS 传感器正向高精度、高可靠性、多功能集成化、智能化和微功耗方向快速发展。此外，物联网技术的兴起使无线 MEMS 传感器的需求急剧增加，电源已成为关键点。利用能量收集芯片将太阳能、风能、振动能、热能等转化为电能驱动无线传

表 2.1.1 机械领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	MEMS 传感器	227	5716	25.18	2013.16
2	船舶新型推进系统	152	884	5.82	2014.56
3	无人机	460	12880	28.00	2014.76
4	燃气轮机	265	3870	14.60	2013.45
5	海洋探测与定位技术	191	1567	8.20	2013.75
6	无人汽车的自主控制	70	1591	22.73	2014.19
7	海上通信、导航与定位技术	175	1857	10.61	2013.81
8	新一代图像显示技术	202	2626	13.00	2013.68
9	飞行器起降与飞行	99	955	9.65	2013.67
10	新型发动机技术	200	6400	32.00	2013.52

表 2.1.2 机械领域 Top10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	MEMS 传感器	82	81	29	21	9	5
2	船舶新型推进系统	22	25	33	19	24	29
3	无人机	55	63	54	102	138	48
4	燃气轮机	76	82	46	43	10	8
5	海洋探测与定位技术	47	46	40	31	19	8
6	无人汽车的自主控制	11	11	21	14	7	6
7	海上通信、导航与定位技术	39	54	33	17	15	17
8	新一代图像显示技术	49	50	48	32	17	6
9	飞行器起降与飞行	27	19	26	15	11	1
10	新型发动机技术	67	35	53	29	4	12

感模块，实现 MEMS 传感器的无源化将成为重要发展趋势。

## (2) 船舶新型推进系统

目前，“原动机 – 传动系统 – 螺旋桨”是军船和商船应用最广泛的推进模式，这种模式虽然具有动力大、设计方法和制造工艺成熟等优点，但随着船舶的发展，它也暴露出诸多弊端，例如大型船舶的船体与推进轴系存在复杂的耦合振动，水下航行器多方向性和机动性不足，未来水 – 路 – 空三栖航行器需要适应多环境的推进器，推进轴系的振动和噪声更是制约潜艇隐身能力的世界性难题。在此背

景下，发展高效、可靠的船舶新型推进系统是当今国内外研究前沿和难点。新型推进系统具有集成、仿生、高效和智能等特征。首先，多采用电机为动力，围绕电机效率和功率密度提升，感应电机、开关磁阻电机、永磁电机和超导电机等先后被论证，低速电机结构拓扑优化、水环境适应性和高精度控制是研究重点；新型过流部件也是新型推进系统效率提升的关键，例如对转螺旋桨、泵喷导管 – 叶轮 – 导叶、无轴推进器的内桨叶等，特殊过流结构导致复杂的耦合流动以及非定常流动，尚缺乏相应的流场描述和设计理论支持；高承载、长寿命轴承技术

是新型推进系统的关键保障技术，针对低速、重载和泥沙环境开发轴承新材料和新结构是关键；新型推进系统的智能控制技术也是未来研究重点，除了实现推进系统自身的电机转速、仿生结构运动和矢量运动等控制，还涉及“推进装置—船舶”系统的运行控制。

### (3) 无人机

无人机通常通过固定翼或旋翼方式产生升力保持其在空中运动。经过近几年的快速发展，人们的研究兴趣从简单平台设计和应用技术逐步转向多机平台系统和复杂功能技术。异构无人机群协同作业技术是目前十分有吸引力且极具挑战性的一个研究方向。异构无人机群是一个复杂的多智能体模型，既包含固定翼也包含旋翼，同时飞机的重量也可以相差比较大，不能把集群中的无人机作为刚体考虑，其气动弹性对集群产生的影响也必须在多智能体模型中体现。为了降低能耗、提高飞行效率和飞行可靠性，必须考虑协同飞行中无人机之间的气动干涉，因而催生了航迹优化、自主导航控制、防碰撞和智能避障的技术需求。此外，针对特殊场合的使用需求产生了一些新的开发前沿，例如便于运输或发射的机翼可折叠无人机，可垂直起降的可倾转旋翼无人机技术，以及为物流设计的无人飞行汽车技术，这些都是无人机技术的发展前沿。

### (4) 燃气轮机

燃气轮机常用于船舶（军用舰艇为主）、车辆（坦克、工程车辆等大型载具）、发电机组等。近年来，针对燃气轮机的研究前沿主要集中在通过改进燃烧室的结构和燃烧技术实现高效低排，以及结合先进智能检测算法和传感器技术实现实时的状态检测和故障诊断。随着环保要求的不断增强，高效低排成为评判燃气轮机先进性的重要性能指标之一。通过优化改进燃烧室冷却结构设计，增加结构紧凑、换热效率高的轻质间冷回热循环系统能够有效地提高发动机性能。然而，复杂的结构体系以及增加

的部件导致发动机质量、制造和维护成本大幅提升，这些技术瓶颈都是目前燃气轮机实现高效低排的挑战。作为一个典型的复杂机械系统，燃气轮机结构形式复杂、工作状况恶劣、易发生各种机械故障。发动机的气路部件的失效、旋转部件的振动和摩擦副的磨损等各类故障均严重影响其运行的安全性、可靠性和高效性。燃气轮机复杂系统的状态诊断问题极具挑战性，由于强烈非线性、非平稳性、不确定性等复杂系统特征，基于传统经典数学理论建模求解十分困难。近年来得到快速发展的神经网络、遗传算法、专家系统等智能算法为解决此类问题提供了新的解决思路，有望实现通过有限参数的故障检测，高效的实现定位、定性及定因。

### (5) 海洋探测与定位技术

海洋蕴藏着丰富的自然资源，同时海洋也是开展地地质学研究的巨大场地。近年来，海洋因其经济上的巨大潜力和战略上的重要地位越来越被人们重视。海洋探测是获取海洋环境、资源、能源、权益信息的重要手段。随着海洋事业的发展，探测技术手段不断更新换代，为高精度的海洋探测提供了技术保证，高精度导航定位是实现海洋高精度探测的基础。要实现高精度的导航定位，不仅需要对母船进行精确导航定位，同时还要实现对水下探测系统的精确导航定位。常用的海洋探测与定位技术有拖曳声纳、天波雷达、天线阵列、陀螺仪等。装备拖曳声纳的舰艇可以保证在对周边水下环境保持掌握的同时维持一定的巡逻速度；天波雷达具有远程探测能力，可以实现对800~3500 km范围内的海面特性、海下目标及海面上空目标进行探测；利用天线阵列可以对海洋盐度等参数进行探测；由陀螺仪组成的惯性导航系统可以实时测量当前载体的三维姿态。由于单一探测与定位系统存在一定的缺陷，使得其通常不能单独进行探测与定位，现在更多地使用组合系统，它集中了多种探测与定位系统的优点，是未来的发展趋势。

## (6) 无人汽车的自主控制

汽车智能化技术简化了汽车的驾驶操作并提高了行驶安全性，正逐步得到广泛应用。其中最典型也是最热门的未来应用就是无人驾驶汽车。无人汽车自主控制通过人工智能技术、雷达、数学计算、监控设备与导航系统协作，实现无人驾驶。目前，无人汽车自主控制的开发前沿主要包括高精度定位、导航、环境感知、避障、自动泊车系统等。无人驾驶汽车产业化的瓶颈问题主要有技术难题、成本、驾驶行为以及法律法规等。实现无人驾驶汽车的量产必须经历驾驶员辅助、半自动驾驶、高度自动驾驶和完全自动驾驶四个阶段。尽管目前无人驾驶汽车产业仍存在各种问题，但无人驾驶汽车实质上是建立在汽车主动安全技术、智能化技术逐步升级的基础上的，只要市场对这些技术有持续的需求，就能推动汽车向完全无人化自主控制演进。

## (7) 海上通信、导航与定位技术

随着船舶趋于大型化、高速化，以及海上交通密度与船舶装载量的不断增加，海上交通事故与经济损失呈增长趋势，航运安全与海洋生态开始逐渐受到威胁。海上通信、导航与定位技术在航海事业中扮演着重要角色，为海上军事、海上运输业、海上旅游业、沿海渔业等快速、安全发展提供了有力保障。作为海上通信的一部分，海上导航与定位技术主要来自于美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 GALILEO 和中国的北斗卫星导航四大系统，其中，导航定位的精确度、响应速度、可靠性以及通信定位的稳定性、安全性是此项技术的主要发展方向。此外，海上通信技术还包含海上无线通信系统、海洋卫星通信系统、岸基移动通信系统、集成海洋通信系统等，现阶段依然存在覆盖范围小、传输效率低、受环境影响的通信可靠性差、通信成本高等问题。近年来，5G 移动通信、三路径海洋信道模型、微波散射等技术使海上通信效率、通信质量及通信距离等实现了明显的改善。建设覆盖范围

广、传输距离远、通信速率与可靠性高、价格低廉的海上通信技术的长期发展方向。

## (8) 新一代图像显示技术

人类所获得的信息有 80% 来自视觉，成像、图像处理及图像显示在工业、医疗、航空航天、军事等重要领域有着广泛的应用。新一代图像显示技术的前沿包括红外成像技术，全彩夜视技术，三维图像显示等。红外成像探测系统将以多谱段、多体制、多模式、偏振成像、分布式网络化、多传感器数据融合等技术为手段，以快速获取并发掘利用各种目标的多维动态信息并更准确地识别、跟踪为目标，进入高分辨、大视场、多维以及多传感器协同工作的新阶段。全彩夜视能还原夜晚景物的真实色彩，克服传统夜视成像技术无彩色，亮度暗，对比度差等缺陷，目前国内外研究主要基于图像融合、颜色转换等方法实现全彩夜视。三维显示技术能展现物体的深度感、层次感、空间位置等信息，使人获取与现实事物一致的三维信息，包括体三维显示、全息三维显示和集成成像三维显示等。三维显示技术是当今国际信息电子产业的最前沿研究方向之一，而光电子产业的迅猛发展也必将推动三维显示技术的产业化进程。

## (9) 飞行器起降与飞行

飞行器广泛应用于交通运输、勘探测量和军事侦察等领域。目前飞行器技术的开发前沿包括飞行器的垂直起降和飞行控制两方面的内容，前者包括飞行器的低空、低速性能，以及垂直起降和悬停功能；后者包括飞行器的自主控制，其中涉及到飞行器本体设计、环境感知、地图、定位、导航和避障多方面技术。近年来，飞行器的发展方向集中在无人飞行器方面，即实现飞行器自主控制的智能化形态，提高飞行器的自主性、适应性和稳定性；并实现多飞行器间的协同侦察、协同跟踪与碰撞预警，构成多机集群系统。飞行器的飞行管理系统需要针对环境信息的多边性以及任务的多样性，进行飞行器的轨迹规划和动作部署，实现单个飞行器的路径

和姿态的实时控制以及多个飞行器的集群控制。此外，为了适应多种任务环境的切换，飞行器外形的可变构型设计、长航时动力系统、高抗干扰多模态控制、高速高精度轨迹跟踪自适应控制以及运动过程中的障碍物检测、预测和避障技术等也是飞行器技术未来的发展趋势。

### (10) 新型发动机技术

发动机是借助工质的状态变化将燃料燃烧产生的热能转变为机械能，从而为系统提供动力的装置，决定着系统的动力性、经济性、稳定性和环保性。近年来，发动机在新型技术的驱使下不断向高效能、低油耗和少污染方向发展。发动机直喷技术优化了进气混合效率，在高效节油同时实现大功率输出；可变气门正时技术能够满足发动机高速功率和低速转矩的要求；发动机增压技术能够在整个转速范围内提高燃烧效率，节约燃油并改善排放；废气再循环技术大幅度减少了机械损失和泵机损失的同时降低了排放；可变水泵技术能够根据温度自动改变泵入发动机缸体处的冷却液流量，满足发动机在不同工作状态下的冷却需求并减少了能耗。研发提升发动机动力性能、降低油耗和减少污染的新型发动机技术仍是发动机领域的工程开发前沿。迫于环保和节能的需求，小型化和轻量化也已成为发动机发展的主要趋势之一。此外，融合传感和大数据分析技术实现发动机的健康监测也成为提高发动机可靠性的前沿技术。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 MEMS 传感器

微机电系统（MEMS）是集微传感器、微执行器、微机械结构、微能源、信号处理和控制电路、接口、通信等于一体的微型器件或系统，广泛应用于高新技术产业，是一项关系到国家的科技发展、经济繁荣和国防安全的关键技术。MEMS 传感器是 MEMS 器件的一个重要分支。1962 年，第一个硅

微型压力传感器的问世开创了 MEMS 技术的先河。2000 年至今，在声学、光学、生物和能源等领域出现了形形色色的微传感器件。MEMS 传感器门类品种繁多，按其工作原理可分为物理型、化学型和生物型三类。按照被测量可分为加速度、压力、位移、流量、电磁场、图像、温度、气体成分以及离子浓度等类型的传感器。MEMS 传感器不仅种类繁多，而且用途广泛。作为获取信息的关键器件，MEMS 传感器对各种传感装备的微型化发展起着巨大的推动作用，已在航空航天、汽车工业、生物医学及消费电子产品等领域得到了广泛的应用。

近年来，在市场引导、科技推动、风险投资和政府介入等多重作用下，MEMS 传感器技术发展迅速，新原理、新材料和新技术的研究不断深入，MEMS 传感器的新产品不断涌现。目前，MEMS 传感器正向高精度、高可靠性、多功能集成化、智能化、微型化和微功耗方向发展。借助新型材料，如 SiC、蓝宝石、金刚石及 SOI，开发出的各种新型高可靠 MEMS 传感器，具有耐高温、耐腐蚀和防辐射等性能。纳米管、纳米线、纳米光纤、光导、超导和智能材料也将成为制作 MEMS 传感器的材料。新的 MEMS 制作和组装技术使 MEMS 传感器体积更小、功耗更低且性能更高，具有耐振动和抗冲击的能力。利用专门的集成设计和工艺能够将敏感元件和电路元件制作在同一芯片上，完成信号检测和信号处理，构成功能强大的智能传感器，满足传感器微型化和集成化的要求。传感器集成化是实现传感器小型化、智能化和多功能的重要保证。MEMS 传感器一直是研究的前沿和重点，是各国大力发展的核心和前沿技术，引起了各国研究机构、大学和公司的高度重视。美、德、日等世界大国将 MEMS 传感器技术作为战略性的研究领域之一，纷纷制定发展计划并投入巨资进行专项研究，已显示出明显的领先优势。国内的一些高校和研究机构已着手 MEMS 传感器技术的开发和研究，但在灵敏度、可靠性及新技术

能力提升方面与国外相比还存在较大差距。许多 MEMS 传感器品种尚未具备批量生产的能力，离产品的实用化和产业化还很远，有待于进一步提高和完善。

“MEMS 传感器”工程开发前沿中核心专利公开量排在前三位的国家/地区分别为美国(105)、德国(34)和日本(32)，篇均被引频次排在前三位的国家/地区分别为加拿大(44.5)、荷兰(30.33)和美国(27.15)，见表 2.2.1。在公开

量 Top10 国家 / 地区中，美国和中国、法国均有合作，见图 2.2.1。核心专利公开量排在前三位的机构分别为 BOSC(17)、FAID(17) 和 INFN(11)，见表 2.2.2。在公开量 Top10 机构中，FAID 和 Shortcut Semiconductor Suzhou Co Ltd 合作较多，见图 2.2.2。我国公开的与“MEMS 传感器”工程开发前沿相关的核心专利有 19 项，公开较多的大陆机构为 Shortcut Semiconductor Suzhou Co Ltd。

表 2.2.1 “MEMS 传感器”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	105	46.26%	2851	49.88%	27.15
2	Germany	34	14.98%	808	14.14%	23.76
3	Japan	32	14.10%	822	14.38%	25.69
4	China	19	8.37%	371	6.49%	19.53
5	France	6	2.64%	125	2.19%	20.83
6	South Korea	6	2.64%	94	1.64%	15.67
7	Taiwan of China	4	1.76%	82	1.43%	20.50
8	Italy	3	1.32%	51	0.89%	17.00
9	The Netherlands	3	1.32%	91	1.59%	30.33
10	Canada	2	0.88%	89	1.56%	44.50

表 2.2.2 “MEMS 传感器”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	BOSC	17	7.49%	385	6.74%	22.65
2	FAID	17	7.49%	475	8.31%	27.94
3	INFN	11	4.85%	248	4.34%	22.55
4	TOKE	7	3.08%	182	3.18%	26.00
5	FRSE	6	2.64%	170	2.97%	28.33
6	HONE	6	2.64%	123	2.15%	20.50
7	ROEC	6	2.64%	141	2.47%	23.50
8	SHIH	6	2.64%	152	2.66%	25.33
9	SHOR	5	2.20%	121	2.12%	24.20
10	SMSU	5	2.20%	78	1.36%	15.60

注：BOSC 表示 Robert Bosch GmbH；FAID 表示 Fairchild Semiconductor Corporation；INFN 表示 Infineon Technologies AG；TOKE 表示 Kabushiki Kaisha Toshiba；FRSE 表示 Freescale Semiconductor Inc.；HONE 表示 Honeywell International Inc.；ROEC 表示 Rosemount Aerospace Inc.；SHIH 表示 Seiko Epson Corporation；SHOR 表示 Shortcut Semiconductor Suzhou Co. Ltd.；SMSU 表示 Samsung Electronics Co. Ltd.

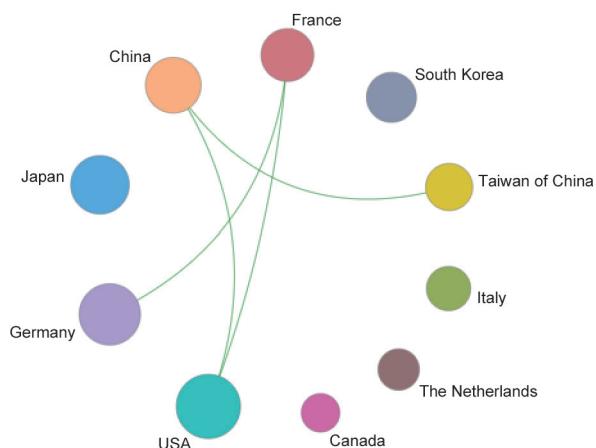


图 2.2.1 “MEMS 传感器”工程开发前沿主要产出国家 / 地区间的合作网络

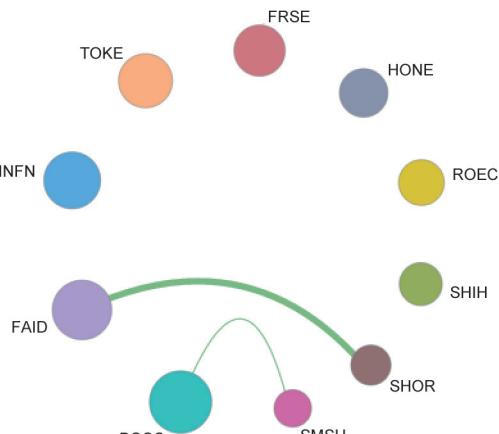


图 2.2.2 “MEMS 传感器”工程开发前沿主要产出机构间的合作网络

### 2.2.2 船舶新型推进系统

#### (1) 仿生推进系统

仿生推进在推进效率、适应特殊环境等方面具有明显优势，因此，开发仿生推进技术，是发展高性能水下航行器的重要内容之一。国内外在仿鱼类波动推进和仿生喷射推进方面展开了相关研究。其中对鱼类波动推进的研究集中在游动推进机制研究、鱼类仿生学实验研究；对鱼类仿生喷射推进模式的研究则是分析水母的推进机制和运动模式，并设计推进装置的驱动机构。同时也有将波动推进和喷射推进模式进行有机复合的多尾鳍协调推进方式。此外，还有基于升力拍翼运动的仿海龟式推进、仿鸭蹼式推进等新型推进机构。研制高效率、高机动性、低噪声、环境适应性强的推进机构，并采取有效、节能的方式驱动是仿生推进系统的技术难点所在。

#### (2) 机器鱼

仿生机器鱼的推进模式和体型具有隐蔽性，且机动性好、速度快、推进效率高、噪声低，在水下侦查追踪、海底探测、水质监测等一些特殊场合，有着传统螺旋桨推动器难以比拟的优势。依据所模仿鱼类游动产生推进力的身体部位，仿生机器鱼可分为依靠身体和 / 或尾鳍推进 (BCF) 模式以及中鳍和 / 或对鳍推进 (MPF) 模式。BCF 模式适用于大多数鱼类，而采用 MPF 模式的鱼类具有

较好的机动性、较高的稳定性和较强的抗干扰能力，是未来机器鱼研究领域的前沿。机器鱼的研究重点包括：提高机器鱼的游速和推进效率；

提高机器鱼的灵活性和机动性；快速上浮和下潜能力；机器鱼的智能控制算法；负载和续航能力，其设计和研制是机、光、电、自动控制、材料技术、密封技术和流体力学等多个学科的融合。

#### (3) 矢量推进系统

矢量推进系统采用推力矢量技术，通过直接改变推力方向来提供所需要的俯仰力和力矩、偏航力和力矩，代替船体操舵方式来提供操纵力，具有节省空间、摆动灵活等优点。从实现矢量推进的功能看，目前出现了多种方案，包括多推进器协作方案、机械导流板式矢量喷水推进方案、直翼推进方案和矢量螺旋桨推进方案。其中矢量螺旋桨推进方案的研究最多，先后出现了齿轮机构、连杆机构、球面并联机构、丝杠螺母机构和液压机构等机构方案。在大推力工况下，提高矢量机构的刚度、控制精度和耐海水腐蚀磨损的能力，减小其航行阻力等是研究重点。建立船舶 – 矢量推进器 – 流体系统动力学模型，提出运动 – 力 – 能量系统多目标、多变量协同设计方法和可靠的运动控制技术，是未来发展方向。

#### (4) 电力推进系统

船舶电力推进系统的主要特征是利用船舶综合电站向全船提供推进动力、辅机和日用电力，完成船舶机动和相关任务的完整系统，具有较高的综合经济性、可靠性，可以提高有效舱容面积和操作性。船舶电力推进系统的技术发展主要集中在：推进装置的高效化、电能来源的绿色化和控制系统智能化。目前常用的电力推进器为吊舱推进器和全回转推进器，其中吊舱推进器集成度更高，实现了电能到机械能的同轴转化，但大功率吊舱推进器也面临着吊舱附体阻力大、轴承温升高和密封失效等难题。采用电机与螺旋桨一体化设计的无轴轮缘推进系统，功率密度高和噪声低，已成为新一代电力推进器的研究前沿。电能来源主要有柴油发电机组、动力电池、岸基电源、燃料电池和太阳能等，新型高效热能发电系统也具有广阔的发展前景。

#### (5) 两栖机器人可变形推进系统

两栖机器人的可变形推进系统通过综合多种常规推进方式，利用构型变换和运动模式自主切换实现其水中和陆地两栖环境下较高的机动性和环境适应性。利用模块化结构改变自身的构型，基于仿生学原理，实现模拟自然界生物的水中游动步态和陆地运动。按两栖机器人行走机构来区分，目前的两栖机器人可分为球形、腿式、轮桨一体和蛇形等几种。国内外围绕两栖机器人推进机构开展了探索性研究，并取得了一定的进展，但速度、机动性、地

形适应性等服役性能相对较差，两栖活动能力难以同时得到保障。要研制出实用的水陆两栖机器人推进系统，还需解决复合推进系统建模、两栖复合推进机构设计与实现、两栖复合推进机构的运动控制与优化、水陆运动模式自主切换机制等问题。

“船舶新型推进系统”工程开发前沿中核心专利公开量排在前三位的国家/地区分别为中国（109）、韩国（18）和美国（11），篇均被引频次排在前三位的国家/地区分别为美国（9.36）、日本（7.88）和德国（5.8），见表2.2.3。在公开量Top10国家/地区中，美国和韩国合作较多，见图2.2.3。核心专利公开量排在前三位的机构分别为HYMR（17）、Hangzhou Changdong Intelligent Technolog（13）和CHSB（6），见表2.2.4。从目前样本数据看，专利主要产出机构间基本不存在合作，见图2.2.4。我国公开的与“船舶新型推进系统”工程开发前沿相关的核心专利有109项，公开较多的大陆机构为Hangzhou Changdong Intelligent Technolog。

### 2.2.3 无人机

#### (1) 飞行平台技术的发展

固定翼、旋翼及多旋翼这三类无人机的技术相对成熟，应用也比较广泛，尤其是多旋翼无人机占市场的90%。近年来，出现了将固定翼和旋翼组合在一起的垂直起降无人机，这类无人机在固定翼两侧机翼上各安置两个旋翼，起飞时旋翼工作，平飞

表2.2.3 “船舶新型推进系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	109	71.71%	612	69.23%	5.61
2	South Korea	18	11.84%	83	9.39%	4.61
3	USA	11	7.24%	103	11.65%	9.36
4	Japan	8	5.26%	63	7.13%	7.88
5	Germany	5	3.29%	29	3.28%	5.80
6	Taiwan of China	2	1.32%	8	0.90%	4.00

表 2.2.4 “船舶新型推进系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HYMR	17	11.18%	68	7.69%	4.00
2	HANG	13	8.55%	14	1.58%	1.08
3	CHSB	6	3.95%	49	5.54%	8.17
4	UHEG	5	3.29%	32	3.62%	6.40
5	HOND	4	2.63%	33	3.73%	8.25
6	UNWP	4	2.63%	29	3.28%	7.25
7	CAZD	3	1.97%	34	3.85%	11.33
8	CSHI	3	1.97%	22	2.49%	7.33
9	MITO	3	1.97%	20	2.26%	6.67
10	BRUH	2	1.32%	8	0.90%	4.00

注：HYMR 表示 Hyundai Motor Company；HANG 表示 Hangzhou Changdong Intelligent Technology Co. Ltd；CHSB 表示 Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co. Ltd.；UHEG 表示 Harbin Engineering University；HOND 表示 Honda Motor Co. Ltd；UNWP 表示 Northwestern Polytechnical University；CAZD 表示 Institute of Automation Chinese Academy of Sciences；CSHI 表示 719th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation；MITO 表示 Mitsubishi Heavy Industries Ltd.；BRUH 表示 Brunswick Corporation。

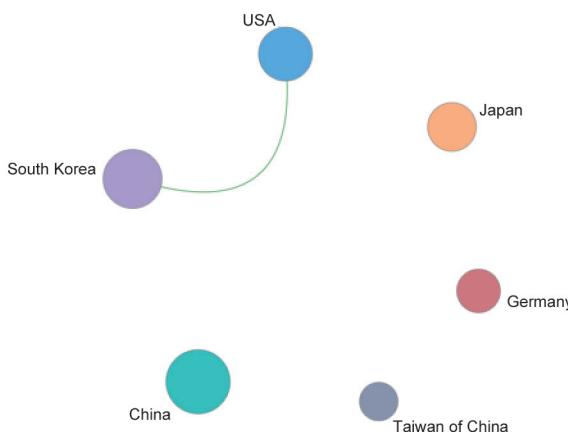


图 2.2.3 “船舶新型推进系统”工程开发前沿主要产出国 / 地区间的合作网络

时固定翼工作，能够完成垂直起降和空中悬停；而两侧的可倾转旋翼在平飞时还可以增加推力。然而，此类无人机由于旋翼的桨叶半径较小，旋翼产生的升力有限，起飞重量也较小，提高其起飞重量是一个重要研究方向。此类无人机在工作时固定翼模式和旋翼模式间的切换也是一个重要研究方向。此外，可折叠式构型无人机、纳米无人机等用于特殊工作环境的无人机同样是值得深入研究的前沿领域。

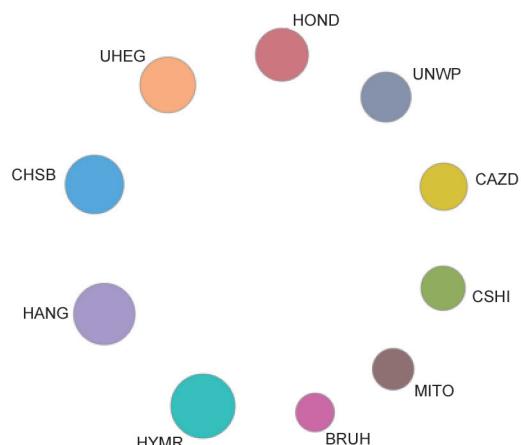


图 2.2.4 “船舶新型推进系统”工程开发前沿主要产出机构间的合作网络

### (2) 多无人机集群协同技术

目前大部分针对无人机的研究工作集中在单一平台技术上，而由多个无人机组成的无人机群则可以实现很多单个无人机无法实现的功能。组成无人机群的无人机不被构型和起飞重量的差异所限制，因此这类异构多无人机集群协同技术备受瞩目。多智能体协同控制技术在地面机器人方面研究较为普遍，但是其控制方法大多基于刚体控制建模，研究的对象是二自由度运动。而在协同工作的无人机群

中，单个无人机不能作为刚体考虑，其气动弹性对无人机群产生的影响也必须在多智能体模型中体现，无人机群是一个基于六自由度运动的多体动力学模型。因此，在多无人机集群协同技术的研究中，除了航迹优化和自主飞行导航控制外，防碰撞和智能避障也是重要的研究领域。此外，基于智能算法的机载微传感器、多机协同飞行/任务管理系统和动态数据融合技术等研究也是无人机技术的研究前沿。

“无人机”工程开发前沿中核心专利公开量排在前三位的国家/地区分别为美国(249)、中国

(62)和加拿大(8)，篇均被引频次排在前三位的国家/地区分别为瑞士(50.33)、加拿大(40.88)和英国(38.5)，见表2.2.5。在公开量Top10国家/地区中，英国和德国合作较多，见图2.2.5。核心专利公开量排在前三位的机构分别为DJII(34)、BOEI(31)和GOOG(16)，见表2.2.6。从目前样本数据看，专利主要产出机构之间基本不存在合作，见图2.2.6。我国公开的与“无人机”工程开发前沿相关的核心专利有62项，公开较多的大陆机构为DJII。

表2.2.5 “无人机”工程开发前沿中核心专利的主要产出国/地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	249	67.12%	6740	68.21%	27.07
2	China	62	16.71%	1428	14.45%	23.03
3	Canada	8	2.16%	327	3.31%	40.88
4	Germany	7	1.89%	195	1.97%	27.86
5	France	7	1.89%	163	1.65%	23.29
6	UK	6	1.62%	231	2.34%	38.50
7	South Korea	5	1.35%	62	0.63%	12.40
8	Israel	4	1.08%	144	1.46%	36.00
9	Switzerland	3	0.81%	151	1.53%	50.33
10	Italy	3	0.81%	78	0.79%	26.00

表2.2.6 “无人机”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	DJII	34	9.16%	884	8.95%	26.00
2	BOEI	31	8.36%	867	8.77%	27.97
3	GOOG	16	4.31%	585	5.92%	36.56
4	AMAZ	12	3.23%	123	1.24%	10.25
5	VEZN	12	3.23%	373	3.77%	31.08
6	EADS	11	2.96%	252	2.55%	22.91
7	HONE	8	2.16%	449	4.54%	56.13
8	QCOM	8	2.16%	81	0.82%	10.13
9	UNMA	8	2.16%	138	1.40%	17.25
10	DISY	6	1.62%	240	2.43%	40.00

注：DJII表示SZ DJI Technology Co. Ltd；BOEI表示Boeing Co.；GOOG表示Google Inc.；AMAZ表示Amazon Technologies Inc.；VEZN表示Verizon Patent and Licensing Inc.；EADS表示EADS Deutschland GmbH；HONE表示Honeywell International Inc.；QCOM表示Qualcomm Incorporated；UNMA表示Unmanned Innovation Inc.；DISY表示Disney Enterprises Inc.。

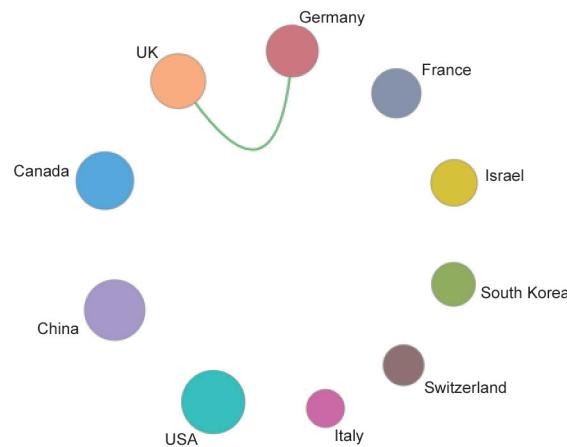


图 2.2.5 “无人机”工程开发前沿主要产出国家 / 地区间的合作网络

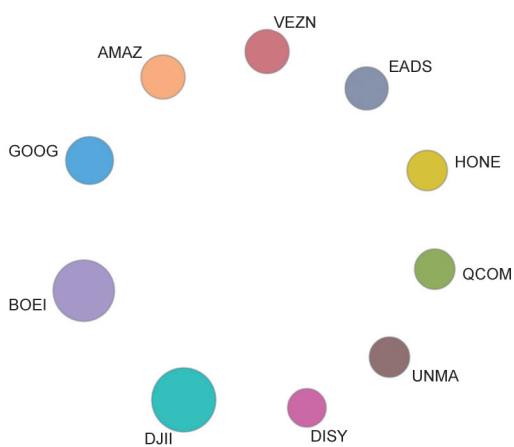


图 2.2.6 “无人机”工程开发前沿主要产出机构间的合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：段正澄 郭东明

课题组成员：

冯煜芳 杨德森 钟掘 杜善义 唐任远  
 李德群 陈懋章 李魁武 王振国 黄庆学  
 蒋庄德 黄瑞松 黄先祥 范本尧 林尚扬  
 李鸿自 乐嘉陵 高金吉 郭孔辉 周志成  
 钱清泉 孙聪 徐芑南 钟志华 张璧  
 张立同 贾振元 钱林茂 范大鹏 李卫华

朱旻昊 陈云赛 张珂 康瑛石 吴建军

管在林 田野 江志斌 曾晓光 刘成良  
 董早鹏 史铁林 王晓俊 赵英俊 夏奇  
 夏凉 陈惜曦 龚渤

执笔组成员：

李宝仁 熊蔡华 张海涛 严新平 李仁府  
 孙博 夏奇 夏凉 陈惜曦 龚渤  
 李俊杰 谭先华 刘智勇 谷洪刚 詹小斌

## 二、信息与电子工程

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

信息与电子工程领域组所研判的 Top 10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。其中，“雷达隐形技术”“新一代移动通信技术”“量子相干性测量与退相干管控”“软体机器人控制方法”“高分辨率遥感场景分类和图像处理技术”“基于深度神经网络的人体姿态识别方法”是基于科睿唯安高被引聚类得出；“可解释深度学习”“网络化协同感知和控制理论”“区块链技术”“硅基光互连芯片技术”这 4 项技术为专家补充。

各前沿所涉及的核心论文从 2012 年至 2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2。其中，“高分辨率遥感场景分类和图像处理技术”是近年来核心论文发

表数目增速最显著的前沿。

#### (1) 雷达隐形技术

雷达隐形技术也称雷达隐身技术或雷达低可观测技术，其专业称谓为雷达目标特征信号控制技术。它是通过外形、材料、电路和对象综合设计等手段调控目标表面入射电磁波散射方向、极化方式、辐射强度和模式，从而降低被敌方雷达系统探测识别的一种技术。由于雷达是远距离探测目标的一种最为重要的方式，因此自出现之日起，雷达隐身就始终是隐身技术发展的重点。

根据技术实现中电磁波操控的维度，雷达隐身技术主要包括外形隐身、材料隐身、有源隐身和隐身综合设计与评估。外形隐身通过外形设计调控电磁波入射方向和散射模式以实现隐身效果，重点是将入射波反射至非威胁方向、降低或遮挡目标表面二面角 / 三面角等强散射源和不连续结构散射。材料隐身是通过在目标表面或其关键部位涂覆和贴装一些特殊的功能材料，以衰减电磁波或改变电磁波

表 1.1.1 信息与电子工程领域 Top10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	雷达隐形技术	24	788	32.83	2015.42	25.0%	0.00
2	可解释深度学习	5	148	29.60	2015.40	—	—
3	新一代移动通信技术	9	386	42.89	2016.00	33.3%	0.00
4	网络化协同感知和控制理论	139	5602	40.30	2013.45	—	—
5	区块链技术	16	213	13.31	2015.88	—	—
6	量子相干性测量与退相干管控	37	1015	27.43	2015.81	40.5%	0.00
7	软体机器人控制方法	24	1498	62.42	2014.67	20.8%	0.00
8	高分辨率遥感场景分类和图像处理技术	69	2327	33.72	2015.55	36.2%	0.00
9	硅基光互连芯片技术	21	790	37.62	2013.52	—	—
10	基于深度神经网络的人体姿态识别方法	7	229	32.71	2016.29	28.6%	0.00

表 1.1.2 信息与电子工程领域 Top10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	雷达隐形技术	0	1	3	6	13	1
2	可解释深度学习	0	1	1	0	1	2
3	新一代移动通信技术	0	0	1	2	2	4
4	网络化协同感知和控制理论	43	37	24	23	12	0
5	区块链技术	0	0	2	3	6	5
6	量子相干性测量与退相干管控	0	0	0	11	22	4
7	软体机器人控制方法	1	1	8	10	3	1
8	高分辨率遥感场景分类和图像处理技术	1	3	7	18	26	14
9	硅基光互连芯片技术	5	4	8	4	0	0
10	基于深度神经网络的人体姿态识别方法	0	0	0	2	1	4

辐射方式。有源隐身技术是指根据目标表面入射电磁波状态和目标状态实时生成与目标散射场相位相反的电磁场信号，从而通过空间对消实现零散射，降低目标雷达散射截面。隐身综合设计与评估是雷达隐身技术工程应用中必须重视和重点发展的一个技术领域，这也是隐身原理基本公开但隐身技术仅为少数几个国家掌握的重要原因之一。

随着探测与反探测技术博弈持续升级对抗，未来雷达隐身技术发展主要方向有：甚低可观测和超低可观测；宽频带和全向隐身；双/多站雷达隐身；一体化综合和轻薄型隐身设计；扰动场/衰减场缩减。

### (2) 可解释深度学习

近年来，以卷积深度神经网络、循环神经网络、生成式对抗神经网络和深度强化学习等为代表的深度学习方法在图像分类与目标检测、语音识别与合成、自然语言处理等领域取得了令人瞩目的性能提升。尽管深度学习在各种人工智能应用中表现出优异性能，但其可解释性一直是深度学习提升应用的弱点，目前深度神经网络所获得高判别能力是通过构造多层非线性映射函数进行逐层抽象而取得，呈现黑盒效应，表现在其内部网络结构和学习参数与决策输出之间的关系很难建立。具备可解释性的人

工智能将突破深度学习的主要瓶颈，如小样本或弱标注数据的有效学习、语义层次上的人机交互学习以及神经网络表示的语义调试等。

当前，通过理解神经网络表示或对复杂的神经网络表示进行解耦以提升其可解释性的研究主要包括 5 个方面：在中间网络层对卷积神经网络表示进行可视化；对卷积特征映射空间与不同语义类别对应关系进行诊断；对不同卷积层的混合模式进行解耦；建立可解释的深度网络模型，如可解释卷积深度神经网络和胶囊网络；借助人机交互进行语义层学习。另一方面，对抗机器学习通过构建对抗样本探测基于深度学习模型的脆弱性。初步研究表明，通过可解释性规则添加扰动形成的对抗样本去学习元预测器，或构建影响函数追溯模型预测至其训练数据，有助于打开深度模型的黑盒，并在一定程度上可对其预测行为或决策边界进行解释。

将基于规则的符号推理和数据驱动的学习过程结合，可增强智能学习过程的可解释性，如诱导学习将神经感知机与逻辑推理结合，使得学习过程可直接利用领域知识，从而增强了学习过程的可解释性。注意力与记忆在人的认知推理过程中扮演了重要角色，特别是对于文本、语音与视频等序列数据

的知识获取、理解与推理过程至关重要。在注意力机制和记忆结构等支撑下构建深度神经推理机制，以提升智能学习和推理的可解释性，是可解释性深度学习的重要研究方向。

### (3) 新一代移动通信技术

为了应对未来移动数据流量爆炸性增长、海量设备同时接入以及各类业务不断涌现，新一代移动通信技术需要提供毫秒级的端到端需求、千亿级设备的连接能力和 Gbit/s 的峰值传输速率，支持超高移动性、超高流量密度和超高连接数密度等多样化应用场景。新一代移动通信技术将融合多种无线接入方式，实现灵活的网络部署和运营维护，全面提升频谱效率、能源效率和成本效率，促进移动通信产业的可持续发展。新一代通信技术意味着新一代移动芯片和相关核心技术的设计、研发和生产，进而涉及整个信息产业的发展，直接涉及产业转型、产业升级，对制造业、服务业均有直接的重大影响。同时，因为通信技术涉及全球性标准、广泛的专利权、巨大的网络建设成本，对任何一个国家而言，移动通信新技术的发展都具有巨大经济利益和社会效益。

### (4) 网络化协同感知和控制理论

网络化协同感知与控制系统 (NCSCS) 通常由一系列传感器和控制器组成，传感器用于从周围环境中收集信息，而控制器则可用于改变环境，传感器和控制器通过通信网络连接。NCSCS 不仅具备感知功能，还能改变周边环境和物理世界，所以 NCSCS 在灾害救助、智能建筑、工厂自动化、井下安全控制和生化攻击检测等领域有着广泛的应用前景。

与传统集中式感知与控制方法相比，网络化分布式协同感知与控制具有以下优势：将感知与控制功能分散，提高了系统对感知和控制节点失效的健壮性；在大规模分布式系统中，通常很难做到全网时钟同步，各个节点往往处于异步工作状态，集中式感知与控制方法无法处理异步信息，而基于

网络的分布式构架可以采用递阶分层处理方法解决异步感知与控制问题；将感知与控制功能分散后可极大提高系统计算效率，通过子系统间的信息交互，可以在降低计算量的同时获得与集中式感知和控制近似的性能。

最近几年，这种基于信息交互的分布式感知和控制理论与方法研究获得极大关注，但很多理论和应用问题尚待解决，包括基于节点间（如控制器、传感器）合作模式、非合作模式的分布式感知与控制，难以全网时钟同步情况下各子系统处于异步工作状态的异步多频分布式感知与控制，分布式协同感知与控制的可扩展性（接受任意节点的任意接入与退出），网络拓扑结构与脆弱性对分布式感知与控制的影响。相信未来会取得突破性进展，有力推动工业互联网下的智能制造、网联无人自主系统、智能电网等领域的发展。

### (5) 区块链技术

区块链采用 P2P 技术、密码学和共识算法等技术，提供一种在不可信环境中进行信息与价值传递交换的机制，是构建未来价值互联网的基石，其具有数据不可篡改、系统集体维护、信息公开透明等特性。区块链技术作为一种通用技术，从数字货币加速渗透至其他领域，与各行各业创新融合。与传统技术相比，区块链技术具有以下 3 方面优势：

共识算法确保区块链上数据难以篡改，更加安全；由于每个节点都存有一份数据，区块链具有异构多活、可靠性强的特征；具有智能合约属性，能自动执行去中心化应用。

随着区块链应用从单一应用到多元方向发展，区块链技术也还远未定型，在未来一段时间还将持续演进，共识算法、服务分片、处理方式、组织形式等技术环节上都有提升效率的空间，在以下几方面存在一定挑战：性能和扩展性不能满足要求，主要表现为交易吞吐量及存储带宽远不能满足应用实际需求。目前比特币的交易吞吐率为每秒 7 笔，以太坊是每秒 14 笔，如何在不影响系统整体安全

性的情况下，提高交易吞吐率将是值得研究的问题，目前通过压缩区块时间、提高区块大小、采用分片的技术都可以有效提高交易吞吐率；数据隐私和访问控制有待改进。在现有公有链中，各参与方都能获得完整数据备份，所有数据对于参与方来讲是透明的，无法使参与方仅获取特定信息。如何在不影响公有链执行效率的情况下，隐私数据保护是一个挑战性问题。目前这方面研究包括混币机制、零知识证明机制、环签名机制等保护用户的交易隐私数据；治理机制有待完善。公有链社区摸索出了“硬分叉”和“软分叉”等升级机制，但遗留问题有待观察。由于公有链不能“关停”，其错误修复也异常棘手，一旦出现问题，尤其是安全漏洞，将非常致命。

### (6) 量子相干性测量与退相干管控

量子相干性和量子相变在量子信息中占有重要地位。虽然理论上在演化过程中系统一直具有相干性，但由于实际系统并不是严格封闭的，必然会与环境发生纠缠，从而导致退相干。在量子力学里，开放量子系统的量子相干性会因为与外在环境发生量子纠缠而随着时间逐渐丧失，该效应被称为“量子退相干”，又称为“量子去相干”。量子退相干是量子系统与环境因量子纠缠而产生的后果。由于量子相干性而产生的干涉现象会因为量子退相干而消失无踪。量子退相干促使系统的量子行为变迁成为经典行为，该过程被称为“量子至经典变迁”。德国物理学者汉斯·泽贺最先于1970年提出量子退相干概念。自1980年以来，量子退相干已成为热门研究论题。

量子退相干通常发生很快，因此很难制成处于宏观或介观的叠加态物体。为实验验证量子退相干效应、见证量子与经典之间的平滑边界、检验与改良描述量子退相干的理论模型、找出任何不同于量子力学公正演化行为之处，必须完成以下几件极具挑战性的任务：制备出可分辨的几个宏观态或介观态的量子叠加态；设计一套证实量子叠加的

方法；量子退相干时间必须足够长久，才能正确观测量子退相干；设计一套监督量子退相干的方法。

退相干现象对量子信息科学的影响可大致分成两块内容：量子计算与量子通信。我们知道在量子信息科学中，量子系统的状态蕴藏着信息。量子退相干会使我们所在意的系统的部分或全部信息丧失，因此在量子计算上会造成计算结果出现误差干扰；而在量子通信上，一个环境充满扰动的信息传递通道，在通道末端的收受者有收到噪声及错误信息的可能，需要除错系统如编码方法的协助。

### (7) 软体机器人控制方法

软体机器人控制方法，本质上是解决软体机器人的逆动力学问题。与传统由电机驱动的硬体机器人不同，软体机器人采用类似动物肌肉的软材料驱动，使得机器人具有类似动物的敏捷、灵活的运动能力，增强了对于复杂作业环境的适应性，同时减少了机器人与人交互的危险性。理论上，软体机器人具有无限自由度，能够产生极其复杂的运动，如拉伸、弯曲和扭转等，这使得软体机器人整体运动控制面临巨大挑战。目前，面向机器人驱动的“人工肌肉”材料主要分为：气动工肌肉、形状记忆合金、电活性聚合物等。尽管这些材料都具有能量密度高、形变大、重量轻等优势，软材料驱动器往往具有强非线性、高黏弹性等特点，同时考虑到软材料的环境屈服性，软机器人的作业环境具有极高的不确定性，因此，针对软体机器人的控制方法应具有很好的自适应性和鲁棒特性。总体来说，软体机器人控制方法可从两方面考虑：基于模型的控制方法；基于学习的控制方法。前者通过物理机理或者数据驱动得到系统的运动学模型，并采用传统反馈控制器实现运动控制。这类方法的不足是对于模型具有一定依赖性，而软体机器人在与环境交互中，软驱动器的运动/动力学模型存在很强的不确定性。为了克服对模型的依赖，以及考虑到软体

驱动器与生物肌肉的相似性，后者借鉴生物肌肉的控制方法，通过构建人工神经元网络在线学习实时补偿模型的不确定性。这类方法在神经网络的结构优化和参数调节上仍需大量探索。

#### (8) 高分辨率遥感场景分类和图像处理技术

高分辨率遥感影像作为关系着国计民生的应急和减灾应用的空间大数据。遥感场景分类隶属于整体图像理解的研究范畴，场景分类要对图像场景进行分析、判断、解译和标注。场景分类是学习和发现图像与场景语义内容标签的一个映射过程。场景通常包含多个目标，场景分类也是图像理解的关键课题。常见场景分类算法有局部语义的场景分类、中层语义的场景分类、语义主题模型的场景分类等。根据场景分类的层次又可分为低层特征描述和中层特征描述两大主流方法。由于低层特征描述往往泛化性能差，难以用于处理训练集以外的图像分类，目前场景分类算法大部分集中在基于中层语义建模的场景分类。

中层特征是对低层特征的一种聚集和整合，其本质是利用统计分布建立特征与类别的联系。全局的低层特征往往无法反映局部对象，考虑局部低层特征描述、多局部特征融合及集成学习可提高场景分类的识别率。视觉词袋(BoVW)模型的场景分类，是目前广泛采用的中层语义算法。BoVW模型无需分析场景具体目标组成，根据场景低层特征统计特性建立视觉单词，然后利用图像的视觉单词分布表达图像场景信息。考虑视词的空间共生关系和上下文关系，将有助于提升场景结构语义的解释。但目前BoVW模型的视词数量设置多少为宜尚无定论，且生成对象往往与训练样本有较大相关度，而这是影响算法鲁棒性的重要因素。

统计学习理论是比较成熟的研究算法，在多传感器融合遥感影像场景分类中，基于结构风险最小化原则的支持向量机和利用Bootstrap重抽样的随机森林有相关报道。为实现机载雷达和多光谱图像的场景分类，随机森林往往结合经典的先验模型无

监督图像分割工具MRF进行分类。近期源于文本分类研究的pLSA、LDA等语义主题模型，在星载滑坡和机载航空摄影的场景分类中得到较好实验效果。

中层语义场景分类在一定程度上缓解了语义鸿沟的问题，但对场景尺度变化、传感器拍摄角度和时间的差异、语义对象组合变化往往缺乏有效措施。

#### (9) 硅基光互连芯片技术

硅基光互连芯片技术，是以硅和硅基衬底材料作为光学介质，通过集成电路工艺制造相应的光子器件和光电器件（包括硅基光收发器件、硅基光调制器、硅基光波导器件等），并利用这些器件对光子进行处理、操纵，以实现系统间、主板间、芯片间、CPU间及CPU内部核之间的光互连。硅不仅是一种电子材料，也是一种光子材料。采用硅作为衬底，可以利用已有集成电路工艺制作光子器件。片间与片内光互连，相比于电互联技术，具有超高带宽、高速、低功耗、低失真、低串扰、无电磁干扰等根本性优势。硅基光互连芯片技术主要研究方向有以下几个方面：光发射器，用于发射光波作为信息载体；光波导，用于传导光波；调制器，用于将计算单元产生的电信号加载于光波载体；

光信号接收器，用于接收光信号，并转换成电信号，反馈给计算单元；系统集成。

尽管硅作为光互联材料，展现出许多独特优势，然而，作为单一材料，硅不可能完成光互联器件的所有功能。例如，光传输和光接受本身就是一个矛盾的存在。光传输要求材料必须对光子透明，而光接受则要求材料对光不透明，能够吸收光子。硅材料是一种间接带隙半导体，很难实现受激辐射，因而也难以做成光源材料。因此，硅在光互联应用中存在一些技术瓶颈。例如，2015年与2018年由Nature报道的美国伯克利大学等机构合作研发的硅光子处理器，其一直采用外部光源。因此其发展趋势就是寻找其他能够与硅基CMOS工艺兼容的材

料，以弥补硅材料在光互连芯片技术方面的不足。

### (10) 基于深度神经网络的人体姿态识别方法

基于智能手机和可穿戴设备，如手环、手表的传感器的人体动作识别已成为主流方法，传统的机器学习方法，如支持向量机、贝叶斯网络、时域频域分析等机器学习方法，需要专业的人体动作领域知识来提取特征。基于神经网络的方法依然很少，神经网络和深度学习依然需要人为提取特征。特征提取是机器学习和深度学习中的关键步骤。同样，对于人体动作识别，传感器数据的特征提取也极为重要。

人体动作识别是重要的研究课题，特别是在智能手机和智能可穿戴设备普及的今天。针对人体动作识别，机器学习方法主要有传统支持向量机、决策树、K 近邻、朴素贝叶斯、神经网络以及深度学习。模型依赖的训练数据源主要有单个加速传感器，或者结合陀螺仪、磁场甚至还有声音信息。动作识别中传感器的位置主要分为固定位置（多个传感器一般是固定位置）和非固定位置。特征提取主要为时域提取，有些结合了频域特征提取。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 雷达隐形技术

雷达隐形技术也称雷达隐身技术或雷达低可观测技术，其专业称谓为雷达目标特征信号控制技术。它是通过外形、材料、电路和对象综合设计等手段调控目标表面入射电磁波散射方向、极化方式、辐射强度和模式，从而降低被敌方雷达系统探测识别的一种技术。由于雷达是远距离探测目标的一种最为重要的方式，因此自出现之日起，雷达隐身就始终是隐身技术发展的重点。

根据技术实现中电磁波操控的维度，雷达隐身技术主要包括外形隐身、材料隐身、有源隐身和隐身综合设计与评估。

外形隐身是最早受到关注和发展的雷达隐身技

术，它通过外形设计调控电磁波入射方向和散射模式以实现隐身效果，重点是将入射波反射至非威胁方向、降低或遮挡目标表面二面角 / 三面角等强散射源和不连续结构散射。以隐身飞行器为例，外形隐身设计需解决的关键技术有隐身外形与气动布局综合设计、电大尺寸目标实时电磁计算技术、一体化快速成形等技术。

材料隐身是通过在目标表面或其关键部位（如电子系统天线和一些强散射点处）涂覆和贴装一些特殊的功能材料，以衰减电磁波或改变电磁波辐射方式的一种技术。根据材料电磁调控方式，目前研究和发展的隐身材料主要有：吸波型隐身材料，主要是将雷达波引入材料内部并将其能量耗散掉；以超材料为代表的表面型隐身材料，主要通过亚波长的周期性几何电路结构设计来改变电磁波散射方向图和极化方式。材料隐身技术发展中需解决的关键技术包括电磁 / 热 / 力综合设计分析、微纳加工与超材料技术。以超材料为代表的表面电磁操控材料是未来隐身材料发展的重点。

有源隐身技术是指根据目标表面入射电磁波状态（入射方向、极化）和目标状态（姿态速度等）实时生成与目标散射场相位相反的电磁场信号，从而通过空间对消实现零散射，降低目标雷达散射截面。有源隐身技术目前还处于探索和发展阶段，需要解决的关键技术包括实时电磁频谱感知与测量、电磁场信号实时生成与精确控制、信息超材料等。以有源隐身为目的智能蒙皮是未来隐身技术发展的一个重要方向。

隐身综合设计与评估是雷达隐身技术工程应用中必须重视和重点发展的一个技术领域，这也是隐身原理基本公开但隐身技术仅为少数几个国家掌握的重要原因之一。由于未来多传感器战场感知技术发展，隐身技术也必须强调电磁、光学、红外、声等有源、无源特征信号的一体化控制技术，因此必须解决和发展的关键技术包括多场耦合并行计算、隐身性能仿真测试与评估以及相关设计工具和仪器

技术。

当前，雷达隐身技术经过 50 多年发展，已成功应用于多型武器装备。以隐身飞行器为例，从最早代表性的 F117，到现在的 F22、F35 和 B2 等，中国和俄罗斯也进入掌握隐身战斗机设计技术为数不多的国家行列。随着探测与反探测技术博弈的持续升级对抗，未来雷达隐身技术发展的主要方向有：

向甚低可观测和超低可观测方向发展； 向宽频带和全向隐身方向发展； 从单站雷达隐身向双/多站雷达隐身方向发展； 隐身设计向一体化综合和轻薄型发展； 从散射场减缩到扰动场 / 衰减场缩减方向发展。

目前，雷达隐形技术工程研究前沿中核心论文排名前三的国家为中国、美国、澳大利亚（见表 1.2.1）。

根据核心论文的主要产出机构（见表 1.2.2）来看，排名前三的机构为 Southeast Univ、Cooperat Innovat Ctr Terahertz Sci、Nankai Univ、Tianjin Univ、Xidian Univ。从雷达隐形技术工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络（见图 1.2.1）可看出，中国与澳大利亚、美国间存在合作关系，西班牙与荷兰间存在合作关系。从雷达隐形技术工程研究前沿主要机构间的合作网络（见图 1.2.2）可看出，大部分机构间合作关系较为密切。从施引核心论文的主要产出国家和地区统计结果（见表 1.2.3）来看，中国、美国和新加坡名列前三。其中，中国以 255 篇的论文数高居榜首，所占比例达到 71.63%。从施引核心论文的主要产出机构（见表 1.2.4）来看，排名前三的机构为 Southeast Univ、Air Force Eng Univ、Xidian Univ。

表 1.2.1 “雷达隐形技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	19	79.17%	606	76.90%	31.89
2	USA	4	16.67%	146	18.53%	36.50
3	Australia	2	8.33%	52	6.60%	26.00
4	The Netherlands	1	4.17%	66	8.38%	66.00
5	Spain	1	4.17%	66	8.38%	66.00
6	Iran	1	4.17%	12	1.52%	12.00

表 1.2.2 “雷达隐形技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Southeast Univ	11	45.83%	469	59.52%	42.64
2	Cooperat Innovat Ctr Terahertz Sci	5	20.83%	165	20.94%	33.00
3	Nankai Univ	4	16.67%	173	21.95%	43.25
4	Tianjin Univ	4	16.67%	171	21.70%	42.75
5	Xidian Univ	4	16.67%	76	9.64%	19.00
6	Nanjing Univ	3	12.50%	144	18.27%	48.00
7	Arizona State Univ	2	8.33%	48	6.09%	24.00
8	Fudan Univ	2	8.33%	113	14.34%	56.50
9	Univ Elect Sci & Technol China	2	8.33%	129	16.37%	64.50
10	Peking Univ	2	8.33%	42	5.33%	21.00

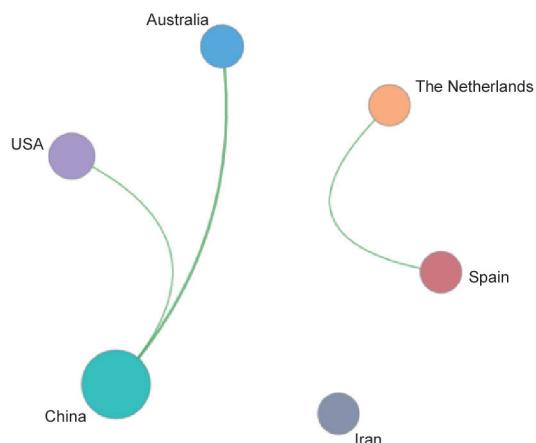


图 1.2.1 “雷达隐形技术”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

### 1.2.2 可解释深度学习

#### (1) 人工智能核心：学习和推理

人工智能特点在于具有永无止境（自我）从数据和经验中学习、直觉推理与自适应等特点。推理是进行思维模拟的基本形式之一，是从一个或几个已知的判断（前提）推出新判断（结论）的过程。一般可将推理分为演绎推理、归纳推理、类比推理、假设性推理、因果推理和综合推理等。早期推理研究在逻辑学派和知识工程学派中展开。逻辑学派主张用形式化方法来描述客观世界，其认为任何推理是基于已有逻辑化知识而展开，如一阶逻辑和谓词

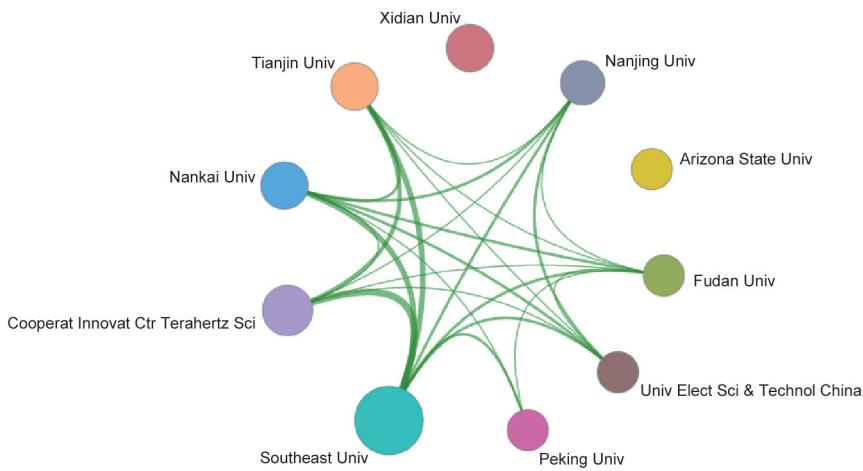


图 1.2.2 “雷达隐形技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “雷达隐形技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	255	71.63%	2016.5
2	USA	36	10.11%	2016.4
3	Singapore	19	5.34%	2016.6
4	India	9	2.53%	2016.6
5	Iran	9	2.53%	2016.3
6	Canada	7	1.97%	2016.1
7	UK	6	1.69%	2016.3
8	Australia	6	1.69%	2016.5
9	Italy	5	1.40%	2016.6
10	Denmark	4	1.12%	2017.0

表 1.2.4 “雷达隐形技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Southeast Univ	53	24.65%	2016.3
2	Air Force Eng Univ	51	23.72%	2016.5
3	Xidian Univ	19	8.84%	2016.8
4	Cooperat Innovat Ctr Terahertz Sci	16	7.44%	2016.2
5	Tianjin Univ	16	7.44%	2016.1
6	Nanjing Univ	15	6.98%	2016.2
7	Chinese Acad Sci	12	5.58%	2016.5
8	Nankai Univ	12	5.58%	2015.8
9	Nat Univ Singapore	11	5.12%	2016.5
10	Commun Univ China	10	4.65%	2016.4

逻辑及定义在其上的推理演算。而随之发展起来的基于知识图谱推理、记忆驱动的推理、多智能体推理、因果推理和跨媒体综合推理等构成了人工智能推理的主要研究内容和未来值得重视的研究方向。

智能学习的 3 种主要模式是： 基于形式化方法，即通过符号逻辑表示下的推理，可视为用规则指导模型去学习和推理； 统计方法，即挖掘数据所蕴含的内在模式进行学习，可视为数据驱动的学习模式，其可在大规模有标记样本上进行有监督的学习（如目前广泛应用的深度学习方法），也可在小样本上进行贝叶斯概率学习，即在解析数据所蕴含的内在模式的基础上，结合组合性和因果性等先验知识进行无监督或半监督学习； 控制论方法，即从经验中自我提升，可视为用问题引导或基于反馈牵引进行学习，如强化学习方法。智能学习和推理是人工智能研究的核心内容。

## (2) 深度学习：黑盒特性与可解释性

近年来，以卷积深度神经网络、循环神经网络、生成式对抗神经网络和深度强化学习等为代表的深度学习方法引起了学术界关注并在产业界成功应用，其在图像分类与目标检测、语音识别与合成、自然语言处理等诸多应用领域均取得了令人瞩目的性能提升，深度的智能学习和推理成为当前人工智

能研究的前沿。

尽管深度学习在各种人工智能应用中表现出优异性能，但是其可解释性一直是深度学习提升应用的弱点，目前深度神经网络所获得高判别能力是通过构造多层非线性映射函数进行逐层抽象而取得，呈现黑盒效应。即这一以数据驱动机器学习为核心的人工智能应用系统虽可感知、学习、行动和决策，系统有效性受限于其无法向用户解释其决策过程的合理性、描述其模型的优势和弱点、预测其在新任务上的适用性甚至确保其在未来应用中的安全性。具备可解释性的人工智能将突破深度学习的主要瓶颈，如小样本或弱标注数据的有效学习、语义层次上的人机交互学习以及神经网络表示的语义调试等。

## (3) 可解释人工智能：数据驱动 + 知识引导

深度神经网络的黑盒特性表现在其内部网络结构和学习参数与决策输出之间的关系很难建立。当前，通过理解神经网络表示或对复杂的神经网络表示进行解耦以提升其可解释性的研究主要包括 5 个方面： 在中间网络层对卷积神经网络表示进行可视化； 对卷积特征映射空间与不同语义类别对应关系进行诊断； 对不同卷积层的混合模式进行解耦； 建立可解释的深度网络模型，如可解释卷积

深度神经网络和胶囊网络；借助人机交互进行语义层学习。另一方面，对抗机器学习通过构建对抗样本探测基于深度学习模型的脆弱性。初步研究表明，通过可解释性规则添加扰动形成的对抗样本去学习元预测器，或构建影响函数追溯模型预测至其训练数据，有助于打开深度模型的黑盒，并在一定程度上可对其预测行为或决策边界进行解释。

深度学习是数据驱动的学习模式，由于缺少显示的规则和推理过程，使得以深度学习为核心的人工智能系统的可解释性难以建立。相关研究表明，将基于规则的符号推理和数据驱动的学习过程结合，可增强智能学习过程（如分类和预测）的可解释性，如诱导学习将神经感知机与逻辑推理（如一阶逻辑推理）结合使得学习过程可直接利用领域知识，从而增强了学习过程的可解释性。受大脑智能启发，人脑在进行感知和认知时，不仅要处理当前数据，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推理过程中扮演了重要角色，特别是对于文本、语音与视频等序列数据的知识获取、理解与推理过程至关重要。因此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。这方面的代表性工作有神经图灵机、记忆网络、自适应计算时间、Neural GPU、Neural Random Access Machines 以及通过强化学习来训练神经图灵机和堆栈、队列等形式的外在记忆体随机访问方法，形成了新的“数据驱动+知识引导”的智能学习框架。因此，在注意力机制和记忆结构等支撑下构建深度神经推理机制，以提升智能学习和推理的可解释性，是可解释性深度学习的重要研究方向。

### （4）文献情况

可解释机器学习的研究正在引起学术界的关注。在 2017 年国际机器学习大会上由哈佛大学

和 Google Brain 的学者组织了关于“Interpretable Machine Learning: The fuss, the concrete and the questions”的教程和论坛。同时，在 2017 年神经信息和处理系统大会上，来自麻省理工、德国 MPI、微软研究院、康奈尔大学、约翰霍普金斯大学、威斯康辛大学麦迪逊分校、纽约大学、加州大学圣迭戈分校、DeepMind 等研究机构的 11 位学者联合组织了“Interpretable ML”的专题研讨会，并录用了来自全球研究机构的共 35 篇论文，从深度学习、核方法和概率模型、自动科学发现、人工智能安全和伦理、因果推理、人机交互、定量和可视化以及符号回归等多个领域对可解释机器学习的相关研究进行探讨。

美国国防预先研究计划局（DARPA）2017 年 10 月开展“可解释人工智能”计划（XAI），以此探索可以使自主系统对其行为进行更好地解析的技术。DARPA 已经确定，在自主系统向分析师提供有关可疑活动的信息或需要进一步检查的情况下，分析人员有必要让自主系统解释为什么要执行例如将特定照片、数据或特定的人带给分析人员这样的行为。按照 DARPA 的设想，XAI 的目标是“产生更多可解释的模型，同时保持高水平的学习表现（预测准确性）；使人类用户理解、信任和有效管理新一代人工智能合作伙伴”。

2018 年 7 月，美国国防高级研究计划局推出人工智能探索（AIE）计划。AIE 延续了 DARPA 在人工智能领域开创性研发的 50 年路线图。过去的 DARPA 投资促进了“第一波”（基于规则）和“第二波”（基于统计学习）AI 技术发展。DARPA 表示，AIE 计划将专注于“第三波”人工智能的应用及理论，旨在让机器适应不断变化的情况，具有解释自身决策原因能力的人工智能系统。

目前，可解释深度学习工程研究前沿中核心论文主要产出国家见表 1.2.5。核心论文的主要产出机构见表 1.2.6。从可解释深度学习工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络（见图 1.2.3）可看出，

美国与法国、英国、哥伦比亚间存在合作关系，中国和丹麦间存在合作关系。从可解释深度学习工程研究前沿主要机构间的合作网络（见图 1.2.4）可以看出，各机构间存在一定的合作关系。从施引核心论文的主要产出国家和地区统计结果（见表 1.2.7）来看，中国、美国和英国名列前三。其中，中国以 53 篇的论文数高居榜首，所占比例达到 26.77%。从施引核心论文的主要产出机构（见表 1.2.8）来看，排名前三的机构为 Univ Nacl Colombia、Case Western Reserve Univ、Chinese Acad Sci。

### 1.2.3 新一代移动通信技术

从研究范式而言，新一代移动通信技术仍将沿

着既往 3 个主要范式深入推进，即测量建模、性能分析和系统设计。测量建模指对客观物理世界的测量、刻画和建模；性能分析指给定无线通信系统和传输机制，分析其系统性能；系统设计指给定系统设计指标，对移动通信网络架构进行设计并展开优化分析。另一方面，随着大数据、机器学习、人工智能技术的进步，如何将其与移动通信结合，实现跨学科融合发展，是未来新一代移动通信技术重点研究方向之一，在未来 5 年内甚至可能成为主流研究和重要分支。拟解决的关键技术有：存储、计算与通信的协同融合技术；支持海量终端接入的泛在网络架构及超密集异构网络技术；超可靠低时延移动通信系统的理论与实现；面向场景和服

表 1.2.5 “可解释深度学习”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	2	40.00%	107	72.30%	53.50
2	Colombia	1	20.00%	60	40.54%	60.00
3	UK	1	20.00%	47	31.76%	47.00
4	France	1	20.00%	47	31.76%	47.00
5	Austria	1	20.00%	17	11.49%	17.00
6	China	1	20.00%	13	8.78%	13.00
7	Denmark	1	20.00%	13	8.78%	13.00
8	Germany	1	20.00%	11	7.43%	11.00

表 1.2.6 “可解释深度学习”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Case Western Reserve Univ	1	20.00%	60	40.54%	60.00
2	Univ Nacl Colombia	1	20.00%	60	40.54%	60.00
3	Cent Supelec INRIA Saclay	1	20.00%	47	31.76%	47.00
4	Univ Massachusetts	1	20.00%	47	31.76%	47.00
5	Univ Oxford	1	20.00%	47	31.76%	47.00
6	IST Austria	1	20.00%	17	11.49%	17.00
7	Shanghai Jiao Tong Univ	1	20.00%	13	8.78%	13.00
8	Univ Copenhagen	1	20.00%	13	8.78%	13.00
9	Staatliche Berufliche Oberschule Kaufbeuren	1	20.00%	11	7.43%	11.00
10	Univ Appl Sci Mittweida	1	20.00%	11	7.43%	11.00

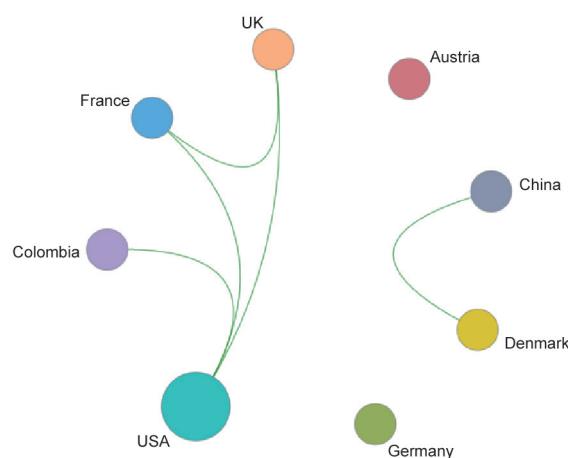


图 1.2.3 “可解释深度学习”工程研究前沿主要国家或地区的合作网络

务的智能移动通信系统设计；数据驱动的移动通信系统的理论与实现；超大规模移动通信网络的优化理论与实时实现。

目前世界上主要国家、地区的发展重点是：美国致力于第五代移动通信（5G）核心技术的知识产权保护，并着力研究数据驱动的、基于人工智能的移动通信新技术；欧洲主要在推进5G核心技术的实现，如大规模天线的核心挑战和商用，同时，以德国等为主的几个国家，特别注重工业化4.0所依赖的超可靠低时延移动通信系统研究；日本以NTT Docomo为代表，重点研究5G商用的

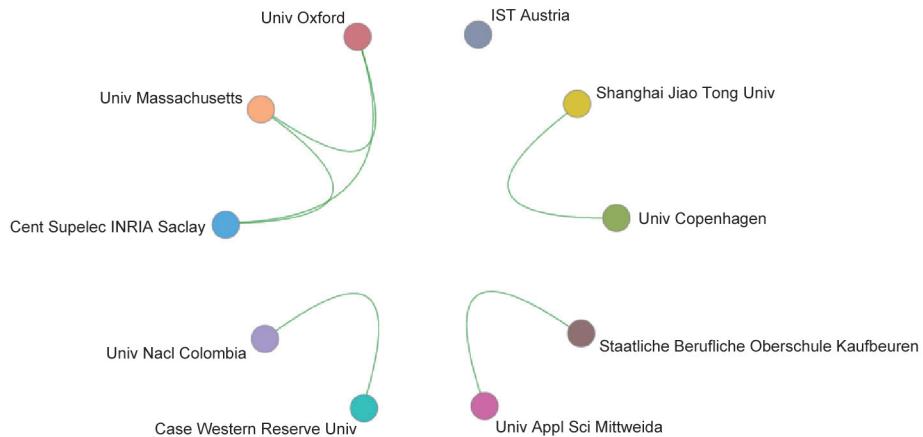


图 1.2.4 “可解释深度学习”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “可解释深度学习”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	53	26.77%	2017.1
2	USA	49	24.75%	2016.7
3	UK	16	8.08%	2017.4
4	Germany	14	7.07%	2017.3
5	The Netherlands	13	6.57%	2017.0
6	Colombia	13	6.57%	2015.6
7	Canada	12	6.06%	2016.7
8	Australia	11	5.56%	2016.5
9	Singapore	9	4.55%	2017.0
10	France	8	4.04%	2016.8

表 1.2.8 “可解释深度学习”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Nacl Colombia	13	20.00%	2015.6
2	Case Western Reserve Univ	12	18.46%	2015.8
3	Chinese Acad Sci	8	12.31%	2017.6
4	Radboud Univ Nijmegen	5	7.69%	2016.2
5	Nanyang Technol Univ	5	7.69%	2017.0
6	Univ Adelaide	5	7.69%	2016.4
7	Wuhan Univ	5	7.69%	2017.2
8	Nanjing Univ Informat Sci & Technol	4	6.15%	2016.3
9	Univ Florida	4	6.15%	2016.8
10	Shanghai Univ	4	6.15%	2016.8

一系列核心问题，如大规模天线的实现。

目前基于 5G 的新一代移动通信技术研究主要围绕以下几个主流方向和分支开展：

#### (1) 信道测量和建模

5G 系统为了满足增强移动宽带 (eMBB) 业务的需求，在高频频段通信，因此围绕高频频段的信道测量和建模是重点研究方向之一；基于大数据的高频段信道建模也是未来重要的发展方向。

#### (2) 大规模天线

5G 系统进一步利用大规模天线提供频谱效率、支持更多用户接入。目前大规模天线，特别是对高频段大规模天线的研究仍有较多问题，第一次进行 5G 大规模商用，实现层面的挑战也是重点研究方向之一。

#### (3) 海量连接

面向物联网、智慧城市、智慧电网等需求，海量连接场景下的无线通信仍将是重点研究方向之一。

#### (4) 超可靠低时延无线通信

目前尚无超可靠低时延无线通信的理论用于指导这一系统的具体设计，因此该研究方向将成为未来第六代移动通信 (6G) 研究重点之一。

其他诸如基于无人机的无线通信技术，基于能量采集和无线能量传输，特别是太空场景下基于无

线能量传输的卫星间通信技术，也是新一代无线通信技术的研究重点。

未来移动通信技术将向以下几个重点方向发展： 存储、计算与通信的协同融合技术； 支持海量终端接入的泛在网络架构及超密集异构网络技术； 超可靠低时延移动通信系统的理论与实现；

面向场景和服务的智能移动通信系统设计； 数据驱动的移动通信系统的理论与实现； 超大规模移动通信网络的优化理论与实时实现； 空天地一体化无线通信系统设计与实现，特别是将地轨卫星与地面网络融合。

目前，新一代移动通信技术工程研究前沿中核心论文排名前三的国家为中国、加拿大、英国（见表 1.2.9）。其中，中国作者所发表的论文占比达到了 88.89%，排名第一，被引频次比例高达 98.70%。加拿大和英国分别排在第二位、第三位。根据核心论文的主要产出机构（见表 1.2.10）来看，排名前 5 的机构为 Beijing Univ Chem Technol、Univ British Columbia、Tsinghua Univ、Univ Sheffield、Beijing Univ Posts & Telecommun、Kings Coll London、Univ Sci & Technol Beijing。其中，这些机构有 4 所位于中国，2 所位于英国，1 所位于加拿大。从新一代移动通

## 第二部分 领域报告：信息与电子工程

表 1.2.9 “新一代移动通信技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	8	88.89%	381	98.70%	47.63
2	Canada	7	77.78%	228	59.07%	32.57
3	UK	5	55.56%	295	76.42%	59.00
4	Singapore	1	11.11%	115	29.79%	115.00
5	Taiwan of China	1	11.11%	53	13.73%	53.00
6	Australia	1	11.11%	18	4.66%	18.00
7	USA	1	11.11%	18	4.66%	18.00

表 1.2.10 “新一代移动通信技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Beijing Univ Chem Technol	7	77.78%	366	94.82%	52.29
2	Univ British Columbia	6	66.67%	223	57.77%	37.17
3	Tsinghua Univ	5	55.56%	344	89.12%	68.80
4	Univ Sheffield	4	44.44%	278	72.02%	69.50
5	Beijing Univ Posts & Telecommun	3	33.33%	175	45.34%	58.33
6	Kings Coll London	3	33.33%	43	11.14%	14.33
7	Univ Sci & Technol Beijing	3	33.33%	50	12.95%	16.67
8	Minist Educ China	1	11.11%	137	35.49%	137.00
9	Shanghai Jiao Tong Univ	1	11.11%	137	35.49%	137.00
10	Univ Elect Sci & Technol China	1	11.11%	137	35.49%	137.00

信息技术工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络（见图 1.2.5）可看出，中国、加拿大、英国间存在较密切的合作关系。从新一代移动通信技术工程研究前沿主要机构间的合作网络（见图 1.2.6）可看出，各机构间合作关系较为密切。从施引核心论文的主要产出国家和地区统计结果（见表 1.2.11）来看，中国、加拿大和美国名列前三。其中，中国以 157 篇的论文数高居榜首，所占比例达到 48.61%。从施引核心论文的主要产出机构（见表 1.2.12）来看，排名前十的机构中，中国占据了 8 席，其中 Beijing Univ Posts & Telecommun 和 Tsinghua Univ 分别以 34 和 17 的施引核心论文数位列第一和第三，所占施引核心论文比例分别为 24.46% 和 12.23%，而排名第二的是加拿大的

Univ British Columbia，其施引核心论文数为 23，占比为 16.55%。



图 1.2.5 “新一代移动通信技术”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

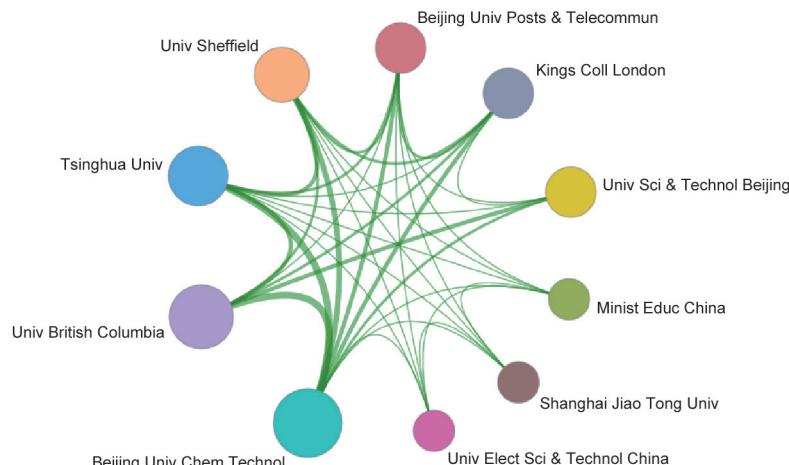


图 1.2.6 “新一代移动通信技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “新一代移动通信技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	157	48.61%	2016.4
2	Canada	45	13.93%	2016.0
3	USA	26	8.05%	2016.3
4	South Korea	25	7.74%	2016.7
5	UK	23	7.12%	2016.0
6	Iran	12	3.72%	2016.4
7	Australia	11	3.41%	2016.3
8	India	9	2.79%	2016.7
9	Singapore	8	2.48%	2016.3
10	Taiwan of China	7	2.17%	2016.4

表 1.2.12 “新一代移动通信技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Beijing Univ Posts & Telecommun	34	24.46%	2016.2
2	Univ British Columbia	23	16.55%	2016.0
3	Tsinghua Univ	17	12.23%	2016.1
4	Southeast Univ	17	12.23%	2016.3
5	Xidian Univ	12	8.63%	2016.3
6	China Univ Min & Technol	9	6.47%	2016.1
7	Nanjing Univ Posts & Telecommun	8	5.76%	2016.6
8	Chinese Acad Sci	7	5.04%	2016.4
9	Univ Essex	6	4.32%	2015.8
10	Beijing Univ Chem Technol	6	4.32%	2016.3

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

信息与电子工程领域组所研判的 Top 10 工程开发前沿汇总见表 2.1.1，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。各个开发前沿所涉及的核心专利自 2012 年至 2017 年的逐年公开情况见表 2.1.2。

#### (1) 无人机与车辆自动驾驶技术

无人机是指依靠系统自身感知、处理和运行能力，根据外部环境实时变化自主决策，完成既定任

务的飞行器。车辆自动驾驶技术是以高精度地图为基础，辅以车载传感设备收集数据，通过具有深度学习能力的智能算法的识别、运算做出相应决策，自主控制车辆行驶的技术。无人驾驶、自主控制能够极大提升系统性能，减轻人员负担，是飞机与车辆的未来发展方向。随着传感器技术、网络技术、信息技术、人工智能技术的快速发展，无人机和自动驾驶车辆技术不断取得重要突破，系统性能持续提升，逐步开始实际应用。

#### (2) 多维度图像信息获取、处理与融合技术

图像信息融合能够以软件手段把对同一目标或场景的不同图像，综合成对同一目标或场景的准确

表 2.1.1 信息与电子工程领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	无人机与车辆自动驾驶技术	177	14 988	84.68	2013.80
2	多维度图像信息获取、处理与融合技术	33	1200	36.36	2013.97
3	虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术	45	1980	44.00	2014.33
4	光纤通信与全光网络	156	6166	39.53	2013.28
5	网络安全中的身份认证与访问控制	23	1278	55.57	2013.70
6	云计算平台	111	9269	83.50	2013.05
7	人–机交互传感方法及应用	39	1534	39.33	2013.38
8	阵列式传感器及阵列传感大数据处理技术	64	2800	43.75	2012.83
9	宽带无线通信系统	83	7121	85.80	2013.14
10	基于非易失性存储器的新型存储系统	50	4480	89.60	2013.02

表 2.1.2 信息与电子工程领域 Top10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	无人机与车辆自动驾驶技术	35	26	67	38	10	1
2	多维度图像信息获取、处理与融合技术	5	9	7	8	2	2
3	虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术	8	5	9	12	9	2
4	光纤通信与全光网络	60	45	21	13	11	6
5	网络安全中的身份认证与访问控制	2	10	6	3	2	0
6	云计算平台	43	33	26	6	2	1
7	人–机交互传感方法及应用	11	9	14	3	2	0
8	阵列式传感器及阵列传感大数据处理技术	30	19	12	2	1	0
9	宽带无线通信系统	35	25	8	9	3	3
10	基于非易失性存储器的新型存储系统	18	18	10	3	1	0

描述。军事、医学、自然资源勘探、海洋资源管理、环境和土地利用管理、地形地貌分析、生物学等的应用需求有力地刺激了图像处理和图像融合技术的发展。随着遥感技术的发展，获取遥感数据的手段越来越丰富，各种传感器获得的影像数据在同一地区形成影像金字塔，图像融合技术实现多源数据的优势互补，为提高这些数据的利用效益提供了有效途径。良好的图像融合方法能够为后续计算机自动化处理奠定坚实基础。

### (3) 虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术

虚拟现实技术利用计算机模拟产生一个纯虚拟的三维空间，在这个虚拟空间中给人们提供一个与客观世界相一致的感知体验。增强现实技术则将计算机模拟的虚拟环境与现实环境进行多层次融合，通过将虚拟信息叠加到现实环境，增强人们对现实环境的感知，借助实物或实际场景的信息模型来增强用户对虚拟物体体验的真实感。无论是虚拟现实技术还是增强现实技术，都极大扩展了人类感知、认识世界的能力，使人类可以不受时空限制，去经历和体验世界上早已发生或尚未发生的事件，观察和研究同一事件在各种假想条件下的发生和发展过程，深入到人类生理活动难以到达的宏观或微观世界去研究和探索，从而为人类认识和改造世界提供了全新方法和手段。为了让人们对虚拟环境/物体获得与真实世界等同的感知，必须从几何、外观、物理、行为等多个方面对虚拟环境/物体进行真实感建模，并实时生成虚拟环境/物体满足人们视觉、听觉、触觉等多种感知渠道所需的模拟信息。因此，虚拟现实与增强现实系统综合了计算机图形技术、计算机模拟仿真技术、人工智能、传感技术、显示技术、交互技术等多个技术类别，是高度集成化的计算机计算模拟系统。

### (4) 光纤通信与全光网络

光纤通信技术是指一种利用光信号与光纤传递信息的方式。光信号经过不同调制方式后能够携带

大量信息。光纤主要制作材料为玻璃，本身属于电气绝缘体，无需考虑接地回路问题。由于光纤通信系统具有通信容量大（目前已达几十 Tbps）、传输距离长、抗干扰性能强、保密性好、成本低等优势，发展迅猛，得到业界持续广泛关注，尤其在现今信息大爆炸时代，光纤通信技术的应用对于通信行业的发展乃至整个社会的变革做出了巨大贡献。

全光网指的是网络传输和交换过程中全部通过光信号处理实现，因为不必在其中实现电光和光电转换，因此能够大幅提升传输带宽，同时降低功耗和节省成本。全光网主要技术有光纤技术、波分复用技术、光交换技术（ROADM、OXC 等）、无源光网技术（FTTX）、光纤放大器技术（EDFA、拉曼放大）等。

光纤通信与全光网络的快速发展，为“提速降费”的国家战略奠定了基础。

### (5) 网络安全中的身份认证与访问控制

身份认证也称为“身份验证”或“身份鉴别”，是指在计算机及计算机网络系统中确认操作者身份的过程，从而确定该用户是否具有对某种资源的访问和使用权限，进而使计算机和网络系统的访问策略能够可靠、有效地执行，防止攻击者假冒合法用户获得资源的访问权限，保证系统和数据的安全，以及授权访问者的合法利益。

目前主流身份认证与访问控制技术包括：基于口令的身份认证与访问控制技术；基于智能卡的身份认证与访问控制技术；基于密码的身份认证与访问控制技术；基于区块链技术的身份认证与访问控制；基于生物特征的身份认证与访问控制技术。

身份认证与访问控制技术发展趋势将在以下几个方面突破和发展：多种身份认证与访问控制技术相结合，提供认证安全性和有效性。例如，口令认证的方式简单易行，基于密码的认证方式技术算法比较成熟、稳定，智能卡具有高安全特性，而指纹虹膜等生物特征具有很好的唯一性，不会丢失或冒用，把各自优势结合起来，可以产生更好效果。

基于智能合约的去中心化分布式验证技术，可以利用 Token 的方式对系统中用户的身份、权限及访问控制进行智能化控制。 基于用户属性的身份认证与访问控制技术，采用基于身份加密机制，利用用户邮箱、身份 ID 等属性作为输入凭证，解决传统密码机制不友好，不可恢复的问题。 认证的标准，通过指定统一的标准，解决不同应用系统认证机制兼容问题。

### (6) 云计算平台

云计算平台能够让用户以按需方式，通过网络方便地访问云系统中的可配置资源共享池，如服务器、网络、存储、应用程序和各种服务，同时以最少管理开销及与供应商最少交互，迅速配置提供或释放资源。云计算的最终目标是将计算、服务和应用作为一种公共设施提供给公众，使人们能够像使用水、电等资源那样使用各类 IT 资源，并按实际用量付费，而不需要自建。为此，云计算被公认为是继个人计算和互联网变革之后的第三次革命，世界上主要国家均将其列入国家整体发展战略，并当作未来信息化的制高点布局和推进。

云计算平台提供的服务可以分为基础设施即服务( IaaS )、平台即服务( PaaS )和软件即服务( SaaS )三个层次，并按照部署形态可分为公有云、私有云、混合云等种类。云计算平台实现的关键技术包括服务器虚拟化技术、分布式计算技术、分布式存储、软件定义网络、云安全技术等。云计算平台已成为互联网时代信息技术基础设施的主要形态，并且由公有云加私有云或多个私有云构成混合云正在成为多数企业和组织向云计算转型的优先选择。云计算平台本身也在迭代演化，出现了移动云、边缘云等新型模式，并为大数据、物联网、人工智能、区块链等新兴应用融合发展提供基础支撑。

### (7) 人-机交互传感方法及应用

人机交互技术在用户与计算设备之间建立起信息交流的界面和通道。从早期手工纸带、命令行界面、图形用户界面，到现在的多点触控界面、实物

用户界面，当前人机交互技术正进入高效、智能、隐形的自然交互阶段。在以人为中心的交互过程中，计算机通过感知用户的语音、表情、姿态、生理数据等各类信息，准确识别用户的交互指令，并建模用户的文化背景、个性习惯、情绪偏好等上下文，更为准确地理解用户的交互意图，预测交互行为，大幅减轻用户在交互过程中的认知负担。人机交互传感的关键方法主要有：基于语音及其他声音信号的交互传感方法、基于笔迹或触点数据的交互传感方法、基于行为表情理解的交互方法、基于情感计算的交互传感方法以及基于生理计算的交互传感方法等。

新型交互设备将采用一种或者多种关键传感方法，提高对用户交互意图理解的准确率；通过投影、体感、声音、气味等各类人工感觉技术，构建用户体验逼真的虚拟环境，提升人与机之间信息交互的带宽，建立新的人机交互界面，为新一代计算系统带来全新的服务体验。人机交互传感方法是穿戴计算系统、智能生活空间系统、游戏娱乐系统、虚拟 / 增强 / 混合现实系统的关键支撑技术，广泛应用于媒体、娱乐、教育、医疗、国防等各个重要领域。

### (8) 阵列式传感器及阵列传感大数据处理技术

阵列式传感器被广泛应用于雷达、通信、导航、声纳、麦克风、地震监测以及其他一些领域。阵列式传感技术是将一组传感器按一定方式布置在空间不同位置上，从而形成接收多维空间信号的传感器阵列。阵列信号处理是对空间信号进行特定处理，以提取有用的信号特征。与单一传感器的一维信号处理相比，阵列信号处理具有灵活的波束控制、较高的信号增益以及很好的空间分辨能力。阵列传感器是硬件基础，其布放形式、分布范围和个数对最终信息提取有重要影响；阵列信号处理算法作为软件部分，更直接关系到相关信息提取的正确性和有效性。阵列信号处理的理论研究始于 20 世纪 60 年代，先后集中在自适应波束控制和空间谱估计上。近 20 年超分辨率谱估计技术受到重视，但是超分

辨算法的运算量普遍较大，算法实时实现的软硬件是一个研究前沿。

随着传感器品种和数量不断增加以及信号采集技术迅速提高，采集到的信号数据量急剧增加，信号在空域和频域上分布范围不断拓宽。传感器及其信号处理技术也正在从传统应用领域进入天文、能源、金融、地理科学、安全保障以及社会网络等多个新领域。信号在带宽、维数、分辨率以及采集网络化上的快速发展，使得信号采集数据增长率高于数据存储增长率和信号处理速度增长率，信号处理进入大数据时代。

大数据背景下的信号处理主要发展方向包括：开发智能传感器、集信号采集、压缩和处理于一体，以降低信号的通信量，并提取有价值信号；发展新的多传感器信息融合算法，以处理复杂多源信息，解决不同数据源的时空配准问题、异类数据融合问题；发展高速信号处理核心技术，以提高 I/O 带宽和实时信号处理能力；引入人工智能大数据处理技术，以提高数据整合、融合和协同分析能力，提高数据挖掘效能。

### (9) 宽带无线通信系统

新一代移动通信系统是移动通信系统演进过程中的一个阶段和目标，它不仅采用新的无线传输技术提高通信系统性能，而且与现有各种有线与无线网络融合；它不仅包含现有移动蜂窝网络结构，而且在某些环境下也可以采用 Ad-hoc 方式组网，或者采用两种结构的组合形式，形成蜂窝网络下的两跳或多跳网络结构方式。一般而言，蜂窝网络是一种广覆盖的网络组网方式，目标是在有限频率和功率资源下实现广域无线覆盖。与蜂窝网络结构相比，Ad-hoc 移动网络结构形式更加灵活，它采用分布式管理技术，由一组自主的无线节点相互合作形成移动通信网络，其中，无线节点既是一般意义上的移动终端，又可以作为无线中继和路由设备转发其他用户数据，因此具有动态搜索、快速建网和网络自恢复能力，有着广泛应用前景。鉴于 Ad hoc

在无线组网和下一代无线网络的重要地位，IETF ( Internet Engineering Task Force ) 已成立 MANET 工作组，进行 Ad-hoc 网络研究。此外，近几年来，随着超宽带 ( UWB ) 技术的发展和应用，无线网络中的节点在工作时可以发送大量非常短和快的能量脉冲，其发射信号功率谱密度较低，非常适合作为新一代移动通信系统中个域网络的实现技术。

随着基于控制与承载相分离思想的软交换技术不断发展与成熟，以及基于交换与业务控制相分离的可以快速实现各种增值业务的智能网技术的广泛应用，它们在新一代移动通信系统中将发挥更大作用。此外，随着 IP 技术的广泛应用，业界广泛认为基于新一代移动通信的通信网络结构发展趋势是以 IP 网络为核心。同时，伴随网络容量和用户的快速发展，IPv6 技术将成为下一代网络的核心协议。

无线通信系统趋于融合：各无线通信系统内的不同适用标准开始求同存异，实行互补，趋于融合；各系统间通过磨合不断趋于融合，各系统也不断完善；无线通信系统与 Internet 之间趋于融合，有利于实现 IP 业务传输的透明化。

### (10) 基于非易失性存储器的新型存储系统

传统存储器的速度等性能比 CPU 相差很大，已成为制约整个计算系统的最大瓶颈。另一方面，移动终端、大数据、云计算、机器学习等新兴应用的快速发展，对存储器的读写性能、I/O 速度、带宽、容量的要求不断提高，现有的缓存 ( SRAM ) / 主存 ( DRAM ) / 硬盘 ( Flash 或者 HDD ) 的多层次存储架构已远远不能满足要求，存储器与 CPU 之间的矛盾日益突出，急需性能优越的新一代非易失存储器去取代 DRAM 和 Flash。因应这一需求，IBM 于 2008 年提出了被命名为 Storage-Class-Memory ( SCM ) 的新的存储器概念，它的定义是即具备非易失性、大容量、低成本等硬盘拥有的优点，又具备读写速度快、可靠性高、可字节寻址等 DRAM 拥有的优点。经过几十年的研发，目前已有很多种非易失存储器技术具有成为 SCM 的潜

力，包括 STT-MRAM、PCRAM（Intel 最新发布的 3D-xPoint）、ReRAM、FRAM 等。SCM 又分为两大类，以主存为目标的 Memory-SCM 和以数据储存为目标的 Storage-SCM。在性能指标上，Memory-SCM 要求为耐久性大于  $10^9$ ，读写延迟小于 200 ns，以便能够与 DRAM（50 ns 级别）一起作为同级主存使用而不必通过 I/O 控制器。拥有这些性能指标的非易失 Memory-SCM 能解决一系列传统存储系统的问题，将全面地优化提升存储系统，甚至彻底改变整个计算架构。

随着数据量增加，计算架构一大发展趋势是大幅度增加缓存容量和主存容量。如果用传统 SRAM 和 DRAM 来实现扩容，由于其易失性，它们需要与速度慢多个数量级的外部存储（Flash 或 HDD）配合使用，这反而会导致整个系统的性能指标降低。Memory-SCM 的快速及非易失性可以很好地解决这个矛盾，不仅实现存储器扩容，减少内部处理开销，也将极大提高整体性能。Memory-SCM 可以取代内存中的 DRAM，由于 SCM 的低成本高密度特征，内存容量可以大幅度提高，其数据是“非易失”的，因此即可以大幅度提高与 CPU 数据交换效率，同时也减少了与 Flash/HDD 之间的数据交换。在一些特定的应用场景，内存的所有 DRAM 都可以用 SCM 取代，尤其是用耐久性可达到  $10^{14}$  的 STT-MRAM。不过大多数情况下，由于新型的非易失存储器的耐久性及读写速度都比 DRAM 差，主存中依然需要保留部分 DRAM，与 SCM 组成混合主存系统。这种混合主存系统需要开发全新的主存数据管理系统、缓冲区管理算法、存储器界面和接口 / 互联技术，以同时管理两种不同的存储器。同时需要开发出针对 SCM 技术特点的故障管理算法，以及弥补 SCM 低耐久性弱点的磨损均衡算法，并将读写频繁的“热数据”转移到 DRAM 上，以减少 SCM 的磨损，从而延长 SCM 的整体使用寿命。比如新型的 Start-Gap 算法可以把耐久性只有  $10^7$  的 SCM 的使用寿命延长到 3 年。产业界已经开

发了多种这样的 SCM/DRAM 混合主存系统，比如亚马逊发布的云计算系统 x1e 中使用的 16 TB 混合内存。SCM 取代 DRAM 的另一个优点是降低能耗，因为 SCM 不需要像 DRAM 那样不断刷新。在大型计算系统中至少 1/3 的电力消耗在存储器系统中，而 SCM 取代 DRAM 可以极大地降低能耗。另一类非易失存储器 Storage-SCM 的应用目标是取代硬盘。与 Flash 相比，SCM 的优点包括速度更快、功耗更低等。

以上新型架构虽然比 SRAM/DRAM/Flash 系统优化了很多，但还有一个缺陷制约了其综合性能：数据需要在不同功能块之间传递，因此消耗了过多的时间和电力。更彻底的改进是把现有的冯·诺伊曼计算架构全盘推翻，放弃以 CPU 为中心的架构，改成全新的“以数据为中心的计算架构”（非冯氏架构）并从头开始重新设计软件和硬件的界面。在以数据为中心的计算架构中，数据存储在大容量的非易失 SCM 存储器阵列中（称为“通用存储器”），系统不再是把数据送到 CPU 去进行运算，而是采用分布式 CPU 将 CPU 计算功能围绕着数据进行布局，以便对数据进行就近计算。IBM 的模拟计算显示，采用非易失 SCM 存储器技术的以数据为中心的计算架构的性能，将比冯氏架构在速度、能耗、占地空间等多个指标上提高多个数量级。

### 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

#### 2.2.1 无人机与车辆自动驾驶技术

无人机的自主控制分为自主运动控制层、自主任务控制层、自主协同控制层 3 个层面，核心关键技术主要是无人系统复杂环境自适应控制技术、面向任务的无人系统自主控制技术、无人系统协同控制技术。复杂环境自适应控制技术主要解决无人系统在复杂条件下自主运动控制问题。面向任务的无人系统自主控制技术主要解决无人系统在对抗环境下执行复杂任务时的自主决策与控制问题。无人系

统协同控制技术主要解决多个无人系统协同执行任务时的控制与决策问题。

自动驾驶的分级目前以国际汽车工程师学会提出的 0~5 级分级为主流（见表 2.2.1）。L0 是完全没有辅助系统，由驾驶员掌握车辆操作；L1 是仍由驾驶员操作车辆，但植入个别的辅助系统；L2 是仍由驾驶员掌控车辆，但可透过主动式驾驶安全辅助系统减轻负担；L3 则允许在特定状况下让系统接管车辆操作，但系统判断需要驾驶操作时，驾驶员则必须接管车辆；L4 以上，主要控制车辆的已经是辅助系统，但在极端情况下，仍需驾驶员接手；L5 就是完全无须驾驶员的无人自驾车，人完全成为乘客。

自动驾驶的核心关键技术主要包括传感器技术、高精度地图技术、车辆与环境交互技术和自主决策技术。传感器相当于自动驾驶汽车的眼睛。汽车通过它识别道路、其他车辆、行人障碍物和基础交通设施。传感器通常分为激光雷达、传统雷达和摄像头 3 种。高精度地图通过车辆准确定位，将车辆准确地还原在动态变化的立体交通环境中。为实现自动驾驶的安全性，高精度地图需要达到厘米级的精确程度。车辆与环境交互技术是指车辆与周围的环境，如车辆、交通设施、云端数据库等交互信息的技术，帮助自动驾驶车辆掌握实时驾驶信息和路况信息，为决策提供信息支撑。自主决策技术支撑自动驾驶的最关键部分，目前主要采用机器学习

与人工智能算法来实现。

无人机技术近年来不断取得突破，各种类型的无人机广泛应用于生产、生活和作战。在高性能无人机方面，美国一直走在世界的前列，研发列装了一系列高性能的军用无人机。美国的 MQ-9 “死神”无人机兼具侦察监视与火力打击能力，在实战应用中取得良好效果。X-47B 无人作战飞机成功在航母上自主起飞和着舰，并具备多平台协同能力。下一步，无人机的控制将由简单的遥控、程控向人机智能融合的交互控制方式转变，并逐步向全自主控制方式发展；系统的体系结构由专用化、单一化向通用化、标准化方向发展；应用模式由单平台独立运用向多平台协同，特别是集群应用方向发展。

车辆自动驾驶技术的发展相对还比较滞后，仍处在 L2 阶段。但各大汽车厂商和科技公司近年来都加大了自动驾驶技术的发展力度，预计将在不久的将来取得重大进展。谷歌在 2009 年就开始自动驾驶技术研究，其无人驾驶汽车已经完成 600 万英里的路测和 50 亿英里虚拟路测。特斯拉自动驾驶系统的级别已达到 L2，并不断迭代更新。在国内，百度在 2013 年启动无人车项目，2015 年成立专门的自动驾驶事业部，直接研发 L4 级超高度自动驾驶技术。2018 年 4 月，完成全球首款 L4 级量产自动驾驶巴士“阿波龙”的量产下线。提高系统的可靠性、对环境的适应能力以及降低系统成本是未来

表 2.2.1 自动驾驶系统等级列表

等级	叫法	转向、加减速控制	对环境的观察	激烈驾驶的应对	应对工况
L0	人工驾驶	驾驶员	驾驶员	驾驶员	—
L1	辅助驾驶	驾驶员 + 系统	驾驶员	驾驶员	部分
L2	半自动驾驶	系统	驾驶员	驾驶员	部分
L3	高度自动驾驶	系统	系统	驾驶员	部分
L4	超高度自动驾驶	系统	系统	系统	部分
L5	全自动驾驶	系统	系统	系统	全部

的发展方向。

无人机与车辆自动驾驶技术的重点开发国家和机构，各国专利在全球的部署情况，企业核心专利量及被引量占比、产学研合作情况见表 2.2.2、表 2.2.3、图 2.2.1 和图 2.2.2。

### 2.2.2 多维度图像信息获取、处理与融合技术

近年来，随着传感器技术的发展，信息表现形式多样化，信息数量巨大化，信息关系复杂化，以

及要求信息处理的及时性、准确性和可靠性都是前所未有的。这就使得利用计算机技术对获得的多源信息在一定的准则下进行分析、优化综合以完成所需的估计和决策（即多传感器信息融合技术）得以迅速发展。信息融合可以描述为：综合多源的信息，得到高品质的有用的信息。各种单一的传感器往往不能从场景中提取足够的信息，以至于很难甚至无法独立获得对一副场景的全面描述。需要多传感器的同时获取目标数据进行融合分析，才可有效地进

表 2.2.2 “无人机与车辆自动驾驶技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	154	87.01%	13 112	87.48%	85.14
2	Germany	6	3.39%	435	2.90%	72.50
3	Japan	6	3.39%	650	4.34%	108.33
4	China	5	2.82%	318	2.12%	63.60
5	Canada	4	2.26%	331	2.21%	82.75
6	UK	2	1.13%	131	0.87%	65.50
7	Israel	2	1.13%	148	0.99%	74.00
8	Ireland	1	0.56%	101	0.67%	101.00
10	South Korea	1	0.56%	85	0.57%	85.00

表 2.2.3 “无人机与车辆自动驾驶技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	FORD	26	14.69%	1700	11.34%	65.38
2	GOOG	20	11.30%	1386	9.25%	69.30
3	FLXT	15	8.47%	1964	13.10%	130.93
4	GENK	9	5.08%	632	4.22%	70.22
5	MGIN	7	3.95%	553	3.69%	79.00
6	AUTO	6	3.39%	1102	7.35%	183.67
7	DJII	5	2.82%	318	2.12%	63.60
8	HOND	4	2.26%	510	3.40%	127.50
9	BOSC	3	1.69%	233	1.55%	77.67
10	HONE	3	1.69%	341	2.28%	113.67

注：FORD 表示 Ford Global Technologies Inc；GOOG 表示 Google Inc；FLXT 表示 Flextronics AP LLC；GENK 表示 GM Global Technologies Operations Inc；MGIN 表示 Magna Electronics Inc；AUTO 表示 Autoconnect Holdings LLC；DJII 表示 SZ Dj Technology Co Ltd；HOND 表示 Honda Motor Co Ltd；BOSC 表示 Bosch Gmbh Robert；HONE 表示 Honeywell Int Inc。

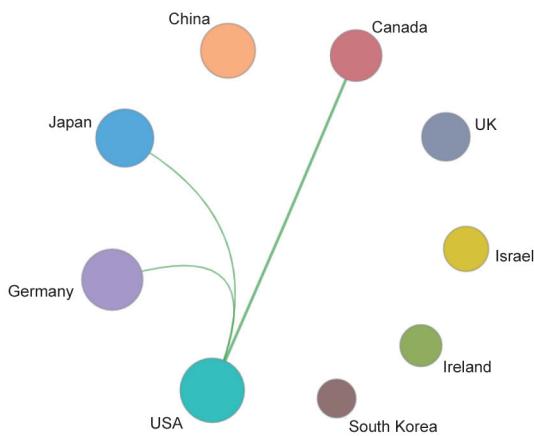


图 2.2.1 “无人机与车辆自动驾驶技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

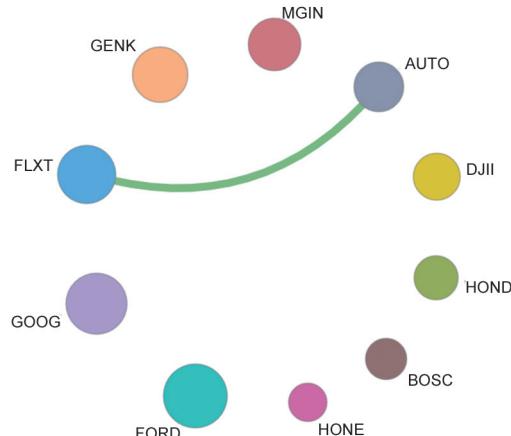


图 2.2.2 “无人机与车辆自动驾驶技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

行分类识别决策。

作为信息融合的一种，图像融合是对多个场景信息的综合。图像融合技术是一种先进的综合多个源图像信息的图像处理技术。所谓多源或者多维图像融合是对多个传感器采集到的关于同一场景或目标的多个源图像进行适当的融合处理，以获取对同一场景的更为准确、更为全面、更为可靠的图像描述。图像是二维信号，图像融合技术是多源信息融合技术的一个重要分支，因此，图像融合与多传感器信息融合具有共同的优点。通过图像融合可以强化图像中的有用信息、增加图像理解的可靠性、获得更为精确的结果，使系统变得更加实用。同时，使系统具有良好的鲁棒性，如可以增加置信度、减少模糊性、改善分类性能等。

目前，将图像融合技术应用于数字图像处理的主要目的存在以下几种：增加图像中有用信息的含量，改善图像的清晰度，增强在单一传感器图像中无法看见/看清的某些特征；改善图像的空间分辨率，增加光谱信息的含量，为改善检测/分类/理解/识别性能获取补充的图像信息；通过不同时刻的图像序列融合来检测场景/目标的变化情况；

通过融合多个二维图像产生具有立体视觉的三维图像，可用于三维重建或立体摄影、测量等；利

用来自其他传感器的图像来代替/弥补某一传感器图像中的丢失/故障信息。

一般来说，图像融合可以在以下 3 个层次上进行：**像素级**。像素级融合是在获取图像信息上进行融合，它能够保留较多信息，提高融合精度，然而由于处理的信息量大，融合效率较低，实时性较差，同时像素级融合图像经过精确配准，否则融合结果容易出现较大误差。**特征级**。在特征级融合的过程中，首先需要对图像进行特征提取，然后依据提取的特征信息对数据采用特征级融合算法进行综合分析和处理。在这一过程中，信息量极大地得以压缩，有利于实时处理，同时融合结果最大限度地给出决策分析所需的信息。**决策级**。决策级融合作为最高水平的融合，融合的结果为指挥、控制、决策提供依据，因此融合结果直接影响着决策水平，决策级融合能够在某些数据源丢失的情况下给出决策，所以具有容错性，此外，与前两个层次相比，决策级融合实时性好、数据要求低、分析能力强，然而对预处理及特征提取有较高要求，所以决策级融合的代价较高。通常，3 级融合可以搭配使用以达到较好融合效果。

图像融合中所用到的信息融合方法可分为六类：基于代数方法、成分代替方法、多尺度分解

方法、统计学方法、变分方法和基于学习的方法。

图像融合是当前图像分析领域的一个重要课题，它有着较为广泛的应用方向，如医学研究、地图绘制、隐匿武器查验等。好的融合图像能为后续的目标识别、分类等计算机自动化处理奠定良好的基础。

多维度图像信息获取、处理与融合技术的重点开发国家和机构，各国专利在全球的部署情况，企

业核心专利量及被引量占比、产学研合作情况见表 2.2.4、表 2.2.5、图 2.2.3 和图 2.2.4。

### 2.2.3 虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术

虚拟现实与增强现实技术都需要在虚拟环境中构建真实世界的模型，这就需要依赖于现实环境的数据采集与建模技术。当前这项技术的发展趋势是

表 2.2.4 “多维度图像信息获取、处理与融合技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	24	72.73%	940	78.33%	39.17
2	Japan	3	9.09%	80	6.67%	26.67
3	Canada	1	3.03%	33	2.75%	33.00
4	Switzerland	1	3.03%	19	1.58%	19.00
5	Germany	1	3.03%	40	3.33%	40.00
6	Finland	1	3.03%	24	2.00%	24.00
7	UK	1	3.03%	35	2.92%	35.00
8	Israel	1	3.03%	27	2.25%	27.00
9	South Korea	1	3.03%	24	2.00%	24.00
10	Sweden	1	3.03%	33	2.75%	33.00

表 2.2.5 “多维度图像信息获取、处理与融合技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	PELI	9	27.27%	428	35.67%	47.56
2	FOTO	5	15.15%	241	20.08%	48.20
3	LYTR	4	12.12%	157	13.08%	39.25
4	MICT	4	12.12%	165	13.75%	41.25
5	CANO	2	6.06%	57	4.75%	28.50
6	AMSH	1	3.03%	33	2.75%	33.00
7	APPY	1	3.03%	31	2.58%	31.00
8	ASPE	1	3.03%	27	2.25%	27.00
9	ETRO	1	3.03%	46	3.83%	46.00
10	GENE	1	3.03%	33	2.75%	33.00

注：PELI 表示 Pelican Imaging Corp；FOTO 表示 Fotonation Cayman Ltd；LYTR 表示 Lytro Inc；MICT 表示 Microsoft Corp；CANO 表示 Canon Kabushiki Kaisha；AMSH 表示 Amersham Pharmacia Biotech Inc；APPY 表示 Apple Inc；ASPE 表示 Aspect Imaging Ltd；ETRO 表示 Etron Technologies Inc；GENE 表示 GE Healthcare Bio-Sci Corp。

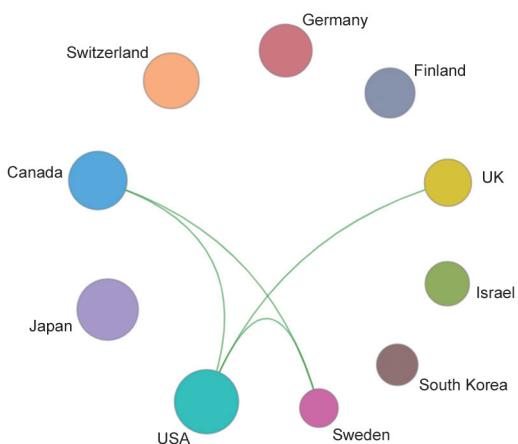


图 2.2.3 “多维度图像信息获取、处理与融合技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

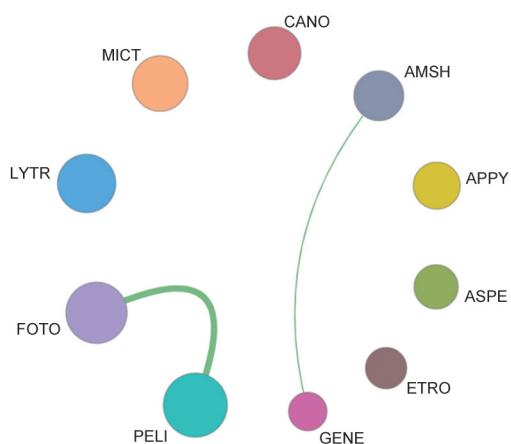


图 2.2.4 “多维度图像信息获取、处理与融合技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

建模对象更广，采集的数据维度、精度和效率更高。建模对象不再局限于几何表面，还包括外观、光照、纹理、双向反射率等。在数据维度方面，除了静态数据，还包含时间维度的动态几何、动态光照、动态纹理等。与此同时采集的速度与精度也在不断提高，几何计算精确达到微米，光照重建也实现了动态光场采集。在建模方法上面，综合利用当前采集设备的最新发展，新的激光扫描仪、深度相机、飞秒相机的使用，拓展了建模的手段；基于视觉、交互以及人工智能等新方法技术，提供了更便捷与智能的建模方式，例如，近年来基于机器学习的建模方法、从高层语义理解的角度探索几何造型设计方法，从而快速批量地设计出风格相似但具有不同尺寸和不同细节的模型。这些技术出现为现实环境的高保真、高效率重建提供了新的技术途径。

虚拟现实与增强现实技术都需要实时高保真地呈现虚拟环境 / 物体，提供给人逼真的视觉体验，这是计算机渲染技术尝试解决的问题。传统图形技术已可以构造出复杂的交互虚拟场景，但表示的准确性和效率有待提高。随着应用的深入，虚拟场景的表现越来越精细，导致其复杂性迅速增长，给虚拟环境的交互处理带来了严重挑战。尽管发明了许

多有效的加速处理技术，如场景简化、采样预算计算以及并行分布处理等，虚拟环境感知的真实性和实时性矛盾仍是影响虚拟现实技术普及应用的瓶颈。目前，这方面的研究出现了两个新的发展趋势。一方面，面对一些特殊的应用需求，通过适当限制交互自由度，寻找低复杂度、高真实性的虚拟场景的表示和驱动方法来达到目的。另一方面，通过针对性地研发新的渲染技术，例如基于外存的大场景渲染技术、GPU 并行计算技术、后处理绘制技术、实时光线跟踪技术等，实现高保真的虚拟环境 / 物体呈现。

为了提供沉浸式虚拟体验，当前虚拟现实与增强现实技术的显示输出技术有别于传统基于显示器的显示方法。通过探索新的显示机理和方式，近年来已经发展出了高分辨率大型投影显示装置、轻量化头盔、真三维光场显示器等一批高新显示设备。近年来，虚拟现实的产业热潮也是随着 Oculus 发布消费级虚拟现实头盔而带动起来的。随后，随着 HTC Vive 虚拟现实头盔、微软 Hololens 穿透式增强现实头盔、Magic Leap 光场显示头盔等一系列产品的推出与发布，以及采用全息技术的显示头盔的出现，给人们提供了新的显示与装置，大大提升了

虚拟现实与增强现实的沉浸式体验。此外，在三维显示器方面，新一代真三维光场显示器，客服了传统裸眼三维显示仅有固定最佳观察点的缺陷，提供了虚拟物体光场的自然呈现，实现了连续的运动视差与双目视差。然而，在显示技术方面，虚拟环境/物体的逼真呈现仍然需要解决虚实一致体验与有限的计算、处理与显示带宽之间的矛盾。

在人机交互方面，传统基于语音、笔式、数据手套和三维鼠标的交互技术日益成熟，但在交互的自然性和效率方面仍存在很多问题，特别是在触觉感知交互方面。尽管许多研究者正在继续完善这些交互技术，但一些虚实融合的新型自然和谐的人机交互技术和界面迅速成为主流发展方向。新的技术力图将人们在现实生活中对物体、环境的交互动作映射为对信息空间的交互过程的用户界面，尽可能地将生活体验应用到人机交互系统中，以降低计算机技术的学习门槛，增加交互的自然性。多点触摸用户界面、基于手势的交互方法是近年来被深入研究的一种人机交互界面，这些交互技术虽然得到初步应用，但往往受限于可靠性、实时性、灵活性、准确性、方便性等因素，与人们所期望的自然、直观的人机交互技术仍然有不小的距离。

虚拟现实与增强现实技术所面向的对象是人，因此需要实现在人感知意义下的虚实环境一致体验。这也需要对人的心理与生理的层面开展感知真实研究。这其中，首先要解决的是由虚拟环境模拟带来的身体不适，通常指“虚拟现实晕动症”。导致虚拟现实晕动症的因素有很多中，首先是视觉信息（即眼睛看到的虚拟画面）与耳内前庭系统感受到的真实位置信息不匹配，从而产生眩晕感；另一个原因是计算导致视觉画面延迟，运动存在延迟滞后现象。此外每个人的瞳距不一，人眼瞳孔中心、透镜中心、画面中心三点可能并非一线，从而出现重影现象，也会带来不适感。最后，由于虚拟场景中景深不同步也可能会产生眩晕。

目前解决晕动症的方法有多种：生物同步反馈技术，如使用全向跑步机等在虚拟世界做出对现实反应的真实模拟；电磁刺激技术，如使用前庭电刺激技术通过耳后电极的反馈刺激用户前庭感受器，使体验者产生强烈的虚拟环境视觉与身体位置沉浸感；提升计算能力，如降低延迟等；

在虚拟场景中添加虚拟参照物，如虚拟鼻子，来减少感知的不适。

虚拟现实与增强现实技术这一概念的提出可以追溯到 20 世纪 30 年代的科幻小说，第一款将概念部分转化为现实的实验室虚拟现实头盔出现于 20 世纪 60 年代，而真正进入消费级市场，引领虚拟现实产业发展的 Oculus 头盔正式发售于 2016 年。在建模、渲染、显示与交互技术都获得长足发展之后，虚拟现实与增强现实技术终于步入寻常百姓的家里，开始真正影响人们的生活，而消费市场的快速发展又会进一步促进技术的完善与发展。当前国际上著名的 IT 企业（如微软、Facebook、Google、Apple）都纷纷增加在虚拟现实与增强现实技术上的投入。市场 – 技术相互促进与发展的成果将会在未来 5 年内得以体现。在虚拟环境呈现的方式、呈现的真实性、人机交互的便捷性与准确性等方面将会取得进一步的发展。近眼光场显示头盔、基于光线跟踪的真实感呈现算法、自然手势交互、移动精准定位与位置感知等方面预期都会有较大的突破，进而将虚拟现实与增强现实创造虚拟环境的真实性进一步提升，从而提供给人们无障碍可体验、感知舒适的虚拟与增强环境。

虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术的重点开发国家和机构，各国专利在全球的部署情况，企业核心专利量及被引量占比、产学研合作情况见表 2.2.6、表 2.2.7、图 2.2.5 和图 2.2.6。

表 2.2.6 “虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	34	75.56%	1507	76.11%	44.32
2	Japan	7	15.56%	208	10.51%	29.71
3	Canada	2	4.44%	82	4.14%	41.00
4	Germany	1	2.22%	121	6.11%	121.00
5	South Korea	1	2.22%	62	3.13%	62.00

表 2.2.7 “虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	MICR	10	22.22%	735	37.12%	73.50
2	MAGI	7	15.56%	309	15.61%	44.14
3	DAQR	3	6.67%	54	2.73%	18.00
4	SHIH	3	6.67%	71	3.59%	23.67
5	SONY	3	6.67%	94	4.75%	31.33
6	GOOG	2	4.44%	86	4.34%	43.00
7	MICR	2	4.44%	49	2.47%	24.50
8	BOSC	1	2.22%	121	6.11%	121.00
9	ETRI	1	2.22%	62	3.13%	62.00
10	EYEL	1	2.22%	15	0.76%	15.00

注：MICR 表示 Microsoft Corp；MAGI 表示 Magic Leap Inc；DAQR 表示 Daqri LLC；SHIH 表示 Seiko Epson Corp；SONY 表示 Sony Corp；GOOG 表示 Google Inc；MICR 表示 Microsoft Technology Licensing LLC；BOSC 表示 Bosch GmbH Robert；ETRI 表示 Electronics & Telecom Res Inst；EYEL 表示 Eye Labs LLC。

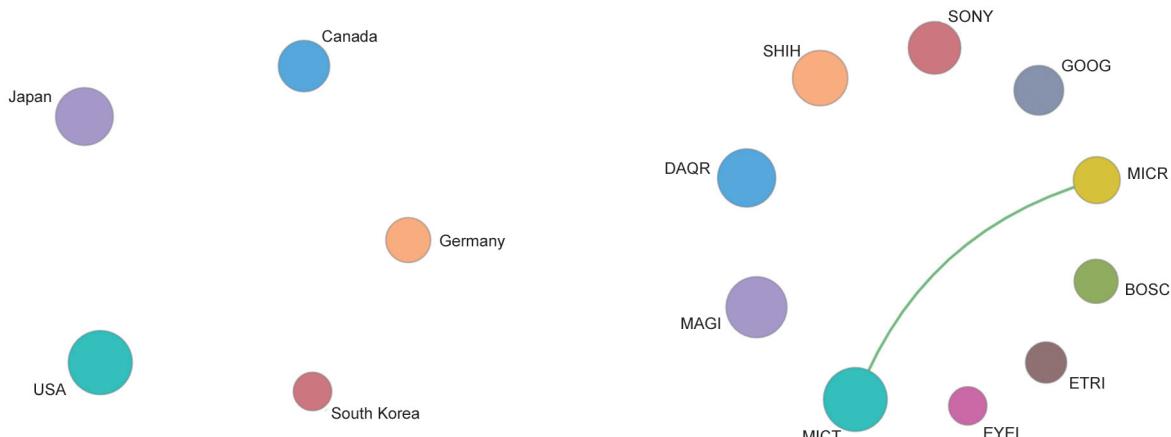


图 2.2.5 “虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

图 2.2.6 “虚拟现实与增强现实系统的显示、交互和操控技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：潘云鹤 卢锡城

课题组副组长：邬江兴 姜会林

院士专家：

第一组：李天初 陈良惠 龚惠兴 姜会林

周寿恒 韦 钰 刘泽金

第二组：邬江兴 段宝岩 陈志杰 刘韵洁

樊邦奎 吴伟仁

第三组：潘云鹤 卢锡城 郑南宁 李伯虎

费爱国 赵沁平 吴建平

## 工作组成员

文献情报专家：

杨未强 刘书雷 耿国桐 霍凝坤 屈婷婷

吴 集 杨 筏 刘宝林 陈振英 叶文莹

联络员：范桂梅 王 兵 张 佳 曾建林

秘书：翟自洋 胡晓女 杨未强

执笔组成员：

艾 渤 程志渊 邓启文 范红旗 韩亚洪

胡晓女 黄辰林 黄育侦 金仲和 李 宝

刘 肯 刘妹琴 任沁源 谭 霜 王 锐

吴 飞 席 鹏 谢人超 杨 易 张成良

郑能干

### 三、化工、冶金与材料工程

## 1 工程研究前沿

### 1.1 Top12 工程研究前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判的 Top12 工程研究前沿见表 1.1.1，它们涉及新能源材料科学与工程、功能材料、复合材料与工程、材料物理与化学、催化等学科方向。其中，“开发新型燃料电池”“金属材料纳米化及高性能”“二氧化碳固定”“高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成”“功能梯度纳米级材料”“超级电容器的设计以及制备”“高效电催化分解水”是传统研究的进一步深入；“石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”“以锂为代表的金属–空气电池”“卤

化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器”“新型荧光分子探针在生物成像中的应用”“金属–有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用”是新兴的前沿。各个前沿所涉及的核心论文在 2012—2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

#### (1) 石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料

碳材料的种类繁多，包括木炭、炭黑、石墨、金刚石、线性碳、碳纤维、玻璃碳、石墨层间化合物、富勒烯、碳纳米管和石墨烯等。碳纳米管和石墨烯是近十年来研究最火热的材料，石墨烯纳米片是一种由碳原子  $sp^2$  杂化轨道组成的六角形呈蜂巢

表 1.1.1 化工、冶金与材料工程领域 Top12 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料	34	2040	60.00	2015.94	50.0%	0.00
2	开发新型燃料电池	49	1023	20.88	2016.31	49.0%	0.00
3	金属材料纳米化及高性能	1834	238 535	130.06	2014.00	—	—
4	二氧化碳固定	19	1195	62.89	2015.16	26.3%	0.00
5	以锂为代表的金属–空气电池	37	3019	81.59	2015.19	62.2%	0.00
6	高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成	18	1184	65.78	2016.28	50.0%	0.00
7	功能梯度纳米级材料	40	2767	69.18	2015.20	67.5%	0.00
8	超级电容器的设计及制备	47	2903	61.77	2015.66	31.9%	0.00
9	高效电催化分解水	21	2455	116.90	2015.86	61.9%	0.00
10	卤化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器	130	13 521	104.01	2015.91	55.4%	0.00
11	新型荧光分子探针在生物成像中的应用	38	1139	29.97	2015.71	28.9%	0.00
12	金属–有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用	31	2314	74.65	2015.23	41.9%	0.00

## 第二部分 领域报告：化工、冶金与材料工程

表 1.1.2 化工、冶金与材料工程领域 Top12 工程研究前沿核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料	2	1	4	1	8	18
2	开发新型燃料电池	0	1	0	6	18	24
3	金属材料纳米化及高性能	302	367	489	419	216	41
4	二氧化碳固定	1	0	3	9	3	3
5	以锂为代表的金属–空气电池	0	5	5	9	14	4
6	高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成	0	0	0	1	11	6
7	功能梯度纳米级材料	0	1	4	21	14	0
8	超级电容器的设计及制备	1	4	5	10	7	20
9	高效电催化分解水	0	0	0	11	2	8
10	卤化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器	0	0	7	36	49	38
11	新型荧光分子探针在生物成像中的应用	0	0	0	17	15	6
12	金属–有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用	1	3	4	6	14	3

状晶格的片状结构新材料，碳纳米管可以看成是石墨烯纳米片卷曲成的一维管状纳米结构碳材料，两者都具有高的机械热力学性能和电性能。然而，无论石墨烯还是碳纳米管，在制备相关复合材料时，由于其特有的小尺寸效应和表面效应以及强的范德华力，使其极其容易发生自身团聚而无法制备出均匀的复合材料；另一方面，由于两者表面的疏水、疏油性质及化学惰性，导致与其他材料的界面相容性比较差，所得复合材料的界面结合强度就比较低。这需要对其进行功能化改性，即在纳米碳材料的石墨晶格中或表面上引入杂原子或杂原予官能团。功能化改性可以达成修饰和调变石墨中碳原子电子结构的目的，从而改变其物理化学性质，进而提高纳米碳材料在制备复合材料时的可加工性。

### (2) 开发新型燃料电池

燃料电池是一种将化学能直接转换成电能的化学装置，是继火力发电、水力发电、核能发电之后的第四种发电技术。燃料电池是一种绿色能源技术，从节约能源和保护生态环境的角度来看，是最有发

展前途的发电技术。燃料电池中最常使用的燃料是氢气，它具有能量转化率高、低排放、能量和功率密度高等优点，然而全球 96% 的氢气来自不可再生能源，并且氢能存在运输和储存困难、配套的基础设施匮乏等问题，限制了燃料电池的大规模应用。因此发展新型燃料电池已经成为目前的研究重点，主要包括：寻找新型可替代燃料（乙二醇、乙炔二醇、甲酸等）并研究其电氧化机理；高性能、长寿命、低成本的新型电催化材料制备及改性的新方法；新型高能量、功率密度柔性燃料电池的设计及开发；利用燃料电池电催化反应生产高附加值化学品的机理及应用研究。

### (3) 金属材料纳米化及高性能

纳米金属材料的制备及其综合性能的提高将极大地促进工业的进一步飞速发展。金属材料的力学性能、电磁学和光学等性能与其晶粒尺寸密切相关，将晶粒纳米化是提高金属材料的综合性能的有效途径。纳米金属材料是由纳米尺寸晶粒组成，其研究主要包括金属材料选择、材料制备和材料性能评价。

目前，只在部分金属材料中实现了纳米化制备，但制备的纳米金属材料尺寸较小，材料内部存在较多缺陷，且制备工艺复杂。因此，研发能用于工业应用的纳米金属制备工艺将具有非常大的应用前景。

金属材料的纳米化及高性能仍然是未来研究的前沿，尤其是在制备大块体纳米材料方面，具有非常艰巨的任务和挑战。预计未来在制备高强度、超塑性以及电磁和化学性能方面，将有突破性的进展，将来的发展重点是制备表面纳米材料和大块体纳米材料并将其应用于工程的研究。

#### (4) 二氧化碳固定

$\text{CO}_2$  可转化为碳、醇、合成气、低碳烯烃、醛、酸、醚和酯等多种有工业价值的化合物。每年有约 1.1 亿吨  $\text{CO}_2$  用于化学品的生产，主要是用在尿素、水杨酸、甲醇、环状碳酸酯和聚碳酸酯的工业生产当中，其他  $\text{CO}_2$  的转化利用技术尚处于研究阶段。 $\text{CO}_2$  和环氧化物合成环状碳酸酯及其聚合物是  $\text{CO}_2$  固定转化的有效途径之一，碳酸亚乙酯、及双酚 A 型聚碳酸酯 (bisphenol A polycarbonate) 已实现工业生产。现已建立的催化剂体系包括金属配合物 (Al, Zn, Co, Mg 等)、有机胺类、金属氧化物等。许多均相催化剂可高效合成环碳酸酯，其难以回收利用限制了大规模工业应用。为了解决上述问题，发展高效多相催化剂体系已经成为研究前沿，这必将进一步推动环状碳酸酯生产的工业化进程。氨甲基化、氨甲酰化反应是转化  $\text{CO}_2$  的另一途径。据报道， $\text{MeNH}_2$ 、 $\text{Me}_2\text{NH}$  和  $\text{Me}_3\text{N}$  等甲基胺的市场价值已超过 4000 EUR/t。因此， $\text{CO}_2$  参与的氨甲基化过程可创造新的附加值。 $\text{CO}_2$  为 C1 原料也可参与羧化及羰基化反应，前者过程可利用亲核试剂活化  $\text{CO}_2$  将其转化为羧化产物；后者包括了  $\text{CO}_2$  原位还原为 CO，进而羰基化两个过程。尽管，这两类  $\text{CO}_2$  固定转化策略为生产羰基化、羧化产物提供了新思路，但是现有的催化体系还存在活性受限、条件苛刻等问题，所以研发高效催化剂是实现  $\text{CO}_2$  固定转化的关键。

#### (5) 以锂空电池为代表的金属–空气电池

金属–空气电池是一类以金属为负极、空气中的氧气为正极活性物质的电化学能量储存 / 转换装置，其正极的氧气由空气提供而无需储存在电池内部，因此金属–空气电池具有较高的能量密度，在电动汽车动力电源，电网储能等领域具有广泛的应用前景，目前研究与开发的前沿体系有锂空电池、锌空电池、铝空电池、镁空电池等。

目前金属–空气电池主要的研究方向（以锂–空气电池为例）有：氧还原 / 氧析出双功能催化剂开发与反应机理研究、催化剂活性与稳定性衰减机制、正极结构设计、锂电极 / 电解质界面认识和锂枝晶问题、锂电极腐蚀与防护、电解质开发、电池结构设计与制造、系统集成等。

金属–空气电池未来发展趋势：采用原位表征方法揭示电极反应与离子传输机理，发展接近真实体系的理论模型与算法，开发可控的材料与电极制备方法，开发高效电池组装工艺与低能耗智能管理系统。

#### (6) 高效光催化太阳能转化、污染物降解和有机合成

光催化（包括粉末光催化和光电催化）利用吸收的光能，激发产生高反应活性的电子和空穴，或者激发态分子，一方面能够驱动热力学上的爬坡反应；另一方面能促进下坡反应快速进行，可广泛应用于光能转化、污染物降解处理和一些涉及氧化还原过程的有机化学品的合成。

光催化的效率取决于吸光效率、光生载流子分离效率和催化反应效率的乘积。为了提高对太阳光的利用效率，新型吸光材料尤其是宽光谱响应的氧化物、氮（氧）化物、硫属化物、卤（氧）化物半导体材料正成为研究前沿。对于光生载流子分离，研究提出多种分离机制，如异质结、异相结、施主–受主、晶面电荷分离等概念，并且正在进一步深化。而在催化反应方面，除了分解水制氢和污染物降解，一些新的反应如光催化还原二氧化碳、合成氨、高

附加值有机化学品制备正在成为新的热门方向，研究涉及半导体表面结构对反应的影响机制、助催化剂的作用以及新型助催化剂的开发。

### (7) 功能梯度纳米级材料

过去 30 余年的研究表明，作为发展高强度材料的新手段，结构材料的纳米化因其含有大量的晶界等界面，在强度、硬度等力学性能指标上远超过传统粗晶结构材料，然而随之带来的塑性与韧性显著降低、加工硬化能力消失、结构稳定性变差等都制约着纳米级材料的发展。针对以上问题，人们提出了功能梯度纳米级材料 (functional gradient nanomaterials) 概念。功能梯度纳米级材料是指组分、结构、物性参数和物理、化学、生物等单一或复合性能都呈连续变化，从而使材料性质和功能也呈梯度变化以适应不同环境，比如在大范围调控强度、扩散速率、化学反应活性变化等，实现某一特殊功能的新型功能性材料。目前的研究前沿主要聚集在功能梯度纳米级材料的制备方法上，其中具有代表性的有如下几种：简单、操作性强的粉末冶金法；纯度高、效率高的自蔓延高温合成法；

适用范围广的激光熔覆法；可精确成型的气相沉积法；可引入大量缺陷的梯度塑性变形法等。

功能梯度纳米级材料为发展新材料和新的加工工艺带来了新挑战与新机遇。一方面，对功能梯度纳米级材料的结构 – 性能映射关系、梯度结构中各层次变形机制与均匀结构的差异及其热、机械与化学稳定性等更深层次的理解迫在眉睫；另一方面，其制备加工工艺的高效性、便捷性、成本控制对今后的应用和发展也至关重要。

### (8) 超级电容器的设计及制备

超级电容器是一种高功率密度的无源储能元件，具有充放电速度快、效率高、循环寿命长、工作温度范围宽、可靠性好等诸多优点，其优越性能和广阔的应用前景吸引了全世界的关注。电化学超级电容器是一种依靠双电层或法拉第准电容原理工作的储能器件，其最大的优点是具有优良的脉冲充

放电性能和快速充放电性能。超级电容器的研究现在主要分两个方向：用于可穿戴设备的柔性微型化超级电容器；面向大规模储能和移动电源的高能量密度超级电容器。柔性微型化电容器的发展还处于初级阶段，主要集中于柔性化电极材料、电解质的开发，同时由于电极材料的不同需要配套开发超级电容器的器件组装及封装技术；常规三明治型超级电容器，组装技术比较成熟，研究内容主要集中在高能量密度电极材料和高压电解质的开发方面。

### (9) 高效电催化分解水

电催化分解水反应可作为重要能源载体——氢气的可持续来源，引起了研究的高度重视。电解水反应由水氧化产氧和水还原产氢两个半反应构成。虽然中性体系电解水产氢和产氧反应过电位较高，但由于温和性的优势，仍有一些研究关注，特别是利用某些缓冲（如磷酸盐和硼酸盐）可在一定程度上减小过电势。而在酸性体系和碱性体系中，贵金属载量和非贵金属电催化剂的研究如火如荼。其中非贵金属电催化剂包括 Fe、Co、Ni 等金属的(氢)氧化物、硫属化物、氮族化物。一些非贵金属产氢催化剂活性接近贵金属催化剂，而碱性体系中的产氧催化剂已经超越贵金属催化剂。为了提高产氢和产氧电催化剂的活性，研究从两个方面开展：一是通过将粒子尺寸做小、晶面选择性暴露、形成核壳结构、三维多孔结构等手段提高分散度、增加活性位点暴露的数量；二是通过制备新的晶体结构、表面结构、金属元素协同作用、非金素元素调变作用等方法提高活性位点的本征活性。

### (10) 卤化物钙钛矿基高效太阳能电池、高性能发光材料和灵敏探测器

卤化物钙钛矿以  $\text{APbX}_3$  为代表，其中 A 为甲铵、甲脒、铯等正离子，X 主要是 I，也可以是 Br 或 Cl，而 Pb 亦可替换为 Sn、Bi、Sb、Ag 等金属，也包括以钙钛矿为结构基础的非  $\text{ABX}_3$  型二维层状钙钛矿，如  $\text{A}_2\text{PbX}_4$ ， $\text{A}_3\text{Bi}_2\text{X}_9$ 。卤化物钙钛矿太阳

能电池具有效率高、成本低和制备简单等特点，是当前太阳电池研究的炙手可热的方向。通过对卤化物钙钛矿结晶成膜的控制、缺陷的控制、电子传输和空穴传输界面的调变，不到十年时间卤化物钙钛矿基小面积电池效率提高到 22.7%。卤化物钙钛矿基高效太阳能电池的大面积化和稳定化是目前研究的重点。基于有机铅碘钙钛矿半导体材料的光电性质及相关结构材料元素的拓展，新型的卤化物钙钛矿材料被发现具有高发光性能或辐射响应灵敏度，亦成为新的热门方向。

### (11) 新型荧光分子探针在生物成像中的应用

荧光探针通过荧光信号的变化（波长、强度、寿命等）达到识别和标记目标分子的作用。随着细胞生物学、分子生物学和染料化学的发展，特别是荧光蛋白在生物中的广泛应用和重要性的推动，荧光探针研究集中在对目标分子更加精准的标记，包括使用蛋白标签、非天然氨基酸、生物相交反应（点击化学）等技术；荧光团性能的大幅度提高，包括荧光强度、光稳定性、多色波长、大斯多克斯位移等；新的荧光响应机制的出现和荧光信号的精确解析；多领域多用途的应用，包括突破衍射极限的空间分辨率，满足实时活体成像的时间分辨率，在生物样本的专一选择性响应，解决实际问题，如应用于荧光引导手术等。

### (12) 金属–有机骨架材料的可控制备、功能导向性修饰及应用

金属–有机骨架（metal-organic framework，MOF）材料是一类由金属离子或离子簇与有机配体配位连接而成的新型有机–无机杂化材料。MOF材料化学组成丰富、孔道结构多样，具有传统无机多孔材料无法比拟的优势。近年来，关于 MOF 材料的研究呈爆发性增长态势，主要研究方向有：

MOF 材料的可控制备，包括材料组成、结构的计算模拟设计，高通量晶体合成与表征，形貌、尺寸可控合成。MOF 材料定向后修饰。包括金属及配体替换反应、共价枝接、限域负载、孔道调变、

材料复合、多级纳米结构组装。MOF 材料的应用。包括二氧化碳捕获、烃类化合物存储、吸附与膜分离、催化、传感器、药物传输、光电化学应用。未来，MOF 材料的合成将从探索试错向精准设计发展，包括功能导向型的微观结构设计优化、孔尺寸剪裁及次级结构单元修饰等。MOF 材料未来将在如下两方面展现出巨大的应用潜力：吸附剂与分离膜。未来发展趋势是基于 MOF 吸附剂与分离膜，探索一条能量集约、环境友好的可替代分离路线，力求实现氢气、二氧化碳、天然气、石油基平台化合物、生物质基平台化合物、生物医药中间体的高效分离，污染物脱除及水体去离子化。功能性器件。通过 MOF 材料与其他功能材料集成来发展微型医药、电子、光学器件及微反应器。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料

石墨烯和碳纳米管是材料学及相关领域研究的前沿。研究表明石墨烯、碳纳米管及其复合材料在电子、信息、能源、材料和生物医药等领域具有广泛的应用前景，可望在 21 世纪掀起一场新的技术革命。

纳米碳复合材料主要包括碳 / 聚合物复合材料、碳 / 纳米粒子复合材料和碳 / 碳复合材料等。无论石墨烯还是碳纳米管，在制备相关复合材料时，由于其特有的小尺寸效应和表面效应以及强的范德华力，使其极其容易发生自身团聚而无法制备出均匀的复合材料；另一方面，由于两者表面的疏水、疏油性质及化学惰性，导致与其他材料的界面相容性比较差，所得复合材料的界面结合强度就比较低。这需要对其进行功能化改性，即在纳米碳材料的石墨晶格中或表面上引入杂原子或杂原子官能团。功能化改性可以达成修饰和调变石墨中碳原子电子结构的目的，从而改变其物理化学性质，进而提高纳

米碳材料在制备复合材料时的可加工性。目前石墨烯和碳纳米管复合材料制备研究的创新性不少是有关石墨烯或碳纳米管的改性的，通过对石墨烯或碳纳米管的改性，优化复合材料的结构，从而提高复合材料的性能。石墨烯的功能化的方法主要有共价键合法和非共价键合法。共价键合功能化主要是对碳材料进行氧化处理，从而在材料表面产生大量的环氧基、羧基、羟基和羧基等含氧基团，由于含氧基团反应活性较高，从而奠定了共价改性基础。然后采用异氰酸酯、硅烷偶联剂、有机胺等试剂与氧化处理后的材料反应，实现碳材料的表面功能化。非共价键合功能化是指通过对碳材料表面进行聚合物包裹或物理吸附等作用，来改变其表面特性，提高其在水或非极性溶液中的分散性。由于聚合物包裹法和物理吸附对石墨烯或碳纳米管的固有结构没有破坏作用，所以可以最大程度地保持它们的结构和性质。

石墨烯、碳纳米管等碳纳米复合材料具有优异的性能，且在多方面表现出了独特的应用优势。然而，目前其产业化应用还比较少见，主要原因在于目前相关复合材料的制备水平还有待进一步提高。当前复合材料的制备是碳材料学科发展面临的一大瓶颈，主要相关研究机构分布在中国、美国和印度

等国家，引导相关研究工作者协同攻关，从不同角度解析制备过程中的相关规律，可望大大提高其制备水平，最终为石墨烯、碳纳米管等纳米碳复合材料的产业化应用乃至进入人们的日常生活打下基础。

基于 Web of Science 数据库的高影响力论文，“石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿的核心论文的主要产出国家或地区及机构分别见表 1.2.1 和表 1.2.2，主要国家或地区及机构间的合作情况分别见图 1.2.1 和图 1.2.2，施引核心论文的主要产出国家或地区及机构见表 1.2.3 和表 1.2.4。

### 1.2.2 开发新型燃料电池

燃料电池是继火电、水电和核电之后的第四代发电技术，曾被美国时代周刊列为 21 世纪十大高新科技之首，被誉为未来世界的新型动力源。燃料电池通过电池内部的电化学反应将化学能转化为电能，电池内部不存在机械传动装置，故工作时噪声低且可靠性高。理论上，只要不断的供给燃料和氧化剂，燃料电池就可以实现化学能到电能的持续转换。

氢能是燃料电池的理想燃料，具有能量转化率高、能量和功率密度高、电氧化速率快等优点，同

表 1.2.1 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	13	38.24%	356	17.45%	27.38
2	China	12	35.29%	367	17.99%	30.58
3	Australia	10	29.41%	1371	67.21%	137.10
4	India	5	14.71%	272	13.33%	54.40
5	South Korea	4	11.76%	377	18.48%	94.25
6	Italy	3	8.82%	72	3.53%	24.00
7	Germany	2	5.88%	23	1.13%	11.50
8	Spain	2	5.88%	24	1.18%	12.00
9	France	2	5.88%	22	1.08%	11.00
10	Israel	1	2.94%	16	0.78%	16.00

表 1.2.2 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Tennessee	11	32.35%	334	16.37%	30.36
2	Univ Sydney	10	29.41%	1371	67.21%	137.10
3	Shandong Univ Sci & Technol	9	26.47%	251	12.30%	27.89
4	Univ Ulsan	4	11.76%	377	18.48%	94.25
5	Shandong Univ	3	8.82%	352	17.25%	117.33
6	Pusan Natl Univ	2	5.88%	227	11.13%	113.50
7	Humboldt Univ	2	5.88%	23	1.13%	11.50
8	Avanzare Innovac Tecnol SL	2	5.88%	24	1.18%	12.00
9	Ist Italiano Tecnol	2	5.88%	24	1.18%	12.00
10	Politecn Torino	2	5.88%	24	1.18%	12.00

表 1.2.3 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	409	49.34%	2016.8
2	India	102	12.30%	2016.8
3	USA	99	11.94%	2017.0
4	Iran	53	6.39%	2016.9
5	South Korea	50	6.03%	2016.1
6	Spain	26	3.14%	2016.4
7	Australia	25	3.02%	2016.4
8	Italy	25	3.02%	2016.0
9	UK	20	2.41%	2016.9
10	Turkey	20	2.41%	2017.0

表 1.2.4 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Tennessee	41	20.20%	2017.2
2	Chinese Acad Sci	38	18.72%	2016.7
3	Shandong Univ Sci & Technol	28	13.79%	2017.3
4	Sichuan Univ	20	9.85%	2017.2
5	Harbin Inst Technol	16	7.88%	2016.9
6	Univ Sydney	13	6.40%	2015.9
7	Shandong Univ	13	6.40%	2017.2
8	Tsinghua Univ	12	5.91%	2016.8
9	Tianjin Univ	11	5.42%	2017.3
10	Indian Inst Technol	11	5.42%	2016.6

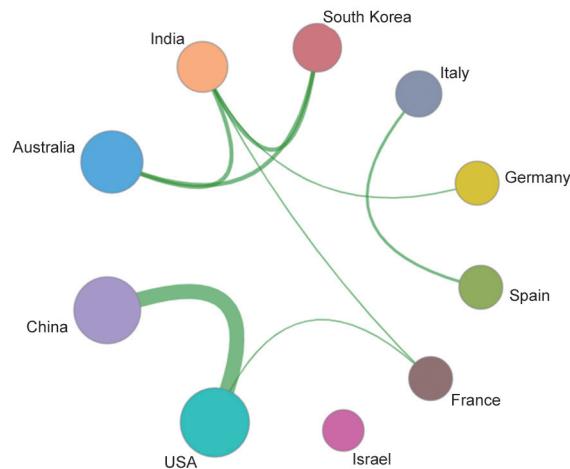


图 1.2.1 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

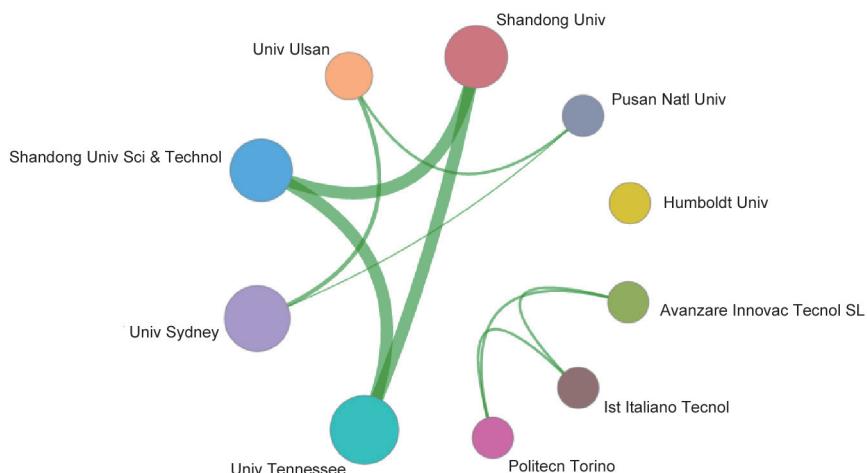


图 1.2.2 “石墨烯、碳纳米管等纳米碳材料的功能化改性及复合材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

时产物只有水，堪称是最为清洁的燃料。然而全球 96% 的氢气均来自不可再生能源，并且氢能存在运输和储存困难、配套的基础设施匮乏等问题，极大地限制了氢燃料电池的应用推广和普及。因此，新型燃料的开发成为该领域的前沿研究方向。目前，丰田已经开始研发一种以天然气为燃料的燃料电池动力系统。天然气燃料电池工作时首先是将天然气分解成氢气和一氧化碳，随后压缩机将空气注入到混合物中，通过燃料电池堆的化学反应产生电能。此过程会产生部分氢气和一氧化碳的废气，这些废气会进入一台微型燃气轮机，燃烧产生更多的电

能。最后发电系统还会使用废热产生额外的电能。因此，预测该天然气燃料电池系统的发电效率会达到 65%。此外，乙二醇、乙炔二醇、甲酸等燃料作为氢燃料的可替代燃料也被广泛的应用和研究。

催化剂是燃料电池另外一个关键材料。作为燃料电池主要催化材料的铂存在两个致命问题，价格昂贵和容易中毒，因此迫切需要发展新型替代催化剂以推动燃料电池技术的发展。2017 年，日本日清纺控股公司通过用碳合金 (carbon alloy) 代替铂，可将燃料电池的材料成本削减至几千分之一左右，在全球首次成功实现了不使用铂催化剂燃料电池的

实用化。电催化氧化和还原是燃料电池进行能量转换的关键步骤，利用电催化开拓高附加值化学品的合成具有重要的研究意义。例如，电催化还原 CO<sub>2</sub> 制备化学品和能源物质可以实现 CO<sub>2</sub> 的资源化利用和洁净电能的有效存储。“开发新型燃料电池”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家和地区及机构见表 1.2.5 和表 1.2.6，施引核心论文的主要产出国家或地区及机构见表 1.2.7 和表 1.2.8。“开发新型燃料电池”工程研究前沿主要国家或地区及机构间的合作网络见图 1.2.3 和图 1.2.4。

当前，我国已连续发布多个政策明确支持发展燃料电池技术，如《中国制造 2025》《国家“十三五”发展规划》，国家发展和改革委员会、国家能源局

印发的《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》《能源技术革命重点创新行动路线图》等，都明确支持“氢能与燃料技术创新”，支持燃料电池发展等核心技术的工程化和产业化。

### 1.2.3 金属材料纳米化及高性能

制备更高性能的金属材料是满足不断发展的工业领域的需求。自 20 世纪 80 年代起，由于纳米金属材料奇异的性能和广阔的应用前景，逐渐引起了各国的重视，将可能成为下一世纪工业革命的核心。目前纳米金属材料的发展方向为金属表面纳米化和块体纳米材料制备，并逐渐开发出了一系列高性能金属材料。纳米金属材料研究的核心技术为金属材

表 1.2.5 “开发新型燃料电池”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	44	89.80%	914	89.35%	20.77
2	Japan	7	14.29%	63	6.16%	9.00
3	USA	5	10.20%	217	21.21%	43.40
4	India	2	4.08%	53	5.18%	26.50
5	Canada	2	4.08%	16	1.56%	8.00
6	Denmark	1	2.04%	13	1.27%	13.00
7	Spain	1	2.04%	15	1.47%	15.00

表 1.2.6 “开发新型燃料电池”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Soochow Univ	22	44.90%	431	42.13%	19.59
2	Chinese Acad Sci	10	20.41%	227	22.19%	22.70
3	Univ Chinese Acad Sci	6	12.24%	146	14.27%	24.33
4	Taiyuan Univ Technol	5	10.20%	180	17.60%	36.00
5	Tokyo Univ Sci Yamaguchi	5	10.20%	41	4.01%	8.20
6	Zhejiang Normal Univ	4	8.16%	47	4.59%	11.75
7	Shandong Univ	4	8.16%	156	15.25%	39.00
8	Peking Univ	4	8.16%	156	15.25%	39.00
9	Xiamen Univ	2	4.08%	57	5.57%	28.50
10	SUNY Stony Brook	2	4.08%	98	9.58%	49.00

## 第二部分 领域报告：化工、冶金与材料工程

表 1.2.7 “开发新型燃料电池”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	354	64.48%	2016.8
2	USA	66	12.02%	2016.8
3	Japan	25	4.55%	2016.6
4	India	20	3.64%	2016.9
5	South Korea	20	3.64%	2016.9
6	Iran	18	3.28%	2016.5
7	Canada	17	3.10%	2017.2
8	Australia	10	1.82%	2016.7
9	Germany	10	1.82%	2016.3
10	France	9	1.64%	2016.6

表 1.2.8 “开发新型燃料电池”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Soochow Univ	52	22.81%	2017.0
2	Chinese Acad Sci	51	22.37%	2016.8
3	Univ Chinese Acad Sci	24	10.53%	2016.5
4	Zhejiang Normal Univ	19	8.33%	2017.1
5	Shandong Univ	19	8.33%	2016.5
6	Univ Sci & Technol China	15	6.58%	2017.0
7	Peking Univ	14	6.14%	2017.0
8	Xiamen Univ	12	5.26%	2016.8
9	Beijing Univ Chem Technol	11	4.82%	2017.2
10	Univ Toronto	11	4.82%	2017.3

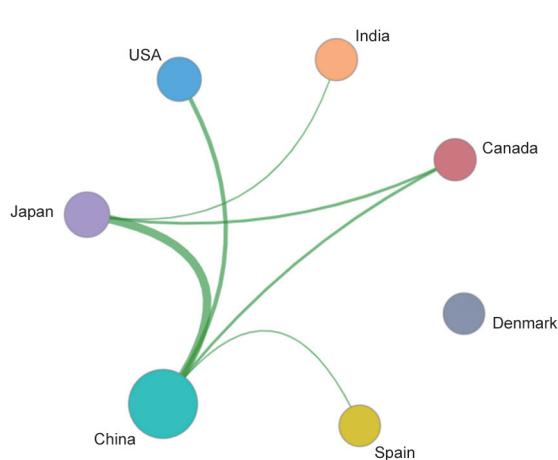


图 1.2.3 “开发新型燃料电池”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

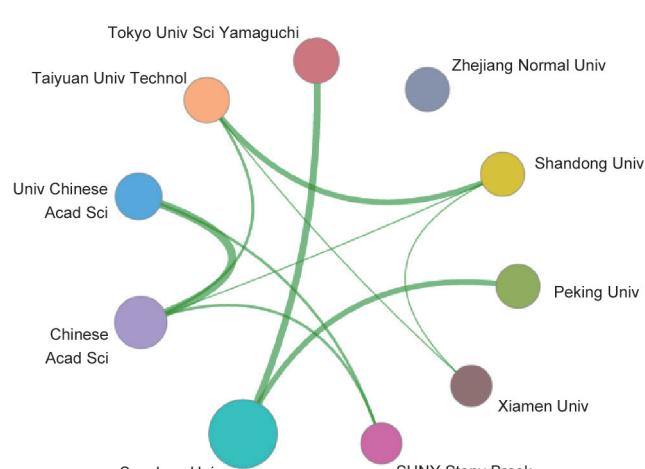


图 1.2.4 “开发新型燃料电池”工程研究前沿主要机构间的合作网络

料的纳米化制备，包括采用电解沉积、粉末冶金和机械加工（大塑性变形和喷丸等方式）等方法，但存在制备技术复杂或制备过程中容易产生缺陷的特点。当前金属材料表面纳米化（即梯度纳米金属材料）的研究较多，其在一定程度上改善了材料的力学、摩擦磨损和腐蚀等性能，但在制备大块体纳米金属材料的研究方面仍然存在不足，研发能用于工业应用的纳米金属制备工艺将具有非常大的应用前景。

2012 年以来，“金属材料纳米化及高性能”前沿核心论文的主要产出国家或地区及机构分别

见表 1.2.9 和表 1.2.10，主要国家或地区及机构间的合作情况分别见图 1.2.5 和图 1.2.6，施引核心论文的主要产出国家或地区及机构见表 1.2.11 和表 1.2.12。其中，金属纳米材料的研究主要集中在金属材料表面的纳米化制备和性能，少部分研究了块体材料的纳米化，主要核心论文产出国别或地区前三名为中国、美国和新加坡。中国产出核心论文占比 48.80%，排名第二的美国核心论文占比为 28.90%。中国与美国之间的合作最多，其次新加坡、澳大利亚与中国，韩国、日本和美国相互也有合作。中国科学院的核心论文最多，其次是南洋理工大学。

表 1.2.9 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	895	48.80%	109 180	45.77%	121.99
2	USA	530	28.90%	76 486	32.06%	144.31
3	Singapore	139	7.58%	23 576	9.88%	169.61
4	South Korea	137	7.47%	18 388	7.71%	134.22
5	Australia	110	6.00%	14 207	5.96%	129.15
6	Germany	104	5.67%	17 550	7.36%	168.75
7	Japan	99	5.40%	13 131	5.50%	132.64
8	UK	77	4.20%	9967	4.18%	129.44
9	India	58	3.16%	5315	2.23%	91.64
10	Saudi Arabia	41	2.24%	4963	2.08%	121.05

表 1.2.10 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Chinese Acad Sci	164	8.94%	22 160	9.29%	135.12
2	Nanyang Technol Univ	97	5.29%	19 330	8.10%	199.28
3	Univ Sci & Technol China	53	2.89%	6653	2.79%	125.53
4	Tsinghua Univ	46	2.51%	6014	2.52%	130.74
5	Zhejiang Univ	38	2.07%	5182	2.17%	136.37
6	Natl Univ Singapore	37	2.02%	4158	1.74%	112.38
7	Fudan Univ	37	2.02%	3720	1.56%	100.54
8	Stanford Univ	35	1.91%	7042	2.95%	201.20
9	Argonne Natl Lab	33	1.80%	5248	2.20%	159.03
10	Univ Calif Berkeley	33	1.80%	4061	1.70%	123.06

## 第二部分 领域报告：化工、冶金与材料工程

表 1.2.11 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	24 269	45.61%	2015.7
2	USA	10 946	20.57%	2015.5
3	South Korea	4440	8.34%	2015.5
4	Germany	2459	4.62%	2015.6
5	Japan	2279	4.28%	2015.5
6	UK	1949	3.66%	2015.7
7	Australia	1931	3.63%	2015.7
8	Singapore	1927	3.62%	2015.4
9	India	1910	3.59%	2015.6
10	France	1102	2.07%	2015.5

表 1.2.12 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	4449	36.19%	2015.6
2	Univ Chinese Acad Sci	1174	9.55%	2015.9
3	Nanyang Technol Univ	1142	9.29%	2015.4
4	Tsinghua Univ	1028	8.36%	2015.7
5	Univ Sci & Technol China	820	6.67%	2015.7
6	Peking Univ	783	6.37%	2015.7
7	Zhejiang Univ	780	6.34%	2015.6
8	Soochow Univ	745	6.06%	2015.8
9	Huazhong Univ Sci & Technol	717	5.83%	2015.7
10	Natl Univ Singapore	657	5.34%	2015.5

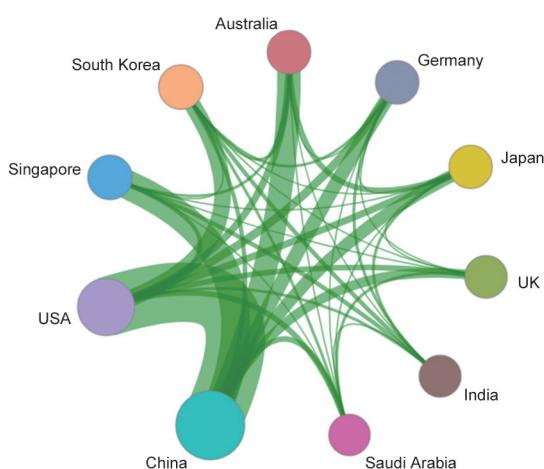


图 1.2.5 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

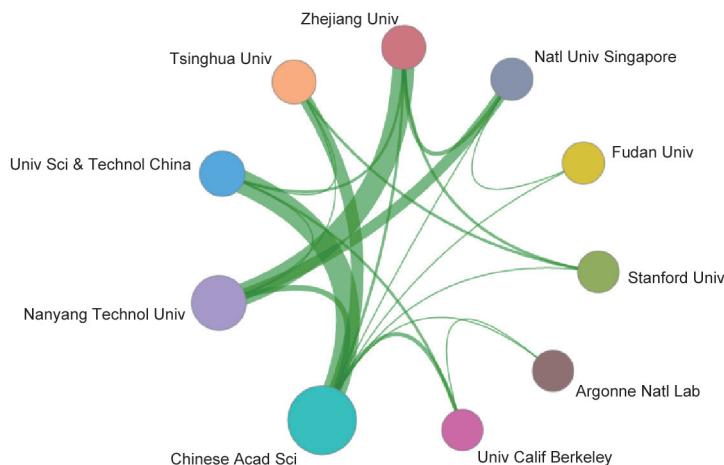


图 1.2.6 “金属材料纳米化及高性能”工程研究前沿主要机构间的合作网络

中国科学院和中国科技大学、清华大学合作较多，新加坡南洋理工大学和浙江大学、新加坡国立大学相互之间的合作也较多。施引核心论文的主要产出国家或地区和核心论文产出国家或地区，中国均排名第一。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top12 工程开发前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判的 Top12 工程开发前沿见表 2.1.1，它们涉及新能源材料科学与工程、功能材料、复合材料与工程、金属材料工程、催化工程、冶金工程、细胞生物学工程等学科方向。在此之中，“绿色化与智能化冶金制造流程”“铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用”“稀有贵金属材料先进制备加工技术”“化石资源和生物质催化转化新技术”“大规模储能技术及其关键材料”“超级电容器关键技术及材料”“新一代高比能锂硫电池、固态锂电池”“先进复合材料制备技术、结构连接及应用”是传统开发的进一步深入；“金属有机骨架材料的晶体工程与规模化应用”“石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用”“增材

制造(3D 打印)技术及应用”“细胞治疗”是新兴的前沿。各个开发前沿所涉及的专利在 2012—2017 年的逐年公开量见表 2.1.2。

#### (1) 大规模储能技术及其关键材料

目前大规模储能技术主要包括抽水蓄能、液流电池、压缩空气、锂基电池、相变储能、铅酸电池、储热、超导、飞轮、超级电容、钠硫电池等。其中，抽水蓄能是目前唯一实现大规模利用的储能技术，但抽水蓄能受到地理条件的限制，与我国风能、太阳能资源存在地域错位，无法满足未来风能、太阳能大规模发展所需储能装机的需求，因此发展抽水蓄能外的其他储能技术势在必行。大规模储能技术需要满足三个条件：一是安全性高；二是生命周期的性价比高；三是生命周期的环境负荷低。然而，除抽水蓄能外，各种储能技术在在规模、成本、寿命等方面存在瓶颈。其中，液流电池、压缩空气、技术成熟度相对较高，成为目前大规模储能技术发展的重点，聚合物锂电池和相变储能具有能量密度高、易于管理、热电联合的优势，在区域供能方面有很好的应用需求。同时，随着世界能源需求的快速增长，全球各国也相继出台多项科技计划，发达国家已在储能技术方面走在了世界前列，比如液流电池寿命已达 10 年左右，压缩空气储能系统的

## 第二部分 领域报告：化工、冶金与材料工程

表 2.1.1 化工、冶金与材料工程领域领域 Top12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	大规模储能技术及其关键材料	503	991	1.97	2014.68
2	化石资源和生物质催化转化新技术	154	310	2.01	2014.73
3	绿色化与智能化冶金制造流程	981	1103	1.12	2014.57
4	增材制造(3D 打印)技术及应用	338	8417	24.90	2014.12
5	先进复合材料制备技术、结构连接及应用	196	6487	33.10	2013.91
6	超级电容器关键技术及材料	609	1573	2.58	2015.12
7	新一代高比能锂硫电池、固态锂电池	579	991	1.71	2015.67
8	石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用	853	1825	2.14	2015.33
9	铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用	165	2967	17.98	2013.52
10	金属有机骨架材料的晶体工程与规模化应用	590	1084	1.84	2015.67
11	稀有稀贵金属材料先进制备加工技术	170	333	1.96	2014.67
12	细胞治疗	237	398	1.68	2014.73

2.1.2 化工、冶金与材料工程领域 Top12 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	大规模储能技术及其关键材料	66	77	91	84	87	98
2	化石资源和生物质催化转化新技术	17	30	25	26	28	18
3	绿色化与智能化冶金制造流程	118	185	193	159	155	171
4	增材制造(3D 打印)技术及应用	54	60	87	86	29	22
5	先进复合材料制备技术、结构连接及应用	43	42	32	49	28	2
6	超级电容器关键技术及材料	63	61	93	121	98	138
7	新一代高比能锂硫电池、固态锂电池	28	43	57	107	125	166
8	石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用	58	85	97	143	216	254
9	铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用	43	53	32	18	16	3
10	金属有机骨架材料的晶体工程与规模化应用	20	44	64	119	131	160
11	稀有稀贵金属材料先进制备加工技术	24	31	26	23	28	38
12	细胞治疗	32	39	28	40	58	40

规模大于 100 MW，飞轮和超级电容的寿命已超过 20 年，超导、储热和压缩空气储能系统的成本低于 1000 USD/kW，并且多种储能技术已进入工程示范和商业应用阶段。

### (2) 化石资源和生物质催化转化新技术

能源是国际社会普遍关注的问题，全球能源结

构呈现多元化的态势，预计到 2040 年，石油、天然气和煤炭仍将占据四分之三的份额，可再生能源占比将快速增长。因此，石油、煤炭、天然气等化石能源以及生物质的清洁高效转化利用是当前能源领域发展的重要方向。现代煤化工技术的突破是煤炭清洁高效利用的关键；未来燃油市场受到新能源

推广的影响，开发原油转化直接制化学品技术以适应未来原油消费市场的变化；生物质能源是可再生能源的重要部分，其大规模低成本高效转化利用将是未来的发展趋势。近年来，催化科学的快速发展为新技术的突破和现有工艺的改进发挥了重要作用。

### (3) 绿色化与智能化冶金制造流程

冶金工业由于规模大，能源消耗和污染物总量总体较大，发展面临的能源环境约束不断增强，推进冶金工业的绿色发展和智能制造，实现与社会的共融发展刻不容缓。绿色化与智能化冶金制造流程技术包含两大方向：绿色制造技术和智能制造技术。冶金工业的绿色制造是指按照循环经济的基本原则，以清洁生产为基础，围绕资源高效利用和节能减排，全面实现冶金产品制造、能源转换、废弃物处理消纳和再资源化等三个功能。绿色制造前沿技术包括：炉渣余热回收和资源化利用，复合铁焦新技术，钢铁厂物质流、能源流和信息流（大数据）协同优化技术，二氧化碳捕集、利用和储存技术等；冶金工业特别是钢铁工业是自动化程度较高的流程型行业之一，智能制造发展基础好、空间大，借助于“互联网+”、物联网等智能制造技术，推动钢铁生产方式的定制化、柔性化、绿色化、网络化、智能化，进而推动钢铁行业的转型升级。钢铁工业智能制造关键技术包括：基于工业大数据关键工艺装备智能控制专家系统，智能机器人应用技术，生产制造流程多目标实时优化在线运行技术，关键工艺装备智能故障诊断与维护大数据系统，冶金工业供应链智能优化技术，协作制造企业信息集成技术等。

### (4) 增材制造（3D 打印）技术及应用

增材制造技术也称3D打印技术，是近30年快速发展的先进制造技术，其优势在于三维机构的快速的自由制造，被广泛用于新产品开发、单件小批量制造。该技术以合金粉末或丝材为原料，通过高功率激光原位冶金熔化/快速凝固逐层堆积。根

据材料在沉积时的不同状态可以分为两大类：金属材料在沉积过程中实时送入熔池，包括激光近净成型制造（laser engineered net shaping, LENS）、直接金属沉积（direct metal deposition, DMD）等；

金属粉末在沉积前预先铺粉，包括直接金属激光烧结（direct metal laser-sintering, DMLS）、选区激光熔覆（selective laser melting, SLM）、熔融沉积成型（fused deposition modeling, FDM）、选择性激光烧结（selective laser sintering, SLS）等。总体来说，该技术具有：制造速度快，节省材料，降低成本；

不需采用模具，使得制造成本降低15%~30%，生产周期节省45%~70%；可以生产用传统方法难以生产甚至不能生产的形状复杂的功能金属零件；可在零件不同部位形成不同成分和组织的梯度功能材料结构，不需反复成型和中间热处理等步骤；激光直接制造属于快速凝固过程，金属零件完全致密、组织细小，性能超过铸件；近成形件可直接使用或者仅需少量的后续机加工便可使用。该技术被誉为一种“变革性”的低成本、短周期、高性能、“控形/控性”一体化、绿色、数字制造技术，在未来航空、航天、核电、石油化工、船舶等高端重大装备制造中拥有巨大的发展潜力和广阔的发展前景，近20年来成为国际材料加工工程与先进制造技术学科交叉领域的前沿研究前沿方向之一，在世界范围内受到政府、工业界和学术界的高度重视。

### (5) 先进复合材料制备技术、结构连接及应用

以高性能纤维（如碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维等）为增强材料的先进复合材料具有密度低、高比强度、高比刚度、耐疲劳、减振、力学性能可设计等优点，是结构轻量化设计的首选材料，在航空航天、汽车工业、风力发电、机械制造和医学等领域有着广泛用途。先进复合材料研究关键在于复合结构优化设计、大面积整体成型技术、再生利用技术、复合连接技术、自愈合技术以及耦合机敏、隐身等功能的复合技术。先进复合材料的连接

方法主要有胶接、机械连接和混合连接。未来复合材料连接方式以采用机械连接、胶接为主，多种新型连接方式为辅的连接技术，总体趋势是通过优化设计连接结构，实现复合材料结构件的一体化，以实现连接部位稳定性与可靠性的统一。

### (6) 超级电容器关键技术及材料

超级电容器，又叫电化学电容器、黄金电容、法拉电容，包括双电层电容器和赝电容器，通过极化电解质来储能。它是一种电化学元件，但在其储能的过程中并不发生化学反应，这种储能过程是可逆的，也正因为此超级电容器可以反复充放电数十万次。超级电容器以其大容量、高功率、长寿命、成本低廉、环境友好等优越的性能，可以部分或全部替代传统的化学电池，并且具有比传统的化学电池更加广泛的用途。超级电容的技术不断发展，推动其应用范围从最初的电子设备领域扩展到动力领域、储能领域。超级电容器技术核心在于如何在保持传统电容器高的功率密度、长的循环寿命、绿色安全环保的情况下制备出低成本、高能量密度的超级电容器，主要通过关键电极材料、相容性高的电容器隔膜、高压电解液的开发以及超级电容器的系统设计、优化与集成等相关技术来实现。

### (7) 新一代高比能锂硫电池、固态锂电池

锂硫电池是新一代高比能二次电池体系，其是以单质硫为正极，锂金属为负极的电化学反应体系。当前锂硫电池的实际比能量已经达到 600 Wh/kg，是锂离子电池的 3 倍。锂硫电池面临的挑战主要有：放电过程中正极产生的多硫化物穿梭至负极，造成电池循环稳定性差；循环过程中负极金属锂粉化以及形成枝晶。目前的主要技术方向有：优化正极的组成和结构，比如在正极中添加多硫化物锚定剂以抑制其穿梭；添加催化剂，催化多硫化物向硫化锂的转变；在负极金属锂表面构建人工固体电解质界面（SEI）膜，以及构建三维网络结构，使得锂离子的沉积更加均匀，从而提高锂硫电池的循环稳定性。

固态锂电池是用固态电解质取代液态电解质，且负极为金属锂的一种电池。由于固态电解质具有优异的机械性能，能够抑制锂枝晶的生成，且具有较高的熔沸点，因此，固态锂电池有望成为下一代高比能、高安全性电池体系。目前的主要技术方向为：制备具有较高室温离子电导率、与金属锂具有良好相容性的固态电解质；通过界面调控与修饰，优化固态电解质与正负极的界面，从而提高固态锂电池的电化学性能。

### (8) 石墨烯基功能材料的关键制备技术及其在储能领域的应用

石墨烯 (graphene) 是一种由碳原子以  $sp^2$  杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料。科学界对于石墨烯的研究已经具有十几年历程，石墨烯 2004 年被证明单独存在后，相关专利技术至 2010 年才急剧增加，每年有大量的发明人和技术涌现，可以预测在未来的几年中石墨烯技术的产业化应用将会进入快速发展期。石墨烯的重要研究方向将主要集中在石墨烯浆料或粉体、石墨烯宏观体（如石墨烯纤维、石墨烯膜、石墨烯气凝胶或泡沫等）及石墨烯复合材料的制备技术领域。石墨烯将被广泛的用于超级电容器和各类新型电池中，它的使用将逐渐脱离前期作为简单的导电剂使用，而将更多的作为活性储能介质使用。这需要对石墨烯进行功能化并制备适用的功能材料或复合材料，如可用于电容器或锂硫电池正极的三维石墨烯、石墨烯包覆硅的锂电池负极材料等。

### (9) 铝、镁、钛、锆等轻金属合金制备及应用

随着航空航天、高速铁路、核电、汽车及生物医疗等高科技领域的快速发展，对高性能金属合金的需求越来越广泛。主要围绕铝、镁、钛、锆等合金开展大量开发工作，如：结构及导线用高性能铝合金；高强、高韧、耐磨及耐腐蚀镁合金；可降解及生物医疗用镁合金；能源、医用钛合金材料；高强度、高韧性锆基非晶态合金、陶瓷材料。

高性能铝合金则是通过微合金化来改善合金性能，当前该方面研究重点则是如何选择、控制元素种类及数量来充分发挥其作用。目前，针对镁合金的研究前沿则是实现镁合金的高强韧化，通过合金成分设计、制备工艺来提高和改进材料的使用性能。目前先进的高强铸造镁合金和铸造变形镁合金的室温拉伸抗拉强度分别在 400 MPa 以上或 550 MPa 以上。目前高强轻质合金的塑性和韧性提高是前沿之一，通过晶粒细化、新相、新结构（LPSO 结构）、界面优化、织构设计等改善高强轻质合金的塑韧性是各国发展重点。除了作为结构材料，医用镁合金尤其是可降解生物医疗用镁合金也是未来发展趋势。此外，提高镁合金的耐腐蚀性也是一研究重点。对于钛合金的研究正在成体系化发展，其较低的制备成本以及新型钛材料的开发可以进一步扩大其应用。锆基非晶态合金具有优异的力学性能、良好的耐腐蚀性能、高效的催化性能等，这些特性促使它在电子、军事等方面得到广泛的应用。

#### （10）金属–有机骨架材料的晶体工程与规模化应用

MOF 拥有灵活多变的金属节点与配体，永久、规则的多孔网络，在气体存储、分离、催化及能源科技应用领域都展现出极大潜力。模拟与实验相结合的晶体工程手段是一种设计合成 MOF 材料的有效策略，主要技术方向有：MOF 晶体的高通量合成、筛选与表征；MOF 晶体成核与生长过程的系统研究；MOF 晶体材料的放大合成。从成本和环境角度而言，面临的挑战性难题便是如何提高 MOF 材料的时空收率，并且减少有机溶剂的使用。因此，开发高时空收率的水相甚至无溶剂合成方法便成为关键。另外，如何精确调控 MOF 晶体的成核和生长参数以获得粒径分布均一的 MOF 晶体材料，也是 MOF 材料放大合成过程中最为关心的问题之一。未来，MOF 材料的规模化应用将体现在如下两个方面，即吸附剂/分离膜与功能性器

件。基于 MOF 材料开发吸附剂与分离膜，有望探索出一条能量集约、环境友好的可替代分离路线。同时，技术手段的不断发展，加之化学、工程、医药、生物、电子、光学多个领域的交叉渗透，又将加快 MOF 微型器件的商业化。在推动 MOF 材料规模化应用的历程当中，MOF 的稳定性问题必将受到更多关注。尽管 MOF 材料是通过有机–无机结构单元之间较强的相互作用连接而成，但其在苛刻环境下的使用仍然面临挑战。因此，将 MOF 与其他保护性功能材料复合，或是对 MOF 做功能导向性的修饰以提高其稳定性，或将从根本上解决这一困扰。

#### （11）稀有 / 稀贵金属材料先进制备加工技术

稀有 / 稀贵金属一般包括钛、锆、铪、钒、铌、钽、钼、钨等稀有难熔金属，锂、铷、铯等稀有轻金属，镓、铟、铊、锗、铼、硒、碲等稀散金属，钪、钇、镧系等稀有稀土金属，钫、镭、钋、锕、钍、镤、铀等稀有放射性金属，金、银、铂族金属（钌、铑、钯、锇、铱、铂）等贵金属。稀有 / 稀贵金属广泛应用于现代能源、冶金、石化、机械、交通、建材、纺织、航空航天、信息、海洋、生物医药等产业，是国民经济、社会发展和国防建设不可或缺的重要基础材料。稀有 / 稀贵金属在地壳中的丰度低，各具不同的理化性质，提取和加工难度大，发达国家非常重视稀有 / 稀贵金属的技术研发，几乎垄断了高端、高附加值产品的国际市场。长期以来，我国在部分稀有 / 稀贵金属高纯产品制备加工上缺乏自主知识产权的核心技术，制造成本高，未能实现规模化生产，制约了光电子等新兴产业的发展。随着稀有 / 稀贵金属在高端装备制造、战略性新兴产业以及重大工程等领域的需求不断上升，稀有 / 稀贵金属材料先进制备加工技术成为各国研发的前沿，关键技术包括：超高纯稀有 / 稀贵金属制备技术、高端功能元器件用大规格稀有 / 稀贵金属靶材制造技术、高端装备制造用大尺寸精深加工

高纯稀有金属材料制品生产技术、高品质稀贵金属粉末制备技术、多品种规格稀贵金属的焊接与联装导电材料制备等。

### (12) 细胞治疗

细胞治疗指的是通过生物技术手段将一些具备特定功能的细胞，包括免疫、抗肿瘤和组织器官再生等注入或植入体内，进而提升免疫能力、修复损伤和组织器官再生，起到治疗疾病或减缓衰老的作用。尽管这一概念提出的历史超过 500 年，但直到现代的细胞培养、干细胞、组织工程和基因工程技术发展，才真正走向产业化。目前细胞治疗主要根据细胞宿主分为异体细胞治疗和自体细胞治疗，根据细胞来源或者靶向组织主要分为胚胎干细胞治疗、造血干细胞治疗、间充质干细胞治疗和神经干细胞治疗等几种。细胞治疗有望在免疫系统疾病、帕金森症、糖尿病的治疗以及损伤修复等领域发挥重要作用。

为了获得稳定的细胞指标效果和更广泛的应用，上述过程中细胞的定向分化、去分化和功能诱导等机制是相关基础研究的前沿，主要包括对表观遗传学的认识，信号通路和细胞、内外调控因子的相互作用等。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 大规模储能技术及其关键材料

能源是经济和社会可持续发展的重要物质基础。随着社会的发展，人们对能源的需求量日益增加，造成化石能源日益匮乏和环境日趋恶化。推进能源结构调整，节约化石能源，大规模利用可再生能源，成为世界各国能源安全和经济可持续发展的重要战略。然而，风能、太阳能等可再生能源发电具有明显的不连续、不稳定性等非稳态特征，因此，配套高效的大规模储能技术是实现可再生能源大规模接入的必然选择，是能源结构调整的关键支撑技术。

在现有的大规模储能技术中，全钒液流电池储能技术、压缩空气储能技术、凝胶聚合物电池 / 相变储热储能技术等具有高安全、低成本、大容量、长寿命等特点，可切实满足实际需求。这些储能技术在基础研发、装置试制和小规模示范等方面已经取得重要阶段性进展，亟待开展多学科、建制化的攻关，实现从技术研究到工程应用的跨越。

发展储能技术已成为各国政府关注和支持的前沿。截至 2016 年年底，全球投运储能项目累计装机规模为 168.7 GW，同比增长 2.4%，其中，电化学储能的累计装机位列第三，规模为 1769.9 MW，同比增长 56%。国际可再生能源署发布的第三版《Rethinking Energy 2017》报告指出，储能电池未来的使用量将大幅增多，预计到 2020 年，全球电池储能市值将跃增至 140 亿美元。美国长期支持和关注储能的发展，2016 年 6 月 16 日，美国召开了扩大智能电网领域可再生能源与储能峰会，奥巴马政府宣布了《联邦和私营部门扩大可再生能源和储能行动计划》。计划设定了未来五年内，美国超过 8 个州的储能需求和配置目标，投资者将为储能投入 1.3 亿美元的资助。德国政府正在实施一项宏大的能源转型战略，即到 2020 年使可再生能源供电的比例达到 35%，到 2030 年和 2050 年分别达到 50% 以上和 80% 以上，旨在使可再生能源成为德国未来电力供应的核心，而能源存储技术的快速发展则成为该战略的有效支撑。日本自 20 世纪 70 年代就开始对储能技术研发进行持续资助，近十年来先后投入 400 多亿日元（30 多亿人民币）用于储能技术研发，目前日本储能装机约占电力总装机的 11%，居世界首位。2012 年，韩国启动了《能源存储技术研发及产业化战略计划》，到 2020 年将投入 6.4 万亿韩元（约 320 亿元人民币）用于储能技术研发和应用。

我国政府对储能也愈来愈重视，在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》、《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》、

《“十三五”国家科技创新规划》等国家科技与能源战略规划中，都将储能技术作为重点发展方向之一。同时，在国家自然科学基金、973计划、863计划、国家重点研发计划等科技计划的支持下，我国多项储能技术在基础研究、关键技术研发、装置试制和小规模示范等方面取得了阶段性进展，但由于我国储能技术研究起步较晚，整体上特别是在系统集成、工程实现、能量系统综合管理等方面与世界先进水平还有相当大的差距。

基于德温特专利数据库，采用相关关键词检索生成专利地图，经多次循环筛选，利用所得相关专利，分析得到表2.2.1和表2.2.2，及图2.2.1和图2.2.2，分别是“大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿核心专利主要产出国家或地区及机构列表，主要国家或地区及机构合作网络图。

## 2.2.2 化石资源和生物质催化转化新技术

能源是国际社会普遍关注的问题，对我国经济

表2.2.1 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	149	29.62%	180	18.16%	1.21
2	Japan	110	21.87%	140	14.13%	1.27
3	USA	105	20.87%	409	41.27%	3.90
4	Germany	54	10.74%	100	10.09%	1.85
5	South Korea	52	10.34%	58	5.85%	1.12
6	Taiwan of China	8	1.59%	13	1.31%	1.63
7	France	6	1.19%	5	0.50%	0.83
8	India	5	0.99%	0	0.00%	0.00
9	Russia	3	0.60%	0	0.00%	0.00
10	Canada	2	0.40%	35	3.53%	17.50

表2.2.2 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	YUAS	日本	64	12.72%	53	5.35%	0.83
2	MATU	日本	24	4.77%	21	2.12%	0.88
3	BOSC	德国	17	3.38%	46	4.64%	2.71
4	SGCC	中国	17	3.38%	22	2.22%	1.29
5	BATT	美国	12	2.39%	111	11.20%	9.25
6	CHWE	中国	12	2.39%	21	2.12%	1.75
7	HITB	日本	11	2.19%	42	4.24%	3.82
8	LITE	德国	11	2.19%	16	1.61%	1.45
9	OCIO	韩国	10	1.99%	3	0.30%	0.30
10	MINN	美国	9	1.79%	4	0.40%	0.44

注：YUAS 表示 GS Yuasa Corp.; MATU 表示 Panasonic Corp; BOSC 表示 Bosch GmbH Robert; SGCC 表示 State Grid Corp China; BATT 表示 Battelle Memorial Inst; CHWE 表示 Chilwee Power Co Ltd; HITB 表示 Hitachi Chem Co Ltd; LITE 表示 Li-Tec Battery GmbH; OCIO 表示 OCI Co Ltd; MINN 表示 3M Innovative Properties Co。

社会健康发展至关重要。据 BP 公司发布的《BP 世界能源展望（2018 年版）》，全球能源结构呈现多元化的态势，但预计到 2040 年，石油、天然气和煤炭仍将占据四分之三的份额。未来石油需求将持续增长，增长的主要来源是作为石化产品的原料。天然气将超过煤炭成为第二大能源来源。煤炭在一次能源中的占比将有所下降，但中国仍是最大煤炭市场，到 2040 年占据全球煤炭需求量的 40%。另外，中国可再生能源占比将快速增长。

创新技术应用于石油、煤炭、天然气以及生物质等的清洁高效转化利用，解决日益凸显的能源与

环境问题，成为当前能源发展的重要任务。特别是煤炭清洁高效利用对我国具有更加重要的意义。现代煤化工将是未来煤炭消费的主要突破口，煤制烯烃、煤制油、煤制乙二醇等大型煤化工示范工程的顺利实施，标志着我国煤炭清洁转化技术创新和产业化均走在了世界前列。煤制乙醇、合成气制烯烃等技术的突破标志着我国在该领域持续发挥引领作用。大型炼化一体化石油加工技术的发展使得油品、石化产品等生产过程更加高效，开发原油直接制备化学品技术以适应未来原油消费市场的变化。天然气催化转化技术的突破（如：甲烷直接转化制芳烃）为页岩气等非常规油气资源的开发利用提供重要的技术支撑。生物质转化方面，生物柴油、生物质热解油、发酵法制乙醇/丁醇、气化—合成气—费托合成、纤维素制乙二醇等方面已取得较大进展，大规模低成本高效转化制备化学品技术将是近期最有可能取得突破的方向。

在上述各种能源转化过程中，催化发挥了极其重要的作用。新工艺的突破得益于高性能催化剂的开发和新型催化材料的应用。反应通道和反应位点的精确控制在发挥传统催化材料（如分子筛）的优势并实现催化过程的高效经济等方面具有重要意义。催化剂制备方法的创新、制备过程

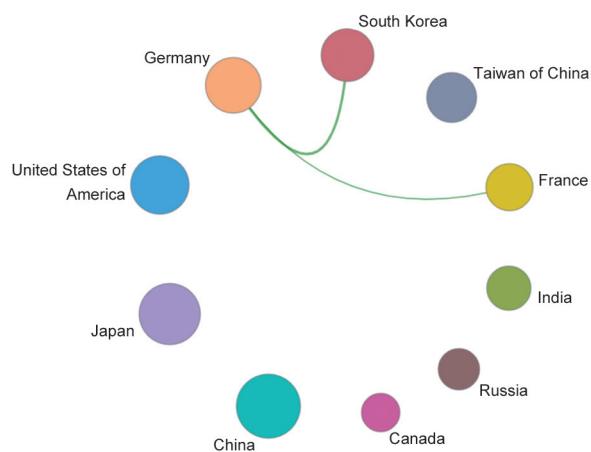


图 2.2.1 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

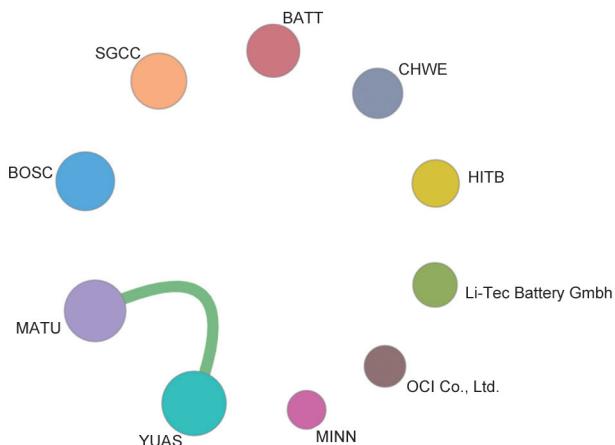


图 2.2.2 “大规模储能技术及其关键材料”工程开发前沿的主要机构间合作网络

绿色化和催化剂回收等仍是催化剂工程发展的主要方向。

基于德温特专利数据库，采用相关关键词检索生成专利地图，经多次循环筛选，利用所得相关专利，分析得到表 2.2.3 和表 2.2.4，及图 2.2.3 和图 2.2.4，分别是“化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿核心专利主要产出国家或地区及机构列表；主要国家或地区及机构合作网络图。

### 2.2.3 绿色化与智能化冶金制造流程

冶金工业是国民经济的重要基础产业，为社会发展提供了重要的原材料保障，有力支撑了相关产业的发展。随着全球气候变化和碳排放形势日益严峻，冶金工业发展面临的环境压力越来越大，特别是钢铁工业作为资源和能源的消耗大户，钢铁生产的环境问题日趋受到整个社会的关注，绿色化和智能化成为了钢铁行业发展的重要方向，成为行业转

表 2.2.3 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	78	50.65%	258	83.23%	3.31
2	China	48	31.17%	63	20.32%	1.31
3	The Netherlands	10	6.49%	2	0.65%	0.20
4	South Korea	6	3.90%	7	2.26%	1.17
5	India	5	3.25%	2	0.65%	0.40
6	Saudi Arabia	5	3.25%	4	1.29%	0.80
7	Germany	4	2.60%	0	0.00%	0.00
8	France	3	1.95%	7	2.26%	2.33
9	Japan	3	1.95%	0	0.00%	0.00
10	Australia	1	0.65%	2	0.65%	2.00

表 2.2.4 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	ESSO	美国	22	14.29%	111	35.81%	5.05
2	UNVO	美国	16	10.39%	8	2.58%	0.50
3	SNPC	中国	12	7.79%	16	5.16%	1.33
4	SABI	美国	10	6.49%	4	1.29%	0.40
5	SHEL	荷兰 / 美国	6	3.90%	24	7.74%	4.00
6	CACP	中国	5	3.25%	1	0.32%	0.20
7	LUMM	美国	5	3.25%	11	3.55%	2.20
8	CALI	美国	4	2.60%	4	1.29%	1.00
9	CELA	美国 / 中国	3	1.95%	28	9.03%	9.33
10	UNCZ	中国	3	1.95%	2	0.65%	0.67

注：ESSO 表示 Exxonmobil Chem Patents Inc; UNVO 表示 Universal Oil Prod Co; SNPC 表示 SINOPEC Corp; SABI 表示 SABIC Global Technologies BV; SHEL 表示 Shell Oil Co; CACP 表示 CAS Dalian Chem & Physical Inst; LUMM 表示 Lummus Technology Inc; CALI 表示 Chevron USA Inc; CELA 表示 Celanese Int Corp; UNCZ 表示 Univ Changzhou。

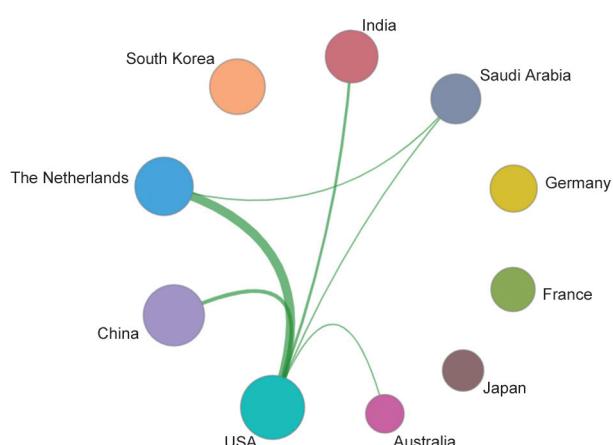


图 2.2.3 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

型升级的关键所在。

推进制造流程的绿色化是钢铁行业绿色发展的主要内容，按照钢铁制造流程三个功能的定位：钢铁产品制造、能源转换和废弃物消纳处理，以“减量化、再利用、资源化”为原则，以零排放为目标，对制造过程产生的余热、余压、余气、废水、含铁物质和固体废弃物充分循环利用，最终实现清洁生产和整个制造流程的绿色化。近年来围绕钢铁制造流程的绿色化发展，重点开发应用了干法熄焦、高炉煤气干式除尘、转炉煤气干式除尘为代表的“三干”技术，水的综合利用、以副产煤气（焦炉、高炉、转炉）为代表的二次能源利用技术，以高炉渣、转炉渣为代表的固体废弃物综合利用技术。此外，炉渣余热回收和资源化利用，复合铁焦新技术，钢铁厂物质流、能源流和信息流（大数据）协同优化技术，二氧化碳捕集、利用和储存技术等前沿技术也成为了开发的前沿。

智能制造是制造业未来发展的重大趋势，也是钢铁工业转型升级、提质增效的重要途径。钢铁工业是自动化程度较高的流程型行业之一，智能制造发展基础好、空间大。借助于“互联网+”、物联网等智能制造技术，推动钢铁生产方式的定制化、

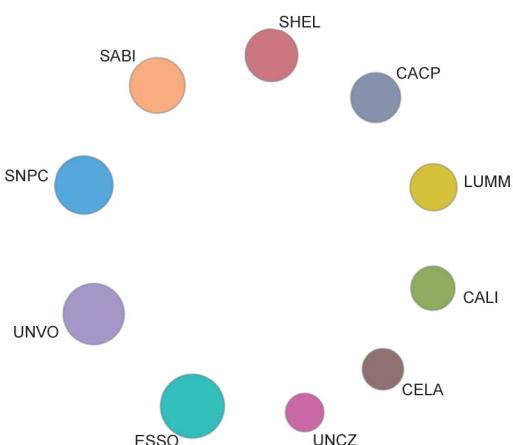


图 2.2.4 “化石资源和生物质催化转化新技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

柔性化、绿色化、网络化、智能化，进而推动钢铁行业的转型升级。近年来，智能制造在钢铁生产制造、企业管理、物流配送、产品销售等方面的应用不断深化，围绕流程型智能制造、大规模个性化定制等方面试点建设了智能工厂或数字化车间，开展了人机智能交互、工业机器人、智能物流管理等技术和装备在生产过程中的应用，促进了钢铁制造工艺的仿真优化、数字化控制、状态信息实时监测和自适应控制等技术的应用。但是总体来看，钢铁工业的智能制造仍处于初级阶段，未来还需重点开发基于工业大数据关键工艺装备智能控制专家系统、智能机器人应用技术、生产制造流程多目标实时优化在线运行技术、关键工艺装备智能故障诊断与维护大数据系统、冶金工业供应链智能优化技术、协作制造企业信息集成技术等关键技术。

2012 年以来，“绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿核心专利主要产出国家或地区及机构分别见表 2.2.5 和表 2.2.6，主要国家或地区及机构间合作网络情况分别见图 2.2.5 和图 2.2.6。从专利分布来看，中国是“绿色化与智能化冶金制造流程”核心专利的主要产出国，占全球专利公开量的 93.17%，核心专利的被引次数、主要产出机构也都

主要集中在中国，说明我国在此领域的研究和发展处于全球非常重要的地位。从核心专利的平均被引次数来看，美国和日本高于中国，从一个侧面说明美国和日本在此技术的开发上获得了更多的关注和

认可，有更高的创新性。从国家或地区及机构合作网络情况来看，主要国家或地区之间以及机构之间合作较为稀疏，说明本领域企业间的合作研发较少，以独立研发为主。

表 2.2.5 “绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	914	93.17%	1039	94.20%	1.14
2	Japan	20	2.04%	38	3.45%	1.90
3	Russia	10	1.02%	1	0.09%	0.10
4	USA	10	1.02%	21	1.90%	2.10
5	South Korea	8	0.82%	2	0.18%	0.25
6	India	3	0.31%	0	0.00%	0.00
7	Taiwan of China	3	0.31%	0	0.00%	0.00
8	Australia	2	0.20%	1	0.09%	0.50
9	UK	2	0.20%	0	0.00%	0.00
10	Poland	2	0.20%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CMEG	中国	59	6.01%	78	7.07%	1.32
2	BAOS	中国	21	2.14%	14	1.27%	0.67
3	SHGG	中国	19	1.94%	34	3.08%	1.79
4	ANSH	中国	13	1.33%	9	0.82%	0.69
5	JGJT	中国	12	1.22%	38	3.45%	3.17
6	HBIS	中国	10	1.02%	9	0.82%	0.9
7	BJSW	中国	9	0.92%	3	0.27%	0.33
8	UYDB	中国	9	0.92%	42	3.81%	4.67
9	JGHX	中国	8	0.82%	8	0.73%	1.00
10	WSGC	中国	8	0.82%	26	2.36%	3.25

注：CMEG 表示 Metallurgical Corp China；BAOS 表示 Baoshan Iron & Steel Co Ltd；SHGG 表示 Beijing Shougang Int Eng Technology Co；ANSH 表示 Angang Steel Co Ltd；JGJT 表示 Shandong Iron & Steel Co Ltd；HBIS 表示 Hebei Iron & Steel Co Ltd；BJSW 表示 Jiangsu Province Metallurgical Design；UYDB 表示 Univ Northeastern；JGHX 表示 Gansu Jiu Steel Group Hongxing Iron & Steel Co Ltd；WSGC 表示 Wuhan Iron Steel (Group) Corp。



图 2.2.5 “绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

图 2.2.6 “绿色化与智能化冶金制造流程”工程开发前沿的主要机构间合作网络

### 领域课题组人员

课题组组长：王静康 薛群基

课题组副组长：丁文江 刘中民 毛新平  
彭金辉 徐惠彬

工作组成员：

邓 元 彭立明 叶 茂 许 磊 代林晴  
王 静 吴玉娟 姚昌国 祝 薇 黄耀东  
杨祖国 朱晓文

执笔组成员：

班宇杰 曹旭鹏 郭德才 黄耀东 李金哲  
荣 倩 吴玉娟 熊锋强 姚昌国 周 锋  
朱晓文

致谢人员：

天津大学

冯亚凯 姜浩锡 李艳妮 王富民 张 雷  
张 立

大连化学物理研究所

班宇杰 曹旭鹏 郭德才 李金哲 荣 倩  
熊锋强 周 锋

上海交通大学

陈 娟 范根莲 郭芳威 衡相文 罗远航  
宿 宁 张 鹏 赵 倩 郑飞燕

宝钢股份中央研究院武汉分院

牛琳霞 康 斌 王 媛

昆明理工大学

李存兄 李 静 李世伟 王仕兴 薛秀珍

俞小花

北京航空航天大学

冯静静 宋庆松

## 四、能源与矿业工程

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top13 工程研究前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top13 工程研究前沿见表 1.1.1，涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中 3 个工程研究前沿是基于科睿唯安共被引聚类分析获得，分别为“微电网与智能输配电系统”“三维地震数据分析和重构技术”“新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿 / 硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池”，其余是专家提名前沿。其中新

兴前沿包括“可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”“微电网与智能输配电系统”“先进高性能燃料电池关键技术”“页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术”“非常规油气微观渗流机理与高效开采技术”“深空及深海核反应堆及电源技术”，传统深入研究包括“煤炭高效、洁净加工和转化”“三维地震数据分析和重构技术”“全智能化一体化小型模块式反应堆技术”，颠覆性前沿为“新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿 / 硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池”，融合交叉学科前沿包括“先进核能技术：聚变 - 裂变混合堆技术”“煤炭与油气开采智能化

表 1.1.1 能源与矿业工程领域 Top13 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	平均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	先进核能技术：聚变 - 裂变混合堆技术	802	35 451	44.20	2013.43	—	—
2	可再生能源发电利用及储能、节能环保技术	687	37 042	53.92	2013.76	—	—
3	煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料	75	146	1.95	2014.75	—	—
4	微电网与智能输配电系统	10	130	13.00	2016.60	50.00%	0.00
5	先进高性能燃料电池关键技术	595	30 669	51.54	2013.27	—	—
6	煤炭高效、洁净加工和转化	810	36 477	45.03	2013.46	—	—
7	页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术	75	452	6.03	2015.20	—	—
8	三维地震数据分析和重构技术	37	403	10.89	2016.49	0.00%	0.00
9	基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术	147	1507	10.25	2014.88	—	—
10	非常规油气微观渗流机理与高效开采技术	1100	9872	8.97	2015.16	—	—
11	全智能化一体化小型模块式反应堆技术	573	25 436	44.39	2013.52	—	—
12	深空及深海核反应堆及电源技术	97	1117	11.52	2014.43	—	—
13	新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿 / 硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池	120	6395	53.29	2015.85	22.50%	0.00

关键工程技术、装备与材料”“基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术”。各个前沿所涉及的核心论文在 2012 年至 2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

### (1) 先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术

聚变 – 裂变混合堆（简称混合堆）是一种结合聚变和裂变的优点、克服二者缺点的核能技术。混合堆与纯聚变堆的主要区别是包层内含有裂变燃料，裂变燃料比 Be 或者 Pb 有更好的中子增殖能力和能量放大能力，有利于降低聚变工程的难度。从氚循环来看，有利于实现氚自持、减少初始投氚量；从能量平衡看，可以降低聚变功率，减少高能中子对材料的辐照损伤。与裂变堆相比，混合堆是聚变中子源驱动的深度次临界系统，安全性能突出，在能量输出的同时可以很好解决裂变燃料增殖和超铀元素嬗变问题。混合堆的主要研究方向包括：驱动器技术（含托卡马克、激光惯性约束聚变、Z 缩缩惯性约束聚变等技术方向），次临界堆技术（含产

氚、增殖、嬗变、能源供应等技术方向），高增益聚变靶设计技术（对惯性约束聚变而言）等。混合堆的发展趋势是立足于近期可实现的聚变参数并借鉴成熟的裂变堆技术，促进聚变能的提前应用，探索解决裂变能源可持续发展的途径。

### (2) 可再生能源发电利用及储能、节能环保技术

基于可再生能源的能源系统是解决世界范围内的能源利用问题和环境污染问题的有效途径，是能源利用走可持续发展道路的必然选择和有效措施。以可再生能源的高效、清洁利用为核心，可再生能源发电和储能技术等领域快速发展，在世界范围内获得越来越多的关注。

从目前可再生能源的资源状况和技术发展水平看，利用风能、太阳能、水能发电，最为现实，前景广阔。可再生能源的发电技术可分为单一能源发电系统和混合能源发电系统。其中单一可再生能源发电系统与其他发电系统相对独立，易受到可再生

表 1.1.2 能源与矿业工程领域 Top13 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术	253	188	192	108	52	9
2	可再生能源发电利用及储能、节能环保技术	150	173	161	117	69	17
3	煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料	6	15	12	16	11	15
4	微电网与智能输配电系统	0	0	0	0	4	6
5	先进高性能燃料电池关键技术	201	165	126	75	25	3
6	煤炭高效、洁净加工和转化	230	213	193	115	57	2
7	页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术	5	8	9	14	23	16
8	三维地震数据分析和重构技术	0	0	0	1	17	19
9	基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术	11	22	25	32	30	27
10	非常规油气微观渗流机理与高效开采技术	96	116	137	206	256	289
11	全智能一体化小型模块式反应堆技术	164	145	124	89	46	5
12	深空及深海核反应堆及电源技术	13	22	16	15	18	13
13	新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿 / 硅异质结叠层、Cu <sub>2</sub> ZnSnSe <sub>4</sub> 薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池	1	2	7	28	48	34

能源自身局限性的影响。混合可再生能源发电系统主要分为两类：一类是利用风、光、水能等可再生能源进行互补结合，克服单一种类的可再生能源在使用时不连续、不稳定的缺陷；另一类是将可再生能源与现有的化石能源进行结合的混合发电系统。

储能技术是通过在电力需求低时储电、在电力需求高时放电的方式帮助电网更好地融合风电、水能、太阳能等可再生能源发电的一种技术。按照储存介质不同储能技术可以分为机械类储能、电气类储能、电化学类储能、热储能和化学类储能等。

目前的主要研究前沿有：可再生能源材料、新型能源系统构成、热力循环特性，区域内可再生能源就地利用最大化、天然气使用最小化和全范围多能源供需平衡，大容量储能的规划及与可再生能源发电的协同调度技术，基于储能的能量流优化和能量调度技术等。

### (3) 煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料

煤炭与油气智能开采是基于采集的海量数据，在不需要人工直接干预情况下，通过采掘环境的智能感知、采掘装备的智能调控、采掘作业的自主巡航等智能分析和信号反馈，由采掘装备独立完成的回采作业过程，或对油气生产动态进行智能调控。煤炭与油气智能开采是环境感知、智能决策、自动控制三个技术单元的深度整合，涉及工程环境感知、数字矿山、矿山物联网、大数据云计算、装备控制自动化五个分支。煤炭智能化开采未来的发展方向为：智能探测，是指对采场未知区域的自动探查和检测，包括煤岩分界、煤矸识别和超前探测等专业领域；智能导航，指利用先进的计算机、光电和导航技术对开采设备和人员进行自动定位，以实现安全监控和精确开采；智能控制，智能化采掘设备与自动调度决策集为一体，融合采煤机智能记忆截割、液压支架智能跟机自动化、工作面运输系统煤流平衡、智能集成供液、工作面可视化视频监控、远程遥控、三维虚拟现实、一键启停等多项技术。

油气开采智能化主要涉及智能化钻井、智能化完井、智能化生产三个研究方向。其中智能化钻井通过结合大数据、人工智能等，利用闭环调控、精准制导，可有效规避钻井风险，提高钻井速度，降低钻井成本，是确保完井、生产顺利开展的基础。智能化完井是借助先进的传感、传输、自动化控制设备，结合大数据、人工智能，可对油气生产过程进行实时监测与控制，为智能生产的进行提供有力支撑。智能化生产是基于大数据对油气田全生命周期的生产进行动态管理与优化。利用研究分支间协同工作，通过资料数据、仪器设备、施工作业等有效整合，进而可实现油气开采智能化。油气田智能化生产需要基于多元数据，通过智能分析，确定开发动态，然后利用智能调控对生产进行实时优化，数据智能采集、传输、分析、调控缺一不可，各个环节需要协同工作，因此数据智能采集—高效传输—智能分析—智能调控一体化技术将是未来发展趋势。同时，工程装备、材料与人工智能深度融合，能够监测油气藏实时状态，进一步提高采收率，可为数据采集、分段压裂、分层生产、数据挖掘等提供有力支撑，也将是未来研究前沿。

### (4) 微电网与智能输配电系统

微电网和智能输配电系统是由分布式电源、储能、能量转换装备、监控和保护装置、负荷等汇集而成的新型发、输、配、用电一体化系统，是一个具备自我控制和能量管理的自治系统。微电网和智能配电系统运行和控制方式灵活，能够无缝接入多样化交直流装备，可工作于并网、离网等多个模式，从而大幅度改善电力系统对分布式电源的接纳能力，提升系统运行效率，并可保证关键负荷的连续、可靠供电。针对微电网和智能输配电系统的设计、运行及其控制特点，近年来综合规划与设计、多时间尺度能量管理、优化调度运行，高性能数字物理混合仿真，电力电子化新型装备及其控制等方向逐步成为了本领域研究前沿。此外，随着大数据、人工智能、新型储能等技术不断突破，未来的微电网和

智能输配电系统将呈现更加高度的开放性和灵活性，实现与冷、热、交通等异构能源系统的融合和互动。

### (5) 先进高性能燃料电池关键技术

燃料电池是一种不经过燃烧，通过电化学方式将储存在燃料和氧化剂中的化学能直接转变为电能的装置，具有高效、清洁、无噪音等优点。氢能燃料电池技术最近几年出现了重大进展，燃料电池汽车已进入全球产业化前夜。汽车用燃料电池在比功率、发电效率和低温启动等方面均已达到或者接近商业化目标。然而，其寿命需要进一步提高，成本需要大幅度降低。主要研究方向为开发高活性、高稳定性（超）低铂氧还原电催化剂及其批量化合成技术，高性能、长寿命（超）低铂膜电极及其批量化制备技术，高耐蚀金属双极板涂层技术，高性能、（超）低铂阴极传质及水管理技术。通过突破核心部件和关键材料技术，形成自主知识产权，大幅度提高性能、降低成本。

### (6) 煤炭高效、洁净加工和转化

煤炭的高效利用是根据终端需要，将经过洁净加工的煤炭作为燃料或原料使用，从而实现煤炭的宝贵价值，煤炭高效利用包括高效燃烧和高效转化；煤炭的洁净加工是根据用户的实际需要，对原煤进行适当的提质处理，从而为其高效利用提供品种对路、质量稳定的煤炭产品；煤炭的洁净转化是将煤炭作为原料使用，分为将煤炭转化为气态、液态及固态燃料或化学产品以及具有特殊用途的炭材料。

煤炭高效利用的主要任务是改善煤炭的终端消费结构，目前科研前沿在煤炭向洁净二次能源（电力、燃料气、燃料油）的就地转化，强化以获取化工原料或产品（气态、液态、固态）为目的的深度加工。煤炭洁净加工的主要任务是提高商品煤质量。目前科研前沿在选煤新技术的开发，特别应针对高效降灰、脱硫以及省水型或干法选煤技术，重点放在动力煤洗选上。煤炭转化技术主要针对除燃烧之外的煤炭化学转化，目前科研前沿有五种煤炭转化技术：煤气化、煤液化、煤制天然气、煤制化

学品和低阶煤热解。

考虑到煤炭利用技术的现状及未来对环境保护更高的要求，未来煤炭高效、洁净加工和转化必将是煤的高效燃烧、发电技术与燃煤污染物控制技术的结合，高效率的燃煤发电机组、循环流化床燃烧技术，以煤气化技术为核心的的整体煤气化联合循环技术，CO<sub>2</sub>的捕集与封存技术、富氧燃烧分离 CO<sub>2</sub>的技术会得到较大的发展。

### (7) 页岩油地下原位改质机理与大规模开发关键技术

页岩油原位转化是采用原位加热技术，将富有有机质页岩中尚未转化的有机质和滞留油气转化为轻质油和气的物理化学过程，可称之为“地下炼厂”。该技术的基本原理是对页岩油矿层加热，生成并产出高品质石油和天然气，在地下高温条件下呈气态存在，大大提高了其流动性，原位转化过程中页岩会产生微裂缝和高压，形成人工渗流系统，增大渗流能力。页岩油原位转化产出的高品质石油经简单加工后可达到航空煤油级别，大大节省了原油炼化成本，产生的残留物保存在地下，减少了环境污染，省去水力压裂，节省水资源，可综合利用风能、太阳能等新能源，减少二氧化碳排放。目前，该技术基本具备了工业化利用条件，但尚未达到工业化程度，应加大对该技术的扶持力度、加大投入，研发适用于中国陆相富有机质页岩油的原位转化技术，推动该技术的工业化进程，对大幅度降低我国原油对外依存度和国家能源安全至关重要。

### (8) 三维地震数据分析和重构技术

在地震数据采集中，由于实际环境的影响（如山川、河流、建筑物等）以及经费的约束，采集到的原始数据常不规则，导致后续的处理，如偏移、多次波压制、地震成像等带来不利影响。三维地震数据分析与重构作为地震资料处理的重要步骤，可有效解决这一问题。该技术的主要研究方向是如何提高野外观测到数据的规则性，以提高抗噪性和成像精度。目前主要的研究趋势集中在针对稀疏地震

数据的 F-K 域地震道插值方法、针对不规则缺失数据的非稳态地震数据重构方法，包括基于预测滤波的数据重构、基于数学变换的数据重构和基于波动方程的数据重构等。目前的发展趋势是将这些核心技术应用到微地震弱信号检测、提高信噪比、油气检测、高精度水力压裂监测、测井约束全波形反演、致密砂岩中的油气检测等领域。

### (9) 基于大数据和认知理论的剩余油气资源空间分布预测技术

剩余油气资源空间分布预测技术，是为了满足当前常规剩余油气资源分布较为分散与隐蔽、非常规油气资源分布非均质性较强的特点而研发的技术，是对传统资源评价方法的重要补充和延伸。以往剩余资源分布研究工作更多地是从油气资源管理角度，开展油气资源 – 区带 – 目标的一体化管理。而当前剩余油气资源空间分布预测技术可以实现剩余油气资源的空间定位与勘探风险可视化，大数据 (big data) 与认知理论 (theories of cognition) 为这一技术提供了条件。大数据指无法在一定时间范围内用常规软件工具进行捕捉、管理和处理的数据集合，是需要新处理模式才能具有更强的决策力、洞察发现力和流程优化能力的海量、高增长率和多样化的信息资产。认知理论是关于有机体学习的内部加工过程，如信息、知识及经验的获得和记忆、达到顿悟、使观念和概念相互联系以及问题解决的各种心理学理论。随着油气勘探开发程度的深入，石油工业界积累了海量油气生产相关数据，如勘探开发生产性统计数据、地震与测井等地球物理资料、测录试等钻测井资料、分析测试等地质研究资料。在成因法、统计法、类比法等传统油气资源评价方法定量评价油气资源量基础上，在认知理论指导下开展大数据的勘探地质处理与开发地质处理，实现油气资源的空间分布预测，明确资源分布规律，指明油气目的层（储层）的有利成藏地带或具体赋存位置，是今后剩余油气资源分布预测技术发展的大势所趋。

### (10) 非常规油气微观渗流机理与高效开采技术

非常规油气微观渗流机理主要涉及油气在微纳米孔隙、微裂缝中的流动特征，可用于分析储层中生产动态，为非常规油气藏的准确描述与评价提供重要支撑。同时，非常规油气藏地质特征复杂，微纳米级孔隙油气开发难度大，迫切需要利用高效开采技术提高非常规油气开发效率，实现非常规油气领域重大突破，主要涉及储层改造、生产调控、自动化开采等研究方向。

我国页岩气、页岩油、致密气、致密油、煤层气、稠油等非常规油气资源丰富，是重要的战略接替资源。但是由于储层复杂，相关的理论技术尚不成熟，利用常规手段难以实现经济有效开采，亟需开展渗流机理的研究，为非常规油气生产调控与实时优化提供科学依据。因此围绕非常规油气微观渗流特征，国内外对非达西渗流，多相渗流、多尺度渗流等关注度持续提升，已成为未来研究前沿。同时，无水压裂、多级压裂、同步压裂、分压合采、“多层系、多井型”混合井网开采，平台式“工厂化”开采等高效技术的研究，由于可显著降低开采成本，提高油气采收率，已成为未来发展趋势。

### (11) 全智能一体化小型模块式反应堆技术

自 2004 年 6 月国际原子能机构 (IAEA) 宣布启动以一体化技术、模块化技术为主要特征的革新型模块式小型堆 (SMR) 开发计划以来，参与的成员国总数已达到 30 个，涌现了 45 种以上的革新型中小型反应堆概念，成为国际上研发前沿领域。小型核反应堆一般是指单堆热功率在 1000 MW (电功率 300 MW) 以下的反应堆，具有无碳排放、容量小、选址灵活、建设投资小、建造周期短、系统设备能在工厂组装和便于运输，且可通过模块化设计建造升级和改善经济性等特点。从国内外已公开的模块式小型堆技术方案来看，有压水堆、高温气冷热堆、高温气冷快堆、铅铋冷却快堆、熔盐堆等多种堆型，但开发立足于短期可部署的模块式小型堆，无一例外选择了一体化压水堆路线，其设计

研发的进度远远超过其他堆型，这主要得益于拥有几十年良好的压水堆技术基础及工业基础。国际上主要小堆机型研发特点：定位于近期推广的一体化压水堆机型，采取设计措施能够排除大冷却剂丧失（LOCA）事故或者弹棒事故，并且采取设计优化提高经济性；船用的模块化或者回路型压水堆机型，采取固有的安全特性和非能动安全系统，充分借鉴了核破冰船和潜水艇的经验，采取标准化设计、批量化生产和装料以增强市场竞争力。小堆属于军民两用技术，既可作为军用动力，应用于舰船动力、边防建设，又可以用于国民经济建设领域（如居民供电、破冰船、城市供热、工业工艺供热和海水淡化），在军民领域应用前景广阔。

### （12）深空及深海核反应堆及电源技术

深空及深海蕴含着丰富的战略资源，是21世纪人类可持续发展的崭新领地和宝贵财富，在国家发展和国际竞争中的战略地位日益凸显。伴随着各种深空及深海技术能力需求的不断提升，能源动力问题已逐渐成为多种深海装备性能进一步提升的瓶颈，亟待突破。与常规能源相比，核反应堆电源具有能量密度高、不需要空气、运行时间长的天然优势，可从根本上解决深海装备的动力短板，成为未来深海能源的最优选择。主要技术包括：热管冷却式反应堆技术。区别于传统回路冷却反应堆的新的反应堆类型，通过热管将反应堆的热量带出，具有简单、安全、可靠、避免单点失效等突出优点，十分适合作为深海小型核反应堆电源装置的首选堆型。自由活塞式斯特林发电机技术：回热式热发电技术，通过直线电机来输出电能。它具有长寿命、高可靠性、高转换效率、绿色无污染、低噪音等诸多优点，在空间电源、太阳能热发电、小型热电联供、便携式电源、生物质能发电系统等诸多领域具有广泛的应用前景。反应堆全自主运行技术：反应堆的全自主运行是指反应堆依靠自身物理热工反馈和仪控系统调节实现自动运行，不需要人员在线监控和干预，能够自动响应工况波动，实现长期稳定免

维护运行。反应堆安全技术：针对深海核反应堆安全技术开展专项研究，重点研究深海核反应堆所特有的安全特性、事故机制以及核扩散威胁等问题。

### （13）新一代太阳电池：包括钙钛矿、钙钛矿/硅异质结叠层、 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池

钙钛矿结构材料是一类具有 $\text{ABX}_3$ 分子结构的化合物，起源于钛酸钙( $\text{CaTiO}_3$ )化合物。钙钛矿结构材料具备很高的吸收系数、陡峭的吸收边及可调带隙范围宽的优点，使钙钛矿太阳电池效率在短短七年时间里从3.8%提升至22.7%。目前科研前沿主要在效率、稳定性和大面积产业化方面，其中无机取代有机、锡元素取代铅元素是解决钙钛矿稳定性和毒性最有效的方法，逐渐成为新趋势。同时，钙钛矿结构材料独特的晶体结构和光电特性也非常适合于叠层太阳电池应用。钙钛矿/硅异质结叠层电池技术利用不同带隙的材料吸收不同能量的光子，从而充分利用太阳光，有望成为突破晶硅单结电池效率极限的新兴技术。此技术现阶段的研发主要集中在优化材料制备工艺、减少寄生吸收和反射损失等方面。短短三年时间，钙钛矿/硅异质结两端叠层太阳电池的效率从13.7%快速提升至25.2%，已经接近单结晶硅电池的最高效率。钙钛矿/硅异质结两端叠层电池技术未来必将成为学术界和产业界的研发前沿。

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 薄膜、聚合物及量子点敏化太阳电池是近年来另一类热门的新型太阳电池。相比铜铟镓硒薄膜， $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 的带隙更接近理想太阳电池禁带宽度，而且具有材料储量丰富、无毒且价格低廉等特点，所制备的太阳电池有望取得更高的转换效率。目前主要研究前沿是通过改进制备方法和掺杂等手段来提高电池的转换效率。代表性的进展包括使用金属前驱物电池效率为12.3%；采用共蒸法效率为8.7%（后续认证效率为10.4%）。聚合物太阳电池是一种基于有机物半导体的太阳电池，其特点是易于通过涂布方式制取大面积柔性太阳电池，

目前可达到 13% 以上的单结电池效率和接近 15% 的叠层电池效率。典型功能层为聚合物电子给体层和富勒烯电子受体层。目前的研究前沿是基于非富勒烯受体层的聚合物太阳电池、使用化学处理（如氯化）对电子给体层进行优化以及采用不同电子给体层制备叠层电池以提高全光谱吸收等。量子点敏化太阳电池是一种并不基于 PN 结、异质结等结结构的光电化学太阳电池。利用光阳极（一般为纳米结构氧化物半导体，如多孔氧化钛、氧化锌纳米线阵列等）上吸附的半导体量子点（可以为化合物半导体如 PbS, CdSe 等或者硅锗等单质半导体）作为光吸收材料，并通过其与所接触的固体 / 液体电解质层中的氧化 / 还原态离子电对进行载流子交换，以实现电子 – 空穴分离。其特点是很容易通过量子点的成分变化及尺寸控制实现带隙调控，从而制备光谱匹配的太阳电池，对界面条件及材料纯度等要求不高，易于实现廉价高效的目的。目前掺汞的 PbS/TiO<sub>2</sub> 体系电池效率为 4.72%，掺锰的 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>+Cu-InS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 体系电池效率可达到 8.0%。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 先进核能技术：聚变 - 裂变混合堆技术

#### (1) 概念阐述和关键技术

聚变 – 裂变混合堆（简称混合堆）是一种结合聚变和裂变的优点、克服二者缺点的核能技术。混合堆与纯聚变堆的主要区别是包层内含有裂变燃料，裂变燃料比 Be 或者 Pb 有更好的中子增殖能力和能量放大能力，有利于降低聚变工程的难度。从氚循环来看，有利于实现氚自持、减少初始投氚量；从能量平衡看，可以降低聚变功率，减少高能中子对材料的辐照损伤。与裂变堆相比，混合堆是聚变中子源驱动的深度次临界系统，安全性能突出，在能量输出的同时可以很好解决裂变燃料增殖和超铀元素嬗变问题。混合堆的主要研究方向包括：驱动

器技术（含托卡马克、激光惯性约束聚变、Z 缩惯性约束聚变等技术方向），次临界堆技术（含产氚、增殖、嬗变、能源供应等技术方向），高增益聚变靶设计技术（对惯性约束聚变而言）等。混合堆的发展趋势是立足于近期可实现的聚变参数并借鉴成熟的裂变堆技术，促进聚变能的提前应用，探索解决裂变能源可持续发展的途径。

#### (2) 发展现状与未来发展趋势

混合堆的研究涉及聚变、裂变两大核能领域，立足于近期可实现的聚变技术和成熟的裂变技术，推动聚变能提前应用和裂变能的可持续发展。

聚变领域又分磁约束聚变和惯性约束聚变。磁约束聚变方面，托卡马克研究处于领先地位。我国正式参加了国际热核聚变实验堆（ITER）项目的建设和研究；同时作为 ITER 装置与聚变示范堆（DEMO）之间的桥梁，我国正在自主设计、研发中国聚变工程实验堆（CFETR）。在惯性约束聚变（ICF）方面，Z 缩缩作为能源更具潜力，有可能发展成具有竞争力的聚变 – 裂变混合能源（Z-FFR）。Z-FFR 由 Z 缩缩驱动器、能源靶、次临界能源包层构成。以下重点对 Z-FFR 需要解决的关键技术进行说明。

Z 缩缩惯性约束聚变涵盖了磁流体力学、辐射输运、原子物理、等离子体微观不稳定性、强脉冲磁场下的运输机制等多物理过程和复杂物理效应。我国已重点开展了 Z 缩缩等离子体内爆动力学及其辐射源物理研究，并获得了丰富的研究成果，Z-FFR 总体概念设计研究取得显著进展。但是，对电流前沿与 Z 缩缩负载参数和内爆动力学的关系、Z 缩缩等离子体辐射源定标律和 Z 缩缩动态黑腔辐射场（温度）定标律，以及 Z 缩缩惯性约束聚变过程中几个重要物理过程的能量转换效率等关键问题，研究甚少。

超强脉冲磁场是 Z 缩缩过程最显著的特征，在此条件下的等离子体形成、磁瑞利 – 泰勒 MRT 不稳定性发展对内爆过程及内爆品质产生决定性影

响。由于在强非线性过程中，负载区的电磁能、Z 缩缩等离子体内能以及辐射能之间的能量交换非常复杂。Spitzer 电阻率不能准确描述 Z 缩缩等离子体电阻率特性，其反常机制还不清楚。如何描述和解释辐射源的产生过程及物理机制极为重要。大电流装置可以为开展 Z 缩缩等离子体物理实验研究提供更宽的参数范围。

典型的 Z 缩缩过程具有柱形内爆特征，而聚变靶为球形内爆，设计合适的黑腔构型，使得负载等离子体 Z 缩缩过程与靶内爆在时间和空间上获得有效分离，这是 Z 缩缩驱动惯性约束聚变的核心问题。在目前我国已有的装置上没有条件开展此项实验研究。相对于激光聚变，Z 缩缩辐射源时间尺度较长，空间尺度较大，难以对波形进行精密调节，需要进行新的聚变靶设计以便有效压缩燃料，获得较高能量增益。

建造新一代大电流的脉冲功率实验平台，有利于开展 Z 缩缩辐射源、黑腔以及靶内爆等 Z 缩缩驱动惯性约束聚变部分关键物理问题的实验研究和验证。建议国家层面支持 2018—2025 年建设峰值电流为 50~70 MA 的 Z 缩缩驱动器，尽快实现聚变点火。一旦点火目标实现，下一步便可开始建设 Z-FFR。Z-FFR 配备大型超高功率重复频率驱动器，首选快脉冲直线变压器驱动器（LTD），电容器

标称储能  $\leq 100 \text{ MJ}$ ，峰值电流为 60~70 MA，上升前沿为 150~300 ns，运行频率为 0.1 Hz；采用“局部整体点火”理念，设计高增益聚变靶丸，能量增益  $Q \geq 100$ ；设计天然铀裂变包层，实现氚自持、能量放大 10~20 倍、裂变燃料增殖。

### （3）重点研究国家 / 地区和机构以及之间的对比及合作情况分析

根据表 1.2.1 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的国家是美国、德国、英国、法国、日本、意大利和中国。其中，美国占据第一位，核心论文比例超过 50%，德国、英国、法国、日本、意大利和中国的核心论文比例均超过 10%。

由表 1.2.2 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是 Lawrence Livermore Natl Lab、Univ Rochester、Los Alamos Natl Lab、MIT、Gen Atom Co、Ist Nazl Fis Nucl、Sandia Natl Labs、Univ Oxford、Chinese Acad Sci，核心论文产出数均超过 20 篇。

根据图 1.2.1 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有美国、日本、德国、英国、法国、中国。中国的论文发表数量较多，主要是与美国、日本、德国、法国、英国和俄罗斯进行合作发表。

根据图 1.2.2 可知，Lawrence Livermore Natl Lab、MIT、Gen. Atom Co.、Los Alamos Natl Lab、

表 1.2.1 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国/地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	434	54.11%	20 456	57.70%	47.13
2	Germany	130	16.21%	6250	17.63%	48.08
3	UK	116	14.46%	6518	18.39%	56.19
4	France	111	13.84%	5468	15.42%	49.26
5	Japan	90	11.22%	5166	14.57%	57.40
6	Italy	87	10.85%	4316	12.17%	49.61
7	China	84	10.47%	3326	9.38%	39.60
8	Spain	53	6.61%	2359	6.65%	44.51
9	Russia	49	6.11%	2234	6.30%	45.59
10	Switzerland	46	5.74%	2647	7.47%	57.54

Univ. Rochester 有合作。

表 1.2.3 中，施引核心论文产生最多的国家是美国，施引核心论文比例达到 29.75%，中国达到 16.81%，德国的施引核心论文比例超过 10%。

表 1.2.4 中，施引核心论文产出最多的机构是 Chinese Acad Sci，施引核心论文比例达到将近 20%。Lawrence Livermore Natl Lab 的施引核心论文比例超过 16%。

通过以上数据分析可知，美国和中国在聚变 – 裂变混合堆的核心论文产出及施引数量处在世界前列，中国内地机构的施引核心论文数量较多。

## 1.2.2 可再生能源发电利用及储能、节能环保技术

### (1) 概念阐述和关键技术

基于可再生能源的能源系统是解决世界范围内的能源利用问题和环境污染问题的有效途径，是能源利用走可持续发展道路的必然选择和有效措施。以可再生能源的高效、清洁利用为核心，可再生能源发电技术和储能技术等领域快速发展，在世界范围内获得越来越多的关注。

#### • 可再生能源发电系统

从目前可再生能源的资源状况和技术发展水平看，利用水能、风能、太阳能发电最为现实，前景

表 1.2.2 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Lawrence Livermore Natl Lab	116	14.46%	5810	16.39%	50.09
2	Univ Rochester	74	9.23%	2935	8.28%	39.66
3	Los Alamos Natl Lab	72	8.98%	3661	10.33%	50.85
4	MIT	44	5.49%	2674	7.54%	60.77
5	Gen Atom Co	41	5.11%	1933	5.45%	47.15
6	Ist Nazl Fis Nucl	29	3.62%	1116	3.15%	38.48
7	Sandia Natl Labs	25	3.12%	1323	3.73%	52.92
8	Univ Oxford	21	2.62%	1553	4.38%	73.95
9	Chinese Acad Sci	20	2.49%	988	2.79%	49.40
10	Univ Calif Berkeley	19	2.37%	1568	4.42%	82.53

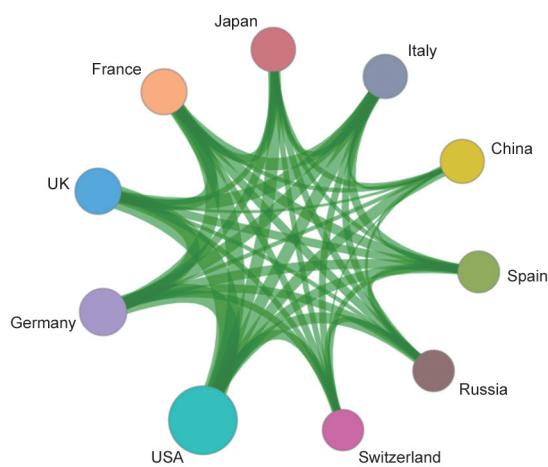


图 1.2.1 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

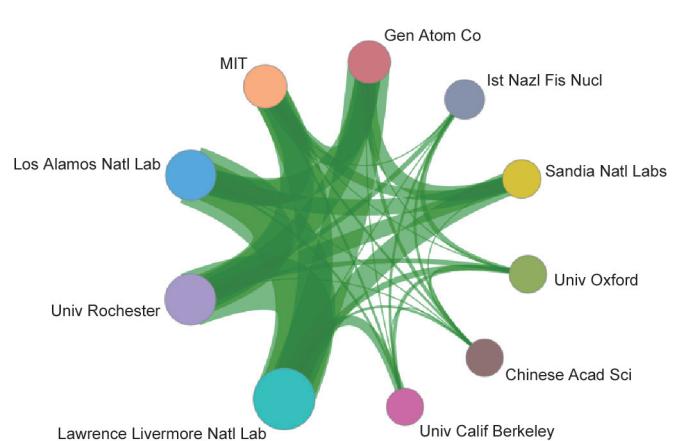


图 1.2.2 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

## 第二部分 领域报告：能源与矿业工程

表 1.2.3 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	9956	29.75%	2015.8
2	China	5626	16.81%	2016.1
3	Germany	3919	11.71%	2015.8
4	UK	2873	8.58%	2015.9
5	France	2542	7.59%	2015.7
6	Italy	2480	7.41%	2015.8
7	Japan	2267	6.77%	2015.8
8	Spain	1418	4.24%	2015.9
9	Russia	1207	3.61%	2015.7
10	Canada	1183	3.53%	2015.8

表 1.2.4 “先进核能技术：聚变 – 裂变混合堆技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	1208	19.58%	2016.1
2	Lawrence Livermore Natl Lab	1015	16.45%	2015.3
3	Univ Calif Berkeley	613	9.94%	2015.6
4	Los Alamos Natl Lab	591	9.58%	2015.5
5	Ist Nazl Fis Nucl	541	8.77%	2015.4
6	MIT	473	7.67%	2015.6
7	Univ Rochester	449	7.28%	2015.4
8	Russian Acad Sci	446	7.23%	2015.6
9	Univ Calif Los Angeles	419	6.79%	2016.0
10	CALTECH	415	6.73%	2015.6

广阔。可再生能源发电系统可分为单一能源发电系统和混合能源发电系统。其中单一能源发电系统与其他系统相对独立，较易受到可再生能源自身局限性的影响。混合能源发电系统主要有两类：一类是利用风、光、水能等可再生能源进行互补结合，克服单一种类的可再生能源在使用时不连续、不稳定的缺陷。另一类是将可再生能源与现有的化石能源（天然气、沼气、生物质能、地热能等）进行结合的混合发电系统。

保证可再生能源的发电系统连续、稳定的输出电力，并确保供电质量是可再生能源发电的关键技

术。目前的主要技术前沿包括：能源系统构成设计和动态模型建立、混合系统热力循环特性，区域内可再生能源就地利用最大化、天然气使用最小化和全范围多能源供需平衡、能量管理和调度控制系统等。

可再生能源的发展方向是通过分布式可再生能源和能源智能微网等方式，构建风、光、水、火、储多能互补系统，开发面向用户电、热、冷、气等多种用能需求的终端一体化集成系统。混合可再生能源发电系统已经开始在美国、欧洲等世界各国电力系统中投入应用。

### • 先进储能技术

储能技术是通过在电力需求低时储电、在电力需求高时放电的方式帮助电网更好地融合风电、水能、太阳能等可再生能源发电的一种技术。广义的电力储能技术可定义为实现电力与热能、化学能、机械能等能量之间的单向或双向存储设备。

按照储存介质的不同，储能技术可以分为机械类储能、电气类储能、电化学类储能、热储能和化学类储能等。机械类储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等；电气类储能主要包括超级电容器储能和超导储能等；电化学类储能主要包括各类电池，例如铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池和液流电池等；热储能将热能储存在隔热容器的媒质（如相变材料）中，需要时可以被转化为电能，也可直接利用热能而不再转化为电能；化学类储能主要是指利用氢或合成天然气作为二次能源的载体，例如通过电解水合成氢气和天然气进行二次利用。

目前抽水蓄能是全球装机规模最大的储能技术，占全球总储能容量的 98%。而压缩空气储能、铅酸电池、锂电池等近年来发展势头迅猛，在全球范围内已成为最具竞争力的储能技术。

其关键技术包括：大容量储能的规划及与可再生能源发电的协同调度技术、基于储能的能量流优化和能量调度技术、储能与能量转换装置的集成设计和协调配置等。

## （2）发展现状与未来发展趋势

### • 可再生能源发电技术

根据 21 世纪可再生能源政策网络（REN21）发布《全球可再生能源现状报告 2018》，2017 年可再生能源发电占到全球发电量净增加值的 70%，这是现代历史上可再生能源发电量增长最大的一年。

目前全球对新增可再生能源发电的投资已超过对新增化石燃料和核能发电投资总和的两倍以上。由于成本竞争力的提高，2017 年可再生能源投资占电力行业总投资的比例超过三分之二，同时可再

生能源在电力行业的份额仍将会继续上升。

根据国家能源局统计，2017 年我国可再生能源发电量为 1.7 万亿千瓦时，同比增长 1500 亿千瓦时；可再生能源发电量占全部发电量的 26.4%，同比上升 0.7 个百分点。其中，水电为 11945 亿千瓦时，同比增长 1.7%；风电为 3057 亿千瓦时，同比增长 26.3%；光伏发电为 1182 亿千瓦时，同比增长 78.6%；生物质发电为 794 亿千瓦时，同比增长 22.7%。全年弃水电量为 515 亿千瓦时，在来水好于去年的情况下，水能利用率达到 96% 左右；弃风电量为 419 亿千瓦时，弃风率为 12%，同比下降 5.2 个百分点；弃光电量为 73 亿千瓦时，弃光率为 6%，同比下降 4.3 个百分点。我国可再生能源发电比重稳步上升。

目前可再生能源最新技术领域有可再生能源先进发电技术、可再生能源并网技术和可再生能源多能互补技术三个方向。

在可再生能源先进发电技术方面，由于光伏发电输出功率的随机性，保证光伏并网发电的最大功率点的跟踪是其研究重点，由于最大功率点跟踪对跟踪的准确性、快速性和稳定性要求比较高，实现有功输出的有效调节是目前光伏发电的关键技术。变速恒频发电技术可最大限度的捕捉、利用风能，并且转速运行范围相对宽松，调节系统更加灵活，是目前主流的风力发电新技术。

在可再生能源发电并网技术方面，可再生资源受环境温度、天气因素的影响，具有比较大的波动性和间歇性，很容易导致电网电压出现闪变或波动，因此并网消纳是将可再生能源接入现有能源体系的关键技术，这些技术包括：先进逆变器技术。逆变器具有可拓展通信功能、可以对无功和有功进行控制、可以降低有功变化率、实现谐波补偿等，保证电能输出质量更稳定、抗干扰能力更强，并具有可以达到智能电网要求的网源互动技术。可再生能源并网需要更加的精确、快速的电网电压信号锁

定技术，能够在大功率并网时不对称运行情况下和电压采样波动情况下完成精确锁相。 系统抗干扰技术。集中式风光电站要在变换器控制的基础上实现低电压穿越，孤岛指令和检测利用输变电系统能量进行管理实现；分布式风光电站要通过控制达到孤岛检测的目的，并利用基于配电网的能量管理系统来发出低电压穿越信号指令。

在可再生能源多能互补技术方面，可再生能源多能互补系统相对于传统发电技术而言，其复杂程度和不确定性都大大增加。 在系统规划方面，主要针对可再生能源进行确定性和不确定性分析。确定性分析主要是结合风、光等可再生资源情况与负荷需求等历史记录数据进行分析；不确定性分析是基于概率统计理论对可再生能源与负荷的变化特性进行建模，同时考虑自然环境、用户冷热电负荷等因素。 在系统综合建模方面，需要针对多能互补的各个子系统的动态特性时间尺度相差悬殊进行研究，例如电力网络功率瞬间平衡，其动态需由微分 – 代数方程描述；而冷热的转换过程最为缓慢，通常以分、时来表述动态过程。

在优化设计方面，基于牛顿 – 拉夫逊法的微网潮流算法、电网全寿命周期成本分析、多目标优化策略的混沌量子遗传算法等。以实现能源最佳利用和系统长期经济可靠运行为目标，进行科学合理的系统集成和能量管理。

### • 先进储能技术

截至 2017 年年底，全球已投运储能项目累计装机规模达 175.4 GW，同比增长 4%。其中抽水储能的累计装机规模依旧占据最大比重，为 96%，但较上一年下降 1 个百分点；电化学储能的累计装机规模紧随其后，规模为 2926.6 MW，同比增长 45%，占比 1.7%，较上一年增长 0.5 个百分点。在各类电化学储能技术中，锂离子电池的累计装机占比最大，超过 75%。

2017 年，全球新增投运化学储能项目装机规模为 914.1 MW，同比增长 23%。新增规划、在建

的电化学储能项目装机规模为 3063.7 MW，预计短期内全球电化学储能装机规模还将保持高速增长。

截至 2017 年年底，我国已投运储能项目累计装机规模为 28.9 GW，同比增长 19%。2017 年中国储能市场新增投运储能项目总规模为 121 MW，涉及集中式可再生能源并网、辅助服务、用户侧三个领域。其中在集中式可再生能源并网领域，2017 年储能项目开始在技术示范应用的基础上寻求商业化突破。以青海直流侧光伏储能示范项目、吉林风电场热电混合储能项目为代表。光储领域加快商业化进程，电储能与储热的综合应用成为解决电力系统调峰和可再生能源消纳的新探索方向。新能源快速发展带来的电力系统灵活性和消纳问题，暴露了传统电力运行和调度机制存在的瓶颈，也进一步提高了储能集中在可再生能源并网领域的应用价值和发展潜力。

目前大规模储能技术中只有抽水储能技术相对成熟，但由于受地理因素制约，其广泛使用受到制约。而其他储能方式还处于实验示范阶段或者初期研究阶段，储能装置的可靠性、使用寿命、制造成本以及应用能力等方面还有待突破。总体来看，我国储能技术研究尚处于发展初步阶段，还不适于在电网全面推广应用，同时还存在着诸如研发体系不健全、经济性收益有待提高、缺乏运行数据支撑等一系列问题。目前储能技术研究的关键技术领域主要分布在以下几个方面。

在储能系统规划方面，主要包括：广域布局的储能系统与常规电源、新能源发电的协同调度方法；百兆瓦级储能系统在新能源发电、输电和配电等各环节中的规划布局方法。 新型技术与供电商模式下储能的选型配置方法、分布式储能系统的汇聚效应及在电网中的运行模式和管理策略。 储能技术实现市场化应用的政策和制度需求，包括促进储能发展的电价机制、市场准入制度及电力市场机制；研究多种类电力市场交易下储能与其他能源的协调运作机制等。

在储能设备研究方面，主要关键技术方向包括：针对现有体系下锂离子、铅炭、液流等储能电池的关键材料改性、低成本化制备、能量密度提升和产业化技术；基于离子液体、固态电解质的高安全性电池材料体系和液流电池低成本高可靠膜制备技术。超级电容器多孔石墨烯电极、高耐压电解质盐和电解液、纤维素隔膜等材料的研制。空气压缩机和膨胀机技术；高转化效率和低成本的储冷储热和储气技术。针对下一代储能技术，研究锂硫、锂空气等新型高比能量电池技术；研制高效制氢及氢发电装备，突破低成本、高效率和规模化储氢技术；研发大容量高能量密度储热储冷技术装备，突破热相变储能关键材料技术。

在储能系统集成及工程应用方面，主要关键技术包括：适用于百兆瓦级储能电站集成与控制技术研究及工程示范。包含储能电池组（BP）、电池管理系统（BMS）、储能变流器（PCS）、中央控制系统（MGCC）和能量管理系统（EMS）的电池储能系统架构；规模化梯次利用电池的重组、集成和热疏导等安全管理技术。基于新型器件、拓扑及控制方法的储能变流器研制；储能变流器的控制、储能电池管理、以及系统能量监控与调度系统。储氢系统、相变储能和飞轮储能的系统集成和工程应用技术；海水抽水蓄能和深冷储能系统集成与试验技术等。

物理储能依旧占据主导部分。根据国家“十三五”水电规划，到2020年年底，我国抽水蓄能的累计装机量为40 GW。截至2017年年底，抽水蓄能在运规模为28.49 GW，在建规模为38.71 GW，预计到2020年将完成规模目标。

电化学储能将保持稳定增长。电动汽车等高密度分布式储能系统将使电网形态发生根本改变，随着新能源汽车得到规模化的推广和应用，电池系统的性能和成本逐渐成为影响行业快速发展的主要瓶颈问题。未来电化学储能将围绕高能量密度、低成本、高安全性、长寿命的电池系统作为发展目标。

储能技术与可再生能源系统深度融合。储能技术能够实现可再生能源平滑功率波动、削峰平谷、调频调压，是满足可再生能源大规模接入电网的重要手段。随着智能微电网与能源互联网的发展，市场对灵活性的电力调峰资源和促进可再生能源并网的需求将越发迫切，储能技术在该领域有着广阔的发展前景。

### （3）重点研究国家/地区和机构以及之间的对比及合作情况分析

根据表1.2.5可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的国家是美国、中国、伊朗、印度。其中，美国、中国占据前两位，核心论文比例分别为26.78%和19.51%，印度和伊朗的核心论文比例均超过6%。

由表1.2.6可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是MIT、Imperial Coll Sci Technol & Med、Univ Malaya、Chinese Acad Sci、Huazhong Univ Sci & Technol，核心论文产出数均超过10篇。

根据图1.2.3可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有中国、美国、澳大利亚、英国、德国。中国的发表论文数量较多，主要是与美国、澳大利亚和英国进行合作发表。

根据图1.2.4可知，Imperial Coll Sci Technol & Med和Univ Malaya有合作。

表1.2.7中，施引核心论文数产出最多的国家为中国，施引论文比例为33.96%，美国将近达到20%；印度、英国、伊朗、西班牙、澳大利亚、德国和意大利的施引核心论文比例均超过5%。

表1.2.8中，施引核心论文产出最多的机构是Chinese Acad Sci，比例达到将近25%。Tsinghua Univ和North China Elect Power Univ的施引核心论文比例均超过10%。

通过以上数据分析可知，美国和中国在可再生发电的核心论文产出及施引数量处在世界前列，中内地机构的施引核心论文数量较多。

表 1.2.5 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	184	26.78%	9997	26.99%	54.33
2	China	134	19.51%	7261	19.60%	54.19
3	Iran	46	6.70%	1908	5.15%	41.48
4	India	43	6.26%	2382	6.43%	55.40
5	Spain	40	5.82%	2172	5.86%	54.30
6	UK	39	5.68%	2289	6.18%	58.69
7	Australia	39	5.68%	2158	5.83%	55.33
8	Germany	33	4.80%	1580	4.27%	47.88
9	Canada	33	4.80%	1419	3.83%	43.00
10	Malaysia	26	3.78%	1517	4.10%	58.35

表 1.2.6 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	MIT	15	2.18%	713	1.92%	47.53
2	Imperial Coll Sci Technol & Med	13	1.89%	798	2.15%	61.38
3	Univ Malaya	13	1.89%	643	1.74%	49.46
4	Chinese Acad Sci	12	1.75%	633	1.71%	52.75
5	Huazhong Univ Sci & Technol	12	1.75%	495	1.34%	41.25
6	Tech Univ Denmark	10	1.46%	717	1.94%	71.70
7	Indian Inst Technol	9	1.31%	491	1.33%	54.56
8	Univ New S Wales	9	1.31%	443	1.20%	49.22
9	King Fahd Univ Petr & Minerals	9	1.31%	440	1.19%	48.89
10	Univ Tehran	9	1.31%	368	0.99%	40.89

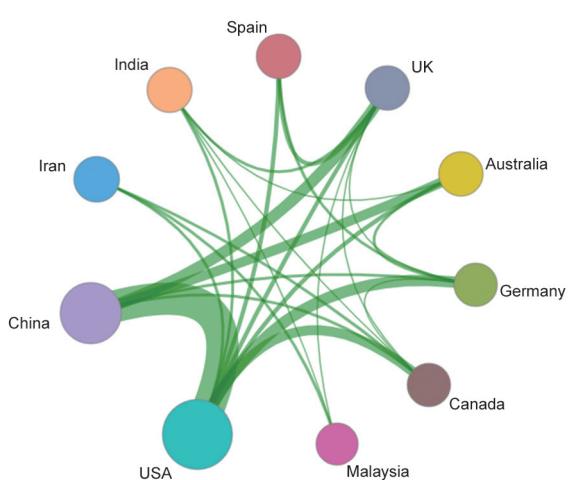


图 1.2.3 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

### 1.2.3 煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料

#### (1) 概念阐述

智能开采始于 20 世纪八九十年代的自动采矿技术 (Automated mining) 和遥控采矿技术 (Telemining /Distance mining)，1992 年芬兰提出智能矿山 (Intellimine) 计划，煤炭智能开采的概念基本确定。当前我国老油田、非常规、深层、深水等油气勘探开发亟需利用智能化装备与材料，对油气田生产动态进行智能调控，以降低开发成本、提高油气产量和采收率。智能开采是指在不需要人

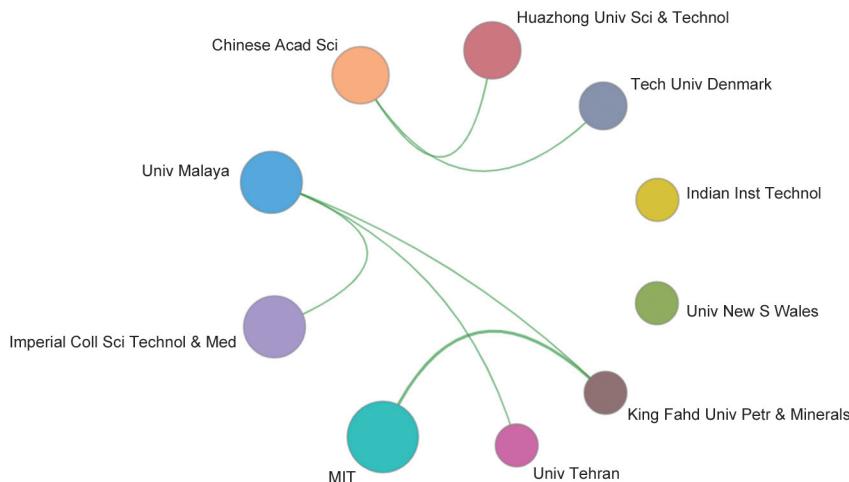


图 1.2.4 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	7544	33.96%	2016.3
2	USA	4244	19.11%	2015.9
3	India	1920	8.64%	2016.2
4	UK	1414	6.37%	2016.1
5	Iran	1294	5.83%	2016.2
6	Spain	1232	5.55%	2015.8
7	Australia	1205	5.42%	2016.0
8	Germany	1183	5.33%	2016.0
9	Italy	1150	5.18%	2015.9
10	South Korea	1027	4.62%	2016.1

表 1.2.8 “可再生能源发电利用及储能、节能环保技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	870	24.47%	2016.1
2	Tsinghua Univ	417	11.73%	2016.3
3	North China Elect Power Univ	416	11.70%	2016.1
4	Univ Chinese Acad Sci	300	8.44%	2016.5
5	Xi'an JiaoTong Univ	299	8.41%	2016.1
6	Nanyang Technol Univ	268	7.54%	2016.1
7	Huazhong Univ Sci & Technol	259	7.29%	2016.2
8	Shanghai Jiao Tong Univ	250	7.03%	2016.2
9	Islamic Azad Univ	243	6.84%	2015.8
10	Zhejiang Univ	233	6.55%	2016.1

工直接干预的情况下，通过开采环境的智能感知、开采装备的智能调控、开采作业的自主巡航，由开采装备独立完成的回采作业过程。煤炭与油气的智能化开采是在机械化开采、自动化开采的基础上，通过信息化与工业化的深度融合提高生产效率和经济效益的革命性技术。

### （2）各前沿分支工程科学

1) 煤炭智能开采关键技术、装备与材料。它是环境感知、智能决策、自动控制三个技术单元的深度整合，涉及工程环境感知、数字矿山、矿山物联网、大数据云计算、装备控制自动化五个分支。工程环境感知是针对井下设备、人员和灾害三个方面 的自动探测与传输技术，旨在解决复杂地质条件下采煤作业全过程监控自动化与精细化问题。澳大利亚侧重于以热红外成像为基础的煤层地质结构智能探测；中国聚焦于采煤装备位置与姿态的智能探测。我国智能开采装备水平与国外相当，具有采煤机运行参数、机器故障参数、机器姿态参数等在线感知能力，具有采煤机截割滚筒记忆截割、机载无线收发信号功能，能够构建采煤机远程监控系统。国外主流电液控制液压支架可完成综采工作面设备远程控制和系统故障诊断等功能，国内液压支架电液控制系统可靠性仍与国外技术存在一定差距。目前，我国自主研发的刮板输送机智能化主要体现为软启动控制、刮板链自动张紧和运行工况监测技术。综采工作面智能化集成系统可实现综采工作面采煤机、液压支架、刮板输送机、转载机、破碎机、带式输送机、组合开关、移动变电站等设备的智能化集成控制及协同互锁，在一些煤矿应用之后实现了综采工作面自动化和少人化。装备控制自动化是指在不需要人工直接干预情况下，采掘装备通过预编程序实现自主调控、采掘作业的自主巡航，由采掘装备独立完成的回采作业。澳大利亚重点发展采煤机的记忆割煤与自主导航技术，中国聚焦于井下采掘装备远程遥控技术。

2) 数字矿山与矿山物联网关键工程技术、装备与材料。它是以矿山空间数据与模型为中心，是空间信息技术、网络技术及可视化技术在矿山企业综合应用的集中体现，其基本任务是通过统一时空基准、统一数据标准、统一网络结构和统一集成平台，为矿山生产全过程的可视化、精细化、智能化管控提供数据保障与技术支持。数字矿山未来的主攻方向为：矿山空间数据仓库与数据更新技术、矿山数据挖掘与知识发现技术、真3D实体建模与虚拟采矿技术。矿山物联网由感知层、传输层、分析层和应用层组成，依托覆盖矿山井上井下的高速网络建设矿山传感网，通过多种传感器将矿山环境、设备及人员实时联接起来，对矿山灾害环境、设备健康状况、人员安全态势的实时监测、感知、交流与控制。矿山物联网未来发展的重点为：多网融合传输技术、多参量信息分析处理技术。随着矿山物联网覆盖的范围越来越广，“人、机、物”三元世界在信息空间中交互、融合所产生并在互联网上可获得的数据也越来越大，这些数据的内在价值的提取和利用需要用超大规模、高可扩展的云计算技术来支撑。煤矿大数据云计算技术尚处于起步阶段，需要在统一技术标准、数据建模两方面着力发展。

3) 智能化钻井关键工程技术、装备与材料。智能化钻井通过结合大数据、人工智能等，利用超前探测、闭环调控、精准制导，可有效规避钻井风险，形成高质量井眼，提高钻井速度、钻遇率，降低钻井成本，是保证完井、生产顺利开展的基础。智能化钻井需要基于钻井过程大数据，通过分析实时工况，对钻井破岩参数进行自适应优化，智能调控井眼轨迹。其中智能化钻井关键技术主要涉及数据双向高效传输技术、闭环智能调控技术、钻井智能导向技术。钻井过程会产生海量数据，为了确保地面控制系统与井下信息的动态交互，需要利用智能钻杆等装备进行更高效的数据传输。利用对钻井数据的智能分析，通过信号反馈，优化钻井参数，

形成钻井信息闭环调控，显著提高了钻井数据处理效率，具体涉及无人化钻台、智能控压、一体化司钻控制等装备。智能导向是根据地层条件与地面控制指令，控制钻头钻速进行靶点定向钻进，具体涉及智能钻头等装备。为了提高复杂条件下工具性能，碳纤维复合材料、高熵合金、超级钢、纯相多晶金刚石等材料受到国内外广泛关注。同时，仿生钻井液、超分子聚合物钻井液等作为井眼钻进与顺利进行的重要载体在国内外得到了广泛研究。当前，挪威已将高度灵活、可执行多任务无人化钻台应用于现场。贝克休斯首款 TerrAdapt 自适应钻头，通过自动化控制来大幅减小井下故障发生频率。英国北海 Babbage 油田通过智能闭环控制，利用智能钻杆的数据高效传输，使机械钻速提高了近 200%。斯伦贝谢、贝克休斯、威德福、哈里伯顿等相继将智能导向技术用于钻井现场。

4) 智能化完井关键工程技术、装备与材料。智能化完井是借助先进的传感、传输、自动化控制设备，结合大数据、人工智能等，可对油气生产过程进行实时监测与控制，为智能生产的进行提供有力支撑。智能化完井是利用结合大数据、人工智能等，通过自动化装备，进行层间隔离、永久监测、流量控制、出砂控制，为智能化生产提供有效支撑。其中智能化完井关键技术主要涉及油井开采入流控制技术、完井参数智能优化技术。当前，一体化完井管理控制系统集井下监测、数据传输、分层流量控制于一体，可以实现油藏信息管理、动态数据共享和流量智能调控，受到国内外广泛关注，具体涉及井下传感器、井下生产控制器、多通道封隔器等装置。当前，贝克休斯 InCharge 完井系统利用电力液压驱动，可控制多达 12 个产层，实现无级节流。斯伦贝谢 Manara 完井系统，可进行数据无线传输、多通道封隔、分层监控。此外，哈里伯顿、中石油等也相继推出了 SmartWell、EIC-Riped 完井系统。同时，结合纳米材料与完井液的多功能智能化纳米完井

液体系，可对井下复杂情况或事故进行自动识别与处理，已成为未来发展趋势。

#### 5) 智能化生产关键工程技术、装备与材料。

智能化生产是基于大数据、尝试学习等对油气田全生命周期的生产进行动态管理与优化。利用研究分支间协同工作，通过资料数据、仪器设备、施工作业等有效整合，进而可实现油气开采智能化。智能化生产利用传感装置采集井下数据，然后传输至地面系统进行智能分析和信号反馈，通过地面与井下装备执行控制指令，对井下工况进行智能管理与优化。其中，智能化生产关键技术主要涉及油藏生产动态实时四维解释技术、智能驱替提高油田采收率技术、多元海量数据智能分析利用技术。油气智能化生产主要涉及油田智能监测装备，获取各个环节动态信息，为油气藏实时解释、油气开采智能分析提供支撑。同时，在油气田生产中会产生海量数据，需要利用深度学习与数据挖掘等进行信息的智能分析，对大数据储存、计算装备的性能也提出了更严苛的要求。此外，纳米智能驱油剂由于可以显著提高低渗透油藏的采收率，已得到了国内外高度关注。当前，Anadarko 石油公司基于 Delaware 盆地微生物 DNA 正在构建庞大监测数据库，用于分析油气藏生产动态。油藏机器人可以准确监测复杂条件下温度、压力等信息，已成为国内外研究前沿，阿美石油公司在该领域开展了积极研究。而壳牌公司利用大数据、云计算建立了油田管理系统，初步实现了生产自动调控。为了提高油田采收率，中石油、中石化等在智能精细注水、智能纳米驱油剂提高采收率方面进行了积极探索。加拿大自然资源公司也开展聚合物纳米微球提高采收率先导试验。此外，中国在超级计算机方面发展迅速，已达到国际先进水平，为油气开采中海量数据存储、计算、分析等方面研究奠定了重要基础。

### (3) 发展现状与未来发展趋势

智能化开采未来的发展方向是基于生产过程中的动态信息，依托相关工程技术、装备与材料，对

煤炭及油气开采进行全生命周期实时智能调控。目前，国内外围绕智能化开采的关键领域均进行了大量研究，但仍未实现全过程智能开采，未来需要在以下方面实现重大突破：

### 1) 工程装备、材料与人工智能的深度融合：

通过有效的数据采集、分层智能生产、数据挖掘与智能分析，实现煤炭与油气高效智能开发。利用先进的计算机、光电和导航技术对开采设备和人员进行自动定位，以实现安全监控和精确开采。同时，材料与人工智能的深度融合有助于全方位改善工程装备性能，实现对采场未知区域的自动探查和检测，甚至对井下复杂生产情况或事故进行自动识别与处理。

2) 数据智能采集 – 高效传输 – 智能分析 – 智能调控一体化技术：基于采集的多元海量数据，通过智能分析，确定生产实时动态，利用智能调控开采过程，实现数据采集、传输、分析、调控各个环节协同工作。

### (4) 国家 / 地区和机构以及之间的对比及合作情况

根据表 1.2.9 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的国家是中国、印度、加拿大、澳大利亚和英国。其中，中国核心论文比例超过 50%，其他国家核心论文比例均低于 10%。由表 1.2.10 可

知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是 Xi'an Univ Sci & Technol, Luohe Med Coll 以及 China Univ Min & Technol Beijing。其中，Xi'an Univ Sci & Technol 和 Luohe Med Coll 的核心论文产出比例超过 5%。

根据图 1.2.5 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有中国、澳大利亚、美国、英国和意大利。其中中国与澳大利亚、美国、英国这三个国家均具有合作关系，合作国家数最多，合作发表的核心论文数量也最多。而印度、加拿大的论文数尽管较多，但没有与其他国家或地区进行过合作。

根据图 1.2.6 可知，与其他机构具有合作关系的机构有 Luohe Med Coll, Chinese Acad Sci, Henan Qual Engn Vocat Coll, Henan Polytech Inst 和 CSIRO，其中 Luohe Med Coll 分别与 Henan Qual Engn Vocat Coll, Henan Polytech Inst 这两个机构之间彼此具有合作关系，合作发表核心论文数量也较多。中国西安的 Xi'an Univ Sci & Technol 是发表论文数量最多的机构，但没有与其他机构开展过合作研究。

根据表 1.2.11 可知，该研究方向的施引核心论文产出数量最多的国家是中国、澳大利亚、美国、英国和印度。其中，中国施引核心论文比例超过 50%，其他国家只有澳大利亚施引核心论文比

表 1.2.9 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国/地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	43	57.33%	75	51.37%	1.74
2	India	6	8.00%	5	3.42%	0.83
3	Canada	5	6.67%	9	6.16%	1.80
4	Australia	3	4.00%	24	16.44%	8.00
5	UK	3	4.00%	9	6.16%	3.00
6	USA	3	4.00%	8	5.48%	2.67
7	Romania	2	2.67%	11	7.53%	5.50
8	Iran	2	2.67%	2	1.37%	1.00
9	Italy	2	2.67%	2	1.37%	1.00
10	Thailand	2	2.67%	1	0.68%	0.50

表 1.2.10 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Xi'an Univ Sci & Technol	6	8.00%	0	0.00%	0.00
2	Luohe Med Coll	4	5.33%	0	0.00%	0.00
3	China Univ Min & Technol Beijing	3	4.00%	3	2.05%	1.00
4	Henan Qual Engn Vocat Coll	3	4.00%	0	0.00%	0.00
5	Chinese Acad Sci	2	2.67%	27	18.49%	13.50
6	Shiraz Univ	2	2.67%	2	1.37%	1.00
7	Henan Polytech Inst	2	2.67%	0	0.00%	0.00
8	Univ Alberta	2	2.67%	0	0.00%	0.00
9	Shandong Univ Sci & Technol	1	1.33%	35	23.97%	35.00
10	CSIRO	1	1.33%	24	16.44%	24.00

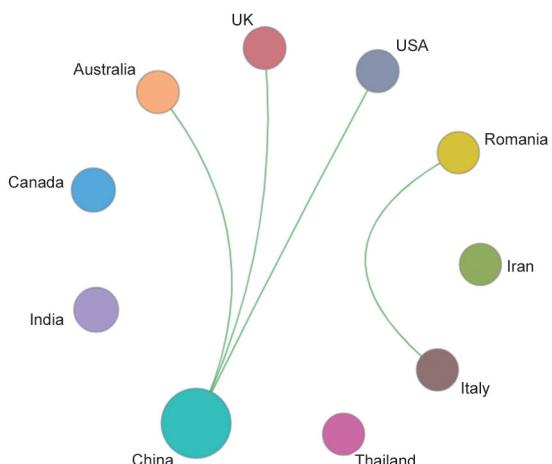


图 1.2.5 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

例高于 10%。由表 1.2.12 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构分别是 China Univ Min & Technol、Chinese Acad Sci 以及 Shandong Univ Sci & Technol。其中，China Univ Min & Technol 和 Chinese Acad Sci 的施引核心论文产出比例均超过 20%。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top14 工程开发前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top14 工程开发前沿见表 2.1.1，它们涵盖了能源和电气科学技术

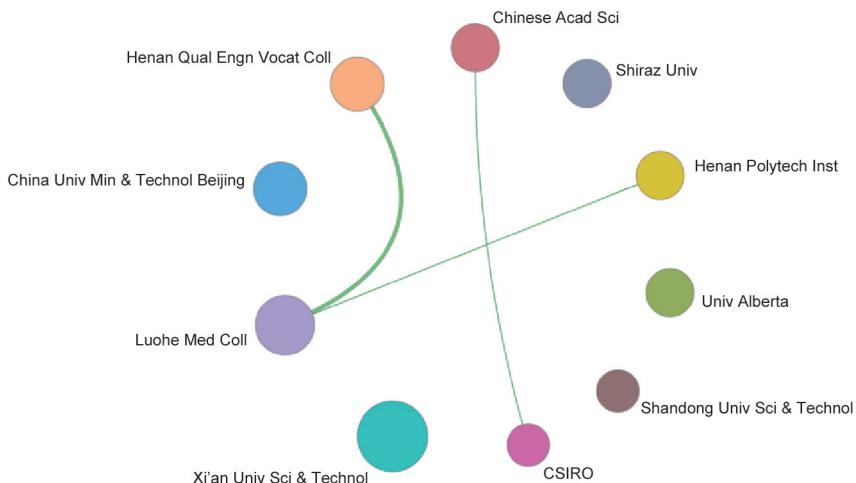


图 1.2.6 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

## 第二部分 领域报告：能源与矿业工程

表 1.2.11 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	78	53.06%	2017.0
2	Australia	15	10.20%	2016.5
3	USA	11	7.48%	2016.4
4	UK	10	6.80%	2017.3
5	India	10	6.80%	2016.7
6	South Korea	6	4.08%	2017.3
7	Italy	5	3.40%	2014.8
8	Malaysia	4	2.72%	2016.0
9	Japan	4	2.72%	2016.3
10	Taiwan of China	4	2.72%	2017.3

表 1.2.12 “煤炭与油气开采智能化关键工程技术、装备与材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China Univ Min & Technol	24	32.88%	2017.8
2	Chinese Acad Sci	17	23.29%	2015.7
3	Shandong Univ Sci & Technol	10	13.70%	2017.9
4	CSIRO	5	6.85%	2016.8
5	Newcastle Univ	5	6.85%	2017.0
6	China Univ Geosci	3	4.11%	2016.3
7	Univ Sydney	3	4.11%	2016.7
8	New Jersey Inst Technol	2	2.74%	2017.0
9	Univ Malaya	2	2.74%	2015.5
10	Petru Maior Univ Tirgu Mures	2	2.74%	2016.5

与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程和矿业科学技术与工程 4 个学科。其中 5 个工程开发前沿基于科睿唯安共被引聚类分析获得，分别为“能源与电力系统中的先进储能技术”“无线电力传输及其相关设备的研究及应用”“可再生能源发电系统的运行与控制”“石油工程新工具新材料”“非常规油气藏储层测井识别”，其余是专家提名前沿。

其中新兴前沿包括“无线电力传输及其相关设备的研究及应用”“绿色采矿技术（煤、油、气、矿）”“矿业安全智能精准开采技术与装备”，传

统深入研究包括“化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”“乏燃料后处理及核设施仪器仪表”“可再生能源发电系统的运行与控制”“先进反应堆技术及设备研发”“石油工程新工具新材料”“非常规油气藏储层测井识别”“三维地质建模技术”，颠覆性技术包括“先进核燃料技术研发”，融合交叉学科前沿包括“电力系统高压大功率电力电子器件及装备”“能源与电力系统中的先进储能技术”“矿产和地热宽谱段遥感勘查”。各个工程开发前沿所涉及的核心专利在 2012 年至 2017 年的逐年发表情况见表 2.1.2。

### (1) 化石能源(煤炭、非常规油气)开发利用系统与核心技术装备

煤炭开发利用系统与核心技术包括采掘两方面，其中煤矿综采自动化智能化无人化成套技术与

装备一般可泛指在综采成套装备中应用自动化和智能化控制技术，实现不同程度的工作面少人化或无人化开采作业。发展综采自动化和智能化技术，最终实现煤矿工作面无人化开采是煤炭开采技术的发

表 2.1.1 能源与矿业工程领域 Top14 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	化石能源(煤炭、非常规油气)开发利用系统与核心技术装备	7570	19 467	2.57	2014.51
2	电力系统高压大功率电力电子器件及装备	30 142	93 793	3.11	2014.02
3	乏燃料后處理及核设施仪器仪表	6868	6162	0.90	2014.97
4	能源与电力系统中的先进储能技术	34 878	112 316	3.22	2014.26
5	无线电力传输及其相关设备的研究及应用	1700	32 763	19.27	2014.47
6	可再生能源发电系统的运行与控制	23 387	55 280	2.36	2014.56
7	先进反应堆技术及设备研发	1147	6231	5.43	2013.65
8	矿产和地热宽谱段遥感勘查	5821	19 950	3.43	2014.4
9	石油工程新工具新材料	10 890	52 436	4.82	2013.77
10	绿色采矿技术(煤、油、气、矿)	400	1080	2.70	2014.3
11	非常规油气藏储层测井识别	4766	17 227	3.61	2014.51
12	三维地质建模技术	3072	5108	1.66	2016.51
13	先进核燃料技术研发	46 462	244 048	5.25	2013.69
14	矿业安全智能精准开采技术与装备	3932	5379	1.37	2014.83

表 2.1.2 能源与矿业工程领域 Top14 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	化石能源(煤炭、非常规油气)开发利用系统与核心技术装备	599	747	848	1819	1796	1116
2	电力系统高压大功率电力电子器件及装备	3203	4236	4377	4812	4750	5115
3	乏燃料后處理及核设施仪器仪表	620	841	938	1145	1556	1651
4	能源与电力系统中的先进储能技术	4039	4882	5309	5355	5627	6614
5	无线电力传输及其相关设备的研究及应用	140	192	234	255	312	392
6	可再生能源发电系统的运行与控制	2468	3501	3656	4064	4251	4394
7	先进反应堆技术及设备研发	127	102	144	161	160	232
8	矿产和地热宽谱段遥感勘查	492	811	831	804	1006	1308
9	石油工程新工具新材料	1077	1246	1473	1608	1719	1890
10	绿色采矿技术(煤、油、气、矿)	34	46	48	56	80	86
11	非常规油气藏储层测井识别	273	590	608	713	669	880
12	三维地质建模技术	15	44	157	259	622	1151
13	先进核燃料技术研发	5150	5667	6509	6113	6723	8068
14	矿业安全智能精准开采技术与装备	336	528	553	762	907	747

展方向。主要技术方向包括：研发液压支架围岩耦合自适应控制技术，研发基于智能决策、时序控制、记忆放煤和人工干预协同控制的自动化放顶煤控制系统，研发可靠、实时、安全的工作面多机协同控制系统，研究工作面端头与超前支护系统自动化等。煤巷智能快速掘进技术与装备是指采用具有感知能力、记忆能力、学习能力和决策能力的掘锚机、锚杆机、破碎转载机、带式输送机等煤巷掘进装备，以自动化控制系统为枢纽，以远程可视监控为手段，实现掘进工作面巷道掘进系统“全断面快速掘进、掘支运平行作业”的安全协调高效掘进技术。智能快速掘进技术创造了掘进、支护、运输“三位一体”的快速掘进新类型，实现了设备的集中协同控制，为下一步掘进工作面无人化奠定了基础。主要技术方向及关键技术包括：智能截割技术、智能锚护技术、输送带多点驱动功率平衡技术和张紧力自动控制技术、辅助工序自动化技术、物联网集成技术、系统的适应性研究等。煤巷智能快速掘进技术的发展趋势是由掘支运“三位一体”向掘支运输“四位一体”方向发展。此外，下一步需要研究构建掘进机大数据库和云计算中心，这一平台将有效解决掘进机的智能控制和远程服务问题，“无人值守、智能掘进”将变成现实。

我国非常规油气资源储量丰富，是重要的战略接替资源。但由于非常规油气储层具有低孔、低渗、较大渗流阻力和低采收率的特点，通过传统手段难以实现非常规油气的经济高效开发。亟需通过长水平井技术、大规模体积压裂改造技术和高效“井工厂”技术的工程系统与核心技术装备的创新，提高非常规油气的产量和采收率，降低其开发成本，进而实现我国非常规油气领域的重大突破，为保障我国能源战略安全贡献力量。长水平井技术是扩大非常规油气储层泄流面积，提高井眼控制体积，并进行分段压裂改造的有效方法，它可以显著提高单井产量和采收率。长水平井钻完井的关键技术包括：旋转导向钻井技术、

高效钻井液技术和井筒完整性控制。体积压裂通过压裂的方式对储层实施改造，在形成一条或多条主裂缝的同时，通过分段多簇射孔、高排量、大液量、低黏液体、以及转向材料及技术，使天然裂缝与人工裂缝相互交错，从而增加改造体积，提高初始产量和最终采收率。“工厂化”钻井利用自动化钻机，通过将各项钻井作业标准化和专业化，采用流水线式的“工厂化”生产模式批量完成钻井作业，提高设备、人员和组织施工效率，从而缩短整体钻井时间，降低了综合开发成本。因此长水平井技术、体积压裂和“井工厂”钻井可显著提高非常规油气的产量和采收率，降低作业成本，已成为国内外竞相研发的前沿。

### (2) 电力系统高压大功率电力电子器件及装备

高压大功率电力电子器件及装备是电力系统中实现电能传输、分配和变换的基础和核心，尤其是特高压交直流输电和智能电网技术的核心，其包含高压大容量或高频电力电子器件，基于电力电子器件的柔性交流输电系统(FACTS)，静止同步补偿器(STATCOM)，静止无功补偿装置(SVC)，电力电子变压器(PET)和能源路由器装备等。随着国家能源结构调整与迅速增长的能源需求，电力系统高压大功率电力电子器件及装备领域在向大功率、高频化和智能化方向发展。高压大容量电力电子器件的研发，尤其是大容量晶闸管、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)，是实现我国发展更经济的远距离大容量特高压交直流输电，实现长距离大容量的西电东送、南北互供以及全国联网的核心技术之一，高压大容量电力电子器件的可靠性、模块内芯片的并联均流、高压模块封装的热阻以及驱动保护等技术是其主要技术研究方向。基于碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)材料的新型高压高频电力电子器件，能满足智能电网和新能源技术高能效、高功率密度和更多新功能的发展需求，其主要技术方向包括高质量SiC厚外延和硅衬底GaN外延技术、栅氧可靠性和电流崩塌

问题、器件高压终端保护技术和智能驱动技术等。高压交直流输电容量的大幅提升需要依靠高性能大容量电力电子装备来实现，智能化、信息化的大容量电力电子装备与智能电网的结合将更加紧密。

### (3) 乏燃料后处理及核设施仪器仪表

乏燃料后处理是指对从反应堆卸出后的核燃料（称为“乏燃料”）的处理和处置过程。包括乏燃料的中间贮存、乏燃料的后处理和放射性废物的处理、最终处置等过程。乏燃料后处理是核燃料循环后段的核心，是对核电站卸出的乏燃料元件进行处理、分离和回收未烧尽的铀和新生成的钚，同时对放射性废物进行处理，满足处置要求。后处理技术按照乏燃料在主工艺中被处理时的存在状态而分为湿法（亦称“水法”）和干法两种。水法萃取流程是目前唯一经济实用的后处理流程，常用的普雷克斯流程（PUREX）就是将反应堆乏燃料元件经过适当的预处理转化为硝酸水溶液，然后采用有机溶剂（常用磷酸三丁酯的煤油溶液）进行萃取分离，以达到回收核燃料和除去裂变产物的目的。而干法后处理对于处理高燃耗乏燃料，特别是快堆乏燃料具有一定的优势，是当前一个重要的研究方向。

为保障核电运行全寿期的安全高效运营，加强核电关键系统和设备的自动运行监控，提高系统、设备的可靠性；同时提高核电站运行的可利用率，提高经济性；实现对人不可达区域进行机器人维修，减少工作人员的受照剂量；最终为严重事故处理及退役创造技术条件。包括数字化技术、人工智能及核测仪表，其他涉及核安全的关键仪表技术。

### (4) 能源与电力系统中的先进储能技术

在能源的生产和消费链中，任何阶段都可以实施能量的储存技术。储能技术对新型能源和现代电力系统而言尤为重要。因为在大型电力系统中，一直存在着能源生产和需求在空间和时间上的错配问题，可再生能源都有间歇性和波动性，智能电网更是需要通过先进储能技术，实现能源的高效清洁利用。

一般而言，只要能满足能源与电力系统中对功率和能量的需求，目前已有的和正在开发的储能技术都能应用于该系统中，具体包括电化学储能技术，如各种传统和新型二次化学电池，液流电池等；化学储能技术，如氢气的存储技术；热化学的储能技术，如氦气的分解和复合反应，甲烷的分解和复合反应等；储热技术，如显热和潜热利用技术；动能储能技术，如飞轮储能；势能储热技术，如抽水电站，压缩空气储能；电磁的储存技术，如超导磁能储存以及超级电容器等。

优化选择一种或多种储能技术应用于能源与电力系统中，必须同时考虑技术和经济两方面的问题，比如投资成本，运行成本，能量或功率密度，循环次数以及对环境的影响因素等。

### (5) 无线电力传输及其相关设备的研究及应用

无线电力传输是运用近场谐振耦合、电磁波或超声波等技术，实现电能由发射端到接收端无线传输的技术。其中，近场感性谐振耦合技术被广泛用于研制统一的可携带电子设备无线充电平台、电动汽车静态无线充电装置、电动汽车动态无线充电系统、工业机器人无线充电装置、植入式电子设备无线充电装置、电网监控设备或巡线无人机的无线充电装置、无人潜艇的海底无线充电系统等设备。基于微波或激光无线电力传输技术的空间太阳能电站是未来重要的可再生能源发电方式。大功率远场无线电力传输技术、大功率高频电力电子技术、大功率高频电力器件技术、最高效率跟踪技术、动态控制技术、多场耦合分析、电磁超材料等成为研究前沿。未来无线电力传输技术将向远距离、高功率、高效率、高安全性、微型化等方向发展，在交通电气化、航空航天、植入式电子医疗设备、水下探测、智能家居等应用领域发挥重要的作用。

### (6) 可再生能源发电系统的运行与控制

可再生能源发电系统的运行与控制技术是运用先进电力电子技术、控制理论与信息通信技术，

实现风电、光伏等可再生能源发电系统在不同容量等级与并网方式下安全、高效、灵活运行的综合技术体系。

可再生能源发电系统可采取集中式与分布式两种运行方式。集中式可再生能源发电，通过构建新能源基地和场站集群，可实现可再生能源的规模化开发、集中式并网与远距离外送，有效解决我国可再生能源分布与负荷中心不匹配的问题，适应我国电网未来发展建设格局；但面临故障穿越、并网稳定性、灵活运行控制、高效外送消纳与电网预测调度等突出技术挑战。分布式可再生能源发电，利用分布式发电单元、逆变器或直流变换器等装置，实现可再生能源的分布式转换接入与本地化消纳利用，具有经济、高效、灵活、可靠的特点；但同时存在与配电系统协调控制、故障定位保护、系统稳定性等技术难点。

因地制宜，采取不同开发规模与并网形式，实现各类可再生能源规模化开发与高效率消纳利用，同时有效克服其波动性、间歇性、随机性对电力系统安全稳定运行的负面影响，实现一次能源结构升级，构建清洁低碳、安全高效的电力能源系统，是相关领域研究的主要目标与技术方向。

当前前沿技术包括：可再生能源发电基地直流外送系统的稳定控制技术；分布式发电与微电网、主动配电网等电力系统新形态的融合技术；高比例分布式发电直流并网消纳技术；多种可再生能源发电系统联合优化调度与智能控制；面向安全稳定并网的可再生能源发电系统内电力电子设备集群协调运行控制技术。

### （7）先进反应堆技术及设备研发

针对先进反应堆技术及设备研发发展，国际“第四代核能国际论坛”于2002年提出了第四代核电的6种研究开发的堆型（包括各自的燃料循环）和研究开发“路线图”；国际“全球核能合作伙伴”致力于推动安全、可持续发展、经济和防止核扩散的先进核能技术联合研发；国际原子能机构发起国

际项目致力于发展可持续的革新核能系统。第四代核电站开发的目标：具有固有安全性，充分利用核资源，提高热效率，开发核能制氢、冶金、化工等多种用途，处置核废料，防止核扩散、反恐。目前国际上遴选出了6种最具前景的反应堆系统，分别是钠冷快堆（SFR）、超高温反应堆（VHTR）、气冷快堆（GFR）、铅冷或铅-铋共熔物冷却的快堆（LFR）、熔盐堆（MSR）和超临界水堆（SCWR）。第四代堆选择快谱反应堆是因为其具备核燃料增殖的能力，钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆和熔盐堆都具备这方面的能力，明显提高铀资源的利用率；并能够嬗变以实现废物最小化。而超高温气冷堆的作用是能够实现高温制氢、提高核电厂的发电效率，同时其高温热可以在工业领域进一步拓展核能的应用。美国针对本国核能特点推出行波堆，中美开展合作共同开发。行波堆是快中子堆的一种特殊设计，利用高性能燃料和材料技术，通过长寿命和深燃耗使占天然铀中绝大部分的<sup>238</sup>U在堆内实现原位增殖和焚烧，降低对乏燃料后处理需求。

### （8）矿产和地热宽谱段遥感勘查

矿产和地热宽谱段遥感勘查主要与国家需求相关。随着资源勘查程度的增加，寻找新矿难度也在逐步增加，迫切需要新的技术手段。从过去几十年来的发展来看，遥感逐步发展成为资源勘查评价方法的常用的技术手段，世界各国争先发射各种勘查卫星，包括可见光-短波红外、热红外、微波等宽谱段。目前来说，虽然干旱区-半干旱区和浅覆盖区的遥感资源勘查方法相对成熟且已经具有很大成效，但是，其一，世界范围内陆地绝大部分被植被所覆盖，给目前勘查技术手段带来很大困难，而遥感作为一种新技术需要突破植被覆盖区找矿，可以利用植被抑制和光谱层析剥离技术来实现；其二，备受国际社会追捧的清洁资源——地热可供使用的大部分被第四系所覆盖，热红外识别温度场和微波识别构造一定程度上揭示了隐伏区下的深部信息，所采用的技术需要增

强和提取有用信息并且抑制和减弱干扰信息，从而有效地指导勘查，提供资源预测的准确性和有效性。总之，矿产和地热宽谱段遥感勘查，其技术本质就是通过较宽电磁波谱段范围内的各类不同作用的遥感数据，有效地增强和提取与矿产和地热资源勘查有关的信息，抑制和减弱干扰信息，最终目的是指导勘查，满足资源勘查开发中有效靶区选取的生产需求，实现资源找矿突破。

### (9) 石油工程新工具新材料

随着油气藏勘探开发的复杂程度日益加深，为应对井下高温高压等复杂工况，迫切需要研制石油工程新工具新材料，以实现井眼顺利钻进与油气高效开采，推动复杂油气藏勘探开发进程。其中石油工程新工具主要涉及钻井、完井、生产等方面，新材料则用于提高石油工具、钻井液、压裂液、支撑剂等的性能。

目前，世界油气勘探开发领域由浅层向深层，由浅海向深水，由常规向非常规进一步拓展，日趋复杂的地质环境为石油工程提出更高、更新的要求，在国家创新驱动发展战略与中国制造 2025 战略的引领下，为了提升油气勘探开发规模和效益，开展石油工程中工具材料创新研究是必然趋势。当前，石油工程新工具的研究前沿包括：智能导向工具，旋转导向工具、智能同井注采工具、智能分层注水工具等。而前沿材料有：纳米颗粒材料、功能梯度材料、碳纤维复合材料等，可以用于显著改善工具性能。此外纳米减阻剂、纳米智能驱油剂、自愈性聚合物材料等在提高钻井液、压裂液与支撑剂等性能方面起到了重要的推动作用。

### (10) 绿色采矿技术（煤、油、气、矿）

绿色开采就是使开采对矿区环境的扰动量小于区域环境容量，实现资源开发利用最优化和生态环境影响最小化，在开采过程中既要严格实施科学有序的开采，又要对矿区及周边环境的扰动控制在环境可控制的范围内。煤、油、气、矿绿色开采技术，是从开采的角度认识和对待煤、油、气、矿、瓦斯、

水、土地、矸石等一切可以利用的能源资源，防止或尽可能减轻开采能源资源对环境和其他资源的不良影响，在取得经济效益的同时实现最佳的环境效益和社会效益。

煤炭资源绿色开采是针对煤炭大量开采造成的环境问题提出的，仍然是资源环境领域科学的重点，应从采煤方法的源头进行技术开发与创新，加强伴生资源共同开采和利用技术研究，加强技术和装备的研究。研究内容包括保水开采技术、土地与建筑物保护与生态重建技术、煤与瓦斯协调开采技术、减沉开采、矸石减排、瓦斯浓缩利用技术、固体废弃物利用技术、矿产资源清洁开发与加工技术、矿区废弃地生态修复技术、矿产开发效益效果评价、矿区资源环境安全与监测预警等。金属非金属矿山绿色开采的重点是采选一体化技术、无废开采技术，突破机械连续切割掘进、采矿技术，创新高压水射流、激光和等离子破岩掘进与采矿技术。

绿色油田开采是一个系统整体的概念，它以追求环境效益、社会效益、经济效益为目标，可持续发展为模式。通过现代技术科技的生态化研究开发生态产品，形成清洁采油甚至无废物污染生产技术系统，并使其转化为可在市场上销售的环保产品，改变以往采油企业高能耗、高污染的高消耗发展模式，建立起生态经济一体化的可持续发展模式。其技术创新主要包括提高注水水质处理技术、注入水精细过滤技术，创新生产流程中的关键设备，提高资源的利用率；创新生产流程控制系统，提高生产效率。

### (11) 非常规油气藏储层测井识别

非常规油气藏是指用传统技术无法获得自然产能、需用新技术改善储层渗透率或流体黏度等才能经济开采的油气藏，常规测井方法在非常规油气藏中适用性很差，需要进行测井解释模型的重新探索，利用新型测井技术，形成非常规油气藏储层测井识别技术。目前主要技术包括：ECS 测井（元素能谱测井仪）、成像测井、核磁共振测井等特殊测井技术，以及测井曲线重叠图像快速识别、自然伽马和三孔

隙度测井识别，电磁电阻率和电阻率—流体性质法，页岩油气有效裂缝层段检测技术等，这些技术具有高识别精度和速度，通过确定有效储层和非储层连续识别深度范围，提高非常规油气藏有效储集层预测准确性，满足非常规油气藏有效储层勘探开发中压裂有效层段的生产需求。未来非常规储层测井识别仍是难点和前沿，将会在采集技术、岩石物理研究、处理与解释方法研究以及储层评价等系列技术方面提升优化，预计未来数字岩石物理技术将在测井评价与分析方面发挥更重要的作用，此外测井解释评价软件向多学科一体化方向发展，更重视油气藏综合评价，测井基础理论方法研究力度加大，分析技术与手段更为丰富。

### (12) 三维地质建模技术

三维地质建模技术是运用计算机技术，在虚拟三维环境下，将空间信息管理、地质解译、空间分析与预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来，并用于地质分析的技术。数据源包括钻孔数据、剖面数据、三维地震资料和其他地质数据等。建模方法包括相控地质建模、沉积微相约束的岩相建模和孔、渗、饱等参数建模。克里金方法、随机建模方法、序贯高斯模拟方法、双模迭代技术、沉积相耦合岩石物理类型建模、井震协同建模技术、三维储层参数建模、四维地震技术等成为研究前沿。未来三维地震建模软件将更加成熟，应用更为广泛；由早期的注重形态建模向形态与物性并重的方向发展；与地震、测井、电法、重、磁等物探数据和钻井、地质认识等资料结合更加紧密；与各种专业模型（矿藏描述、成藏模拟、重磁场三维反演、沉积环境分析等）与应用结合更加紧密，大数据分析、云计算、物联网等IT主流技术将成为主要手段。

### (13) 先进核燃料技术研发

在2011年日本福岛核事故发生之后，各国开始加速以耐事故燃料（简称ATF）为代表的先进核

燃料的研发工作。相比传统燃料，ATF燃料通过增强燃料包容裂变产物和包壳材料抗氧化的能力来提高反应堆和乏燃料水池在事故情况下的安全性，提供更长的事故应对时间，并因此潜在的通过主动或被动方式缓解事故后果，实现更深的燃耗，并提高燃料的经济性。ATF可以在新建和在役核电站应用，因此ATF燃料的研发对于核电的安全发展具有重大意义。研发方向均着眼于包括革新的包壳和新型燃料，可分为三个方向：提高锆合金包壳的高温抗氧化能力及强度；具有高强度和抗氧化能力的非锆合金；比UO<sub>2</sub>具有更好性能和裂变产物滞留能力的新型燃料。扩展的ATF还应包括几何形状的变化，如环形燃料。研究包括材料、工艺和检测、验证技术。

### (14) 矿业安全智能精准开采技术与装备

矿业安全智能精准开采技术与装备是指基于透明空间地球物理和多物理场耦合，以智能感知、智能控制、物联网、大数据、云计算等作支撑，具有风险判识、监控预警等处置功能，能够实现时空上准确安全可靠的智能少人（无人）安全精准开采的新模式新方法新装备。目前主要研究方向：创新具有透视功能的地球物理科学，智能新型感知与多网融合传输方法与技术装备，动态复杂多场多参量信息挖掘分析与融合处理技术，基于大数据云技术的精准开采理论模型，多场耦合复合灾害预警，远程可控的少人（无人）精准开采技术与装备，救灾通信、人员定位及灾情侦测技术与装备和基于云技术的智能矿山建设，这些研究方向为实现“互联网+”科学开采的未来少人（无人）采矿提出了技术路径。聚焦矿业智能少人（无人）安全开采，进一步加大矿业科技创新力度，力争2020年矿业安全智能精准开采取得阶段性突破，2035年基本实现矿业安全智能精准开采，到2050年全面实现矿业精准开采，以矿业开采全面实现高科技产业改造升级，助推中国能源科技强国梦。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备

#### （1）煤矿综采自动化、智能化、无人化成套技术与装备

煤矿综合机械化长壁开采是煤炭的主要开采方式，综采成套装备的技术进步是促进煤炭安全、高效、绿色开采技术发展的引擎。现代自动化、信息化、智能化技术及先进制造技术与煤炭开采技术的深度融合，使煤矿综采成套装备实现自动化、智能化、无人化成为可能。煤矿井下工作条件恶劣，安全隐患和危害职业健康的因素多，加强煤矿智能化开采装备技术的研究和应用，淘汰落后的开采方法和装备，引导煤矿向安全、高效、绿色开采方向发展，提升装备的自动化和智能化水平，逐步实现少人化、无人化开采是煤炭综采技术发展趋势和矿井现代化生产的必然要求。

为更好地反映和表述综采工作面的自动化技术内涵和水平，依据综采工作面成套装备控制系统在感知、决策和执行三要素方面的水平，定义为自动化综采工作面、智能化综采工作面、无人化综采工作面。自动化综采工作面，是指综采工作面采用了具有自动化控制功能的液压支架、采煤机、刮板输送机等机电一体化成套装备，实现了工作面少人操作、安全高效开采。智能化综采工作面，是指综采工作面采用了具有充分全面的感知、自学习和决策、自动执行功能的液压支架、采煤机、刮板输送机等机电一体化成套装备，实现了工作面的高度自动化少人远程监控、安全高效开采。无人化综采工作面，是指综采工作面采用了具有完全自动化、智能化控制功能、高可靠性的液压支架、采煤机、刮板输送机等机电一体化成套装备和远程智能化综合控制系统，实现了工作面（两端头以内）完全无人操作的安全高效开采。

综采自动化和智能化是实现工作面无人化开采的基础，无人化开采是煤矿开采技术发展的终极目标。主要技术主流及拟解决的关键技术包括：

1) 基于液压支架与围岩耦合原理，研发液压支架围岩耦合自适应控制技术；基于排队理论，研究综采工作面群组支护系统协同控制技术；研发智能型液压支架姿态工况监测预警与耦合控制装置，研发高可靠性液压支架智能感知和控制元件；研发基于智能决策、时序控制、记忆放煤和人工干预协同控制的自动化放顶煤控制系统。

2) 研究煤岩性状对截割负载及调控的敏感性，建立煤岩截割负载突变的在线检测及截割状态判别准则，提出截割转速与进给速度相结合的自适应截割自主控制方法，研发采煤机自主精确定位和自学习、智能调高、记忆截割的智能化控制技术，研究综采工作面采煤机截割—液压支架支护—运载集成系统的多源信息融合方法，解决多机协同作业的冲突消解与避让算法和技术，研发可靠、实时、安全的工作面多机协同控制系统。

3) 研究综采装备关键元部件失效模式与故障机理，构建装备关键部件及系统可靠性评价体系，完善可靠性设计，攻克关键元部件材料和制造工艺，切实解决综采装备的可靠性问题，特别是提高采煤机的可靠性，提高工作面综合开机率，为工作面自动化、智能化和无人化提供可靠保障。

4) 加强工作面端头与超前支护系统自动化的研究，解决工作面端头与超前支护的制约。同时，要进一步研究突破工作面两端过渡段斜切进刀工艺自动化和智能化难题。

开发和推广应用综采自动化和智能化技术，减人提效是实现煤炭安全高效开采的根本途径，提高综采工作面成套装备的可靠性和适应性，并与自动化和智能化控制技术融合，目前已经在部分先进矿井实现了工作面少人化或有限条件下的无人化生产。通过不断的技术攻关，发展综采自

动化和智能化技术，最终实现煤矿工作面无人化开采是煤炭开采技术的发展方向。

### （2）煤巷智能快速掘进技术与装备

采掘协调一直是煤炭生产过程中关注的重要问题。随着井下综采工作面装备的自动化、智能化水平提升，掘进效率低下导致的采掘失衡已经成为现代化大型矿井面临的难题。经过近十几年的发展，我国煤巷掘进技术水平有了大幅度提高。特别是近年来，中国煤炭科工集团太原研究院联合神东公司合作开发了高效快速掘进系统，该系统于2014年7月至2015年11月应用于神东大柳塔煤矿5-2煤层综采工作面，实现了全断面快速掘进、掘支运平行作业、远距离监控操作、辅助作业机械化（部分），是目前机械化、自动化、信息化程度最高的快速掘进系统。但是，高效快速掘进系统仍然存在不足：

系统仅适应于神东等地质条件较好的矿区，系统的适应性不高；系统配套设备的机械化、自动化、智能化程度总体不高，存在进一步提升的空间；

单机设备的可靠性有待提高；系统没有实现掘辅平行作业。为此，需要进一步研究煤巷快速掘进的有关问题，探索智能快速掘进技术，以便进一步提高掘进作业的各项技术指标，满足安全高效采煤的需要。

目前，国内外主要有三种类型的煤巷机械化快速掘进技术：综合机械化掘进技术、连续采煤机掘进技术、掘锚一体化掘进技术。这三种传统煤巷快速掘进技术存在的主要问题是：掘、支、运不平衡；掘锚后配套系统能力差；系统未实现协同控制；智能化程度不高。以上问题制约了巷道掘进速度，形成采掘失调的矛盾。

智能快速掘进技术是指采用具有感知能力、记忆能力、学习能力和决策能力的掘锚机、锚杆机、破碎转载机、带式输送机等煤巷掘进装备，以自动化控制系统为枢纽，以远程可视监控为手段，实现掘进工作面巷道掘进系统“全断面快速掘进、掘支

运平行作业”的安全协调高效掘进技术。智能快速掘进技术创造了掘进、支护、运输“三位一体”的快速掘进新类型，实现了设备的集中协同控制，为下一步掘进工作面无人化奠定了基础。

国外掘锚机和全断面掘进机拥有自动截割技术、输送设备监测和自动控制技术，实现了全功能遥控、截割断面监视；德国、美国、奥地利等国已经掌握可弯曲带式输送机的线摩擦多点驱动技术、输送带的转弯技术等。但目前自动化的单机设备大部分应用在金属矿、盐矿等非煤矿山领域，国外煤矿掘进工作面的技术装备仍处于半自动化水平，目前尚无智能快速掘进成套技术与装备。我国智能化快速掘进技术与国际同行处在同一起跑线，而且，我国是世界上最大的煤炭生产国，如果能够在智能化快速掘进技术的领域有所突破，必将占领该领域的技术制高点，为我国掘进技术与装备在国际煤机市场赢得一席之地。

煤巷智能快速掘进的主流技术及关键技术如下。

1) 智能截割技术。掘锚机是快速掘进系统的“龙头”装备，掘锚机的智能化研究主要体现在智能截割技术上，包括：掘锚机的自动定位和导向技术、煤岩特性智能识别技术、煤岩自适应截割技术、掘锚机智能感知技术。

2) 智能锚护技术。巷道支护是制约快速掘进的主要因素。随着掘进能力的提升，掘快支慢的矛盾越来越突出。因此，必须研制全自动钻架和全自动锚杆钻车，实现整个锚杆作业工序（钻孔、装药卷、上锚杆、紧固锚杆、锚杆供给）的全部自动化，实现辅助工序（铺网）的自动化，提高锚杆支护的速度和效率，并逐步减少人的参与，最终实现锚杆支护无人化，为整个掘进系统的智能化水平打下基础。智能锚护技术需要研究的关键问题有围岩状态实时监测及锚护参数的动态设计、锚护位置自动定位技术、智能锚钻集中控制系统、药卷自动喷射技术、智能健康诊断技术、自动铺网技术等。

3) 输送带多点驱动功率平衡技术和张紧力自动控制技术。带式输送机是快速掘进系统中的核心装备，目前的带式输送机存在的主要问题有：输送带弯曲运行时张力大、易跑偏；输送带弯曲率与机架最小弯曲半径不匹配；输送带磨损严重、使用寿命低等。为解决上述问题，保证输送机在输送带运行过程中顺利拐弯，需要采用多点驱动技术，减小胶带张力。进一步研究带式输送机驱动点的选择、驱动功率的平衡、驱动策略的制定等。同时需要对输送带的张紧力实现自动控制，确定最小张紧力，减小输送带张力对输送机弯曲运行的影响。

4) 辅助工序自动化技术。快速掘进技术的研究，除需解决掘进与支护的矛盾外，还需解决掘进和辅助工序的矛盾。供水、供电、通风、除尘、辅助运输、带式输送机延伸等辅助工序也是影响巷道掘进效率和速度的制约因素。有必要考虑将部分辅助作业逐步实现机械化、自动化，从而逐步实现掘进与辅助工序的平行作业。

5) 物联网集成技术。结合物联网技术，实现工作面的无线传输，组成设备各状态传感器网络，实现相关设备的位姿识别、状态监控、故障预警等功能，从而大幅减少工作面人员数量、降低劳动强度，提高掘进效率，打造协调、连续、高效作业的掘进工作面，实现“机械化换人、自动化减人”目标。

6) 系统的适应性研究。结合我国不同矿区特殊的煤层地质条件，特别是在较为复杂的煤层赋存和地质条件下，研究新的作业工艺、新的设备配套形式，实现掘进一次成巷、掘支运平行连续作业，提高系统的适应性。神东快速掘进系统，能适应中厚煤层巷道的掘进工艺，要求顶板、底板比较稳定，具备一定的空顶距，需要进一步研究适应神东矿区、阳泉矿区、黄陵矿区地质条件的快速掘进系统，特别是掘锚联合机组。

智能快速掘进技术的发展趋势是由掘支运“三位一体”向掘支运辅“四位一体”方向发展。此外，下一步需要研究构建掘进机大数据库和云计算中心，这一平台将有效解决掘进机的智能控制和远程服务问题，“无人值守、智能掘进”将变成现实。

### (3) 非常规油气开发利用系统与核心技术装备

非常规油气是指在油气藏特征与成藏机理方面有别于常规油气藏，由于特殊的储层岩石性质（基质渗透率低，存在天然裂缝）、特殊的充注（自生自储岩石中的吸附气，甲烷水合物）以及/或者特殊的流体性质（高黏度），而只有采用先进技术、大型增产处理措施和/或特殊的回收加工才能获得经济开发的油气聚集。其关键参数是储层孔隙度一般小于10%，渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；关键标志是“油气大面积连续分布，圈闭界限不明显”和“无自然工业稳定产量，达西渗流不明显”。随着常规油气勘探开发难度的不断加大，非常规油气资源已日益引起全世界的高度重视。可以说，非常规油气是世界油气工业发展的必然趋势、必由之路和必然选择。因此，加快对非常规油气的开发利用对弥补能源缺口、确保国家能源安全具有十分重要的战略意义。

非常规油气开采的分支工程技术主要包括：钻井技术（水平井钻井技术为前沿主流），压裂技术，平台式“工厂化”开采技术。

1) 水平井钻井技术。与直井相比，水平井具有泄油气面积大、单井产量高、穿透度大、储量动用程度高、节约土地占用、避开障碍物和环境恶劣地带等优点，在提高单井油气产量和提高油气采收率方面具有重要作用，目前已成为非常规油气资源高效勘探开发的关键技术。随着水平井综合能力和工艺技术的发展，催生了多种水平井新技术，如大位移水平井、侧钻水平井、多分支水平井、羽状水平井、丛式水平井（PAD）、欠平衡水平井、连续

油管钻井等。

2) 压裂技术。近年来，压裂规模从小型化向大型化发展，压裂层数从单层向多层发展，压裂井型从直井向水平井发展，形成了直井分层压裂、水平井分段压裂、重复压裂、同步压裂等多种压裂技术及配套工艺，成为非常规油气资源经济有效开发的核心技术，对非常规油气快速发展发挥了关键作用。目前压裂技术正向以下3方面发展：现有压裂技术不断发展与融合，如连续油管压裂、小井眼压裂、井下混配压裂等技术不断发展与完善；压裂装备向大功率化、模块化、小型化、便携化等方向发展；高效、低成本、环境友好的压裂技术将是未来重要的发展方向，如正在试验的体积压裂改造、高速通道压裂等技术。

3) 平台式“工厂化”开采技术。主要是基于井间接替策略，采用丛式水平井钻井、同步压裂或者交叉压裂的作业方式，在一个井场进行数十口井同步作业，节约土地、降低成本，突破了一个井场单井开采效益差的难题，为实现页岩气等非常规油气资源经济开发提供了高效运行模式。

目前，非常规油气开发技术较复杂、成本较高，未来应该最大化地去研究在保证非常规油气顺利勘探开采的基础上，如何降低成本，以达到预期的开采目标。主要研究趋势：坚持长期的基础理

论创新，为非常规油气的勘探开发提供坚实的理论基础和技术指导。坚持核心技术进步与规模化应用，是非常规油气突破的关键；可将水平井规模压裂，平台式“工厂化”开采等技术的开发作为重点来抓；强化工艺技术攻关，尽快形成低成本的配套工艺技术。加强对非常规油气资源开发的调控工作，制定科学的发展规划，有序开发利用，建立和规划所需人才队伍培养体系，形成由研究者和技术专家等构成的人才组织，从而保证非常规油气资源的合理发展。

### (4) 国家/地区和机构以及之间的对比及合作情况

根据表2.2.1可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的国家是中国、美国、日本、俄罗斯和德国。其中，中国核心专利比例超过80%，其他国家核心专利比例均低于5%。由表2.2.2可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的机构分别是UYMT、UYMB、SHGR、UYHP以及SNPC。其中，仅UYMT、UYMB和SHGR的核心专利产出比例均超过2%。

根据图2.2.1可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有美国、中国、澳大利亚、加拿大和德国。其中中国、美国这两个国家具有合作关系，合作发表的核心专利数量也较多。而日本

表2.2.1 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	6330	83.62%	10 363	53.23%	1.64
2	USA	364	4.81%	5646	29.00%	15.51
3	Japan	227	3.00%	679	3.49%	2.99
4	Russia	132	1.74%	111	0.57%	0.84
5	Germany	82	1.08%	612	3.14%	7.46
6	South Korea	78	1.03%	45	0.23%	0.58
7	Australia	64	0.85%	287	1.47%	4.48
8	France	50	0.66%	359	1.84%	7.18
9	India	48	0.63%	139	0.71%	2.90
10	Canada	41	0.54%	786	4.04%	19.17

和俄罗斯核心专利数量尽管较多，但与其合作的国家或地区数量均不超过两个，与中国也没有合作关系。

根据图 2.2.2 可知，与其他机构具有合作关系的机构有 UYMT, UYMB, SHGR, SNPC 和 Univ Xi'an Sci & Technology，其中UYMT, UYMB, SHGR 这三个机构之间彼此具有合作关系，合作发表的核心专利数量也最多。中国西安的 Univ Xi'an

Sci & Technology 分别与 UYMB, SHGR 有合作关系，但合作发表的核心专利数较少。

## 2.2.2 电力系统高压大功率电力电子器件及装备

### (1) 概念阐述和关键技术

大功率电力电子技术使用大功率半导体器件，通过信息流对能量流的精确控制，实现电能的有效变换与传输，提升大功率电力电子装备的转换效率

表 2.2.2 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	UYMT	China	247	3.26%	1221	6.27%	4.94
2	UYMB	China	189	2.50%	356	1.83%	1.88
3	SHGR	China	153	2.02%	440	2.26%	2.88
4	UYHP	China	141	1.86%	332	1.71%	2.35
5	SNPC	China	91	1.20%	374	1.92%	4.11
6	UYTL	China	85	1.12%	150	0.77%	1.76
7	Univ Xi'an Sci & Technology	China	79	1.04%	128	0.66%	1.62
8	KOBM	Japan	74	0.98%	225	1.16%	3.04
9	BJSW	China	73	0.96%	67	0.34%	0.92
10	SDST	China	69	0.91%	108	0.55%	1.57

注：UYMT 表示 Univ China Mining & Technology；UYMB 表示 Univ China Mining & Technology Beijing；SHGR 表示 Shenhua Group Corp Ltd；UYHP 表示 Univ Henan Polytechnic；SNPC 表示 China Petroleum & Chem Corp；UYTL 表示 Univ Taiyuan Technology；KOBM 表示 Kobe Steel Ltd；BJSW 表示 Beijing Shenwu Environment & Energy Tech；SDST 表示 Univ Shandong Sci & Technology。

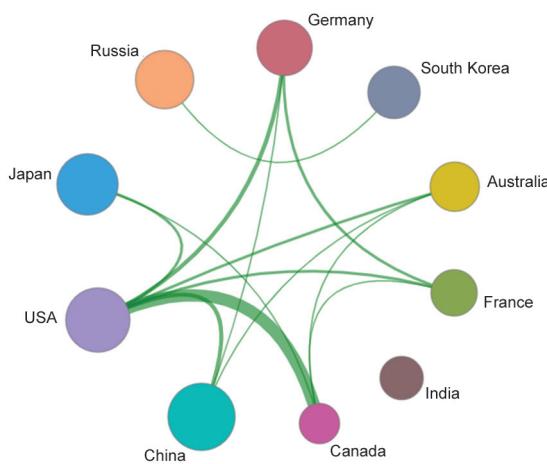


图 2.2.1 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

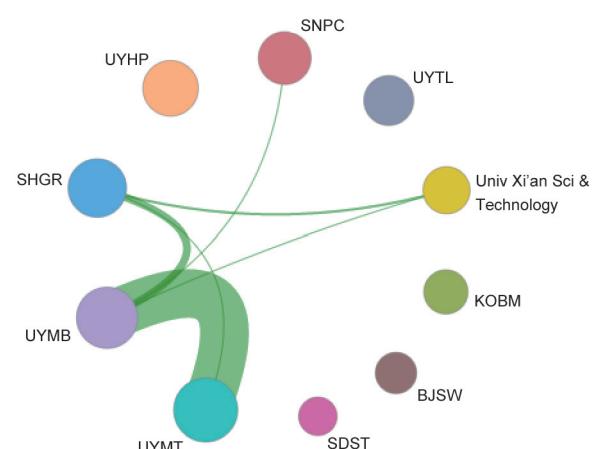


图 2.2.2 “化石能源（煤炭、非常规油气）开发利用系统与核心技术装备”工程开发前沿的主要机构间合作网络

和精度。当前，我国正处于能源需求增长和能源结构调整变革的关键时期，特高压交直流输电技术和智能电网的发展受到了全社会的广泛关注，电力系统高压大功率电力电子器件及装备领域面临巨大的发展机遇和挑战，在向大功率、高频化和智能化方向发展的进程中，一些重大关键科学技术问题急待解决。

### (2) 发展现状与未来发展趋势

1) 高压大容量电力电子器件。为实现我国长距离大容量的西电东送、南北互供以及全国联网，发展更经济的远距离大容量特高压交直流输电，相比其他国家，我国急需更高容量的高压 IGBT 和 IGCT 来实现高压交直流输电容量的大幅提升。我国已实现了 6 英寸 8000V/4000A 晶闸管、4500V/4000AIGCT、3300V/2400AIGBT 的量产，2018 年株洲中车研发了世界上容量最大的 4500V/3000A 压接式 IGBT 样品，瑞士 ABB 和日本三菱分别研发了 8500V/4240A 晶闸管、4500V/2100A IGBT 产品。高压大容量电力电子器件研发拟解决的关键科学技术问题主要包括高压 GTO 晶闸管的快速开关和可靠性问题、IGBT 模块内芯片的并联均流、模块封装的热阻和成本降低、

驱动保护技术等。

2) 新型高压高频电力电子器件。为了适应智能电网发展和新能源技术发展的需要，急需能高频开关和耐高压的电力电子器件来实现高能效和高功率密度，重点发展碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 电力电子器件。欧洲、美国、日本等国家和地区的企先先后实现了 900V-1700V SiC 器件和 30V-650V GaN 器件的产业化，研制报道了 10kV SiC MOSFET、27kV SiC IGBT 和 22kV SiC GTO 样品，我国目前已研制报道了 10kV SiC MOSFET 和 10kV SiC IGBT 样品。研发拟解决的关键科学技术问题主要包括高质量 SiC 厚外延技术、栅氧可靠性问题、器件高压终端保护技术等。

3) 大容量和智能化电力系统电力电子装备。高压交直流输电容量的大幅提升需要依靠高性能大容量电力电子装备来实现，包括基于电力电子器件的柔性交流输电系统 (FACTS)，静止同步补偿器 (STATCOM)，静止无功补偿装置 (SVC)，电力电子变压器 (PET)，能量路由器。研发拟解决的关键科学技术问题主要包括高可靠大容量电力电子装置技术、能量双向流动电力电子装置、高能效装置技术等。

表 2.2.3 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	19 056	63.22%	21 726	23.16%	1.14
2	Japan	4897	16.25%	30 528	32.55%	6.23
3	USA	1643	5.45%	22 001	23.46%	13.39
4	South Korea	1200	3.98%	2995	3.19%	2.50
5	Germany	1139	3.78%	5953	6.35%	5.23
6	Switzerland	469	1.56%	3607	3.85%	7.69
7	Russia	403	1.34%	125	0.13%	0.31
8	Austria	256	0.85%	2126	2.27%	8.30
9	Taiwan of China	221	0.73%	822	0.88%	3.72
10	France	196	0.65%	1087	1.16%	5.55

### (3) 重点研究国家 / 地区和机构以及之间的对比与合作情况分析

我国电力系统高压大功率电力电子器件及装备工程开发前沿的核心专利产出有着总量领先但单个机构的数量和质量有待提高的特点。如表 2.2.3 和表 2.2.4 所示，我国从事高压大功率电力电子器件及装备的企业数量较多，当前电力系统高压大功率电力电子器件及装备工程前沿开发的相关企业数量和相关核心专利数量最多的国家为中国，

但我国专利的平均被引量和被引占比却远低于美国、日本、欧洲等传统发达国家和地区，单个中国企业在工程开发前沿中核心专利的产出普遍落后于欧洲、美国、日本的领军企业。“电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿的主要国家或地区间合作日趋紧密，如图 2.2.3 所示，其中，一些企业之间也开展了分工协作，包括半导体代工厂和半导体企业间的合作，如图 2.2.4 所示。

表 2.2.4 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	SGCC	China	2186	7.25%	3583	3.82%	1.64
2	FJIE	Japan	771	2.56%	5982	6.38%	7.76
3	INFN	Austria	673	2.23%	4827	5.15%	7.17
4	MITQ	Japan	590	1.96%	3980	4.24%	6.75
5	CRRC	China	497	1.65%	802	0.86%	1.61
6	ALLM	Switzerland	438	1.45%	3161	3.37%	7.22
7	TOKE	Japan	437	1.45%	2232	2.38%	5.11
8	NPDE	Japan	419	1.39%	3037	3.24%	7.25
9	TOYT	Japan	419	1.39%	2187	2.33%	5.22
10	CSPG	China	274	0.91%	311	0.33%	1.14

注：SGCC 表示 State Grid Corp China；FJIE 表示 Fuji Electric Co Ltd；INFN 表示 Infineon Technologies AG；MITQ 表示 Mitsubishi Electric Corp；CRRC 表示 Zhuzhou Crrc Times Electric Co Ltd；ALLM 表示 ABB Technology Co Ltd；TOKE 表示 Toshiba Corp；NPDE 表示 Nippondenso Co Ltd；TOYT 表示 TOYOTA Jidosha KK；CSPG 表示 China Southern Power Grid Co Ltd.。

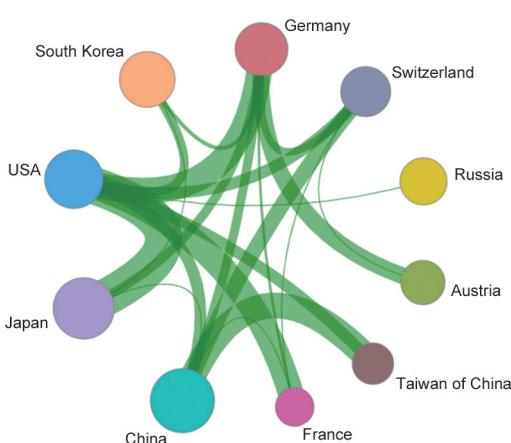


图 2.2.3 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

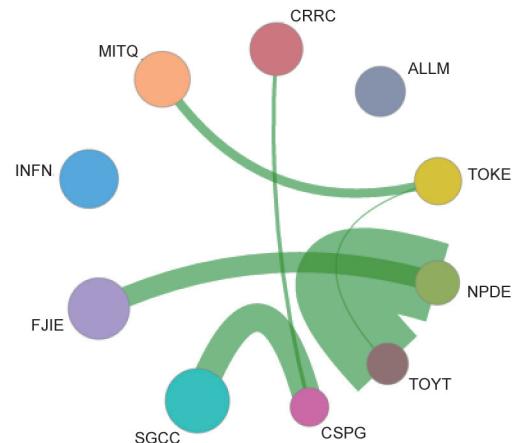


图 2.2.4 “电力系统高压大功率电力电子器件及装备”工程开发前沿的主要机构间合作网络

### 2.2.3 乏燃料后处理及核设施仪器仪表

#### (1) 概念阐述和关键技术

1) 乏燃料后处理是指对从反应堆卸出后的核燃料（称为“乏燃料”）的处理和处置过程。包括乏燃料的中间储存、乏燃料的后处理和放射性废物的处理、最终处置等过程。乏燃料后处理是核燃料循环后段的核心，是对核电站卸出的乏燃料元件进行处理，分离和回收未烧尽的铀和新生成的钚，同时对放射性废物进行处理，满足处置要求。后处理技术按照乏燃料在主工艺中被处理时的存在状态而分为湿法（亦称“水法”）和干法两种。水法萃取流程是目前唯一经济实用的后处理流程，常用的普雷克斯流程（Purex）就是将反应堆乏燃料元件经过适当的预处理转化为硝酸水溶液，然后采用有机溶剂（常用磷酸三丁酯的煤油溶液）进行萃取分离，以达到回收核燃料和除去裂变产物的目的。而干法后处理对于处理高燃耗乏燃料，特别是快堆乏燃料具有一定的优势，是当前一个重要的研究方向。

2) 为保障核电运行全寿命期的安全高效运营，加强核电关键系统和设备的自动运行监控，提高系统、设备的可靠性；同时提高核电站运行的可利用率，提高经济性；实现对人不可达区域进行机器人维修，减少工作人员的受照剂量；最终为严重事故处理及退役创造技术条件，核设施仪器仪表的研发包括数字化技术、人工智能及核测仪表、其他涉及核安全的关键仪表技术。

#### (2) 发展现状与未来发展趋势

1) 动力堆乏燃料后处理厂所处理的介质具有高放射性、高毒性和高腐蚀性，还存在核临界安全和辐射安全等突出问题，对工程技术、专用设备、在线控制与监测、远距离操作、维修等方面要求高，核燃料后处理技术研究难度大，需要开发一系列特殊的工程技术、专用设备和仪表等。国际上对后处

理工艺流程的开发一般包括实验室工艺条件及串级实验，实验室规模台架温热试验，中试规模的热验证等过程；关键设备的开发需经历原理样机研制，设备放大研究和科研样机的研制，以及工程样机研制等阶段，对典型的单元工艺流程、设备和布置、检修方案还需要在非放（或冷轴）条件下进行 1:1 规模的工程验证。在此基础上，才能开展核燃料后处理厂的工程设计工作，以提高后处理厂的可靠性、可操作性和可维修性，从而确保开工率、经济性和安全性。

核能可持续发展必须解决铀资源利用最优化和放射性废物最小化两大问题。通过后处理提取的铀、钚，返回热堆复用仅能使铀资源的利用率提高 30%；返回快堆复用，则可使铀资源的利用率提高 60 倍。同时，通过后处理分离出的长寿命、高放射毒性的次锕系元素和裂变产物，在快堆中以焚烧和嬗变等方式消耗，不仅能够有效降低乏燃料对环境的影响，监管时间也能大幅缩短，减少经济和社会成本。因此，核燃料闭式循环，尤其是包含快堆的核燃料闭式循环，是核能可持续发展的必由之路。

2) 核设施仪器仪表包括数字化技术、人工智能及核测仪表、其他涉及核安全的关键仪表技术。其中核测量仪表是利用射线的某些特征进行射线种类及相关物理测量的设备。核设施仪器仪表主要包括反应堆控制、安全保护和环境监测三部分，按照仪表种类来说包括核测仪表以及涉及核安全的关键仪表。我国已经建立起产品品种比较齐全，可以满足一般需求的核测仪表设备制造体系，但是随着先进核电技术的发展，核电站的安全性和可靠性不断提高，随之而来的对核测仪表及其他涉及核安全关键仪表的测量精度、运行环境和产品可靠性要求也不断提高，产品的更新换代势在必行。由于在关键材料、设计和加工制造水平及条件，测试检验能力

有差距，国内生产企业的现有产品已经无法满足三代核电的技术要求。

美、法、英、俄、印、日等国家是拥有核燃料循环所有环节的国家，除美国以外，都坚持发展后处理和核燃料闭式循环。目前，全世界总的后处理能力约为每年 4850 吨，超过 9 万吨的乏燃料已经被后处理。法国的 UP3、UP2-800 和英国的 THORP 后处理厂代表了当前世界在运行的商业后处理厂的先进水平。国际上积极研发开展快堆乏燃料干法后处理的研究，最终实现一体化快堆（燃料制造—反应堆—后处理在同一厂址）闭式燃料循环（U、Pu、MA 回收利用）。

为保障智能化和智慧化，提升核工业高科技战略产业水平，需深入并广泛应用以工业机器人、图像识别、深度自学习系统、自适应控制、自主操纵、人机混合智能、虚拟现实智能建模等为代表的新型人工智能技术，包括从智能仪表智能控制器采用到核电站全数字仪控系统建立；利用“互联网+”建立大数据系统开发数字核电站（三维动态）开发虚拟现实（VR）技术；到操作指导和事故处理指导，核电站设备系统的智能维护，利

用机器人或机器人系统维修高放射性区域不可达地区的利用。

### （3）重点研究国家和机构以及之间的对比及合作情况分析

根据表 2.2.5 可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的国家是日本、美国、中国、荷兰、德国、韩国、法国和俄罗斯。其中，日本核心专利比例超过 30%，美国和中国的核心论文比例均超过 20%，除荷兰外的其他国家核心专利比例均低于 6%。

由表 2.2.6 可知，该研究方向的核心专利产出数量最多的机构分别是 GENE、PHIG、CGNP、MITQ，核心专利产出比例均超过 5%。

根据图 2.2.5 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有美国、荷兰、德国、法国、加拿大和俄罗斯。

根据图 2.2.6 可知，与其他机构具有合作关系的机构有 CGNP 和 CNNU，合作发表的核心专利数量也最多；HITA 分别和 TOKE、GENE 两个机构具有合作关系。

表 2.2.5 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	Japan	193	30.54%	700	18.37%	3.63
2	USA	170	26.90%	1921	50.42%	11.30
3	China	153	24.21%	182	4.78%	1.19
4	The Netherlands	38	6.01%	767	20.13%	20.18
5	Germany	28	4.43%	289	7.59%	10.32
6	South Korea	21	3.32%	42	1.10%	2.00
7	France	16	2.53%	115	3.02%	7.19
8	Russia	14	2.22%	3	0.08%	0.21
9	Canada	9	1.42%	54	1.42%	6.00
10	Poland	6	0.95%	2	0.05%	0.33

表 2.2.6 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	GENE	USA	38	6.01%	404	10.60%	10.63
2	PHIG	The Netherlands	34	5.38%	571	14.99%	16.79
3	CGNP	China	32	5.06%	68	1.78%	2.13
4	MITQ	Japan	32	5.06%	71	1.86%	2.22
5	HITA	USA	29	4.59%	120	3.15%	4.14
6	SHMA	Japan	29	4.59%	146	3.83%	5.03
7	TOKE	Japan	25	3.96%	38	1.00%	1.52
8	CNNU	China	17	2.69%	17	0.45%	1.00
9	USGO	USA	12	1.90%	47	1.23%	3.92
10	WESE	USA	10	1.58%	76	1.99%	7.60

注：GENE 表示 General Electric Co；PHIG 表示 Konink Philips NV；CGNP 表示 China Guangdong Nuclear Power Group Co L；MITQ 表示 Mitsubishi Electric Corp；HITA 表示 Hitachi Ltd.；SHMA 表示 Shimadzu Corp；TOKE 表示 Toshiba Corp；CNNU 表示 China National Nuclear Corporation；USGO 表示 USGO: National Nuclear Security Administration, which is an agency within the U.S. Department of Energy and is closely related to U.S. Department of Homeland Security；WESE 表示 Westinghouse Electric Co Llc。

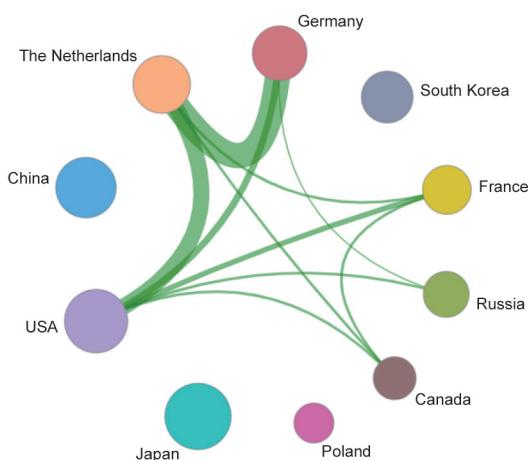


图 2.2.5 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

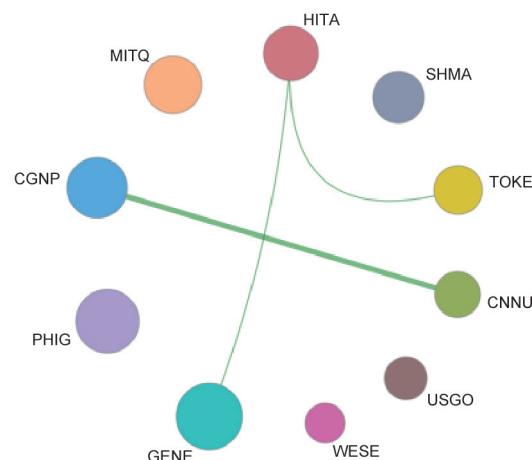


图 2.2.6 “乏燃料后处理及核设施仪器仪表”工程开发前沿的主要机构间合作网络

### 领域课题组人员

课题组组长：翁史烈 倪维斗 彭苏萍

专家组组长：袁士义

课题组副组长：黄震 巨永林 刘静

能源与电气科学技术与工程学科组：

组 长：翁史烈 罗 安

秘书长：巨永林 徐千鸣

参加人（按照拼音排序）：

蔡旭 代彦军 丁小益 韩东 韩敏芳

何晋伟 江亿 李争起 上官文峰 沈水云

沈文忠 盛宏至 史进渊 汪洪亮 王俊

王睿 翁一武 杨林 余晴春 章俊良

赵长颖 钟文兴 朱森

## 核科学技术与工程学科组：

组 长：叶奇蓁 李建刚

秘书长：苏 罡 高 翔

## 参加人（按照拼音排序）：

郭 晴 郭英华 胡 古 李思凡 刘少帅

师学明 杨 勇

## 地质资源科学技术与工程学科组：

组 长：毛景文 赵文智

秘书长：张国生 刘 敏

## 参加人（按照拼音排序）：

曹 宏 陈志勇 董世泰 侯连华 黄金亮

李潮流 李厚民 李建忠 李 欣 梁 坤

王淑芳 王晓梅 魏国齐 吴 穗 徐兆辉

杨建民 杨 涛 姚佛军 张朝军 张水昌

张 研 周灿灿

## 矿业科学技术与工程学科组：

组 长：袁 亮 李根生

秘书长：张 农 宋先知 周福宝 吴爱祥

## 参加人（按照拼音排序）：

安衍培 江丙友 阚甲广 钱德雨 时国庆

薛 生 尹升华

文献情报专家：陈天天 李 婷

## 工作组办公室：

能源与矿业工程学部办公室：

宗玉生 张 宁 王浩闻

《Frontiers in Energy》期刊编辑部：

刘瑞芹 黄冬苹

## 五、土木、水利与建筑工程

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域 Top10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及了结构工程、土木建筑材料、道路与铁路工程、建筑学、暖通空调、市政工程、测绘工程和水利工程等学科方向。其中，“土木工程结构与系统全寿命可靠性”“超高性能与智能水泥基复合材料”“道路铺面再生材料与材料再生”“绿色本土建筑”“基于人工智能的建筑设计方法”“多层次空天地遥感数据的融合处理”“水工程全寿命安全”是传统研究的深入，“建筑环境调控智能系统”“污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理”和“智慧城市地理时空大数据动态融合”是新兴前沿。各个前沿所涉及的

核心论文自 2012 年至 2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2，其中，“建筑环境调控智能系统”近年核心论文发表数目增速最显著。

#### (1) 土木工程结构与系统全寿命可靠性

土木工程结构与系统全寿命可靠性是指考虑荷载的随机分布以及材料、构件乃至结构在服役期间其性能随时间发生演化的时变可靠性。在环境与荷载长期作用下，土木工程结构性能会发生退化，该退化过程兼具随机性和时变性。基于随机过程理论，在荷载效应和结构性能的概率模型都完备的前提下，可定量计算出结构的时变可靠度。土木工程结构与系统全寿命可靠性主要研究方向包括环境作用下结构性能演化、时变可靠度计算、结构体系可靠性等。结构性能演化规律直接影响可靠度分析结果，目前多直接采用确定性分析建立的

表 1.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	平均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	土木工程结构与系统全寿命可靠性	215	4440	20.65	2014.57	—	—
2	超高性能与智能水泥基复合材料	64	2594	40.53	2013.59	—	—
3	道路铺面再生材料与材料再生	27	601	22.26	2013.74	—	—
4	绿色本土建筑	317	9213	29.06	2013.89	—	—
5	基于人工智能的建筑设计方法	107	3704	34.62	2013.92	—	—
6	建筑环境调控智能系统	31	1244	40.13	2015.32	38.70%	0.00
7	污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理	7	243	34.71	2016.14	28.60%	0.00
8	多层次空天地遥感数据的融合处理	141	7023	49.81	2014.39	—	—
9	智慧城市地理时空大数据动态融合	52	1244	23.92	2015.50	—	—
10	水工程全寿命安全	49	913	18.63	2013.78	—	—

表 1.1.2 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	土木工程结构与系统全寿命可靠性	30	39	31	39	45	31
2	超高性能与智能水泥基复合材料	14	17	17	13	3	0
3	道路铺面再生材料与材料再生	7	3	9	6	2	0
4	绿色本土建筑	56	76	76	70	34	5
5	基于人工智能的建筑设计方法	17	26	27	25	10	2
6	建筑环境调控智能系统	1	0	4	11	13	2
7	污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理	0	0	0	2	2	3
8	多层次空天地遥感数据的融合处理	25	21	21	32	32	10
9	智慧城市地理时空大数据动态融合	1	1	6	18	15	11
10	水工程全寿命安全	10	9	18	6	6	0

抗力退化模型，同时引入相关随机参数。构件层面时变可靠度计算方法主要有早期的穿越法、时不变可靠度串联体系法、蒙特卡罗模拟法以及概率密度演化法等。结构体系的可靠性分析一直是一个难点。从 2012 年至 2017 年，土木工程结构与系统全寿命可靠性的核心论文篇数为 215，被引频次为 4440，篇均被引频次为 20.65。

### (2) 超高性能与智能水泥基复合材料

超高性能与智能水泥基复合材料是指具有超高力学性能和超高耐久性能的水泥基复合材料以及具有自感知、自保温、自清洁和自阻尼等智能化功能的水泥基复合材料。随着建筑、桥梁等土木结构的发展，结构的复杂化对土木工程材料提出了更高的要求。相较于普通混凝土，超高性能混凝土具有极高的抗压强度，优异的韧性，超高的耐磨性、抗爆性和显著提升的耐久性。超高性能混凝土的研究主要面向两大方向展开：工作性和力学性能。得益于碳材料和相变储能材料的发展，具有自感知、自保温、自清洁等智能化功能的水泥基复合材料成为了可能。碳纳米管、石墨烯、纳米碳纤维等碳材料的掺入，使得水泥基材料的力学性能、电学性能等均有不同程度的提高，在提升混凝土结构安全性和可靠度的同时，赋予了混凝土结构具有智能监测

的功能。从 2012 年至 2017 年，超高性能与智能水泥基复合材料的核心论文篇数为 64，被引频次为 2594，篇均被引频次为 40.53。

### (3) 道路铺面再生材料与材料再生

近年来，循环经济和可持续发展理念在道路铺面领域引起了极大关注，其中可再生的道路铺面材料成为研究关注的前沿。道路铺面再生材料与材料再生的内涵包括两个方面，再生材料是指借鉴仿生学原理同时又具备感知和激励双重功能的材料，主动感知、自动愈合和自我修复是其基本特征。开发新型再生材料，揭示其再生机理，构建再生复合材料设计体系是实现道路材料可持续发展的有效措施。材料再生是指工业与民用废弃物如钢渣、塑料颗粒、建筑垃圾、道路旧料等材料的再生利用过程。研发新型材料再生技术，探索其物化性能，揭示新旧材料共混机理是实现废弃材料资源化利用的重要手段。从 2012 年至 2017 年，道路铺面再生材料与材料再生的核心论文篇数为 27，被引频次为 601，篇均被引频次为 22.26。

### (4) 绿色本土建筑

当代绿色本土建筑是基于现代技术和材料，仍具有地域环境适应性和文化延续性的建筑类型。本土建筑在长期的发展中，与地域环境形成了明确的

适应关系，它一方面需要批判性地汲取传统建造体系中的气候适应性特征；另一方面需要回应当代生活要求，并与文脉和社会环境形成可持续的良性发展体系。绿色本土建筑的研究既聚焦于将现代的环境控制技术、结构安全技术、日常厨卫设施与智能通信系统应用于既有的传统建筑遗产中，也致力于发现本土建筑在环境协调、气候适应、文化传承与功能组织中的智慧与经验。这一领域的研究尤其关注本土建筑形式在因地制宜、自我调适、自我完善的过程中对构建整体民族文化形象的贡献。从 2012 年至 2017 年，绿色本土建筑的核心论文篇数为 317，被引频次为 9213，篇均被引频次为 29.06。

### （5）基于人工智能的建筑设计方法

基于人工智能的建筑设计方法是以建筑设计过程为对象，以人工智能为创新驱动，以各种虚拟技术为界面的，讨论人类设计师如何与具有一定智能的机器系统，通过实时交互来进行设计，以期同时发挥人类的创造与处理非确定问题的能力、机器的精确感知与高速计算能力。首先，传统的建筑设计方法是基于建筑师为唯一主体的一元论体系，而新方法强调人与具有智能的机器互动来完成设计，所以从理论架构上就突破了该一元论体系。其次，最新的人工智能领域，以基于深度神经网络技术的突破为亮点，能够以超出人类感知能力的正确率，完成图像、语音等的识别与解析，并且通过增强学习算法已经实现了在各种博弈问题上对人类的反超。这些都为使机器具有一定程度的智能提供了可能。最后，虚拟技术在硬件上的轻量化、普及化使得其应用场景呈现出爆炸性增长，相比传统屏幕的二维图形用户界面，其带有沉浸感的真三维环境大大提高了信息交互的效率。同时，随着各种实时扫描与投射技术的发展，可触用户界面也逐渐开始普及，彻底摆脱了无论是屏幕还是虚拟环境的这种感知代理模式，直接使得建筑师可以在实物上进行各种带

有可计算信息的操作，从而实现人与机的直接互动。从 2012 年至 2017 年，基于人工智能的建筑设计方法的核心论文篇数为 107，被引频次为 3704，篇均被引频次为 34.62。

### （6）建筑环境调控智能系统

建筑环境调控智能系统是指以建筑室内的热、声、光、空气品质等环境参数为控制目标，以建筑空调供暖系统、照明系统、围护结构等机电系统进行自动监测、自动控制、自动调节和自动管理的系统。主要研究方向包括：建筑环境参数的监测和传输，调控系统的智能化分析、识别和诊断，建筑机电系统的智能化自动控制和设备运行优化等。该系统由建筑自动化系统功能细分和发展而来，最初的建筑自动化系统通过计算机对空调供暖、电梯、供水、安保、消防和供配电系统进行监测和控制，为物业管理人员提供建筑运行状态的参考和预警，起到辅助建筑管理的作用，随着近年来计算机、电子技术的发展，以及手机、智能穿戴设备、显示屏等智能终端的普及，使得建筑环境调控向智能化方向发展，如使用智能终端对建筑环境参数和室内人员主观感受进行采集，结合人员的主观感受进行环境参数的智能化控制，以及更为个性化的室内环境参数调控终端等。从 2012 年至 2017 年，建筑环境调控智能系统的核心论文篇数为 31，被引频次为 1244，篇均被引频次为 40.13。

### （7）污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理

微塑料是指粒径很小的塑料颗粒以及纺织纤维，通常认为粒径小于 5 mm 的塑料颗粒。其主要来源是生活中广泛存在的塑料暴露在自然环境中被风吹日晒逐渐变小而成的微塑料。另外，人们使用的化妆品或者清洁用品中有大量的磨砂颗粒，或者家用洗衣机排出的废水中含有的大量纤维。这些微塑料体积小、比表面积大、吸附污染物的能力强，更容易与污水中普遍存在的疏水性多氯联苯、双酚

A 等持久性有机污染物形成有机污染球体，且在污水处理中漂浮在水面上，传统城市污水处理厂无法将其有效处理。游荡的微塑料很容易被贻贝、浮游动物等低端食物链生物吃掉且不能被消化，导致动物生病甚至死亡；如果带着有机污染物的微塑料被吃掉，污染物在生物体内酶的作用下释放出来加剧其病情。微塑料、带有有机污染物的微塑料进入上层动物体内，食物链“富集”效应会使大量的食用微塑料的生物生病或者死亡。污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理研究是通过多种观察、实验、理论推导和模拟手段，研究污水中微塑料等污染物的组成，采用多种技术手段研究这些微塑料等污染物在污水处理系统中的迁移途径、转化产物、转化和分布规律。重点研究微塑料、持久性有机污染物、重金属、内分泌干扰物和新兴污染物等。从 2012 年至 2017 年，污水处理中微塑料等污染物迁移与转化机理的核心论文篇数为 7，被引频次为 243，篇均被引频次为 34.71。

#### (8) 多层次空天地遥感数据的融合处理

通过获取多源、多层次航空、航天和地面遥感数据，对遥感大数据的信息深度融合，以地物目标的物理特性为基础，分析影像特征、发现多源数据之间的内在规律性。以混合多层次融合技术为主，将像素层、特征层和决策层融合，结合行业特有模型提取有价值信息。主要的研究方向包括：多源遥感数据高精度预处理，如遥感影像的辐射定标、几何校正、大气校正等常规处理和多源异构数据的协同精确校正等。多源遥感数据空间融合，主要有基于联合区域网平差的方法和基于图像配准的方法。前者是从摄影测量的角度出发，将空间融合问题转换为多源遥感数据的联合区域网平差问题；后者是从图像处理和计算机视觉的角度出发，将空间融合问题转换为图像配准问题。

多源遥感数据信息融合，在实现多源遥感数据

的空间融合后，需要对这些具有统一地理坐标信息的多源数据进行信息融合，从而发掘出全新、有意义的信息。多源遥感数据信息融合一般可分为三个层次：像素级、特征级和决策级。主要的发展趋势包括：支持多源数据联合区域网平差，实现异源、异时相、异分辨率间图像的同名点自动搜寻和联合平差；基于多层次混合的深度信息融合技术；基于深度神经网络和学习的信息提取技术。从 2012 年至 2017 年，多层次空天地遥感数据的融合处理的核心论文篇数为 141，被引频次为 7023，篇均被引频次为 49.81。

#### (9) 智慧城市地理时空大数据动态融合

随着智慧地球和智慧城市的建设和应用，无所不在的亿万个各类传感器将产生 PB/EB 甚至 ZB 数据量级的城市地理时空大数据。智慧城市地理时空大数据动态融合从实时获取的多平台、多时相、多传感器、多类型、高分辨率、高光谱的海量多源地理时空大数据中自动发现和提取隐含的和非显见的模式、规则及知识，通过高效智能动态融合处理快速地将之转化成有价值的信息，极大地提高了智慧城市的空间认知能力，是测绘工程领域的研究前沿之一。其主要研究方向是智慧城市地理时空大数据表示、度量和理解的基本理论和方法，揭示时空大数据与现实世界对象、行为、事件间的对应规律。其未来发展趋势是用各种手段和集成各种方法对智慧城市及其中的实体目标和人类活动进行地理时空数据采集、信息提取、网络管理、知识发现、空间感知认知和智能位置服务，形成一门多学科交叉的科学和技术。从 2012 年至 2017 年，智慧城市地理时空大数据动态融合的核心论文篇数为 52，被引频次为 1244，篇均被引频次为 23.92。

#### (10) 水工程全寿命安全

水工程是国家基础设施体系的关键组成部分，对保障水安全和促进社会经济发展具有不可替代的

重要作用。近年来，在“一带一路”倡议背景下，水工程建设从国内走向国外，从内陆走向深海，面临的环境更加复杂多变，对施工安全和服役期内的运行安全也提出了更高的要求。水工程全寿命安全是针对结构物全寿命各阶段的安全隐患及周围环境变化提出的概念，主要研究水利工程结构的抗振、抗腐、抗震技术以及水下结构物无损检测、损伤识别、快速修复技术等，从而构建涉水工程结构安全诊断评价体系，优化水工程全寿命安全设计。相比于水工、港工及近海工程，深海工程的环境更为复杂，包括风、浪、流、盐等常态环境因素和台风、地震等极端环境因素。为了确保深海工程的安全，必须要综合考虑各种环境因素的联合作用，通过实验或模拟技术分析深海工程结构在复杂环境下的响应特征及破坏机理，并在此基础上建立深海工程结构的全寿命性能监测系统和损伤修复系统，从而构建深海环境水工程全寿命安全的评价体系和设计准则。因此，复杂条件下的水工程灾变机理研究、智能监控和自动修复技术以及结构系统全寿命安全分析与优化设计将成为今后水工程全寿命安全的重要发展方向。从2012年至2017年，水工程全寿命安全的核心论文篇数为49，被引频次为913，篇均被引频次为18.63。

### 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

#### 1.2.1 土木工程结构与系统全寿命可靠性

在20世纪中期，由于工业化迅猛发展，各国进行了大规模的基础设施建设，与此同时，土木工程结构的耐久性和使用寿命问题日益突出。由于对结构性能演化的认识不足，使得部分结构性能过早退化，威胁结构安全并浪费社会资源。国内外结构工程师们深知结构使用寿命的重要性，提出了一套与结构目标使用年限有关的设计方法：容许应力设计法、破坏强度设计法和极限状态设计法。目前基于概率理论的极限状态设计法经实践检验后为大多

数国家所采用。但该方法仅满足结构在施工完成后的状态，引入了目标使用年限对荷载的影响，但未考虑结构性能退化问题。

为此，有关研究人员提出采用基于随机过程的可靠性分析方法。基于随机过程意味着在考虑时变性的影响下，引入结构抗力退化的时变概率模型。然而到目前为止，对环境与荷载作用下各类结构的性能演化机理尚缺乏深入的认识。因此基于已有构件抗力预测模型的可靠性分析结果与真实情况有所偏差。此外，不同学者针对各自的抗力退化模型提出了不同的时变可靠性分析计算方法，如穿越法、时不变可靠度串联体系法、以及蒙特卡罗模拟法等。其中，穿越法和时不变可靠度串联体系法或是不适用时变可靠度计算，或是受限于特定的极限状态方程的表达形式。尽管蒙特卡罗模拟法不受限于随机物理系统以及极限状态方程，且应用最为广泛，精度较高，但是计算相对耗时。

目前，土木工程结构与系统全寿命可靠性的研究方向有：

(1) 时变可靠性分析方法改进，主要有基于泊松计数过程等随机过程模型的时变可靠度计算的解析法，以及基于蒙特卡罗模拟的随机模拟法，以克服直接模拟法带来的高昂计算成本，以及小概率事件抽样面临的困难。此外还有基于概率守恒原理的概率密度演化方法的时变可靠度计算方法等。

(2) 结构、系统时变状态函数的改进，如考虑钢筋锈蚀速率的时变性、钢筋腐蚀电流密度分布及钢筋锈蚀形态的不均匀性的锈蚀钢筋混凝土结构的时变可靠度计算，考虑复杂结构失效模式转换的等效极值事件建立及可靠度计算等。

(3) 基于时变可靠性的结构与系统全寿命设计理论与维护技术。

土木工程结构与系统全寿命可靠性的核心论文数为215篇（见表1.1.1），核心论文的篇均被引频次为20.65。核心论文产出排名前三的国家/地

表 1.2.1 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	72	33.49%	1523	34.30%	21.15
2	USA	40	18.60%	911	20.52%	22.78
3	Italy	24	11.16%	528	11.89%	22.00
4	Australia	19	8.84%	396	8.92%	20.84
5	UK	18	8.37%	421	9.48%	23.39
6	Iran	18	8.37%	303	6.82%	16.83
7	Czech Republic	12	5.58%	124	2.79%	10.33
8	Singapore	11	5.12%	254	5.72%	23.09
9	France	9	4.19%	279	6.28%	31.00
10	Germany	9	4.19%	151	3.40%	16.78

表 1.2.2 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Hunan Univ	13	6.05%	342	7.70%	26.31
2	Dalian Univ Technol	12	5.58%	207	4.66%	17.25
3	Tongji Univ	10	4.65%	240	5.41%	24.00
4	Lehigh Univ	9	4.19%	256	5.77%	28.44
5	Univ Sydney	8	3.72%	199	4.48%	24.88
6	Univ Zabol	8	3.72%	118	2.66%	14.75
7	Natl Univ Singapore	6	2.79%	183	4.12%	30.50
8	Tech Univ Munich	6	2.79%	103	2.32%	17.17
9	VSB Tech Univ Ostrava	6	2.79%	48	1.08%	8.00
10	Politecn Milan	5	2.33%	149	3.36%	29.80

区为中国、美国和意大利（见表 1.2.1），其中中国发表论文占比为 33.49%（其中港澳占 9.7%），是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家 / 地区为法国、英国、新加坡、美国和意大利，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 21.15，略高于平均水平，说明中国学者在该前沿的研究工作也逐步受到了关注。从排名前十的核心论文产出国家 / 地区合作网络（见图 1.2.1）来看，除捷克之外，论文数量排名前十的国家 / 地区之间有较为密切的合作关系。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.2），

该前沿排名前三的产出机构为中国的湖南大学、大连理工大学和同济大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.2）来看，机构间合作不甚紧密。

施引核心论文产出前五的国家 / 地区为中国、美国、意大利、英国和澳大利亚（见表 1.2.3），施引核心论文产出前三的机构为中国湖南大学、同济大学和美国理海大学（见表 1.2.4）。

根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前五的国家 / 地区施引核心论文数也比较多，其中中国施引论文数排名第一，说明中国学者对该前



图 1.2.1 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

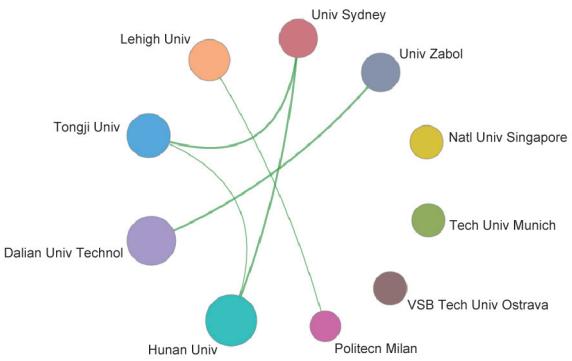


图 1.2.2 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1191	38.72%	2016.5
2	USA	645	20.97%	2016.0
3	Italy	241	7.83%	2015.9
4	UK	216	7.02%	2016.2
5	Australia	182	5.92%	2016.4
6	Iran	167	5.43%	2016.5
7	Germany	132	4.29%	2016.5
8	India	112	3.64%	2016.2
9	Singapore	96	3.12%	2016.1
10	France	94	3.06%	2016.3

表 1.2.4 “土木工程结构与系统全寿命可靠性”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Hunan Univ	150	18.82%	2016.4
2	Tongji Univ	131	16.44%	2016.4
3	Lehigh Univ	90	11.29%	2015.4
4	Dalian Univ Technol	76	9.54%	2016.5
5	Politecn Milan	66	8.28%	2016.0
6	Beihang Univ	65	8.16%	2016.7
7	Huazhong Univ Sci & Technol	57	7.15%	2016.6
8	Univ Sydney	55	6.90%	2016.3
9	Wuhan Univ	54	6.78%	2015.7
10	Northwestern Polytech Univ	53	6.65%	2016.4

沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

综合以上统计分析结果，在土木工程结构与系统全寿命可靠性研究前沿，我国目前处于领跑的态势，建议我国继续加大在该前沿前沿的研究投入，保持该前沿在世界上的领先水平。

### 1.2.2 超高性能与智能水泥基复合材料

随着社会经济、现代工业设计制造技术、工程结构设计理论方法以及施工技术的发展，工程结构朝着更高、更长、更深的方向发展，这对混凝土的性能提出了更高的要求。具有超高力学性能、超高延性、超高耐磨性、超高抗爆性和超高耐久性的超高性能混凝土使得复杂的工程结构得以实现。同时，人们对工程结构有了更为精细化和智能化的要求，以期获得更可靠、更安全的居住通行环境。

智能水泥基复合材料是智能化时代的产物，它在对重大土木工程结构应力、应变和温度等参数进行实时监测，对结构损伤进行无损检测评估并及时修复，对减轻台风、地震等冲击荷载作用具有潜在作用，对建筑室内环境进行调控产生节能、调温、调湿的效果。智能水泥基复合材料作为土工结构材料领域的高新技术，为传统材料的未来发展注入了新的内容和发展活力，也提供了全新的机遇。对其基础理论及其应用技术进行深入研究将使传统土工材料工业获得新的、突破性的飞跃，其发展必将使水泥基材料的应用具有更加广阔的前景和产生巨大的社会效益。

超高性能与智能水泥基复合材料的主要研究方向有：

(1) 超高性能水泥基复合材料制备技术与性能调控。这一方向主要涵盖了两个方面：一是超高性能水泥基复合材料的新拌特性；二是材料宏观性能及微结构与宏观性能的联系。前者关注超高性能水泥基复合材料的流变性、可泵性，以期能够将其应用到高、长、深的复杂工程结构中；后者关注超高性能水泥基复合材料的宏观力学性

能、耐久性能以及材料微观结构与这些宏观性能之间的联系。

(2) 超高性能水泥基复合材料工程应用研究。超高性能水泥基复合材料应用到工程结构中除了保证其自身性能要求外，还需充分研究由超高性能水泥基复合材料制成的各类结构构件的力学性能，在此基础上才能建立其成熟的可靠度设计计算方法。将这一具有超高性能的材料更广泛地应用于建筑、桥梁、路基、大坝等工程结构中还存在许多挑战。

(3) 智能水泥基复合材料智能监测特性。智能水泥基复合材料走向智能化的一个重要方向是使传统的水泥基材料具有自监测、自诊断的功能，人们较为关注工程结构应力、变形和温度等方面自监测能力，结合碳纤维、碳纳米管、石墨烯等材料的发展，提升智能混凝土监测的灵敏度、稳定性、适用范围和耐久性等是当前的前沿。

(4) 智能水泥基复合材料智能调节特性。智能水泥基复合材料的另一智能化方向是具备自调节、自修复的自控能力。这类材料适应于服役环境的变化以及自身结构的变化，如对温度、湿度的调节，对形状、阻尼的自控，对微裂缝的自修复等。这一方向有着广阔前景。

超高性能与智能水泥基复合材料的核心论文数为 64 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引频次为 40.53。核心论文产出排名前三的国家或地区为美国、韩国和中国（见表 1.2.5），其中中国发表论文占比为 17.19%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家或地区为印度、荷兰、意大利、韩国和中国，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 42.45，略高于平均水平。说明中国学者在该前沿的研究工作还有进一步上升的空间。从排名前十的核心论文产出国家或地区合作网络（见图 1.2.3）来看，中国与美国及英国间的合作相对频繁。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.6），该前沿排名前三的产出机构为韩国大学、美国密歇

表 1.2.5 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	18	28.13%	721	27.79%	40.06
2	South Korea	13	20.31%	552	21.28%	42.46
3	China	11	17.19%	467	18.00%	42.45
4	UK	6	9.38%	225	8.67%	37.50
5	The Netherlands	4	6.25%	215	8.29%	53.75
6	Italy	4	6.25%	174	6.71%	43.50
7	France	4	6.25%	119	4.59%	29.75
8	Canada	4	6.25%	106	4.09%	26.50
9	Malaysia	3	4.69%	89	3.43%	29.67
10	India	1	1.56%	102	3.93%	102.00

表 1.2.6 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Korea Univ	8	12.50%	299	11.53%	37.38
2	Univ Michigan	7	10.94%	297	11.45%	42.43
3	Univ Connecticut	6	9.38%	271	10.45%	45.17
4	Korea Inst Construct Technol	4	6.25%	233	8.98%	58.25
5	Eindhoven Univ Technol	4	6.25%	215	8.29%	53.75
6	Univ Liverpool	4	6.25%	150	5.78%	37.50
7	Daegu Univ	4	6.25%	126	4.86%	31.50
8	Sejong Univ	3	4.69%	185	7.13%	61.67
9	Univ Perugia	3	4.69%	140	5.40%	46.67
10	Univ Suwon	3	4.69%	108	4.16%	36.00

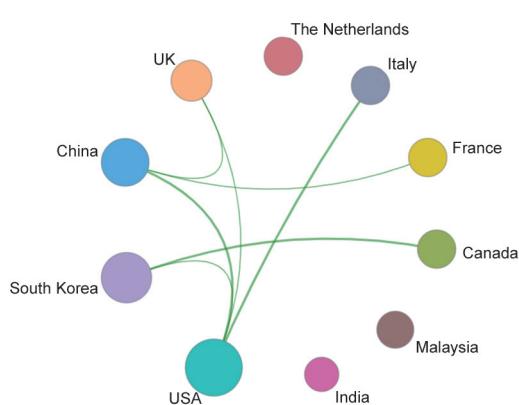


图 1.2.3 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

根大学和美国康涅狄格大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.4）来看，美国以及韩国国内机构合作较为密切，但不同国家或地区机构之间合作较少。

施引核心论文产出前五的国家或地区为中国、美国、韩国、澳大利亚和意大利（见表 1.2.7），施引核心论文产出前三的机构为韩国大学、中国哈尔滨工业大学和韩国汉阳大学（见表 1.2.8）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前五的国家或地区施引核心论文数也比较多，其中中国

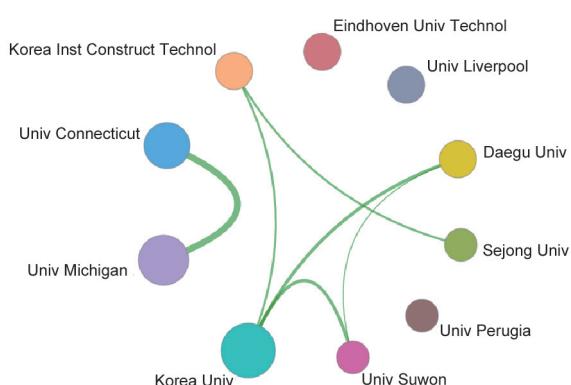


图 1.2.4 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

施引论文数排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

综合以上统计分析结果，在超高性能与智能水泥基复合材料研究前沿，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势，建议我国继续加大在该前沿领域的研究投入，推动该前沿的相关研究向世界领先水平的加速发展。

### 1.2.3 道路铺面再生材料与材料再生

近年来，循环经济和可持续发展理念在道路铺

表 1.2.7 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	452	31.45%	2016.5
2	USA	310	21.57%	2016.3
3	South Korea	142	9.88%	2016.2
4	Australia	107	7.45%	2016.6
5	Italy	96	6.68%	2016.5
6	Canada	73	5.08%	2016.5
7	India	72	5.01%	2016.3
8	UK	66	4.59%	2016.2
9	Iran	60	4.18%	2016.5
10	Malaysia	59	4.11%	2016.4

表 1.2.8 “超高性能与智能水泥基复合材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Korea Univ	51	13.67%	2015.6
2	Harbin Inst Technol	41	10.99%	2016.6
3	Hanyang Univ	40	10.72%	2016.9
4	Southeast Univ	39	10.46%	2016.3
5	Dalian Univ Technol	37	9.92%	2016.6
6	Hunan Univ	35	9.38%	2016.5
7	Univ British Columbia	33	8.85%	2016.3
8	Northwestern Univ	33	8.85%	2015.9
9	Iowa State Univ	32	8.58%	2016.3
10	Missouri Univ Sci & Technol	32	8.58%	2016.9

面领域引起了极大关注，其中可再生的道路铺面材料成为研究关注的前沿。道路铺面再生材料与材料再生的内涵包括两个方面，再生材料是指借鉴仿生学原理同时又具备感知和激励双重功能的材料，主动感知、自动愈合和自我修复是其基本特征。开发新型再生材料，揭示其再生机理，构建再生复合材料设计体系是实现道路材料可持续发展的有效措施。材料再生是指工业与民用废弃物如钢渣、塑料颗粒、建筑垃圾、道路旧料等材料的再生利用过程。研发新型材料再生技术，探索其物化性能，揭示新旧材料共混机理是实现废弃材料资源化利用的重要手段。

国内外关于铺面再生材料的研究成果主要集中在自修复材料的应用，当前主要自愈合材料能够修复毫米级裂缝，但在宽深裂缝上的自修复亟待进行理论创新和技术研发。自我感知材料、形状记忆聚合物已成功应用在航空航天等高精尖领域的智能材料中，两者在欧美国家道路铺面中有部分应用，但总体尚处于起步阶段。材料再生的研究成果主要集中在固体废弃物在道路工程中的资源化利用，但其再生过程的共混机理尚未明确，导致路用性能欠缺。因此，进一步对再生材料和材料再生中的科学问题进行研究是非常必要的。

全球交通基础设施可持续发展促进道路铺面研究紧紧围绕再生材料与材料再生两方面展开。借助新型再生材料的自修复、形状记忆功能，可以有效提高路面性能，延长路面寿命，降低道路维护保养成本，促进科技与经济的发展。材料再生可以有效缓解全球资源紧张和环境污染问题，推动经济和环保的进步。因此进行道路铺面再生材料与材料再生研究，有利于开创道路工程领域技术、经济、环保等方面的新局面，符合我国可持续发展的目标。这一前沿的主要研究方向包括：

(1) 揭示再生材料物化性能、智能感知、自我修复机理；开发道路铺面再生材料；建立复合再生材料协同作用模型；分析再生体与原有体的协同作用机理；研发智能化、自适应的新型再生材料；优化多物理场耦合条件下再生材料性能。

(2) 揭示材料再生的不同组分长期协同工作机理（如新旧沥青混合料协同作用、外加组分与原有材料的协同作用、新型胶凝材料不同组分的协同作用等）；建立工业与民用废旧材料基因数据库；探明废旧材料性能优势与缺陷；利用材料计算设计理论，实现材料再生过程绿色化、精细化、高效化。

表 1.2.9 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Spain	9	33.33%	222	36.94%	24.67
2	Australia	5	18.52%	82	13.64%	16.40
3	USA	3	11.11%	88	14.64%	29.33
4	Italy	3	11.11%	64	10.65%	21.33
5	Portugal	3	11.11%	51	8.49%	17.00
6	Canada	2	7.41%	52	8.65%	26.00
7	Switzerland	2	7.41%	47	7.82%	23.50
8	UK	2	7.41%	45	7.49%	22.50
9	France	2	7.41%	34	5.66%	17.00
10	Sweden	1	3.70%	31	5.16%	31.00

道路铺面再生材料与材料再生的核心论文数为 27 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引频次为 22.26。核心论文产出排名前五的国家或地区为西班牙、澳大利亚、美国、意大利和葡萄牙（见表 1.2.9）。篇均被引数排名前五的国家或地区为瑞典、美国、加拿大、西班牙和瑞士。从排名前十的核心论文产出国家或地区合作网络（见图 1.2.5）来看，国际间合作不甚紧密。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.10），核心论文发表最多的是西班牙科尔多瓦大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.6）

来看，机构之间合作不甚紧密。

施引核心论文产出前五的国家或地区为中国、美国、西班牙、澳大利亚和英国（见表 1.2.11），施引核心论文产出前三的机构为澳大利亚斯温伯恩理工大学、西班牙科尔多瓦大学和英国诺丁汉大学（见表 1.2.12）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前五的国家或地区施引核心论文数也比较多，其中中国施引论文数排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

综合以上统计分析结果，道路铺面再生材料与

表 1.2.10 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Cordoba	6	22.22%	156	25.96%	26.00
2	Univ Granada	3	11.11%	57	9.48%	19.00
3	Univ Palermo	2	7.41%	46	7.65%	23.00
4	Univ Beira Interior	2	7.41%	35	5.82%	17.50
5	Swinburne Univ Technol	2	7.41%	34	5.66%	17.00
6	Paradox Access Solut Inc	1	3.70%	35	5.82%	35.00
7	Univ Kansas	1	3.70%	35	5.82%	35.00
8	Empa	1	3.70%	33	5.49%	33.00
9	KTH Royal Inst Technol	1	3.70%	31	5.16%	31.00
10	Univ Nottingham	1	3.70%	30	4.99%	30.00

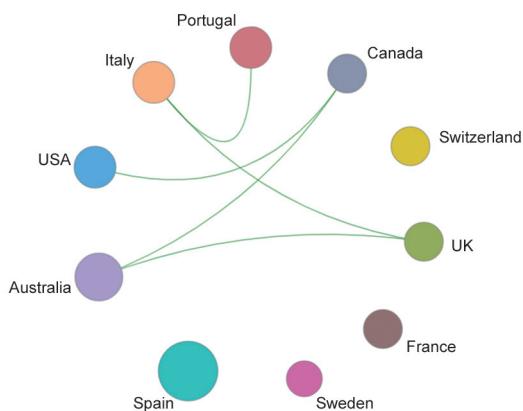


图 1.2.5 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

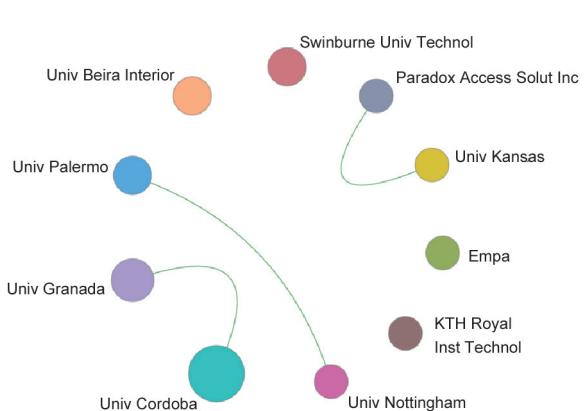


图 1.2.6 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	151	18.48%	2016.8
2	USA	146	17.87%	2016.4
3	Spain	123	15.06%	2016.2
4	Australia	88	10.77%	2016.5
5	UK	74	9.06%	2016.2
6	Italy	64	7.83%	2016.5
7	India	49	6.00%	2016.8
8	Portugal	47	5.75%	2016.1
9	France	39	4.77%	2016.1
10	Thailand	36	4.41%	2016.4

表 1.2.12 “道路铺面再生材料与材料再生”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Swinburne Univ Technol	37	16.30%	2015.9
2	Univ Cordoba	34	14.98%	2015.2
3	Univ Nottingham	30	13.22%	2015.9
4	Suranaree Univ Technol	29	12.78%	2016.0
5	Tongji Univ	20	8.81%	2016.7
6	Southeast Univ	19	8.37%	2016.9
7	KN Toosi Univ Technol	16	7.05%	2015.6
8	Univ Politecn Valencia	16	7.05%	2016.8
9	Univ Melbourne	13	5.73%	2016.8
10	Changan Univ	13	5.73%	2016.6

材料再生研究前沿，我国的相关研究目前处于跟跑的态势，建议我国继续加大在该前沿的研究投入，推动该前沿的相关研究向世界领先水平加速发展。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域的 Top10 工程开发前沿及统计数据见表 2.1.1，上述前沿涉及了结构工程、城乡规划与风景园林、道路与铁路工程、岩

土及地下工程、桥梁工程、土木建筑材料、市政工程、水利工程、测绘工程等学科方向。其中，“智能交通关键技术体系”“超长、超深埋隧道修建技术与智能装备”“新型深水基础及缆索承重桥梁抗风”“环境友好型建筑材料”“城市用水深度处理”“城市雨洪调控技术”和“高精度导航定位与时空大数据”是传统研究的深入，“智能建造及其 3D 打印技术”“绿色规划及绿色建造技术”和“城市地下空间协同开发与利用”是新兴前沿。各个前沿所涉及的专利自 2012 至 2017 年的逐年施引专利数见表 2.1.2。

表 2.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	智能建造及其 3D 打印技术	65	951	14.63	2014.45
2	绿色规划及绿色建造技术	49	245	5.00	2015.41
3	智能交通关键技术体系	85	1022	12.02	2013.44
4	超长、超深埋隧道修建技术与智能装备	14	34	2.43	2014.50
5	城市地下空间协同开发与利用	135	49	0.36	2016.61
6	新型深水基础及缆索承重桥梁抗风	179	240	1.34	2015.09
7	环境友好型建筑材料	254	380	1.50	2015.28
8	城市用水深度处理	153	1757	11.48	2013.67
9	城市雨洪调控技术	67	542	8.09	2014.28
10	高精度导航定位与时空大数据	570	20 781	36.46	2013.42

表 2.1.2 土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	智能建造及其 3D 打印技术	9	7	15	17	14	3
2	绿色规划及绿色建造技术	4	3	3	11	15	13
3	智能交通关键技术体系	22	31	16	8	5	3
4	超长、超深埋隧道修建技术与智能装备	4	1	2	1	3	3
5	城市地下空间协同开发与利用	0	3	0	3	34	95
6	新型深水基础及缆索承重桥梁抗风	21	10	32	36	28	52
7	环境友好型建筑材料	22	20	39	43	44	86
8	城市用水深度处理	39	29	43	30	9	3
9	城市雨洪调控技术	9	12	10	25	9	2
10	高精度导航定位与时空大数据	205	127	112	57	57	12

### (1) 智能建造及其 3D 打印技术

智能建造是基于信息物理系统 CPS 的先进建造技术与信息技术的深度融合，在工业化建造和数字化建造的基础上，通过对建筑与基础设施的构件、部品、体系（即 Physical System，物理系统或实体系统）在其全生命周期中立项、设计、制造、运输、装配、运维及服务等环节的建造活动通过赛博空间（即 Cyber System）的孪生模型进行信息感知与分析、数据挖掘与建模、状态评估与预判、智能优化与决策，从而实现建造对象

自身以及建造过程、建造装备、建造系统的知识推理、智能传感和精准控制与执行。智能建造系统包含智能设计与规划、智能装备与施工、智能运维与服务三大子系统，涉及人工智能、3D 打印、数字建造、机器人、大数据、物联网、云计算等先进技术。随着建筑工业化的深入发展，建筑业生产力的提升愈发依赖于学科交叉，并进一步衍生出智能建造等新兴交叉学科，智能建造系统只有通过建筑、土木、计算机、机械、电信、材料、管理等多学科的深度交叉研究才能得以实现，同时相关技术

体系的攻关对高校、企业之间的联合创新机制和能力提出了更高的要求。从 2012 年至 2017 年，智能建造及其 3D 打印技术的专利公开量为 65，被引频次为 951，平均被引频次为 14.63。

### （2）绿色规划及绿色建造技术

绿色规划及绿色建造技术应用是城乡发展历程中保护地球资源，认同“我们只有一个地球”达成的共识，是实现可持续发展人类命运共同体的规划及建造战略。其主要研究方向不仅包括绿色生态及开放空间规划，且涵盖在城市规划、建设、发展与建筑建造的全生命周期中。在确保满足功能需求的前提下，提倡尽量节约资源能源、提高能源资源利用效率、积极开发利用可再生能源，通过数据分析、参数化设计和人工智能技术实现设计结合自然。具体应用包括海绵城市建设（低影响开发，水敏性城市），气候适应性规划和建造（涉及日照、采光、通风及热舒适度调控）。目前的研究尺度可以是单栋建筑，也可以是城市局部地段和整个城市。从 2012 年至 2017 年，绿色规划及绿色建造技术的专利公开量为 49，被引频次为 245，平均被引频次为 5.00。

### （3）智能交通关键技术体系

智能交通系统以信息技术、通信技术、控制技术、智能技术和系统工程等当代高新技术和新理论为基础，以建设高效、安全、绿色和智能的综合交通系统为目标，从人、车、路、环境等不同维度探索和解决交通问题。不同国家的智能交通系统发展有所侧重，但主要内容上大体一致，包括：智能化交通信息服务系统，智能化交通管理系统，智能化公共交通系统，智能化车辆控制系统，营运车辆管理系统，电子收费系统，安全保障、紧急事件管理与救援系统等。在新技术的引领和推动下，智能交通系统的发展进入一个全新的时代，跨界融合创新催生出了许多新的模式和服务内容，推动了智能交通系统的技术内容及模式的升级换代。目前，智能

交通系统技术创新主要集中在以下方面：交通状态全息精确感知与交互、综合交通系统智能化协同管控与服务、共享交通调度与服务、载运工具智能化与智能生态驾驶及车路协同系统及主动式交通安全保障等。从 2012 年至 2017 年，智能交通关键技术体系的专利公开量为 85，被引频次为 1022，平均被引频次为 12.02。

### （4）超长、超深埋隧道修建技术与智能装备

超长、超深埋隧道一般是指长度 10 km 以上、埋深 500 m（山岭隧道）或水压 0.5 MPa（水底隧道）以上的隧道工程。随着隧道建造技术与装备的进步，在穿越崇山峻岭或跨越江河湖海时，国内外也出现了长度达 50 km 以上、水压达 1 MPa 以上的隧道工程。由于长度长、埋深深，超长、超深埋隧道工程建造面临着极大的技术难题与挑战。其主要技术方向包括：超深埋隧道工程地质和水文地质精细化探测技术与装备；超深埋隧道荷载及结构设计计算新方法；超长、超深埋隧道新型智能材料与结构形式；高应力、高地温、高水压环境下的隧道施工新技术与装备；超高水土压力及超长距离隧道掘进施工技术与装备；适应超深埋复杂环境的智能化、小扰动、高性能施工装备；超深埋隧道建造运维期防水控水新技术与装备；超长隧道安全与服役性能智能感知、维护技术与装备；超长、超深埋隧道运营安全与智慧防灾救援技术；超长、超深埋隧道建造全过程动态风险管理与监控等。从 2012 年至 2017 年，超长、超深埋隧道修建技术与智能装备的专利公开量为 14，被引频次为 34，平均被引频次为 2.43。

### （5）城市地下空间协同开发与利用

城市地下空间协同开发与利用是指以城市总体规划及相关法律法规为基础，根据城市发展对不同功能、规模和性质地下空间的需求，对城市地下空间进行统一规划、布局、开发和利用，建立一种资源共享的地下空间开发和利用模式，构建不同功能

城市地下空间协同开发技术，实现地下空间的可持续发展。其技术方向包括：城市地下空间适宜性评价技术；不同功能、规模、性质城市地下空间协同开发与利用的相互适应性研究；城市地下空间功能、形态等协同开发和利用模式；城市地下空间协同开发的合理结构与共建技术；协同开发地下空间的运维管理模式及方法；城市地下空间多功能协同开发与利用灾害安全管控与智慧监控。我国城市的快速发展和严格的耕地保护制度，使城市未来建设用地十分紧张。而城市地下空间的协同开发与利用，则会使原来功能相对单一、孤立开发的地下空间向多功能、多元化、共享的方向发展，在城市土地资源高度紧缺的条件下，通过协同开发与利用技术，实现地下空间的整体有序开发和利用，从而提升城市地下空间可持续发展能力。从 2012 年至 2017 年，城市地下空间协同开发与利用的专利公开量为 135，被引频次为 49，平均被引频次为 0.36。

#### (6) 新型深水基础及缆索承重桥梁抗风

跨越海峡深湾的桥梁通常采用深水基础及大跨缆索承重桥梁相结合的技术方案。深水基础的构造形式和缆索桥梁的抗风措施是控制结构长期性能演化的关键因素。相关主要技术方向包括：深水基础时变力学行为分析及控制；深水基础波流作用下长期承载性能劣化分析及控制；深水基础冲刷特征分析及控制；近地边界层风特性及模拟；桥梁结构构件气动导纳识别；桥梁颤抖振精细化分析及控制；湍流涡脱形态分析及结构效应等。技术动态包括：碎石垫层沉箱基础冲刷机理及防护方法；带桩沉箱复合基础承载非线性振动特性分析及优化；吸力式基础长期承载沉降行为观测及优化；台风气候条件风场空间分布及非平稳颤振分析；不同来流下颤振主动控制分析及验证；大跨桥梁风致振动全过程模拟及气动极限研究等。从 2012 年至 2017 年，新型深水基础及缆索承重桥梁抗风的专利公开量为 179，被引频次为 240，平均被引频次为 1.34。

#### (7) 环境友好型建筑材料

环境友好型建筑材料是指以节能环保为导向，通过材料性能优化和废弃物综合利用等手段生产的绿色土木工程材料。城市建设、工业生产产生了巨大的废弃物，环境保护和城市发展之间的矛盾，人与自然之间的矛盾日趋尖锐，将废弃物资源化是一条行之有效的物质循环途径。利用城市建设中产生的大量建筑垃圾如废弃混凝土和废弃砌块生产出可再生骨料，通过一定的制备工艺将之用于制备普通混凝土甚至是高性能或超高性能混凝土。针对工业生产产生的大量钢渣、镍渣、粉煤灰、废石膏等工业废渣，研究合理的活性激发技术与组分相容技术，制备出具有良好力学性能和耐久性能的大掺量工业废渣绿色高性能混凝土。同时，通过优化材料性能，制备出具有高力学性能、高耐久性、高耐磨性和高抗爆性的超高性能混凝土材料。以上环境友好型建筑材料可用于多类土工结构，具有广阔的前景。从 2012 年至 2017 年，环境友好型建筑材料的专利公开量为 254，被引频次为 380，平均被引频次为 1.50。

#### (8) 城市用水深度处理

随着城市化的发展，用水量不断增长与淡水资源有限的矛盾日益突出。工业及生活污染废水排入水体导致供水水源污染，主要污染物分为微量有机污染物、微小颗粒污染物、水体富营养化元素，如：氨、磷等，传统混凝、沉淀、过滤净水工艺已不能满足正常生活饮用水的水质要求，为此需要开发针对自来水的深度处理技术及装备，以高级氧化技术、原水预处理技术和以膜过滤技术为核心的净化工艺为第三代饮用水深度处理技术的代表。

城市污水是一种非传统水资源，经深度处理的污水回用可作为非直饮水的城市用水，不仅是解决供水不足和生态环境的有效途径，还能提高回用水的水质、水量及其经济附加值。采用物理、化学、生物及组合技术进行处理，使污水达到可以重新利用标准的整个过程系统，代表性处理技术有生物强

化处理、催化氧化、膜过滤等。从 2012 年至 2017 年，城市用水深度处理的专利公开量为 153，被引频次为 1757，平均被引频次为 11.48。

### (9) 城市雨洪调控技术

随着城市化进程的加快和经济的高速发展，城市雨水问题愈发凸显，主要表现在城市洪涝灾害风险加大、雨水资源大量流失，雨水径流污染严重，城市生态环境破坏严重等方面。城市雨洪调控技术正是应对城市雨水问题提出的概念，通过对城市降雨径流采取“渗、蓄、滞、净、用、排”措施，实现城市雨洪和非点源污染从源头、中途到末端的控制。源头控制技术包括屋顶绿化、低势绿地、透水铺装、雨水花园、植被浅沟、雨水桶等；中途控制技术包括截污雨水井、渗透沟（管）渠、雨水过滤池等；末端控制技术包括雨水塘、雨水湿地、缓冲带、生态堤岸、生物浮岛等。这些技术已在资源利用、防洪减灾、生态环境保护等方面得到了很好的应用。近年来，我国城市雨洪调控利用发展较快，个别城市尝试构建雨洪调控利用的相关体系，建设了一些示范性工程，但总体水平和推广应用程度仍然较低。城市管网雨污分流改造缓慢，雨水利用设施规模偏小，普遍缺乏应对超过管网排水能力降雨的内涝防控设施，缺少雨水设施、地下空间等数据信息和权威性国产模拟软件，难以实现城市雨洪资源综合利用。因此，今后需要加快推进大排水系统、多时空尺度的城市水量水质模拟软件、数字化雨洪资源平台、雨洪资源的分类调度等方面的技术研发与成果推广。从 2012 年至 2017 年，城市雨洪调控技术的专利公开量为 67，被引频次为 542，平均被引频次为 8.09。

### (10) 高精度导航定位与时空大数据

高精度导航定位与时空大数据技术是测绘工程领域的开发前沿之一，在物联网、智慧地球、节能减排、救灾减灾等领域发挥着重要的基础性支撑作用。高精度导航定位技术是借助于导航定位系统所

提供的位置、速度及时间信息实现对各种目标的定位、导航及监管，要求实现广域覆盖，定位、导航精度达到分米级甚至更高精度；时空大数据技术则通过数据处理、分析、融合和挖掘，提高空间定位、空间感知和空间认知能力。其主要研究方向包括：

全球连续覆盖的高精度实时卫星导航定位技术，如第三代 GNSS 技术等； 室内外协同的高精度无缝定位与导航技术，如 Wi-Fi/ WSN /RFID/UWB 等室内定位技术； 时空大数据技术，对地理时空大数据进行时间序列和空间趋势的统计分析和数据挖掘，发现知识，为空间决策支持系统提供知识服务。从 2012 年至 2017 年，高精度导航定位与时空大数据的专利公开量为 570，被引频次为 20781，平均被引频次为 36.46。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 智能建造及其 3D 打印技术

传统建筑业仍处于劳动密集型阶段，对社会资源的消耗极大，尤其是建筑耗能及建筑材料生产过程消耗，在社会总耗能的占比达到 46%，已成为国民经济的巨大负担，绿色、低碳、环保型产业发展势在必行。基于信息物理系统 CPS 的先进建造技术与信息技术的深度融合应运而生的智能建造系统能够有效地解决上述问题，同时也是建筑业转型升级的必然趋势。构建高效的智能建造体系需要有机集成人工智能、3D 打印、数字制造、机器人、大数据、物联网和云计算等先进技术，确保建筑物在全生命周期内全链条的各阶段、各专业、各参与方之间协调工作，实现物理空间和虚拟空间的相得益彰，以实现建筑业的生产方式的升级以及生产力的大幅提升。

当前，“智能建造及其 3D 打印技术”的主要技术方向有：与智能建造相匹配的结构体系及智能设计、智能装备与施工、智能运维与服务。

### (1) 与智能建造相匹配的结构体系及智能设计

传统建筑行业的建筑与结构设计大多仍针对单个项目进行人工设计，需要设计人员进行大量重复性工作，各工种之间协同效率相对低下；尤其是基于节省材料原因，构件和配件的尺寸各异，施工工业化、智能化、施工过程管理等的难度增大且效率不高。智能建造的基本技术特征是规划设计的智能化、加工制作自动化、现场施工智能装配化、运维管理信息化、拆除废件资源化；从而确保建造质量、建造效率、减少劳动力需求，同时实现建筑的全寿命周期维护。结构设计体系化、结构构件及配套部品的模数化和标准化是实现建筑设计智能化的基础和效率保证。此外，高效的结构体系和连接节点技术是实现智能设计的关键技术之一，相关技术发展水平是衡量一个国家智能建造产业水平的重要指标。

### (2) 智能装备与施工

现代建造技术通过标准化部品制造、装配化体系建造、智能化施工技术和信息化过程管理来建造桥梁、建筑、隧道及地下工程等各类建筑物，通过建造模式变革以实现传统建筑业的转型升级。因此，现代建造装备在地下空间开发、大型土方工程、大型结构安装、应急救援救灾、交通运输、空间及海洋探索等领域具有广阔的应用前景。现代化高效的施工工艺和建造装备具有技术含量高、产业关联度大、带动能力强等特点，是国家综合实力和国际竞争力的重要体现之一。正因为如此，研究和发展建造装备技术一直受到世界各国的重视，许多国家都把建造装备技术列入本国的高技术发展计划或国家关键技术进行研究和开发。

当前，传统的建筑施工作业方式正逐渐被一些高新技术所颠覆。建筑施工行业正在加速转型升级，由劳动密集型向技术、知识和管理密集型转变。《中国建筑施工行业信息化发展报告（2016）

互联网应用与发展》深度论述了建筑施工行业互联网应用的现状与未来发展趋势，认为建筑施工行业转型升级离不开互联网的支持与深度应用，智能建造、智能企业将是未来建筑施工行业转型升级和发展的方向。

### (3) 智能运维与服务

集成式智能化建造通过将建筑内部各部品的工厂化生产和现场集成装配施工，可实现安全耐久、施工快捷、低碳环保等建设目标，可大幅减少建筑垃圾和建筑污水，降低建筑噪声，提高施工质量和施工效率。同时，通过各种传感器、智能家居以及相关管理软件系统等来实现建筑系统的全生命周期健康监测和维护管理。在整个建筑系统管理方面，只有通过管理的信息化、智能化和生产流程的标准化，才能更好地降低造价、缩短工期、确保质量和安全性，从而发挥建筑工业化技术的优势，进一步提高整个建筑业的生产效率，实现真正的智能建造。在建筑的全生命周期过程中，使用以现代网络、通信、电子设备等为载体的信息化手段，优化管理流程和实现生产流程的标准化，对建筑的设计、施工、验收、维护管理、拆除和回收利用等进行实时化、精细化、智能化管理，将对智能建造技术的快速发展起到了强有力的作用。

“智能建造及其3D打印技术”工程开发前沿的核心专利为65篇，平均被引频次为14.63（见表2.1.1），排名前三的国家或地区为美国、中国（除中国台湾）和韩国（见表2.2.1），申请专利量最多的国家为美国，占比达到了41.54%，平均被引频次为22.41。中国机构或个人所申请的专利占比达到了40%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为8.69。基于当前的样本数据，从核心专利产出排名前十的国家或地区之间的合作网络（见图2.2.1）来看，国家或地区之间无合作。

根据核心专利的产出机构情况（见表2.2.2），

## 第二部分 领域报告：土木、水利与建筑工程

表 2.2.1 “智能建造及其 3D 打印技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	27	41.54%	605	63.62%	22.41
2	China	26	40.00%	226	23.76%	8.69
3	South Korea	5	7.69%	27	2.84%	5.40
4	Denmark	1	1.54%	12	1.26%	12.00
5	Finland	1	1.54%	20	2.10%	20.00
6	India	1	1.54%	21	2.21%	21.00
7	Japan	1	1.54%	13	1.37%	13.00
8	The Netherlands	1	1.54%	22	2.31%	22.00
9	Russia	1	1.54%	3	0.32%	3.00
10	Germany	1	1.54%	2	0.21%	2.00

表 2.2.2 “智能建造及其 3D 打印技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	STTS(Makerbot Ind LLC)	USA	8	12.31%	243	25.55%	30.38
2	CSCE(China State Construction Engrg. Corp. Ltd.)	China	3	4.62%	19	2.00%	6.33
3	SMSU(SAMSUNG Electronics Co., Ltd.)	South Korea	3	4.62%	17	1.79%	5.67
4	IROB(Irobot Corp)	USA	2	3.08%	92	9.67%	46.00
5	APRECIA Pharm Co	USA	2	3.08%	77	8.10%	38.50
6	GENE(General Electric Co)	USA	2	3.08%	32	3.36%	16.00
7	CISC(Cisco Technology Inc)	USA	2	3.08%	17	1.79%	8.50
8	GLDS(LG Display Co., Ltd.)	South Korea	2	3.08%	10	1.05%	5.00
9	UYTJ(Tongji University)	China	1	1.54%	41	4.31%	41.00
10	View Inc	USA	1	1.54%	37	3.89%	37.00

该前沿排名前三的产出机构为 Makerbot Ind LLC、中国建筑集团有限公司和 SAMSUNG Electronics Co., Ltd.。基于当前的样本数据，从核心专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.2）来看，机构之间无合作。

### 2.2.2 绿色规划及绿色建造技术

绿色规划是构建可持续发展社会战略的必然发展趋势和关键落脚点。其核心内容是在城市发展与建筑全生命周期中，在确保健康舒适居住环境前提

下，节约资源能源、提高能源资源利用效率、积极开发利用可再生能源，实现与自然的协调和环境可持续发展。绿色建筑的研究从建成环境的节能与生态技术入手，在充分利用被动技术实现建筑降耗的基础上，积极开发绿色能源的利用和绿色建筑的综合技术创新。从全球绿色建筑发展的背景看，研究发展的战略咨询将紧密围绕绿色城市与绿色建筑两方面展开，通过关注生态城市、气候环境、自然资源、被动技术、能效技术、人的舒适健康、综合评价技术等，形成一套完整的咨询前沿技术。技术动

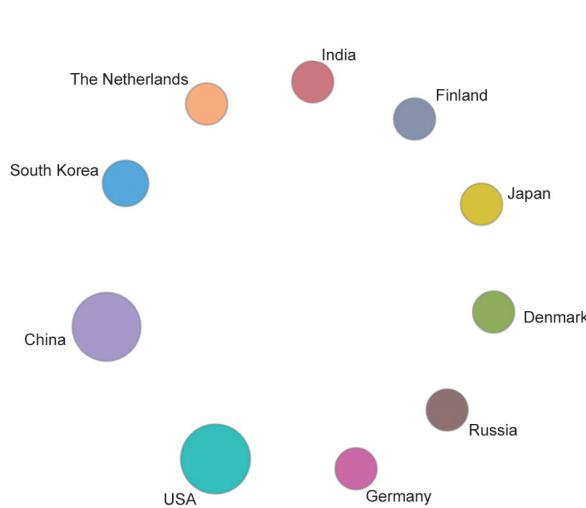


图 2.2.1 “智能建造及其 3D 打印技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

态包括：高密度城区气候与能耗评价方法及信息图谱研究，气候响应的绿色建筑性能优化设计与技术体系，城市建筑能源互联网技术研究，被动技术在绿色建筑中的应用与创新发展研究，绿色建筑的人舒适性与行为模式、评估与评价分析，主被动结合、互补协调的绿色建筑协同技术体系等。

中国的绿色规划如火如荼的发展，80% 的国家级新区所在城市或其部分城区是国家绿色低碳相关示范项目所在地，在新区绿色能源、蓝绿生态格局、绿色交通系统、绿色建筑和绿色基础设施等方面进行了试点，并发布了《绿色生态城区评价标准》。

“绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿的核心专利 49 篇，平均被引频次为 5( 见表 2.1.1 )，排名前三的国家或地区为中国（除中国台湾）、美国、日本（见表 2.2.3）。中国机构或个人所申请的专利占比达到了 95.92%，在专利数量方面比

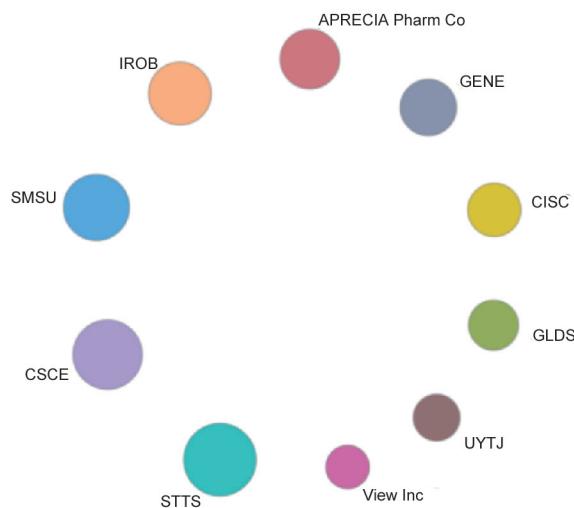


图 2.2.2 “智能建造及其 3D 打印技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 4.96。基于当前的样本数据，从核心专利产出国家或地区之间的合作网络（见图 2.2.3）来看，国家或地区之间无合作。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.4），该前沿排名前三的产出机构为太空智造股份有限公司、常州绿建板业有限公司和恒元建筑板业有限公司。从核心专利产出机构排名前 12 的合作网络（见图 2.2.4）来看，机构之间合作较少。

### 2.2.3 智能交通关键技术体系

智能交通系统以信息技术、通信技术、控制技术、智能技术和系统工程等当代高新技术和新理论为基础，以建设高效、安全、绿色和智能的综合交通系统为目标，从人、车、路、环境等不同维度探索和解决交通问题。不同国家的智能交通系统发展

表 2.2.3 “绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	47	95.92%	233	95.10%	4.96
2	USA	1	2.04%	8	3.27%	8.00
3	Japan	1	2.04%	4	1.63%	4.00

## 第二部分 领域报告：土木、水利与建筑工程

表 2.2.4 “绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	Beijing Taikong Panel Ind Corp	China	3	6.12%	9	3.67%	3.00
2	Changzhou Lvjian Plate Ind Co., Ltd.	China	3	6.12%	9	3.67%	3.00
3	Hengyuan Building Board Ind Co., Ltd.	China	3	6.12%	9	3.67%	3.00
4	Shandong New Century Municipal Eng Co	China	2	4.08%	10	4.08%	5.00
5	Univ Northeast Petroleum	China	2	4.08%	6	2.45%	3.00
6	CNPW(Power Construction Corporation of China)	China	2	4.08%	4	1.63%	2.00
7	Shenzhen Inst Building Res Co., Ltd.	China	2	4.08%	3	1.22%	1.50
8	Lifengwang Shishi Environmental Protection Building Material	China	1	2.04%	13	5.31%	13.00
9	CRTC(Railway Eng Res Inst China Academy Railway Sciences)	China	1	2.04%	10	4.08%	10.00
10	Dongguan Yueyuan Packaging Co., Ltd.	China	1	2.04%	9	3.67%	9.00
11	Guangdong Yuansheng Eco-environment Prot	China	1	2.04%	9	3.67%	9.00
12	UYZH(Zhejiang University)	China	1	2.04%	9	3.67%	9.00

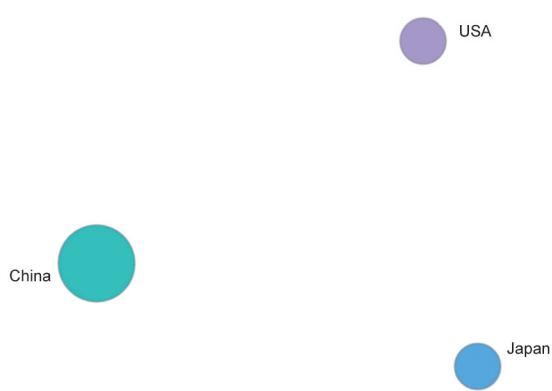


图 2.2.3 “绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

有所侧重，但主要内容上大体一致，包括：智能化交通信息服务系统，智能化交通管理系统，智能化公共交通系统，智能化车辆控制系统，营运车辆管理系统，电子收费系统，安全保障、紧急事件管理与救援系统等。

在新技术的引领和推动下，智能交通系统的发展进入一个全新的时代，跨界融合创新催生出了

许多新的模式和服务内容，推动了智能交通系统的技术内容及模式的升级换代。目前，智能交通系统技术创新主要集中在五大领域： 交通状态全息精确感知与交互：实现前端感知设施的智慧化和网络化，准确、实时、透彻、全面掌握路网整体运行状态，为出行者和交通管理部门提供科学的决策依据； 综合交通系统智能化协同管控与服务：利用大数据、云计算、自动驾驶、车联网、人工智能等新技术，提升交通系统的智能化管控水平，逐步实现对交通个体的精准控制和诱导，提升交通设施的容量和效率； 共享交通调度与服务：以出行即服务为导向，以共享交通为背景，设计多模式共享交通系统，实现对多模式共享交通一体化管理、组织、调度和服务； 载运工具智能化与智能生态驾驶：以网联化为基础的智能汽车，成为代表未来先进技术发展趋势及产业升级方向的战略制高点，相关技术研发已经进入了现场规模测试阶段，未来将给交通系统带来巨大的变革和挑

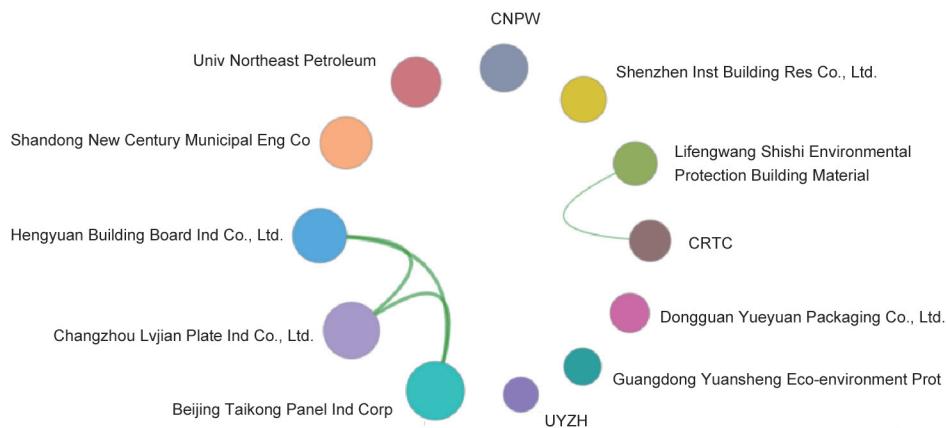


图 2.2.4 “绿色规划及绿色建造技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

战；车路协同系统及主动式交通安全保障：基于无线通信、传感探测等技术获取车辆和道路信息，通过车车、车路通信进行交互和共享，实现车辆和基础设施之间智能协同与配合，达到优化利用系统资源、提高道路交通安全、缓解交通拥堵的目标。车路协同是目前世界交通运输领域的前沿领域，已成为世界各国极力投注资源推动的重点之一，如美国 IntelliDriveSM、日本 Smartway、欧盟 eSafety 等。

“智能交通关键技术体系”工程开发前沿的核心专利为 85 篇，平均被引频次为 12.02(见表 2.1.1)，

排名前四的国家为中国（除中国台湾）、美国、日本和澳大利亚（见表 2.2.5），其中中国机构或个人所申请的专利占比达到了 72.94%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 10.31。从核心专利产出国或地区之间的合作网络（见图 2.2.5）来看，国家或地区的合作较为稀疏。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.6），核心专利产出最多的是 Qualcomm Incorporated。从目前样本数据来看，核心专利产出排名前十的机构之间基本不存在合作（见图 2.2.6）。

表 2.2.5 “智能交通关键技术体系”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	62	72.94%	639	62.52%	10.31
2	USA	17	20.00%	301	29.45%	17.71
3	Australia	2	2.35%	23	2.25%	11.50
4	Japan	2	2.35%	24	2.35%	12.00
5	Finland	1	1.18%	23	2.25%	23.00
6	India	1	1.18%	16	1.57%	16.00
7	The Netherlands	1	1.18%	39	3.82%	39.00
8	Saudi Arabia	1	1.18%	16	1.57%	16.00
9	Sweden	1	1.18%	10	0.98%	10.00

## 第二部分 领域报告：土木、水利与建筑工程

表 2.2.6 “智能交通关键技术体系”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	QCOM(Qualcomm Incorporated)	USA	5	5.88%	61	5.97%	12.20
2	UYQI(Tsinghua University)	China	2	2.35%	35	3.42%	17.50
3	UYXN(Xidian University)	China	2	2.35%	25	2.45%	12.50
4	ZGTH(China Railway Signal & Communication Corporation Limited)	China	2	2.35%	25	2.45%	12.50
5	HAIT(Harbin Institute of Technology)	China	2	2.35%	24	2.35%	12.00
6	IBMC(International Business Machines Corporation)	USA	2	2.35%	23	2.25%	11.50
7	Xi'an Feisida Automation Eng Co., Ltd.	China	2	2.35%	21	2.05%	10.50
8	Wuhan Fenghuo Zhongzhi Digital Technology	China	2	2.35%	17	1.66%	8.50
9	Bravioz Oy	Finland	1	1.18%	40	3.91%	40.00
10	TTTA(Tata Consultancy Service Co., Ltd.)	India	1	1.18%	39	3.82%	39.00

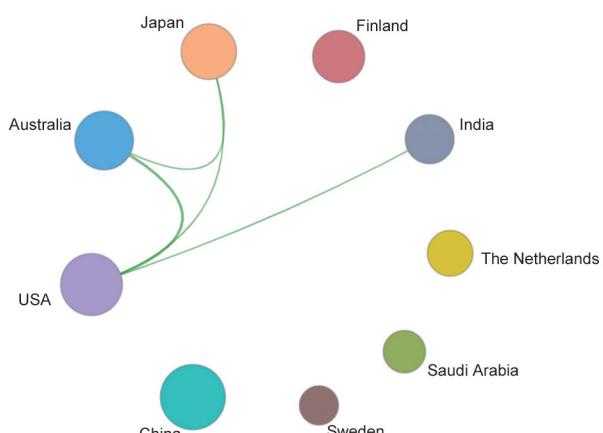


图 2.2.5 “智能交通关键技术体系”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

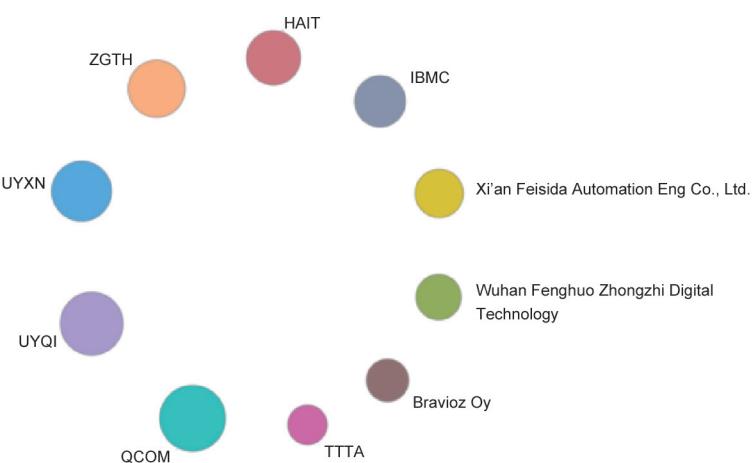


图 2.2.6 “智能交通关键技术体系”工程开发前沿的主要机构间合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：崔俊芝 陈以一

院士专家：

崔俊芝 欧进萍 梁文灏 龚晓南 杜彦良  
胡春宏 钮新强 肖绪文 吴志强

其他专家：

陈仁朋 池明曼 樊健生 高 军 顾冲时  
郭蓉寰 韩继红 洪开荣 李安桂 李德英  
李 惠 刘加平 刘仁义 罗尧治 马 军  
孟凡超 乔丕忠 曲绍兴 任伟新 沈果毅  
时蓓玲 孙 剑 谈广鸣 唐海英 王发洲  
王卫东 吴 昊 熊鲁霞 徐 斌 徐赵东  
杨 峰 张洛先 赵铁军 郑飞飞 郑 刚  
朱若霖

工作组成员：

工程院土木、水利与建筑工程学部办公室：

唐海英 邢慧娴

FSCE 期刊编辑部：

结构工程：陈以一 赵宪忠 王 伟

桥梁工程：葛耀君 孙 智

岩土及地下工程：朱合华 庄晓莹 刘 芳

水利工程：黄文锐 蔡 奕

交通运输工程：凌建明 肖飞鹏

同济大学相关学科专家：

建筑学：李振宇 谭 峥

城乡规划与风景园林：张尚武 庞 磊

结构工程：顾祥林 张伟平 吕西林 李国强  
周 颖

桥梁工程：李建中 孙利民

岩土及地下工程：黄宏伟 丁文其 蒋明镜

袁 勇

暖通空调：张 旭 周 翔

土木建筑材料：蒋正武 陈 庆

市政工程：夏四清

工程力学：李 岩 王华宁

测绘工程：童小华 陈 鹏

水利工程：刘曙光

同济情报所：陈 欣 姚俊兰

秘 书：

吴宇清 刘 芳，FSCE 期刊编辑部

李 敏，同济土木工程学院

姚俊兰，同济情报所

桂晓澜，高等教育出版社

报告执笔人名单：

负责执笔人：

陈以一 葛耀君 朱合华

其他执笔人：

结构工程：顾祥林 赵宪忠 张伟平 贾良玖

桥梁工程：孙 智

岩土及地下工程：张冬梅 闫治国 刘 芳

水利工程：蔡 奕

建筑学：李振宇 谭 峥

暖通空调：张 旭

城乡规划与风景园林：张尚武 庞 磊

道路与铁路工程：肖飞鹏

土木建筑材料：蒋正武 陈 庆

测绘工程：陈 鹏

市政工程：夏四清

同济情报所：姚俊兰

## 六、环境与轻纺工程

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

环境与轻纺工程领域（以下简称环境领域）组所研判的 Top10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及了环境科学技术、环境工程、气象科学、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 7 个学科方向。其中，各个前沿自 2012—2017 年的逐年核心论文发表情况见表 1.1.2。

##### （1）污染物在多介质、多界面下的迁移转化机理

污染物的迁移是指污染物在环境中所发生的空间位移及其所引起的富集、扩散和消失的过程，而污染物转化是指污染物在环境中通过物理、化学或生物的作用改变存在形态或转变为另一种物质的过程。环境系统是多介质的，具有不同的环境界面，因此，污染物在环境介质间的迁移导致介质污染，在介质界面处的转化决定污染的水平。

该研究前沿聚焦于碳、氮、磷、硫、重金属和有机污染物在水—气、水—土、气—土及其与生物接触面等环境界面下的迁移、转化、分配与归趋行为以及对环境和生态系统的影响机制。由于环境系统具有多介质、多界面、多组分、多流态的特点，导致污染物在环境系统中的迁移转化过程极为复杂，定性描述相对容易，定量刻画非常困难，因此，主要研究方向包括污染物在环境介质间的分配与归趋行为、多介质环境中污染物的迁移转化机理、微界面对污染物迁移转化的控制与影响以及复杂体系中污染物迁移转化的过程模拟等。

传统环境污染与控制研究基本局限于介质属性，环境领域的科学家往往也依据重点研究的介质来区分，随着环境系统观念的深化，继续开展水、气、土或生物单一介质污染的研究将不能解决我国所面临的复杂环境问题。未来的环境污染与控制研究，将摒弃将污染物从一类介质转移到另一类介质的惯性思维，通过统筹考虑水、气、土污染问题，

表 1.1.1 环境领域 Top10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	污染物在多介质、多界面下的迁移转化机理	483	22 579	46.75	2013.24	—	—
2	大气复合污染机理	182	12 610	69.29	2014.02	—	—
3	大气污染的健康效应	1119	68 394	61.12	2013.49	—	—
4	环境纳米复合材料净污技术及其原理	11	291	26.45	2016.27	27.3%	0.00
5	高分辨率全球海洋环流模型	29	655	22.59	2014.48	27.6%	0.00
6	海洋酸化	38	1852	48.74	2013.66	15.8%	0.00
7	天气气候的可预测性及模式发展	14	731	52.21	2014.14	14.3%	0.00
8	基于肠道微生物组学的食品营养代谢机理研究	20	2112	105.60	2013.10	—	—
9	功能型与智能型可穿戴柔性材料	152	6221	40.93	2015.01	16.4%	0.02
10	染整废水的净化技术	14	402	28.71	2016.07	14.3%	0.00

表 1.1.2 环境领域 Top10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	污染物在多介质、多界面上的迁移转化机理	175	138	79	68	18	5
2	大气复合污染机理	31	28	58	39	24	2
3	大气污染的健康效应	324	287	258	157	74	19
4	环境纳米复合材料净污技术及其原理	0	0	0	2	4	5
5	高分辨率全球海洋环流模型	7	2	5	4	7	4
6	海洋酸化	9	9	11	4	5	0
7	天气气候的可预测性及模式发展	1	3	4	5	1	0
8	基于肠道微生物组学的食品营养代谢机理研究	8	5	4	3	0	0
9	功能型与智能型可穿戴柔性材料	9	17	28	33	40	25
10	染整废水的净化技术	0	0	0	4	5	5

深入研究污染物在介质间的迁移过程及其在界面处的转化机制，从真正意义上实现对环境污染的准确刻画与有效控制。

### (2) 大气复合污染机理

大气复合污染是指由多种来源的多种污染物在一定的大气条件下（温度、湿度、光照等）发生多种界面间的相互作用、彼此耦合构成的复杂大气污染体系，表现为大气氧化性物种增加，细颗粒物浓度上升，大气能见度显著下降等。伴随着中国经济的高速增长和城市化进程的不断加速，城市和区域大气环境质量快速恶化，先是以煤为主要能源所产生的高浓度二氧化硫和颗粒物，后是快速增加的机动车所排放的大量氮氧化物和挥发性有机物，这些一次污染物以及由一次污染物在大气中发生复杂反应生成的二次污染物，与天气、气候系统相互作用和影响，形成高浓度的污染，并在大范围的区域间相互输送与反应，最终导致大气能见度降低，灰霾现象频繁发生，形成区域性的大气复合污染。围绕大气复合污染形成的物理与化学过程与控制技术原理的重大科学问题，揭示形成大气复合污染的关键化学过程和关键大气物理过程，阐明大气复合污染的成因，建立大气复合污染成因的理论体系，发展大气复合污染探测、来源解析的新原理与新方法是

该领域的研究方向。对这些内容的研究将为解决全球大气污染问题，乃至气候问题提供更多更强的理论基础和科学依据。

### (3) 大气污染的健康效应

大气污染对人体健康具有复杂而广泛的不利影响，这已成为全球社会发展的前沿问题。最新权威报告将大气污染确定为全球疾病负担（GBD）的主要风险因素，造成 3.1% 的伤残调整生命年（DALYs）。大气污染是由可吸入颗粒物、重金属元素以及挥发性有机物等构成的复杂混合污染物，渗透在人类生活的各个方面。众多基于流行病学和病理生理学的研究表明，大气污染，尤其是可吸入空气动力学直径小于  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) 和  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 的颗粒，增大了患呼吸系统疾病（如哮喘、慢性阻塞性肺病、肺癌）与心脑血管疾病（如心肌梗塞、心力衰竭、中风）的风险。老年受试者、孕妇、婴儿和本身患有同类疾病的人群更易受到大气污染的不利影响。因此，积极开展大范围的研究工作，全面深入分析大气污染对人体健康的影响，对于推进我国大气环境保护和提高居民健康水平具有重要的现实意义。

### (4) 环境纳米复合材料净污技术及其原理

纳米材料指至少某一维度的尺寸在 1~100 纳米

范围的材料。纳米材料因具有高比表面积和反应活性，在污染物高效净化与深度处理（如吸附、催化降解等）方面具有巨大的优势，为发展环境污染防治新技术提供了新方向。但纳米颗粒材料存在易团聚失活、操作困难等技术瓶颈，鲜见规模化应用报道，通过固定化策略制备纳米复合材料是突破其应用瓶颈的有效策略。如纳米氧化铁、氧化锰等金属氧化物深度去除水中重金属等污染物性能突出，石墨烯、碳纳米管等碳材料以及沸石、黏土矿物、活性炭等多孔材料因其导电/限域/支撑等特性而成为上述金属氧化物的良好载体。近年来，国内外科学家发展了多种类型的环境纳米复合材料并开展了其在环境污染物净化方面的研究工作。

近期研究前沿论文报道的环境纳米复合材料主要包括纳米金属氧化物@壳聚糖、纳米氧化锌@蒙脱石、纳米氧化锰@活性炭、载钴碳纳米管、纳米氧化铜@沸石、纳米金属氧化物@多孔树脂等具有不同结构和功能特性的复合材料，研究的净污过程主要包括水中重金属、砷、氟、磷等污染物的吸附去除、有机污染物的催化降解、汽油脱硫等。目前，环境纳米复合材料净污技术研究总体处于实验室探索阶段，鲜见工程化应用报道。进一步发展大颗粒、操作简便、可再生与循环利用的纳米复合材料，对于环境纳米技术从实验室研究走向工程化应用具有关键性意义。

### （5）高分辨率海洋环流模型

海洋环流包含多个空间和时间尺度的物理过程，高分辨海洋环流模型是认识和预报海洋多尺度动力过程与海洋环境的主要手段之一。近年来随着海洋环流模式的发展和计算能力的提高，海洋数值模式已经能够较为准确地模拟大尺度环流结构，并具备了一定的海洋中尺度过程刻画能力。然而，由于理论研究进展相对缓慢，缺乏对海洋中小尺度动力过程及其相互作用的深入理解，目前国内外主流的海洋环流模型尚无法有效实现对海洋关键中小尺度过程的准确模拟。针对这些瓶颈和前沿问题，目

前主要的研究方向与发展趋势包括：一方面，发展超高分辨率海洋环流模型，并结合高分辨率海洋观测，推动中小尺度海洋动力学的理论创新，通过基于物理过程的参数化方案改进，提高对海洋中小尺度动力过程与海洋环境的模拟能力；另一方面，在高分辨率海洋环流模型基础上，进一步发展基于卫星遥感和现场观测的资料同化技术，通过同化观测数据以减小模型对海洋环境要素的计算误差，提高海洋环流模型对海洋多尺度过程与环境要素的预报能力。

### （6）海洋酸化

随着人为 CO<sub>2</sub> 升高及海水吸收 CO<sub>2</sub> 增多，以及气候变化导致的陆源入海物质及海洋上升流改变等多种因素导致了海水酸度（pH）增加的过程被称为海洋酸化，对珊瑚礁、近海养殖等海洋生态系统造成了极大的影响。目前，全球海洋正处于 5500 万年以来海洋酸化速度最快的时期。按照目前人为排放 CO<sub>2</sub> 浓度的增长速率估算，预计 2100 年前表层海水 pH 将下降 0.3~0.4（降至 7.8 左右），即海水酸度将比 1800 年增加 1~1.5 倍。为评估海洋酸化带来的危害及风险，目前海水酸化的主要研究方向包括：一是研究海洋酸化的成因、过程与反应机制，海洋酸化与海洋物理化学变化的关系，海洋酸化的参数变化与建模分析；二是从易受影响的敏感生物入手，研究海洋酸化对钙化生物早期生命过程、进化适应与病变反应的影响；三是选择代表性物种先行研究，如珊瑚礁与藻类；四是追溯历史，通过地质矿物研究推演过去的气候变化与酸化事件。

海洋酸化是国际海洋研究的热门领域，除上述提及的研究主题外，该领域还呈现出如下发展趋势：

研究对象由直接受影响的敏感生物逐渐扩展到大型哺乳动物等顶层捕食者；研究方法从简单的实验室研究提升为更接近实际的原位围隔试验和更先进的技术设备；研究内容从早期发育繁殖与幼虫生长转向更多的生命过程、生理反应、功能行为及基因表达；评估范围从单个个体上升到群体系统

水平与多层次响应研究；研究区域从沿海代表性区域延伸到更广泛的大洋甚至深海；研究参数从单一的 pH 变化发展为多因子联合试验与协同效应分析。

### (7) 天气气候的可预测性及模式发展

短期天气预报和中长期气候预测的准确率是国内外民众所关心的重要问题，也是当今国际大气科学领域的重点前沿问题。目前主要的手段是通过数值模式来进行天气预报和气候预测。欧洲中期天气预报中心（简称欧洲中心）、英国、美国拥有世界一流的预报系统和模式。目前欧洲中心的高分辨率全球模式水平分辨率已经达到 9 km；全球集合预报系统分辨率提高到 18 km，可用于未来 15 天集合预报。欧洲中心模式系统对全球大气环流和灾害性天气的中短期预报技巧也处于世界领先地位，比如对 2012 年 10 月 Sandy 飓风在 15 天前就可进行成功预报。英国气象局在模式发展上有其独到之处，是目前全球唯一发展和实现了天气气候一体化模式的国家，即：从中短期的全球和区域天气预报到延伸期预报和月—季节预测，以及 100 年气候预估，都使用的是同一个模式系统框架。美国的全球数值天气预报技巧总体位于世界第三位，成功预报了 2015 年冬季纽约城大暴风雪。

中国正在已经建立的 GRAPRES 全球区域统一框架的数值天气预报业务系统基础上，自主改进和发展资料同化、模式动力物理、集合预报等适宜技术，建立完整的 GRAPES 技术体系，实现从中国区域 3 km 左右到全球 10~25 km 分辨率的 GRAPES 数值确定性和数值集合预报，缩小与国际先进水平的差距。

### (8) 基于肠道微生物组学的食品营养代谢机理研究

肠道是人体重要的消化、免疫和神经感知器官。肠道微生物种类繁多，近年来的研究发现，肠道微生物组与人体的多种疾病密切相关，益生菌与营养膳食因子可通过调控肠道微生物而改善肠道健康，

已经掀起了世界性的研究浪潮。明确饮食结构及其组分对肠道微生态影响，全面认识膳食营养成分通过肠道微生物介导影响代谢性疾病发生、发展的规律及内在作用机制，建立肠道微生态变化与人类健康状况之间的关系，预测不同的膳食组成对代谢性疾病发生的风险，进而设计新的膳食组合配方及基于风险分析的治疗对策，相关研究对促进人类营养健康具有重大现实意义。

### (9) 功能型与智能型可穿戴柔性材料

研究功能型与智能型可穿戴柔性材料的目的是将柔性材料通过制造和加工成为功能型和智能型的电子器件，其制成的器件通过传感器感知外界环境的变化，将变化所产生的信号通过信息处理器作判断处理，并发出指令，然后通过驱动器调整材料的各种状态，以适应外界环境的变化，从而实现自诊断、自调节、自修复等多种功能。用于制造的材料需要具有高速的电子迁移率和良好的整体导电性，于此同时还需要具有可实际使用的机械性能，安全性能和环境稳定性，而恰当的材料选择和制造工艺是实现这些目标的关键。其应用领域包括电子智能防护服、电子智能监测服、可穿戴计算机服装、无线遥感与通信服、休闲娱乐服等。

### (10) 染整废水的净化技术

印染行业生产过程会排放大量废水，染整废水具有成分复杂、有机物含量高、盐含量高、色度大等特点，是对环境影响很大的难处理工业废水，新型染料和助剂的使用加剧了染整废水难以生化降解的问题。仅进行常规生化 / 物化处理，染整废水的 COD 及色度难以满足排放或回用标准，其深度净化成为行业亟待解决的问题。“催化氧化技术”近年来成为染整废水深度净化领域的前沿技术，该技术在催化剂的作用下，利用光、电或环境友好型氧化剂将废水中难降解的有机污染物降解转化为无毒小分子有机物或彻底矿化。

催化氧化技术主要包括电化学氧化法、Fenton 法、光催化氧化法、催化臭氧氧化法等，在实践应

用中均存在不同程度的问题。该领域未来研究的发展趋势是对现有技术不足的突破和技术集成。其中包括：开发高效、低成本、高稳定的新型电极材料；发展负载型光催化氧化催化剂和相应催化氧化反应器；通过反应器设计和废水预处理工艺提高光催化氧化中光的利用率；发展多相催化臭氧氧化技术；以及对现有催化氧化净化技术进行优势组合，如电催化+臭氧协同技术、催化臭氧氧化—光催化氧化等。

### 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

#### 1.2.1 大气污染的健康效应

大气污染是我国近年来面临的重要环境问题，其复合型的污染特征会导致极为复杂和严重的健康效应。2013年，国际癌症研究机构（IARC）将大气污染正式列为一级致癌物。据估计，全球约有92%的人群生活在空气质量超标地区，每年约有300万例死亡与大气污染有关，其中近90%发生在中低收入国家。大气污染物主要包括可吸入颗粒物（PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>等）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、臭氧（O<sub>3</sub>）、一氧化碳（CO）以及挥发性有机化合物（VOCs）等。众多研究表明，基于流行病学和病理生理学的视角，大气污染与心血管疾病、呼吸系统疾病以及部分癌症具有重要关联。其中，细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）对人体的危害最大，它可以直接穿透肺泡进入血液，其所携带的细菌、病毒、重金属元素等有害物质也会一并被人体吸收。世界各国都将大气污染对人体健康的影响作为研究的重点，目前该领域的研究方向集中在大气污染物浓度与暴露反应的关系、大气污染物的急性与慢性健康效应、大气污染的遗传毒性与非遗传毒性致病机理等方面。我国在大气污染对人体健康影响方面的研究起步较晚，缺乏长期系统的监测和数据积累。

通过对大气污染的健康效应研究前沿核心论文

的解读发现，该研究前沿下有核心论文1119篇，被引频次高达68394次，篇均被引频次为61.12次，多出现在2012—2015年左右（见表1.1.1）。

在1119篇核心论文中，产出国家或地区主要为美国和中国，篇均被引频次分别为71.26次和84.89次（见表1.2.1）；产出机构主要为哈佛大学和加州大学伯克利分校，论文比例分别为7.42%和6.88%，被引频次高达11212次和9938次（见表1.2.2）。

“大气污染的健康效应”工程研究前沿中核心论文发文量排在前三的国家或地区分别为（见表1.2.1）：美国（556）、中国（228）和英国（168），篇均被引频次排在前三的国家或地区分别为瑞士（149.60）、德国（139.42）和荷兰（134.87）。在主要产出国或地区的合作网络中（见图1.2.1），中国和美国合作最多，与英国、加拿大、德国等也有一定的合作。

核心论文发文量排在前三的机构分别为（见表1.2.2）：哈佛大学（83）、加州大学伯克利分校（77）和北京大学（53），篇均被引频次排在前三的机构分别为Univ British Columbia（197.93）、Hlth Canada（195.91）和复旦大学（195.18）。发文较多的中国机构为北京大学、中国科学院和复旦大学（见表1.2.2）。在主要机构间的合作网络中（见图1.2.2），加州大学伯克利分校与Hlth Canada之间的合作数量最大，北京大学与中国科学院、复旦大学以及Univ British Columbia的合作较多。

从施引核心论文的前十国家或地区及研究机构排名来看，主要集中在中国的中国科学院、北京大学和清华大学，美国的哈佛大学、华盛顿大学、加州大学伯克利分校和哥伦比亚大学以及英国的伦敦帝国理工大学（见表1.2.3和表1.2.4）。

综上所述，我国在大气污染的健康效应研究领域处于与国外同类研究并跑的态势，并有逐渐向领跑状态发展的趋势，建议继续加大在该前沿的研究投入，推动相关研究向世界领先水平的加速发展。

表 1.2.1 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	556	49.69%	39 618	57.93%	71.26
2	China	228	20.38%	19 356	28.30%	84.89
3	UK	168	15.01%	17 229	25.19%	102.55
4	Canada	130	11.62%	13 335	19.50%	102.58
5	Italy	106	9.47%	8740	12.78%	82.45
6	Germany	102	9.12%	14 221	20.79%	139.42
7	Spain	92	8.22%	11 044	16.15%	120.04
8	France	90	8.04%	10 580	15.47%	117.56
9	The Netherlands	86	7.69%	11 599	16.96%	134.87
10	Switzerland	72	6.43%	10 771	15.75%	149.60

表 1.2.2 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	83	7.42%	11 212	16.39%	135.08
2	Univ Calif Berkeley	77	6.88%	9938	14.53%	129.06
3	Peking Univ	53	4.74%	3292	4.81%	62.11
4	Univ Utrecht	50	4.47%	8923	13.05%	178.46
5	US EPA	47	4.20%	8512	12.45%	181.11
6	Hlth Canada	43	3.84%	8424	12.32%	195.91
7	Chinese Acad Sci	43	3.84%	3074	4.49%	71.49
8	Univ British Columbia	42	3.75%	8313	12.15%	197.93
9	Ctr Res Environm Epidemiol CREAL	42	3.75%	2830	4.14%	67.38
10	Fudan Univ	40	3.57%	7807	11.41%	195.18

表 1.2.3 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	1852	31.13%	2014.4
2	China	890	14.96%	2014.7
3	UK	752	12.64%	2014.5
4	Germany	445	7.48%	2014.6
5	Canada	412	6.93%	2014.5
6	Australia	368	6.19%	2014.7
7	The Netherlands	327	5.50%	2014.5
8	Italy	315	5.30%	2014.5
9	Spain	298	5.01%	2014.5
10	Switzerland	290	4.87%	2014.6

表 1.2.4 “大气污染的健康效应”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Harvard Univ	278	18.42%	2014.4
2	Chinese Acad Sci	217	14.38%	2014.8
3	Univ Washington	180	11.93%	2014.6
4	Univ London Imperial Coll Sci Technol & Med	139	9.21%	2014.1
5	Univ Calif Berkeley	137	9.08%	2014.2
6	Peking Univ	119	7.89%	2014.4
7	Columbia Univ	114	7.55%	2014.6
8	Univ British Columbia	111	7.36%	2014.8
9	Univ Utrecht	110	7.29%	2014.3
10	Tsinghua Univ	104	6.89%	2014.6

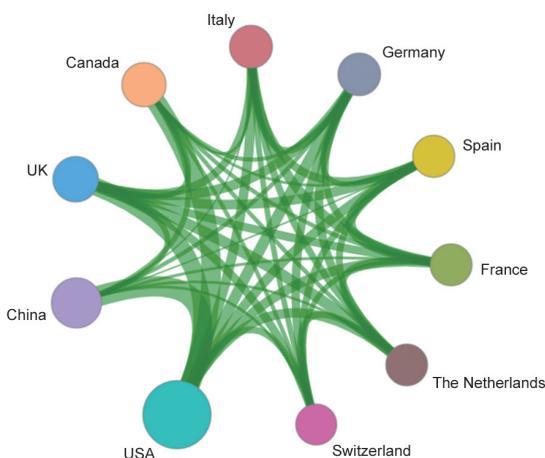


图 1.2.1 “大气污染的健康效应”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

### 1.2.2 高分辨率全球海洋环流模型

海洋环境预报是人类海上活动的基础，人类活动需求驱动着海洋环流模型的发展。20世纪90年代以来，随着海洋观测、数据同化和高性能计算机等技术的进步，高分辨率海洋环流数值模型在全球海洋业务化需求的驱动下得到了快速发展，形成了一批国际知名的海洋环流数值模型，包括HYCOM、POM、ROMS、NLOM、HAMSOM、LICOM、NEMO 和 MOM 等。海洋环流包含了从几千公里尺度的大尺度环流，一直到厘米量级小尺度湍流混合的多尺度动力过程，且多尺度过程之间

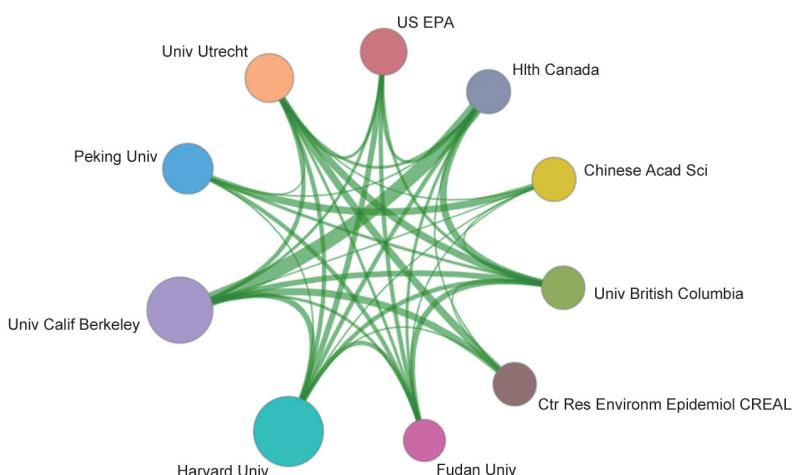


图 1.2.2 “大气污染的健康效应”工程研究前沿主要机构间的合作网络

相互作用、相互耦合，不同尺度的非线性相互作用使得能量在多尺度动力空间上实现传递与转化。虽然目前高分辨率海洋数值模型已经能够较为准确地模拟大尺度环流结构，并对海洋中尺度过程具有一定的刻画能力，但理论研究缺乏对海洋中小尺度动力过程及其相互作用的深入理解，目前主流环流模式的动力框架与混合参数化方案决定了现有环流模型模拟的中尺度能量趋于逆向串级，无法准确刻画中尺度能量的正向串级与耗散，这是目前制约海洋环境预报发展的主要瓶颈之一，也是高分辨率海洋环流模型发展的国际前沿问题。

针对这些瓶颈和问题，目前主要的研究方向与发展趋势包括：一方面，发展超高分辨率海洋环流模型，并结合高分辨率卫星遥感和现场观测，深入开展海洋中小尺度过程研究，推动海洋动力学理论创新和物理过程的参数化方案研究，通过海洋环流模型的参数化方案改进来提高对海洋中小尺度动力过程与海洋环境的模拟和预报能力。目前这方面工作主要以美国 JPL 实验室的全球超高分辨率环流模型和 NASA 负责的 SWOT 卫星计划为代表。另一方面，在高分辨率海洋环流模型基础上，进一步发展基于卫星遥感和现场观测的资料同化技术，通过三维变分、多尺度耦合等技术手段同化观测数据，以减小模型对海洋环境要素的计算误差，提高海洋环流模型对海洋多尺度过程与环境要素的模拟和预报能力。这方面工作主要以美国弗罗里达州立大学、美国海军研究生院、迈阿密大学等机构联合开发的全球 HYCOM 资料同化模型为代表。

表 1.2.5 是该工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区，可以发现无论是论文比例还是被引频次比例，美国均排名第一，且与其他国家有不小的差距，说明美国在这方面具有较大的研究优势。我国在这方面核心论文数较少，排在第五位，但值得注意的是篇均被引频次达到 31 次，占据第一位。在主要产出国家或地区合作网络中（见图 1.2.3），美国、澳大利亚、加拿大和英格兰之间存在广泛的

合作交流，而我国仅与美国存在合作。

表 1.2.6 是该工程研究前沿中核心论文的主要产出机构，在核心论文数排名前 10 的机构仍然主要集中在美国，我国的研究机构没能出现在排名前十中。根据主要机构间合作网络（见图 1.2.4）可以看出，Univ Michigan、Univ Calif San Diego、Naval Res Lab 和 Bangor Univ 这四个机构之间彼此具有合作关系，Univ Southampton、Woods Hole Oceanog Inst 和 Univ New S Wales 这三个机构之间也具有合作关系。

在施引核心论文的国家或地区排名中，中国排名第四，与排名第一的美国仍有不小的差距（见表 1.2.7）；中国海洋大学和中国科学院在施引核心论文的机构排名中分别位列第六和第七位（见表 1.2.8）。美国的机构在机构排名中仍占据着大多数。

由此可以看出，美国在“高分辨率全球海洋环流模型”的开发上不仅领先于全球，而且和其他国家有着密切的合作。相比之下，中国在该领域还处于跟跑的阶段，应该进一步加强和其他国家和机构间的交流合作，继续加大在该前沿的研究投入，推动该前沿的相关研究从跟跑到并跑到领跑加速发展。

### 1.2.3 功能型与智能型可穿戴柔性材料

由于电子信息系统已经成为我们日常生活中不可或缺的一部分，功能型与智能型可穿戴柔性材料在近几年中成为工程界研究的前沿之一，其是将电子元件与纺织品有机结合，但两者的性能完全不同，前者硬脆，刚度大；后者柔韧，牢度好。这是研究者们需要克服的第一个难题。功能型与智能型可穿戴柔性纺织品通过传感器感知外界环境的变化，将变化所产生的信号通过信息处理器作判断处理，并发出指令，然后通过驱动器调整材料的各种状态，以适应外界环境的变化，从而实现自诊断、自调节、自修复等多种功能。功能型与智能型可穿戴柔性纺织品主要在服装中实现诸多功能，其一般应具有传

## 第二部分 领域报告：环境与轻纺工程

表 1.2.5 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	24	82.76%	560	85.50%	23.33
2	UK	9	31.04%	237	36.64%	26.33
3	Australia	6	20.69%	160	24.43%	26.67
4	France	4	13.79%	71	10.84%	17.75
5	Canada	4	13.79%	89	13.59%	22.25
6	Japan	1	3.45%	30	4.58%	30.00
7	China	1	3.45%	31	4.73%	31.00

表 1.2.6 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Michigan	8	27.59%	152	23.21%	19.00
2	Univ Calif San Diego	5	17.24%	128	19.54%	25.60
3	Univ Southampton	5	17.24%	173	26.41%	34.60
4	Woods Hole Oceanog Inst	5	17.24%	191	29.16%	38.20
5	MIT	3	10.34%	29	4.43%	9.67
6	USN	3	10.34%	96	14.66%	32.00
7	Univ New S Wales	3	10.34%	131	20.00%	43.67
8	Portland State Univ	3	10.34%	41	6.26%	13.67
9	Naval Res Lab	3	10.34%	30	4.58%	10.00
10	Bangor Univ	3	10.34%	30	4.58%	10.00

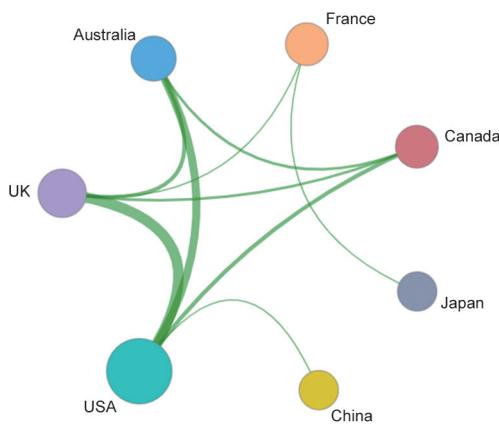


图 1.2.3 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

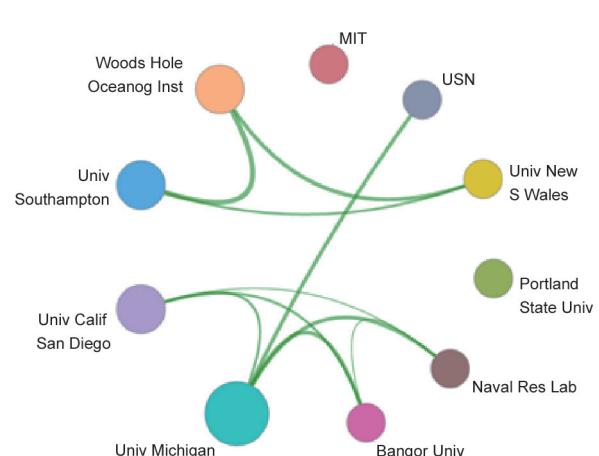


图 1.2.4 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	196	41.09%	2015.5
2	France	59	12.37%	2015.5
3	UK	55	11.53%	2015.1
4	China	41	8.60%	2015.6
5	Australia	35	7.34%	2015.3
6	Japan	28	5.87%	2015.8
7	Germany	24	5.03%	2015.0
8	Canada	24	5.03%	2015.2
9	Norway	8	1.68%	2014.6
10	Sweden	7	1.47%	2015.6

表 1.2.8 “高分辨率全球海洋环流模型”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Calif San Diego	40	17.24%	2015.6
2	Woods Hole Oceanog Inst	34	14.66%	2015.3
3	Univ Washington	23	9.91%	2015.4
4	MIT	23	9.91%	2015.7
5	Univ Southampton	22	9.48%	2014.8
6	Ocean Univ China	20	8.62%	2015.5
7	Chinese Acad Sci	19	8.19%	2015.9
8	Univ Michigan	18	7.76%	2015.2
9	Natl Oceanog Ctr	17	7.33%	2015.4
10	CALTECH	16	6.90%	2015.9

感功能、反馈功能、响应功能、自诊断功能、自修复功能、自调节功能。

### (1) 一维柔性导电材料

基于纤维的功能型与智能型可穿戴柔性材料其必须考虑的一个重要组成是用于制造的材料需要具有高速的电子迁移率和良好的整体导电性，于此同时还需要具有可实际使用的机械性能、安全性能和环境稳定性能，而恰当的材料选择和制造工艺是实现这些目标的关键。目前基于纤维状的柔性导电材料主要包括导电聚合物、金属氧化物和碳材料等，而制造方法中最具应用前景的是纺织技术，其次是

纳米涂层技术等。

### (2) 一维柔性储能材料

研究者们除了探索可穿戴柔性纺织品的本身功能以外，柔性储能元件也是其主要的研究方向，如超级电容器、柔性电池等。特别是纳米技术不断发展，使得直接在纤维表面或者内部构建电子器件成为可能，但是将这些一维纤维装配到三维服装中，并且在穿着和使用中保持它们的性能，在理论和实际都存在巨大的挑战。因此设计功能型与智能型可穿戴柔性元件，需要从材料准备、制造技术和器件结构等方面进行考虑，克服将这些元件集成到一根

纤维或者纱线中，从而装配到服装中进行使用，实现元件与纺织品的一体化。

### (3) 功能型与智能型可穿戴柔性材料的主要应用领域

功能型与智能型可穿戴柔性材料的应用领域主要包括电子元件、可穿戴电子器件和其他应用。其中电子元件包括光纤晶体管、织物天线、电子连接器、纤维电路；可穿戴电子器件包括传感器与传感网络、可穿戴能量转换器、可穿戴能量存储器等；其他应用包括电子智能防护服、电子智能监测服、可穿戴计算机服装、无线遥感与通信服、休闲娱乐

服等。

“功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿主要研究地区为中国、美国和伊朗（见表1.2.9），这三个地区发表的核心论文数已经超过全球所有地区的81%，并且这些文章都集中在近三年之中。该研究前沿中排名前五的研究机构为Inst Color Sci & Technol, Nanyang Technol Univ, Chinese Acad Sci, Xi An Jiao Tong Univ 和 Natl Univ Singapore（见表1.2.10）。

该研究前沿中中国和美国占据领跑地位，而且中国和其他多个国家均有合作关系，是该研究前沿

表 1.2.9 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	82	53.95%	3678	59.12%	44.85
2	USA	25	16.45%	925	14.87%	37.00
3	Iran	19	12.50%	465	7.47%	24.47
4	Singapore	15	9.87%	790	12.70%	52.67
5	Australia	9	5.92%	344	5.53%	38.22
6	Russia	4	2.63%	85	1.37%	21.25
7	UK	4	2.63%	63	1.01%	15.75
8	Saudi Arabia	3	1.97%	181	2.91%	60.33
9	South Korea	3	1.97%	151	2.43%	50.33
10	Japan	3	1.97%	88	1.41%	29.33

表 1.2.10 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Inst Color Sci & Technol	16	10.53%	403	6.48%	25.19
2	Nanyang Technol Univ	9	5.92%	454	7.30%	50.44
3	Chinese Acad Sci	9	5.92%	453	7.28%	50.33
4	Xi An Jiao Tong Univ	7	4.61%	197	3.17%	28.14
5	Natl Univ Singapore	6	3.95%	336	5.40%	56.00
6	MIT	6	3.95%	244	3.92%	40.67
7	Harbin Engn Univ	5	3.29%	114	1.83%	22.80
8	Huazhong Univ Sci & Technol	5	3.29%	605	9.73%	121.00
9	Joint Ctr Energy Storage Res	5	3.29%	216	3.47%	43.20
10	Monash Univ	4	2.63%	175	2.81%	43.75

的重点研究国家（见图 1.2.5）。该研究前沿中研究机构合作较多的为 MIT 和 Joint Ctr Energy Storage Res（见图 1.2.6）。

在施引核心论文的国家或地区排名中，中国排名第一（见表 1.2.11）；中国科学院在施引核心论文的机构排名中排名第一（见表 1.2.12）。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

环境与轻纺工程领域组所研判的 Top10 工程开

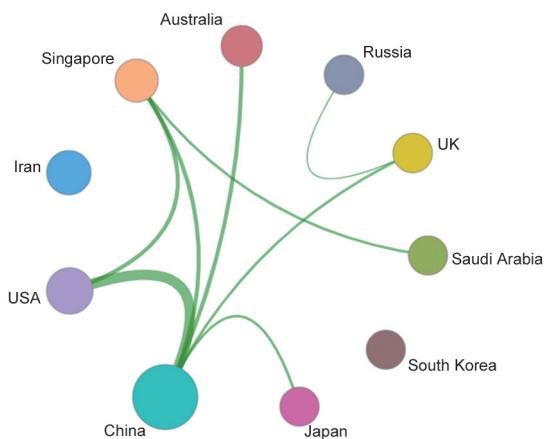


图 1.2.5 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

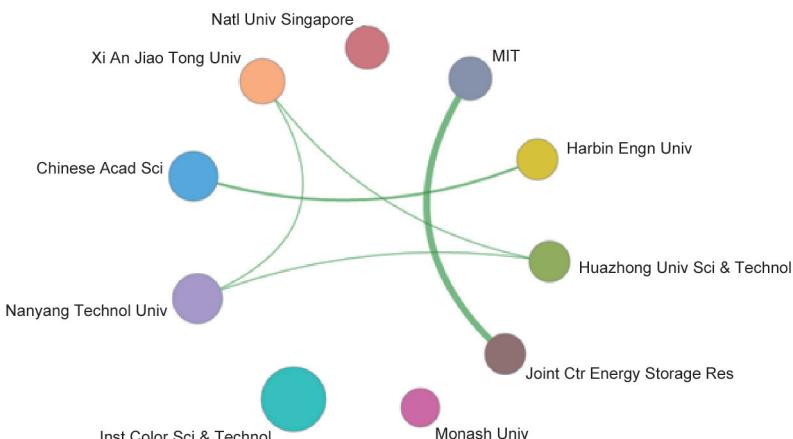


图 1.2.6 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿机构间的合作网络

表 1.2.11 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1765	55.49%	2016.3
2	USA	433	13.61%	2016.0
3	South Korea	207	6.51%	2016.1
4	Iran	168	5.28%	2016.3
5	India	152	4.78%	2016.2
6	Singapore	118	3.71%	2015.4
7	Australia	110	3.46%	2016.0
8	Germany	80	2.51%	2016.2
9	UK	79	2.48%	2016.2
10	Saudi Arabia	69	2.17%	2016.0

## 第二部分 领域报告：环境与轻纺工程

表 1.2.12 “功能型与智能型可穿戴柔性材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	181	28.33%	2016.1
2	Nanyang Technol Univ	58	9.08%	2015.6
3	Natl Univ Singapore	54	8.45%	2015.1
4	Tsinghua Univ	53	8.29%	2016.3
5	Inst Color Sci & Technol	53	8.29%	2016.2
6	Huazhong Univ Sci & Technol	50	7.82%	2016.3
7	Tongji Univ	49	7.67%	2016.3
8	Shanghai Jiao Tong Univ	49	7.67%	2016.0
9	Cent S Univ	47	7.36%	2016.3
10	Xi An Jiao Tong Univ	45	7.04%	2016.7

发前沿见表 2.1.1，前沿涉及了环境科学技术、环境工程、气象科学、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 7 个学科方向。其中，各工程开发前沿自 2012 年至 2017 年的逐年核心专利公开量见表 2.1.2。

### (1) 新能源和清洁能源技术

新能源和清洁能源是指除常规化石能源和大中型水力发电之外的太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能、小水电、核能等。当今世界各国均在积极推动新能源和清洁能源发展，如积极稳妥发展水电、全面协调推进风电开发、推动太阳能多元化利

用、加快发展生物质能、加快发展地热能开发利用、推进海洋能发电技术示范应用、推动储能技术示范应用等。太阳能和风能应用的主要难点问题在于能量转换效率低、成本高、寿命短以及储能难。太阳能光热转换关键材料及光谱选择性吸收涂层的开发是提高太阳能利用率的关键技术问题。风力发电机作为风力发电系统中的核心，其技术水平的革新和技术难题的突破对整个风力发电产业有着极其重要的影响，与其相关的风力发电机的研究、设计、制造等是主要研究方向。发展生物质可再生能源已成为减少环境污染、缓解能源供需矛盾的重要途径，开

表 2.1.1 环境领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	新能源和清洁能源技术	1519	58 880	38.76	2013.07
2	土壤有机污染修复治理技术	780	1116	1.43	2015.47
3	污—废水资源能源回收技术	47	18	0.38	2015.79
4	大气污染控制技术	252	2848	11.30	2013.05
5	遥感雷达自动监测技术	149	5083	34.11	2013.53
6	灾害自动监测预警系统	302	4931	16.33	2013.69
7	自主式水下航行器	1000	6517	6.52	2014.27
8	农药残留监测技术电子化	1000	1100	1.10	2015.4
9	智能化可穿戴纺织品	1000	17 056	17.06	2014.47
10	生态皮革	1745	618	0.35	2015.98

表 2.1.2 环境与轻纺领域 Top10 工程开发前沿的逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
1	新能源和清洁能源技术	664	404	227	149	52	23
2	土壤有机污染修复治理技术	43	47	88	133	192	267
3	污 – 废水资源能源回收技术	2	5	0	6	15	19
4	大气污染控制技术	23	30	34	33	27	40
5	遥感雷达自动监测技术	44	32	40	19	11	3
6	灾害自动监测预警系统	75	77	60	53	30	7
7	自主式水下航行器	100	122	138	166	174	192
8	农药残留监测技术电子化	37	40	156	117	107	354
9	智能化可穿戴纺织品	79	111	190	151	181	219
10	生态皮革	0	0	76	489	566	614

发高效的、经济的生物质气化、液化，生物质发酵产沼气、生物乙醇及生物制氢等关键技术及设备，推动其产业化发展仍是今后一段时期内该领域的前沿方向。

### (2) 土壤有机污染修复治理技术

我国耕地资源短缺，局部地区土壤污染严重，主要污染物有重金属和有机污染物。与重金属污染相比，土壤有机污染更广泛、更复杂，包括多环芳烃等持久性有机污染物，严重影响农产品安全及土地资源的持续利用。因此，亟需发展土壤有机污染修复治理技术。

土壤有机污染修复治理技术于 20 世纪 70 年代开始萌芽，到 20 世纪 80 年代呈现高速发展的趋势。治理技术主要分为物理修复、化学修复和生物修复。常用的物理修复方法有气相抽提、热脱附及焚化等，适用于挥发或半挥发性有机污染物的修复。化学修复技术利用芬顿试剂、高锰酸钾等氧化分解有机污染物，或使用表面活性剂等增效试剂，提高污染物在液相中的溶解度，达到洗脱的目的，适用于难挥发及难降解的有机污染物。生物修复是利用土著微生物、添加菌株或联合植物降解吸收积累有机污染物。由于环境中的污染物往往不是单独存在的，工业集聚地等土壤复合污染问题突出，因此近年来，

联合修复技术越来越受到关注，用于处理不同性质的复杂有机污染场地 / 土壤。

我国的土壤有机污染修复技术研究起步较晚，一方面土壤修复产业迅速发展，另一方面缺乏先进的修复技术与装备，原创技术少，目前尚处于跟跑阶段。经济高效绿色的土壤有机污染修复治理技术仍是未来需要发展的重点。

### (3) 污 – 废水资源能源回收技术

污 – 废水资源能源回收技术是将污 – 废水中的水资源、生物能源和营养物质进行回收利用。污 – 废水中蕴含着宝贵的资源，而当前水处理技术是以去除污染物为主导目标，未能将资源能源进行有效的回收利用。污水治理思路正在由污染物去除向从污水中回收资源能源转变，污水处理厂将成为资源能源回收厂。该开发前沿的关键技术包括以下四个方面：再生水深度处理和安全高效利用技术。开发新型物化、生化技术及高效耦合技术，形成包括新兴污染物去除技术和高品质再生水超深度处理技术的污水深度和超深度处理技术体系。污水处理的能源自给技术。开发研究污水处理厂低碳运行的工艺，如好氧颗粒污泥、厌氧膜生物反应器、厌氧氨氧化技术等；开发污泥热水解、气化、污泥厌氧消化以及与之相关的沼气回收、净化、提纯技术；

开发污水处理的热电联产技术，包括燃料电池、微型燃气轮机等技术。污水处理资源回收技术。研究污水处理过程中资源回收的途径、方法和潜力，以磷回收、纤维素回收、生物柴油回收、聚羟基烷酸回收为目标，形成有实用价值的资源回收技术体系。下一代污水处理厂运行管理与策略优化技术。确定精确控制的因子，集成物联网等技术成果，实现污水厂的自我感知与自我管理，以及节能降耗优化运行与高效控制。今后一段时期内，为了达到资源回收、能源自持、环境友好，基于污－废水资源能源回收技术将是水处理领域的开发前沿。

### (4) 大气污染控制技术

从20世纪中期开始，由于工业化进程发展，污染物排放日益增加，大气污染成为人体健康的重要威胁，世界各国对大气污染控制的重视程度日益提高，形成了一系列包括基本方法、净化设备和工艺流程等的控制措施和技术。大气污染主要包括工业生产产生的有害气体、汽车发动机燃料在不完全燃烧时排出的一些有害物质及其他自然形成的对人体健康构成危害的气态污染物或细颗粒物。目前前两项已成为大气的主要污染源。从污染源种类来划分，大气污染控制技术主要包括颗粒污染物控制技术、气体污染物的控制技术和汽车尾气控制技术等方面，具体又可分为电站锅炉烟气排放控制、工业锅炉及炉窑烟气排放控制、典型有毒有害工业废气净化、机动车尾气排放控制、居室及公共场所典型空气污染物净化、无组织排放源控制、大气复合污染监测模拟与决策支持、清洁生产等领域。国外从清洁能源角度开发控制汽车排放尾气污染，如积极改革燃料和改进燃烧结构，研究高效的尾气处理装置等；同时也在研究开发针对工业生产中的具体污染物的削减和控制技术，如降低煤燃烧中汞的排放等。我国正在逐渐重视相关的控制技术开发工作，目前相关的开发前沿主要包括工业废气分离处理和发动机尾气处理两部分，工业废气处理重点是多种污染物的协同处置、一体化治理、深度脱除等；针

对汽车，主要研发的是尾气净化关键技术。

### (5) 遥感雷达自动监测技术

遥感和雷达在气象科学中的应用主要是包括对回波资料的收集、传输、处理，利用雷达波在大气中的散射、折射和衰减理论，研究云和降水物理、探测各种尺度的天气系统、探测晴空大回波、进行降水定量测量和警戒灾害性天气等。雷达气象学研究工作分为三个主要领域：一是利用多普勒测量研究晴空和多云条件下的大气运动学和动力学；二是包括雨量的定量测量和各种水凝物识别在内的降水测量研究；三是着眼于动力学－运动学来研究降水和大气热力结构。目前，遥感雷达数据在进行短时灾害天气方面已经有了广泛的应用，但随着极端灾害天气发生概率的增加，遥感雷达自动监测技术和雷达及探空智能化水平方面还需进一步发展，还需完善天气雷达的观测布局，如综合考虑水利、民航、兵团等部门对全国统一布网的天气雷达的需求，在现有新一代天气雷达站的基础上进行补充完善，重点补充灾害易发区、监测空白区新一代天气雷达。

### (6) 灾害自动监测预警工程

该工程开发前沿属于环境领域中与气象科学有关的学科，是传统研究领域的深入。近年来气象灾害频发，对社会经济和人民财产造成的损失与危害越来越大，灾害自动监测和早期预警成为减轻灾害的重要方面。目前主要方向是要在气象灾害综合数据库、气象灾害致灾机理、灾害快速评估技术、致灾因子预报预测技术、预警信息传播技术以及气象灾害风险管理方面取得突破，针对暴雨洪涝、台风、雾霾、干旱、高温、低温等不同种类气象灾害，建成基于大数据技术基础的气象灾害综合数据库，全面揭示气象灾害及其风险的特征、发生发展规律和致灾机理，尤其是要在灾害的遥测技术和快速识别技术取得突破，建立较为完善的气象灾害风险防控和减灾管理工程体系，对洪涝灾害、干旱灾害、地震灾害、风暴潮灾害、地质灾害、森林火灾等灾害

的自动监测及早期预警，可实现精准防灾减灾。因此，发展最快和有效的遥感方法和技术，研发气象卫星遥感和地基的气象雷达大数据处理关键技术，建立可视化强、安全性高的国家级多灾种气象灾害综合早期预警系统和工程是减轻灾害发生的关键。

### (7) 自主式水下航行器

海洋水下观测依赖于各种参数观测的传感器探头，为了获取更多实时/准实时、大范围的水下探测，需要将传感器放置在自主可控的水下航行器中，包括自主水下机器人、自主/遥控水下机器人、混合驱动水下机器人、水下滑翔机、波浪滑翔机等。因此，自主式水下航行器是一种将人工智能、探测识别、信息融合、智能控制、系统集成等多方面技术集中应用于同一水下载体上的无人无缆潜水器装置。基于自主式水下航行器的水下环境主观观测是当前国际研究的前沿，也是海洋环境观测技术的发展趋势。提高自主式水下航行器的运动能力、研究环境海流对其主观观测行为的约束以及研究多水下航行器协作控制与观测是目前发展的主要技术方向。

由于没有连接电缆，自主式水下航行器能够在距母船相当远的区域作业，但这也决定了其操作受航行器自身的导航、控制系统和续航能力的制约。因此，发展可靠性好、集成度高并具有综合补偿和校正能力的智能导航系统，提高控制系统的自适应性以及开发高效率、高密度能源是目前我国自主式水下航行器研发需要突破的关键技术。

### (8) 农药残留监测技术电子化

农药化学污染物残留监测的传统定性定量方法都是以相应的物质标准作参比。世界进入信息化时代，把物质标准转化成电子标准，通俗讲，为每种农药建立一个自身独有的电子身份证，就能实现农药残留为检测技术电子化、信息化，从而可以实现农药残留监测由电子标准替代实物标准作参比的传统方法，也实现了农药残留由传统靶向检测向非靶向筛查的跨跃式发展，其方法效能是传统的色谱法或质谱无法比的。这将是农药化学污染物残留检测

技术跨时代的进步。这项技术现在已露萌芽，预计再过10~20年将会普遍推广应用。

### (9) 智能化可穿戴纺织品

智能化可穿戴纺织品其特征是将织物和电子器件相结合，呈现出现有电子设备无法实现的柔韧性和典型尺寸。电子器件和织物融为一体，织物即是器件，有时不易被发觉。智能化可穿戴纺织品可以更容易地适应特定的计算和传感需求的变化，可穿戴系统能够自动识别用户的活动和行为状态以及其周围环境，并根据这些信息来调整系统的配置和功能。智能纺织品领域特别关注材料及其制造工艺，各种创新技术不断涌现，目的实现产品的整体性、灵活性、人体工效性、低能耗和自我控制。

从工程学科上来看，智能化可穿戴纺织品涉及纺织工程、材料学和电学及控制等多个学科。目前的主要研究前沿是：一维柔性导电纱线的制备，一维柔性储能材料的装配，以及柔性传感器、电子智能防护服、电子智能监测服等智能化可穿戴服装。

### (10) 生态皮革

制造生态皮革/裘皮及其制品，是国内外皮革行业最重要的战略目标。铬鞣法因其优良的革性能一直是制革工业占据主导地位的鞣制方法，但其易导致废水铬含量超标、产生含铬固废等问题，具有潜在的环境风险。因此，实施无铬鞣法，从源头消除铬污染，是实现生态制革最重要的发展方向，也是当前国际皮革领域科技竞争的前沿。

在无铬生态皮革/裘皮制造技术开发方面，目前主要研究内容及拟解决的关键科技问题是： 在系统研究和认识有机鞣剂作用机理、构效关系等重要科学问题的基础上，分别开发能够替代铬鞣剂用于皮革、裘皮制造的生态有机鞣剂系列产品，并建立其优化应用工艺技术； 在系统研究和认识两性染整材料分子结构和电荷性质的调控方法、构效关系等重要科学问题的基础上，开发与生态皮革有机鞣制体系相匹配的高结合性两性复鞣剂、两性加脂剂系列产品，并建立其优化应用工艺技术； 通过

研究和构建针对多组分复杂体系的生态性评价方法，建立皮革鞣制染整材料、皮革 / 裳皮制造过程、皮革 / 裳皮制品的生态性评价方法及标准；通过解决因鞣制、染整材料的变化而导致的皮革制造工艺平衡、产业链技术衔接等技术难题，建立以关键材料为支撑的生态皮革全产业链集成技术。

因此，我国皮革行业目前的发展主要以生态皮革鞣制、染整关键材料研发为技术突破口，构建关键材料生产、生态皮革制造、生态皮革制品加工全产业链集成技术，研究并建立相关产品的生态性评价方法及标准。

### 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

#### 2.2.1 土壤有机污染修复治理技术

土壤有机污染修复治理技术自 20 世纪 70 年代萌芽以来，发展已较为成熟。目前常用的土壤有机污染修复技术有植物修复、微生物修复、气相抽提、热脱附、表面活性剂增溶洗脱、化学氧化 – 还原、固定 – 稳定化、电动力学修复、客土法等。其中，物理修复技术效果较好，但费用昂贵，不适合大规模应用；化学修复技术中的氧化剂和增效试剂可能会滞留在土壤中，造成二次污染，存在一定生态风险；因此，当前重点关注生物修复技术以及协同修

复技术。近几年来，我国土壤修复产业迅速发展，修复技术不断创新，开发具有自主知识产权的移动式、模块化的高效经济绿色土壤有机污染修复技术装备已经势在必行。

近 6 年来的 780 项土壤有机污染修复治理技术的核心专利中，我国公开量高达 766 项，占所有公开专利的 98.21%（见表 2.2.1）。对比近 30 年我国与美国在有机污染修复技术专利的发展趋势，发现我国土壤修复产业起步较发达国家晚 20 年，但近 6 年来土壤修复产业迅速发展，相关专利公开量呈指数增长，在土壤有机污染修复技术上的研发投入在全世界名列前茅。相比之下，发达国家土壤有机污染修复技术在 20 世纪 90 年代就较为成熟，近年相关专利公开量逐渐减少。与此同时，我国土壤有机污染修复相关专利平均被引频次为 1.33，远低于美国、加拿大等发达国家，从侧面反映我国土壤有机污染修复技术原创较少，创新不足，影响力不够，修复技术水平仍有待提高。

从排名前十的核心专利产出机构看（见表 2.2.2），皆为我国机构。其中高校 / 研究所 5 位，公司 5 位。排名第一为青岛理工大学，专利公开量为 19 项，主要研究石油污染以及重金属 – 有机物复合污染土壤的修复，其次为北京建工环境发展有限责任公司、上田环境修复股份有限公司、中科鼎

表 2.2.1 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	766	98.21%	1015	90.95%	1.33
2	USA	4	0.51%	28	2.51%	7.00
3	Canada	3	0.38%	22	1.97%	7.33
4	South Korea	2	0.26%	1	0.09%	0.50
5	Australia	1	0.13%	47	4.21%	47.00
6	Ireland	1	0.13%	1	0.09%	1.00
7	Israel	1	0.13%	0	0.00%	0.00
8	Japan	1	0.13%	2	0.18%	2.00
9	The Netherlands	1	0.13%	0	0.00%	0.00

实环境工程有限公司，三家公司分别成立于 2008 年、2010 年、2002 年，主要关注异位修复装置。中国科学院沈阳应用生态研究所核心专利数量排名第 5，重点研究表面活性剂协同植物强化微生物修复有机污染土壤。此外，浙江大学、南京土壤所及常州大学的专利公开量分别排名第 6 位、第 8 位、第 10 位。从目前样本数据来看，本前沿专利技术

主要产出国家或地区间基本没有研发合作关系（见图 2.2.1）。本前沿专利技术主要产出高校 / 研究所及企业间基本没有研发合作关系（见图 2.2.2），企业研发主体地位尚未建立，产业化程度不高，市场尚不成熟，土壤有机污染修复技术上的产学研合作仍有很大空间。

近 6 年公开的核心专利中主要分为两大类：土

表 2.2.2 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	UNQT	19	2.44%	1	0.09%	0.05
2	BER	14	1.79%	16	1.43%	1.14
3	JSER	13	1.67%	22	1.97%	1.69
4	BDEE	11	1.41%	62	5.56%	5.64
5	CSAE	11	1.41%	22	1.97%	2.00
6	UNZH	11	1.41%	53	4.75%	4.82
7	BGET	10	1.28%	0	0.00%	0.00
8	CISS	10	1.28%	47	4.21%	4.70
9	CMEG	10	1.28%	12	1.08%	1.20
10	UNCZ	8	1.03%	3	0.27%	0.38

注：UNQT 表示 Univ. Qingdao Technological；BER 表示 BCEG Environmental Remediation Co. Ltd.；JSER 表示 Jiangsu Suntime Environmental Remediation Co. Ltd.；BDEE 表示 Beijing Dingshi Environmental Engineering Co. Ltd.；CSAE 表示 Shenyang Applied Ecology Inst.；UNZH 表示 Univ. Zhejiang；BGET 表示 Beijing Geoenviron. Eng. & Technology Inc.；CISS 表示 Inst. Soil Sci. Chinese Acad. Sci.；CMEG 表示 China City Environment Protection Engineering Co. Ltd.；UNCZ 表示 Univ. Changzhou。

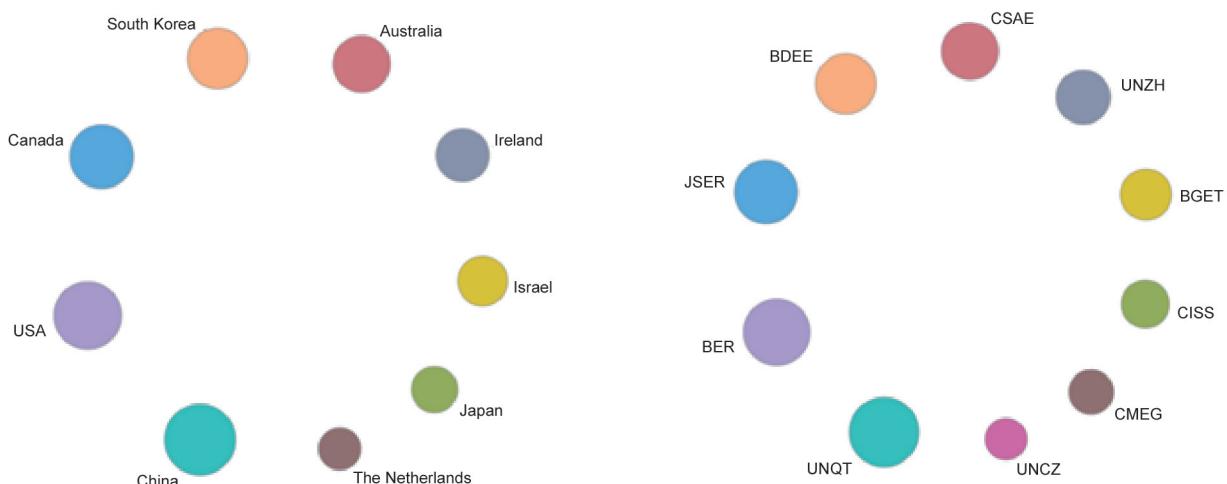


图 2.2.1 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

图 2.2.2 “土壤有机污染修复治理技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

壤有机污染修复装备与土壤有机污染修复添加剂。添加剂作为有机污染修复技术辅助材料，以专性微生物菌剂、生物质-矿物等复合材料为主，生物炭及纳米材料等应用较少。土壤有机污染修复装备的核心专利以热脱附、微生物修复以及增溶洗脱为主。热脱附及气相抽提技术主要对装备的组件进行了改装，部分利用电、微波、太阳能、等离子体等技术进行能量优化，促进有机污染物分解，并未有原理上的创新；微生物修复、增溶洗脱以及植物修复大部分在原有机理的基础上，添加了生物炭、纳米材料或易降解碳源促进降解；化学氧化主要对原有工艺的反应条件进行优化。

近年来组合技术发展较快，尤其是2017年以来，土壤污染修复联合技术以及成套装备专利公开量显著增加，如化学氧化协同微生物降解有机污染物、表面活性剂协同植物促进微生物降解有机污染物以及电化学氧化技术发展较快，相比单一处理技术能更好地适应不同类型有机污染物处置，并且能够很好地修复重金属-有机污染物复合污染，以及土壤-地下水有机污染，具有很好的前景，这也是本前沿研发的重要趋势。

### 2.2.2 遥感雷达自动监测技术

近年来，随着极端灾害天气发生概率的增加，遥感雷达数据在对短时灾害天气监测方面具有重要的应用，但仍然存在一些问题。在遥感雷达自动监测技术和雷达及探空智能化水平方面还需进一步发展；需进一步完善天气雷达的观测布局，如综合考虑水利、民航、兵团等部门对全国统一布网的天气雷达的需求，在现有新一代天气雷达站的基础上进行补充完善，重点补充灾害易发区、监测空白区新一代天气雷达。同时，根据气象灾害防御需要，各地需按照统一观测方法、技术标准和数据格式原则，统筹做好局地天气雷达站和其他地基遥感观测设施布局，逐步统一技术状态，逐步实现利用远程操控或预设程序进行运行控制、软件升级、参数修改、

在线定标等功能，进一步推进设备观测模式自适应性。基于天气实况自动判识功能，逐步实现设备根据实况自动调整观测模式的能力，调整现有的工作模式，实现对不同天气现象不同观测要素的重点采集工作，开展智能观测模式的试验应用。建设飞机气象观测能力，发展长巡时、高性能气象无人机，形成高原无人区、远海下投探空和机载遥感探测能力。建设具备台风探测和气象卫星载校飞功能的综合气象探测专用飞机，定期开展重点区域机动遥感综合观测试验。

“遥感雷达自动监测技术”开发前沿中核心专利的主要产出国家排在前三的国家或地区分别为：美国（126）、中国（5）和芬兰（5），被引频次排在前三的国家或地区分别为美国（4345）、芬兰（115）和日本（86）（见表2.2.3）。

核心专利的产出排在前三的机构分别为：GOOG（11）、MICT（7）和ITLC（6），平均被引频次排在前三的机构分别为FITBIT INC（54.33）、MICT（51.86）和ALARM.COM INC（44.33），都是美国的机构或者公司（见表2.2.4）。

“遥感雷达自动监测技术”的核心专利数目美国排名第一，是该工程开发前沿的重点国家之一，中国虽然处于第二，但与美国相比，专利数相差很大，处于同类开发领域较落后的态势，建议中国加大在该开发前沿的研究投入，推动相关研究向世界领先水平靠拢。

从图2.2.3给出的“遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿国家间的合作网络图可看出，本开发前沿主要是美国与其他大部分国家之间存在合作关系。图2.2.4给出了该开发前沿各个机构间的合作网络图，表明本前沿专利技术在各个机构或者企业之间研发合作关系很弱，他们之间基本没有合作关系。

### 2.2.3 农药残留监测技术电子化

农药多残留监测技术信息化，包括检测技术电

表 2.2.3 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	126	84.56%	4345	85.48%	34.48
2	China	5	3.36%	62	1.22%	12.40
3	Finland	5	3.36%	115	2.26%	23.00
4	Canada	4	2.68%	59	1.16%	14.75
5	UK	4	2.68%	59	1.16%	14.75
6	Germany	3	2.01%	44	0.87%	14.67
7	Japan	3	2.01%	86	1.69%	28.67
8	South Korea	2	1.34%	36	0.71%	18.00
9	Switzerland	1	0.67%	38	0.75%	38.00
10	France	1	0.67%	43	0.85%	43.00

表 2.2.4 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	GOOG	USA	11	7.38%	232	4.56%	21.09
2	MICR	USA	7	4.70%	363	7.14%	51.86
3	ITLC	USA	6	4.03%	149	2.93%	24.83
4	DEXM	USA	5	3.36%	171	3.36%	34.20
5	APPY	USA	4	2.68%	73	1.44%	18.25
6	OYNO	USA	4	2.68%	99	1.95%	24.75
7	ALARM.COM INC	USA	3	2.01%	133	2.62%	44.33
8	FITBIT INC	USA	3	2.01%	163	3.21%	54.33
9	FULL RECOVERY INC	USA	3	2.01%	72	1.42%	24.00
10	MEBX	USA	3	2.01%	52	1.02%	17.33

注：GOOG 表示 Google Inc. 或 Google LLC；MICR 表示 Microsoft Corporation；ITLC 表示 Intel Corporation；DEXM 表示 Dexcom Inc.；APPY 表示 Apple Inc.；OYNO 表示 Nokia Corporation 或 Nokia Technologies OY；ALARM.COM INC 表示 Alarm.com Incorporated；FITBIT INC 表示 Fitbit Incorporated；FULL RECOVERY INC 表示 Full Recovery Incorporated；MEBX 表示 State Farm Mutual Automobile Insurance 或 State Farm Mutual Automobile。

子化、检测数据分析智能化和风险溯源可视化三方面的内容。

农药化学污染物残留问题已成为国际共同关注的食品安全重大问题之一。我国市售农产品中农药检出情况依然普遍，违禁、高剧毒农药残留仍在威胁民众“菜篮子”安全。当前农药化学污染物的检测范围，包括农药及 PCBs 等化学污染物约 1600 多种，欧盟、日本、美国对近千种农药规定了严格

的农药最大限量标准 5 万~16 万项，以实物标准为参比的传统检测技术及靶向检测方式已不能适应当前食品安全风险监控的需要，而基于精确质量数和全谱扫描的信息化监测技术，则可以实现目标物、非目标物、未知物的精准定性。因此，发展可靠的信息化监测技术对食品中化学污染物高通量的筛查非常必要。

鉴于高分辨质谱侦测技术的高度数字化、信

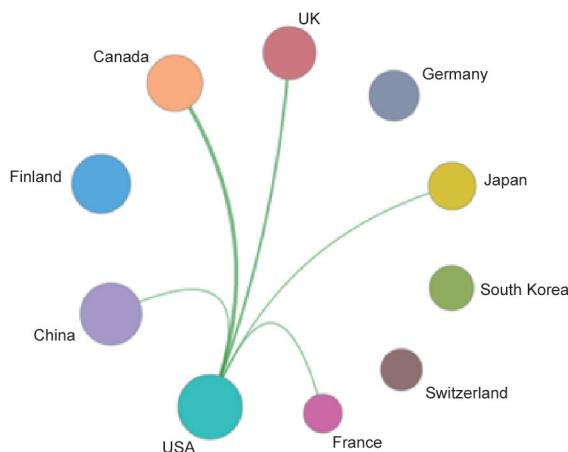


图 2.2.3 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

息化和自动化的实现，产生的数据也呈现出规模巨大、类型多样、产生速度快、价值密度低的大数据 4V 特征，这就为农药残留数据的采集、处理、存储和分析提出了极大的挑战。因此，为了对海量数据进行快速智能分析，可以用于大数据采集、传送、统计和智能分析的农药残留侦测技术平台亟待开发。

如何将获得的海量农药残留检测结果数据，并将其直观、实时地展现在地图上，是当前大数据时代背景下农药残留分析领域的重要研究内容。结合 Web-GIS 技术，并应用数据统计分析方法，创新性地以专题地图的形式，综合使用形象直观的地图、统计图表、报表等表达方式，多形式、多视角、多层次地呈现我国农药残留现状，绘制农药残留地图，为农药残留风险溯源提供有效的工具。

(1) 检测技术电子化，是指通过建立电子标准（保留时间、一级加合离子精确质量、同位素分布及丰度、二级碎片精确质量数及谱图）替代实物标准，实现目标物、非目标物、未知物的精准定性，使农药多残留由靶向检测向非靶向筛查的跨跃式发展。

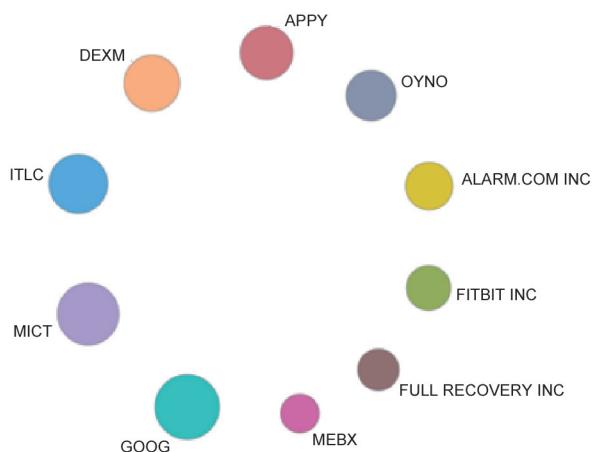


图 2.2.4 “遥感雷达自动监测技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

拟解决的关键技术：评价世界常用 1200 种农药化学污染物的质谱特征，建立 TOFMS、QE、NMR 精确质量数据库，碎片离子谱图库，NMR 库，为高通量筛查方法建立奠定理论基础；建立适用于水果、蔬菜、茶叶等植物源产品中数百种农药化学污染物高效快速的前处理技术；建立满足欧盟、日本、美国 MRLs 要求的高通量筛查方法，实现一次样品制备，一次进样，就可以对样品实现 1000 余种农药残留的全面筛查，相比传统色谱和质谱法，其方法效能是无以伦比的。

(2) 检测数据分析智能化：建立农药残留数据采集系统和智能分析系统，实现在线数据采集、结果判定、统计分析和“一键下载”报告制作的自动化。

拟解决的关键技术：基础数据库构建，为农药残留侦测数据的分析和污染等级判定提供标准和科学依据；建立数据采集系统，实现检测结果的自动上传、数据预处理和污染等级判定，构建农药残留侦测结果数据库；建立数据分析系统，关联农药残留侦测结果数据库和基础数据库，实现多维农药残留数据的单项和综合统计分析以及图文并茂检测结果报告生成的自动化。

(3) 风险溯源可视化：将农药残留电子化检测技术与 Web-GIS 技术结合，构建农药残留风险监控可视化系统。

拟解决的关键技术：研发在线制图系统。与 Web-GIS 技术相结合，并应用数据统计分析方法，创新性地以专题地图的形式，综合使用形象直观的地图、统计图表、报表等表达方式，多形式、多视角、多层次地呈现我国农药残留现状；研编纸质地图。采用系统思想集成表达农药残留的空间分布、农药种类、农产品类型、残留量、毒性、超标情况等多种维度信息。

目前农药残留检测技术通常为气相色谱或液相色谱与选择性检测器联用，以及低分辨的一级质谱和二级质谱检测技术等，其共同特点是定性鉴别离不开标准品做参比，而且由于扫描速度和驻留时间的限制，每次扫描约 100 种化合物，500 种则需要 6 次以上才能扫描完成，速度慢并且比较繁琐。

对近 20 年农药残留分析文献统计发现，检测技术已从经典的色谱技术、质谱技术，发展到高分辨质谱技术。高分辨质谱技术，采用精确质量数测定，结合化合物保留时间、同位素丰度及分布等信息，提高了化合物定性确证能力，同时降低了假阳性检出率；全扫描模式下定性点高于 10 个，灵敏度高 ( $\leq 10 \mu\text{g}/\text{kg}$ )，可对复杂基质中化合物进行快速定性确证，同时提高了未知化合物的侦测能力；高扫描速度（每秒 4 次）无需考虑化合物数量上的限制，可实现农药同时高通量筛查；通过测定化合物碎片离子种类和丰度的差异，实现同分异构化合物的鉴别。因此，无需标准品定性对照，基于高分辨质谱精确质量数的检测是农药多残留发展的一个趋势。

2009 年至今，中国检验检疫科学研究院庞国芳院士团队及时捕捉到高分辨质谱在农药多残留分析的研究机遇：研发了 GC/LC-Q-TOFMS 以精确质量数取代以实物标准做参比的传统农药多残留方法，使农药残留检测技术实现了由靶向检测向非靶向筛查的跨越式发展；研究建立了基于高分辨质谱—互联网—数据科学三元融合技术的农药残留侦测技术平台，实现了食用农产品农药残留实时检测和数据的及时采集、管理和智能分析，使农药残留检测报告生成自动化；研究建立了高分辨质谱—互联网—地理信息 (GIS) 三元融合技术，实现了农药残留结果的地图可视化；研究建立了大数据融合技术评估农药残留膳食暴露风险和预警风险，开发出风险值自动计算——信息多维采集分析专用软件，实现了农药残留风险的全面、快速诊断。这四方面成果初步解决了当前我国农药残留领域面临的四个难题，为构建完善的农药残留监控体系提供了技术保障。

“农药残留监测技术电子化”开发前沿中核心专利的主要产出国家排在前三的国家或地区分别为：中国 (964)、韩国 (20) 和美国 (6)，见表 2.2.5。核心专利的产出排在前三的机构分别为：CAIQ (28)、CNTA (19) 和 CAGS (15)，见表 2.2.6。

从图 2.2.5 给出的“农药残留监测技术电子化”工程开发前沿国家间的合作网络图可看出，本开发前沿主要是中国与荷兰、西班牙与英国间存在合作关系。图 2.2.6 给出了该开发前沿各个机构间的合作网络图，表明本前沿专利技术在各个机构或者企业之间研发合作关系很弱，他们之间基本没有合作关系。

## 第二部分 领域报告：环境与轻纺工程

表 2.2.5 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	964	96.40%	1010	91.82%	1.05
2	South Korea	20	2.00%	36	3.27%	1.80
3	USA	6	0.60%	31	2.82%	5.17
4	Taiwan of China	3	0.30%	0	0.00%	0.00
5	Spain	2	0.20%	13	1.18%	6.50
6	Japan	2	0.20%	8	0.73%	4.00
7	Germany	1	0.10%	2	0.18%	2.00
8	UK	1	0.10%	0	0.00%	0.00
9	India	1	0.10%	0	0.00%	0.00
10	The Netherlands	1	0.10%	4	0.36%	4.00

表 2.2.6 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	CAIQ	28	2.80%	5	0.45%	0.18
2	CNTA	19	1.90%	44	4.00%	2.32
3	CAGS	15	1.50%	50	4.55%	3.33
4	Beosen Jiangsu Food Safety Technology Co	14	1.40%	0	0.00%	0.00
5	Guangzhou Jindian Jingfang Pharm Co Ltd	12	1.20%	0	0.00%	0.00
6	XRES	11	1.10%	1	0.09%	0.09
7	Runtivo Biological Technology Beijing Co	9	0.90%	14	1.27%	1.56
8	UYJS	9	0.90%	5	0.45%	0.56
9	Qingdao Baolikang New Materials Co Ltd	8	0.80%	8	0.73%	1.00
10	UCAG	8	0.80%	17	1.55%	2.13

注：CAIQ 表示 Chinese Academy of Inspection and Quarantine；CNTA 表示 China National Tobacco of Chinese Academy of Agricultural Sciences；CAGS 表示 Chinese Academy of Geological Sciences；XRES 表示 Wuxi X Research Product Design & Research Co Ltd；UYJS 表示 Jiangsu University；UCAG 表示 China Agricultural University。

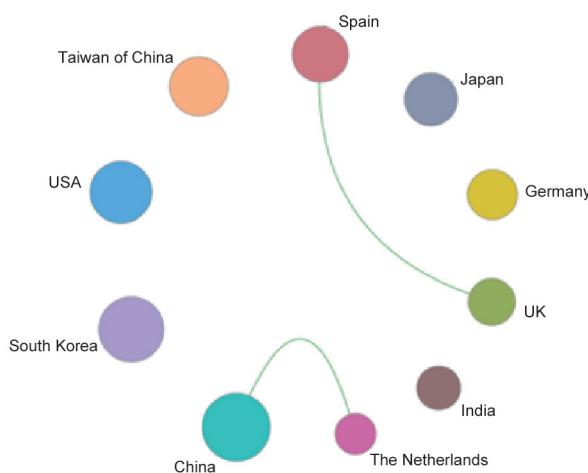


图 2.2.5 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络



图 2.2.6 “农药残留监测技术电子化”工程开发前沿的主要机构间合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：郝吉明

专家组：

贺克斌 魏复盛 张全兴 曲久辉 杨志峰  
 张远航 吴丰昌 朱利中 潘德炉 丁一汇  
 徐祥德 侯保荣 张 健 蒋兴伟 孙宝国  
 庞国芳 孙晋良 俞建勇 陈克复 石 碧  
 瞿金平 岳国君 陈 坚

工作组：

黄 霞 鲁 玺 许人骥 胡 敏 裴元生  
 陈宝梁 潘丙才 胡承志 席北斗 徐 影  
 颜 鹏 宋亚芳 白 雁 马秀敏 李 洁

王 静 王学利 黄 鑫 郑 菲

办公室：

张 健 朱建军 张向谊 梁真真 张海超  
 郑文江 穆智蕊

执笔组成员：

黄 霞 鲁 玺 徐 影 石 英 许人骥  
 胡承志 单 超 王 旭 盛雅琪 陈雪晴  
 谭天怡 经志友 白 雁 席北斗 姜永海  
 贾永锋 潘丙才 马秀敏 黄 鑫 李 洁  
 王知泓 王学利 覃小红 李发学 毛志平  
 李 俊 张琳萍 王碧佳 张弘楠 权震震  
 常巧英 王 静 孙金沅 王宏洋 郑明霞

## 七、农业

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

农业领域工程研究前沿 Top10 中，主要分为三大类：传统深入研究前沿。包括农业资源科学学科的“全球气候变化与作物生产”、应用生态学学科的“土壤菌群多样性与生物固氮”、应用生态学学科的“植物多样性与全球生物安全”、农业资源科学学科的“土壤重金属污染及对农作物的胁迫”、作物科学学科的“作物营养供给与农业可持续发展”、林业工程学科的“森林结构对森林碳循环的影响”。新兴研究前沿。包括作物科学学科的“主要农作物分子设计育种”、农业工程学科的“智能农机装备”和农业资源科学学科的“植物对生物与非生物胁迫反应机理”。颠覆性研究前沿。包括农业生物工程学科的“CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”。

每个前沿支撑核心论文数差异较大，最多为“智能农机装备”的 491 篇，最少为“植物对生物与非

生物胁迫反应机理”的 18 篇，平均约 123 篇。篇均被引频次约 82 次，平均出版年为 2014 年 8 月（见表 1.1.1）。8 个研究前沿的论文在 2012 年至 2017 年间变化规律不明显。而“CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”和“智能农机装备”发表论文数均有十分明显的上升趋势（见表 1.1.2）。

##### （1）主要农作物分子设计育种

属于作物科学学科，是新兴研究前沿。广义上的分子设计育种包括定向分子育种、系统分子育种和分子设计育种。狭义的分子设计育种以生物信息学为平台，以基因组学和蛋白质组学的数据库为基础，综合作物育种学流程中的作物遗传、生理生化和生物统计等学科的有用信息，根据具体作物的育种目标和生长环境，先设计最佳方案，然后开展作物育种试验的分子育种方法。分子设计育种通过多种技术的集成与整合，对育种程序中的诸多因素进行模拟、筛选和优化，提出符合育种目标（最佳基因型）的亲本选配和后代选择策略，以提高作物育种中的预见性和育种效率，实现从传统的“经验

表 1.1.1 农业领域 Top10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	主要农作物分子设计育种	70	5829	83.27	2014.23	—	—
2	CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑	157	17 299	110.18	2015.20	—	—
3	智能农机装备	491	2213	4.51	2015.37	—	—
4	全球气候变化与作物生产	63	6457	102.49	2014.51	—	—
5	土壤菌群多样性与生物固氮	215	18 377	85.47	2014.54	—	—
6	植物多样性与全球生物安全	70	6190	88.43	2014.74	—	—
7	土壤重金属污染及对农作物的胁迫	26	2639	101.50	2015.12	—	—
8	作物营养供给与农业可持续发展	60	4028	67.13	2014.65	—	—
9	植物对生物与非生物胁迫反应机理	18	1330	73.89	2014.61	55.60%	0
10	森林结构对森林碳循环的影响	56	5695	101.70	2014.34	—	—

表 1.1.2 农业领域 Top10 工程研究前沿逐年核心论文数

序号	工程研究前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	主要农作物分子设计育种	15	11	14	10	13	7
2	CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑	7	17	26	32	38	37
3	智能农机装备	26	44	71	73	133	144
4	全球气候变化与作物生产	8	13	11	12	8	11
5	土壤菌群多样性与生物固氮	38	34	34	31	38	40
6	植物多样性与全球生物安全	11	9	10	12	13	15
7	土壤重金属污染及对农作物的胁迫	1	5	3	5	5	7
8	作物营养供给与农业可持续发展	10	6	9	15	10	10
9	植物对生物与非生物胁迫反应机理	1	3	4	4	6	0
10	森林结构对森林碳循环的影响	9	12	6	13	12	4

育种”到定向、高效的“精确育种”的转化。

### (2) CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑

属于农业生物工程学科，是颠覆性研究前沿。基因组编辑技术是通过核酸内切酶特异切割 DNA 靶位点，产生 DNA 双链断裂，诱导 DNA 的损伤修复，从而实现对基因组的定向编辑。CRISPR/Cas9 ( clustered regulatory interspaced short palindromic repeats/CRISPR-associated protein 9 ) 技术是其中一种准确、高效、便捷的生物基因编辑技术。CRISPR 是存在于古细菌基因组中有规律、成簇、间隔短回文的重复序列。它主要依赖 Cas9 核心蛋白，在 RNA 的介导下，识别目标序列进行切割造成 DNA 的双链断裂，修复时可为生物机体提供一种特异性免疫保护机制，以抵抗外来质粒、病毒等遗传物质的入侵。它解决了生物常规育种需要进行多代杂交、所需时间长的问题，可以定向加快育种进程。

### (3) 智能农机装备

属于农业工程学科，是新兴研究前沿。农用装备控制技术的智能化，重点是各种传感器、通信系统、图像处理及计算机视觉等信息化技术的深入与扩展，包括传感器在车辆转向控制、车辆地面作业部件的提升与下降控制、车辆位置与电液一体化控制等；基于植物 / 作物特性与果蔬等农产品成熟度

图像传感监测系统，综合图像处理与视觉传感功能（自动视觉监测系统）的间苗与除草装置；视觉与图像处理技术（立体视觉系统）在多机协同作业中联合收获机与运粮车的协同控制，包括收获机粮仓无线电载荷控制以及可控制推送速度的粮食推送控制器，联合收获机脱粒机构与集粮箱性能的改进等。无人机和机器人在农业领域应用前景广泛。在物联网和大数据时代，智能农机装备快速发展。

### (4) 全球气候变化与作物生产

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。全球气候变化是指由于人类活动向大气排放了过量的二氧化碳等温室气体，导致大气中的温室气体浓度过高，从而在全球平均气温基础上产生了以增温为主要特征的全球范围的气候变化现象。其结果：

将导致作物生长环境的变化，严重影响农作物的生长发育和农业的可持续发展； 将影响农作物种植区域与种植制度的变化； 将影响农业生产成本及管理方式的变化。为了应对气候变化，人类社会必须从策略、理念、方法和技术等方面进行顶层设计，在作物领域建立应对气候变化的科学、技术及生产体系。

### (5) 土壤菌群多样性与生物固氮

属于应用生态学学科，是传统深入研究前沿。

氮循环与农业生产和生态环境息息相关，人类通过对农业土壤施入氮肥来增加作物产量。但与此同时，氮肥的流失又破坏了原有的氮素平衡，进而导致全球的环境问题。大量研究表明自然界的氮循环主要是由微生物介导的。固氮微生物广泛存在于自然界，可以分为自生、共生和联合固氮微生物。固氮微生物将大气中的氮还原成氨的过程称为固氮作用。硝化反应直接利用铵态氮作为底物，是氮循环的中心环节，一般由氨氧化微生物和亚硝酸盐氧化微生物共生介导。生物固氮研究在基础理论研究中主要围绕着诱发非豆科作物结瘤的最佳条件和提高共生固氮效能，包括诱导根瘤菌侵入主要农作物共生结瘤的有效方法及根瘤菌导入非豆科宿主细胞的途径、共生部位和共生机理等。在应用基础研究中，主要是通过生物技术手段改造固氮微生物和现有的农作物，使新的固氮菌与新的农作物更容易形成共生固氮关系，提高固氮效能等。

### (6) 植物多样性与全球生物安全

属于应用生态学学科，是传统深入研究前沿。植物多样性包括物种多样性、遗传多样性、生态环境多样性。通过对生物多样性产生机制的分析及利用不同尺度对植物多样性格局成因的解释，可以研究物种共存的中性过程和生态位过程的作用机制，监控全球生物多样性面临的各种威胁。

### (7) 土壤重金属污染及对农作物的胁迫

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。农作物重金属污染直接影响农业生产及粮食安全，危及人类的生存环境，已经成为当今世界面临的重大生态环境问题之一。重金属污染指由重金属或其化合物造成的环境污染。重金属主要包括铅（Pb）、镉（Cd）、汞（Hg）、铬（Cr）、类金属砷（As）等。农田重金属本身具有较强的隐蔽性，且重金属毒性大、化学行为和生态效应复杂，在土壤中存留时间长，可经农作物吸收、代谢进入食物链，或迁移进入水体、大气环境，对人类生存和可持续发展构成极大威胁。重金属对作物的影响主要表现在对

作物生长发育过程、生理生化指标及产量和品质等方面。目前土壤重金属污染修复的技术主要有两种类型，一是直接清除重金属污染的土壤；二是改变土壤中重金属的存在形态，降低其活性、迁移性和生物可利用性。修复方法主要有物理修复、化学修复、电化修复以及生物修复等。

### (8) 作物营养供给与农业可持续发展

属于作物科学学科，是传统深入研究前沿。在农业生产中，土壤作为基本生产资料是农作物生长的基础。而土壤肥力的提高则需要肥料的支持，保障供给及提高土壤肥料的利用效率，可为农业可持续发展奠定基础。合理的施肥技术既要满足农作物的生长需求，也可有效改善土壤肥料资源分布不均、避免环境污染及耕地退化等现象的发生，实现绿色农业的发展目标。在进行土壤施肥前，首先要进行充分的土壤成分检测工作。对于具有较高肥力的土壤来说，养分的高效利用是作物高产稳产的重要保证。

### (9) 植物对生物与非生物胁迫反应机理

属于农业资源科学学科，是新兴研究前沿。前沿图分析结果显示，研究最为集中的是生物和非生物胁迫两大领域。其中，生物胁迫包括昆虫、灰霉等，主要的研究方向包括防御反应、免疫反应、系统获得性抗性、诱导抗性以及信号转导等。非生物胁迫的重点内容是干旱、活性氧和氧化胁迫、高温胁迫、盐胁迫和渗透胁迫等，涉及的研究包括激素信号相关内容，包括脱落酸、水杨酸和茉莉酸等；同时，光合作用、气孔导度、抗氧化酶系统也是主要内容。在研究方法上，基因表达、转录因子和转录调控仍然是最集中的内容。同时，现代组学，包括转录组、代谢组和蛋白质组相关的内容也比较集中。

### (10) 森林结构对森林碳循环的影响

属于林业工程学科，是传统深入研究前沿。碳循环对全球变化尤其是气候变暖影响巨大，森林生态系统作为陆地生物圈的核心，其碳循环动态已成为全球变化研究领域的前沿。森林生态系统碳循环

的研究主要有实验技术方法（利用生物量清单、微气象学与碳同位素技术等）、地球信息科学方法和模型方法。由于森林植被和土壤对碳元素的固存能力与碳密度布局存在很大的区域差异性和时空变异性，因此探讨全球气候变化条件下森林生态系统碳循环过程的演变趋势还需要利用计算机技术、遥感技术等进行模型推演。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 主要农作物分子设计育种

分子设计育种的概念最早由荷兰科学家 Peleman 和 van der Voort 于 2003 年提出。随着全基因测序技术的飞速发展和植物功能基因组研究的巨大进步，基于全基因组信息开展作物品种分子设计育种成为可能，成为今后作物育种技术发展的方向。分子设计育种的核心是基于对控制作物各种重要性状的关键基因及其调控网络的认识，利用生物技术手段获取或创制的优异种质资源作为分子设计的元件，根据预定的育种目标，选择合适的设计元件通过系统生物学手段加以组装，培育目标新品种。与传统育种技术相比较，分子设计育种将实现在基因水平上对农艺性状的精确调控，解决传统育种易受不良基因连锁影响的难题，大幅度提高育种效率，缩短育种周期；与分子标记辅助育种技术相比，其精准性和可控性得以极大提升。分子设计育种主要包含以下三个步骤：研究目标性状基因以及基因间的相互关系。包括构建遗传群体、筛选多态性标记、构建遗传连锁图谱、数量性状表型鉴定和遗传分析等内容。根据不同生态环境条件下的育种目标设计目标基因型。利用已经鉴定出的各种重要育种性状的基因信息，包括基因在染色体上的位置、遗传效应、基因到性状的生化网络和表达途径、基因之间的互作、基因与遗传背景和环境之间的互作等，模拟预测各种可能基因型的表现型，从中选择符合特定育种目标的基因型。制定具体的育种方

案。要实现真正意义上的分子设计育种，目前来看还存在许多困难：一是分子设计育种需要依靠生物体内错综复杂的遗传通路的清楚解析；二是分子设计育种需要对作物表型性状进行高通量、准确鉴定。

从国家地区分布（见表 1.2.1）看，核心论文产出国主要是美国，占总数约 39% 的 27 篇论文中，被引次数达 2897 次，在前十名中远高于其他国家或地区。被引数比例也高达 50%。核心论文数较多的还有澳大利亚、德国和法国。从研究机构分布（见表 1.2.2）看，以美国的康乃尔大学和印度的国际半干旱热带作物研究中心为主。从合作关系图可以看出，美国和法国之间合作关系紧密（见图 1.2.1），印度的国际半干旱热带作物研究中心和墨西哥的国际玉米小麦改良中心协作联系较多（见图 1.2.2）。中国科学院发表 5 篇核心论文，核心论文数及常被引论文数均偏少。施引核心论文的主要产出国为美国、中国和澳大利亚（见表 1.2.3），施引核心论文的主要产出机构为美国农业部农业研究局，约占 20.9%（见表 1.2.4）。

深入分析支撑数据发现，高被引代表论文有 2014 年在《Molecular Plant》期刊上发表的《A high-density SNP genotyping array for rice biology and molecular breeding》，被引频次达 68 次。前沿论文有 2017 年在《Molecular Plant》期刊上发表的《Crop breeding chips and genotyping platforms: Progress, challenges, and perspectives》。前沿论文研究机构前三位为中国农业科学院、ICRISAT 和康乃尔大学等。利用高频关键词分析结果表明，基因组选择、SNP 及 QTL 是本项目科学家关注的重点。

### 1.2.2 CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑

基因组编辑技术在全球掀起了研究热潮，2012 年被《Science》杂志列入年度 10 大科学进展，2014 年被《Nature Methods》杂志评为过去 10 年

## 第二部分 领域报告：农业

表 1.2.1 “主要农作物分子设计育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	USA	27	38.57%	2897	49.70%	107.30
2	Australia	15	21.43%	1233	21.15%	82.20
3	Germany	12	17.14%	1159	19.88%	96.58
4	France	12	17.14%	706	12.11%	58.83
5	China	10	14.29%	1067	18.31%	106.70
6	India	10	14.29%	1055	18.10%	105.50
7	Mexico	10	14.29%	1178	20.21%	117.80
8	Japan	7	10.00%	333	5.71%	47.57
9	Spain	5	7.14%	857	14.70%	171.40
10	Canada	4	5.71%	624	10.71%	156.00

表 1.2.2 “主要农作物分子设计育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Cornell Univ	10	14.29%	1422	24.40%	142.20
2	Int Crops Res Inst Semi Arid Trop	9	12.86%	1001	17.17%	111.22
3	Int Maize & Wheat Improvement Ctr	9	12.86%	1077	18.48%	119.67
4	USDA Agr Res Service	7	10.00%	977	16.76%	139.57
5	Univ Western Australia	6	8.57%	628	10.77%	104.67
6	Chinese Acad Agr Sci	5	7.14%	317	5.44%	63.40
7	Kansas State Univ	3	4.29%	365	6.26%	121.67
8	Donald Danforth Plant Sci Ctr	3	4.29%	261	4.48%	87.00
9	Leibniz Inst Plant Genet & Crop Plant Res	3	4.29%	221	3.79%	73.67
10	Limagrain Europe	3	4.29%	170	2.92%	56.67

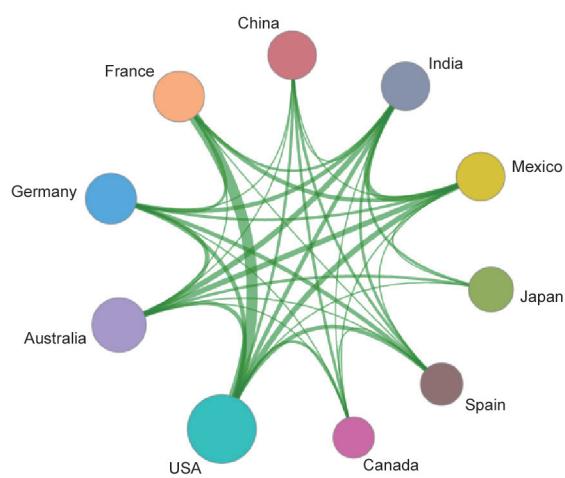


图 1.2.1 “主要农作物分子设计育种”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

间对生物学研究最有影响力的一 10 项研究方法之一。基因组编辑技术是通过核酸内切酶特异切割 DNA 靶位点，产生 DNA 双链断裂，诱导 DNA 的损伤修复，从而实现对基因组的定向编辑。它解决了常规育种需要进行多代杂交、所需时间长的问题，加快了育种进程；同时，由于人为增加突变效率、改变作物自然的进化过程，也增加了基因组编辑植物的环境安全和食用安全风险。基因编辑技术已经发展更新了四代，分别是：ZFNs 编辑技术、TALENs 编辑技术、MGN 编辑技术和 CRISPR/Cas9 系统。CRISPR/Cas9 是一种准确、高效、便

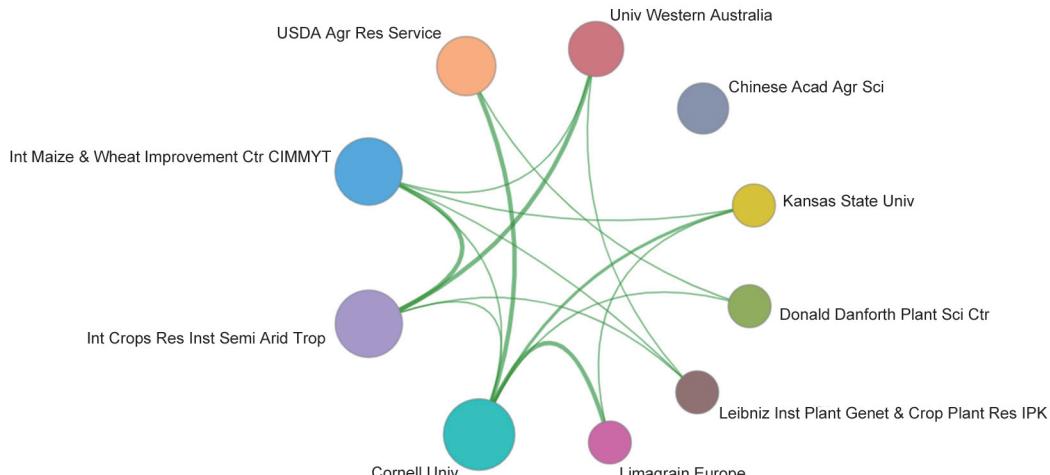


图 1.2.2 “主要农作物分子设计育种”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “主要农作物分子设计育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	1393	28.72%	2015.81
2	China	838	17.28%	2016.18
3	Australia	543	11.20%	2015.71
4	India	444	9.15%	2015.78
5	Germany	429	8.85%	2015.60
6	France	324	6.68%	2015.65
7	Canada	258	5.32%	2015.67
8	UK	252	5.20%	2015.97
9	Brazil	200	4.12%	2015.84
10	Mexico	169	3.48%	2015.66

表 1.2.4 “主要农作物分子设计育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USDA Agr Res Service	313	20.85%	2015.9
2	Int Crops Res Inst Semi Arid Trop	164	10.93%	2015.6
3	Cornell Univ	155	10.33%	2015.5
4	Int Maize & Wheat Improvement Ctr	143	9.53%	2015.7
5	Chinese Acad Sci	137	9.13%	2016.2
6	Ins Nat Rec Agr	134	8.93%	2015.4
7	Chinese Acad Agr Sci	127	8.46%	2016.2
8	Univ Western Australia	113	7.53%	2016.0
9	Univ Queensland	109	7.26%	2015.7
10	Kansas State Univ	106	7.06%	2015.8

捷的生物基因组编辑工具。其工作的原理是外源基因组中称为 PAM ( Protospacer adjacent motifs ) 基序的三个保守核苷酸 NGG ( N 可以为任何核苷酸 ) 可以被向导 RNA ( sgRNA ) 识别 , sgRNA 引导 Cas9 蛋白在 PAM 上游切割。断链的 DNA 进行非同源末端连接修复时 , 会导致插入缺失效应造成基因的移码突变 , 进而达到基因敲除的目的。由于 CRISPR 的 sgRNA 只需 20 多个核苷酸的序列就能识别 PAM 基序 , 并且 Cas9 蛋白单聚体就能发挥作用 , CRISPR/Cas9 系统相对于其他几类基因编辑工具而言 , 操作更加简便 , 敲除效率更高 , 基因的编辑更加精准 , 可大大降低脱靶机率 , 现已被广泛应用于包括重要动植物等的生物基因编辑中。

从国家或地区分布 ( 见表 1.2.5) 看 , 核心论文产出国主要是美国、中国和德国。被引次数也是美国、中国和德国的顺序。从研究机构分布 ( 见表 1.2.6) 看 , 中国科学院以 11 篇核心论文数位居榜首 , 但被引次数仅排第 3 , 篇均被引数排在第 5 。从国家或地区间的合作网络图 ( 见图 1.2.3) 可以看出 , 美国与中国和德国合作最多 , 在研究中占主

导作用。从产出主要机构间合作网络图 ( 见图 1.2.4) 可以看出 , 中国科学院及中国科学院大学与美国的明尼苏达大学有一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家或地区以美国和中国为主 , 施引核心论文比例也远远高于其他国家或地区 ( 见表 1.2.7) 。中国科学院和中国科学院大学一起 , 施引核心论文数近 900 篇 , 施引核心论文比例超过 40% ( 见表 1.2.8) 。

深入分析支撑数据发现 , 40 篇论文被引频次超过 200 次 , 其中 8 篇论文被引频次超过 500 次。 2013 年在《 Nature Protocols 》期刊上发表的《 Genome engineering using the CRISPR/Cas9 system 》论文被引频次超过 1900 次。 2014 年在《 Cell 》期刊上发表的《 Development and applications of CRISPR/Cas9 for genome engineering 》论文被引频次近 1600 次。这两篇论文奠定了 CRISPR/Cas9 系统成为生物基因编辑技术中的引领者地位。目前 , CRISPR/Cas9 技术不但在拟南芥、酵母、鼠、人和果蝇等模式生物中广泛应用 , 而且已成功在经济动物如牛、猪和羊及重要农作物如小麦、高粱、水稻和玉米等物种中实现了定点基因组编辑。利用高频关键词分析结

表 1.2.5 “CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	USA	74	47.13%	10 028	57.97%	135.51
2	China	30	19.11%	2514	14.53%	83.80
3	Germany	21	13.38%	2297	13.28%	109.38
4	UK	17	10.83%	930	5.38%	54.71
5	Japan	12	7.64%	872	5.04%	72.67
6	South Korea	11	7.01%	1351	7.81%	122.82
7	The Netherlands	8	5.10%	1255	7.25%	156.88
8	Australia	8	5.10%	857	4.95%	107.13
9	Italy	8	5.10%	686	3.97%	85.75
10	France	8	5.10%	407	2.35%	50.88

表 1.2.6 “CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Chinese Acad Sci	11	7.01%	1706	9.86%	155.09
2	Univ Minnesota	7	4.46%	395	2.28%	56.43
3	Iowa State Univ	6	3.82%	458	2.65%	76.33
4	Massachusetts Ins Tech	5	3.18%	2274	13.15%	454.80
5	Univ Calif Berkeley	5	3.18%	1895	10.95%	379.00
6	Seoul Natl Univ	5	3.18%	1103	6.38%	220.60
7	Univ Calif Davis	5	3.18%	533	3.08%	106.60
8	Harvard Med Sch	5	3.18%	179	1.03%	35.80
9	Vanderbilt Univ	4	2.55%	634	3.67%	158.50
10	Univ Chinese Acad Sci	4	2.55%	408	2.36%	102.00

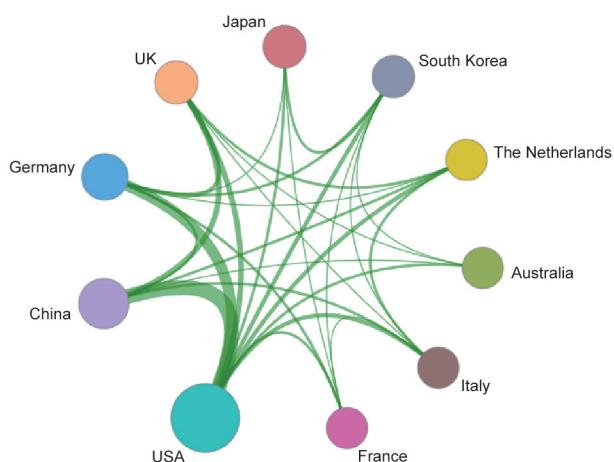


图 1.2.3 “CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

果表明，CRISPR/Cas9、TALEN 及微生物种群是本项目科学家关注的重点。

### 1.2.3 智能农机装备

智能农机装备：农用装备控制技术的智能化，重点是各种传感器、通信系统、图像处理及计算机视觉等信息化技术的深入与扩展。主要研究前沿包括：农业专用传感器：研究农业传感器的新原理、新方法和新技术，多传感器信息融合测量理论与技术方法，农业传感器网络。农业生物仪器：研究开发动植物生命信息传感器与仪器，精细育种装备

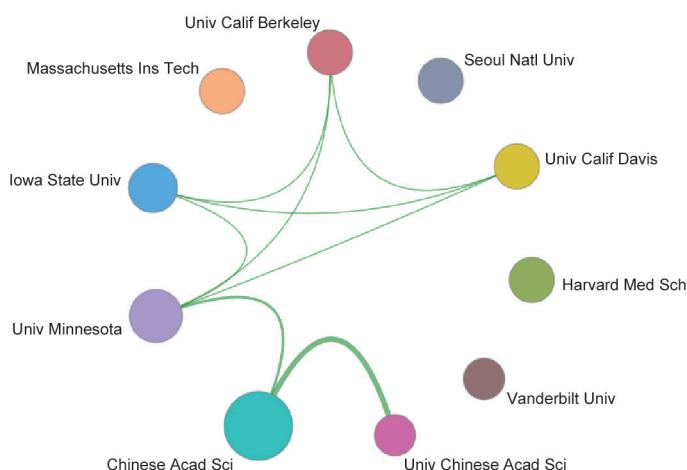


图 1.2.4 “CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”工程研究前沿主要机构间的合作网络

## 第二部分 领域报告：农业

表 1.2.7 “CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	4318	36.55%	2016.2
2	China	2291	19.39%	2016.4
3	Germany	1050	8.89%	2016.3
4	UK	878	7.43%	2016.3
5	Japan	690	5.84%	2016.1
6	France	621	5.26%	2016.3
7	Australia	553	4.68%	2016.3
8	The Netherlands	506	4.28%	2016.2
9	Canada	499	4.22%	2016.4
10	Italy	408	3.45%	2016.3

表 1.2.8 “CRISPR/Cas9 农业生物基因编辑”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	625	29.69%	2016.2
2	Univ Chinese Acad Sci	251	11.92%	2016.4
3	Harvard Univ	213	10.12%	2015.6
4	Univ Calif Berkeley	173	8.22%	2016.0
5	Harvard Med Sch	166	7.89%	2016.9
6	Massachusetts Ins Tech	154	7.32%	2016.0
7	Chinese Acad Agr Sci	149	7.08%	2016.7
8	Univ Calif San Diego	125	5.94%	2016.4
9	Stanford Univ	125	5.94%	2016.3
10	Univ Calif Davis	124	5.89%	2016.1

及信息化技术产品，动植物微生理信息检测设备。

智能化农机具：研究精准变量控制技术、导航技术和作业状态实时监控技术，开发支持精准作业的农业智能装备。农业机器人：研究农业机器人仿生学原理，基础部件设计方法，路径优化、智能控制与决策支持算法，开发典型作业机器人系统。2017 年的开发前沿研究结果表明，本前沿专利项目以中国和美国公开量为主。中国约占 3/4，美国占不到 1/4。但专利被引数比例刚好相反，表明美国虽然数量少但影响力巨大。核心专利的主要产出机构主要有美国的 HUNTER IND 和中国的中国农

业大学，且美国和加拿大机构间有一定的合作关系。农业装备在满足当前不同层次需求的同时，智能装备数字化设计与仿真系统、智能装备测试平台、微机电系统农业传感器、农业机器人、智能导航控制技术，以及将物联网、大数据、云计算与云服务等先进技术融入智能农业装备设计将是未来智能农业装备研究的主要方向。

从国家或地区分布（见表 1.2.9）看，核心论文产出国主要是中国和美国。西班牙虽然核心论文数不足中国的一半，但被引次数位居榜首。从研究机构分布（见表 1.2.10）看，核心论文数比较分散，

表 1.2.9 “智能农机装备”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	China	85	17.31%	185	8.36%	2.18
2	USA	64	13.03%	274	12.38%	4.28
3	Spain	43	8.76%	386	17.44%	8.98
4	India	40	8.15%	26	1.17%	0.65
5	Germany	35	7.13%	188	8.50%	5.37
6	Japan	24	4.89%	22	0.99%	0.92
7	Italy	23	4.68%	293	13.24%	12.74
8	Australia	21	4.28%	136	6.15%	6.48
9	Israel	18	3.67%	163	7.37%	9.06
10	The Netherlands	15	3.06%	223	10.08%	14.87

表 1.2.10 “智能农机装备”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Ben Gurion Univ Negev	9	1.83%	96	4.34%	10.67
2	Univ Florida	9	1.83%	49	2.21%	5.44
3	Univ Tecn Federico Santa Maria	8	1.63%	36	1.63%	4.50
4	Univ Sydney	8	1.63%	29	1.31%	3.63
5	Consejo Superior Invest Cient	7	1.43%	158	7.14%	22.57
6	Nanjing Agr Univ	7	1.43%	42	1.90%	6.00
7	Agr Res Org	7	1.43%	41	1.85%	5.86
8	Hokkaido Univ	7	1.43%	10	0.45%	1.43
9	Univ Sao Paulo	7	1.43%	12	0.54%	1.71
10	Wageningen Univ	6	1.22%	87	3.93%	14.50

没有特别强的机构。从主要国家或地区间的合作网络图（见图 1.2.5）可以看出，美国和中国、美国和印度协作较多，西班牙和意大利之间也关系密切。从机构间的合作网络图（见图 1.2.6）可以看出，只有澳大利亚的悉尼大学和巴西的圣保罗大学间存在合作关系。中国在该研究方向贡献的核心论文数排名第 1，但被引次数仅排第 5，篇均被引比例呈落后状态（见表 1.2.11）。中国科学院是施引核心论文数最多的机构（见表 1.2.12）。

深入分析支撑数据发现，与其他研究前沿相比，本项目中国科学家产出论文数较多，且会议

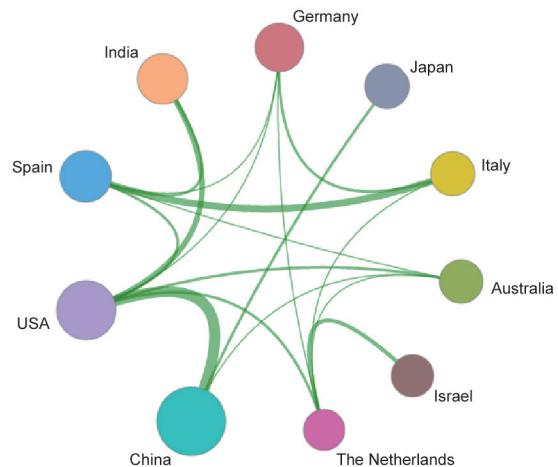


图 1.2.5 “智能农机装备”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

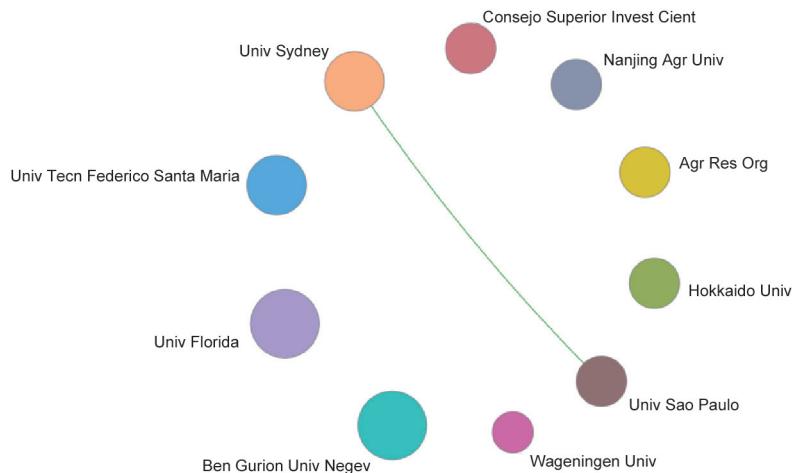


图 1.2.6 “智能农机装备”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “智能农机装备”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	309	24.72%	2016.6
2	USA	252	20.16%	2016.5
3	Spain	143	11.44%	2016.3
4	Australia	117	9.36%	2016.6
5	Germany	110	8.80%	2016.3
6	Italy	84	6.72%	2016.1
7	UK	66	5.28%	2016.6
8	France	65	5.20%	2016.5
9	Canada	52	4.16%	2016.4
10	Japan	52	4.16%	2016.5

表 1.2.12 “智能农机装备”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	29	14.87%	2016.1
2	Consejo Superior Invest Cient	24	12.31%	2016.3
3	USDA Agr Res Service	22	11.28%	2016.5
4	China Agr Univ	22	11.28%	2016.3
5	Univ Florida	18	9.23%	2016.3
6	Mendel Univ Brno	17	8.72%	2014.2
7	Univ Tecn Federico Santa Maria	17	8.72%	2016.3
8	Wageningen Univ	16	8.21%	2016.5
9	Northwest A&F Univ	15	7.69%	2016.5
10	Univ Sydney	15	7.69%	2016.5

论文数占比最大。利用高频关键词分析结果表明，无人机、系统集成及精细农业是本项目科学家关注的重点。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

农业领域工程开发前沿 Top10 中，主要分为三大类：颠覆性开发前沿。包括动物医学学科的“动物干细胞利用技术”、作物科学学科的“作物转基因技术”和动物医学学科的“动物模型及动物基因组编辑”。传统深入开发前沿。包括植物保护学科的“高效低毒作物病害防治化合物研制”、植物保护学科的“抗病基因的导入与抗病新品种利用”、林业科学学科的“林业信息数据库构建与生态系统建设”和作物科学学科的“作物自交系与杂交新品种选育”。新兴开发前沿。包括农业工程学科的“农业废弃物与生物质能源转化”、农业工程学科的“农业设施中太阳能的高效利用”和农业工程学科的“智能农机具的开发利用”。

本领域以“作物转基因技术”的专利公开量最多，达 738 项，平均约 310 项。“动物模型及动物基因组编辑”专利的平均被引数最高，约 33 次。

前沿专利平均被引数约 17 次。专利平均公开年为 2013 年 5 月（见表 2.1.1）。所有前沿的逐年施引专利数均呈规律性的减少态势（见表 2.1.2）。

#### （1）动物干细胞利用技术

属于动物医学学科，是颠覆性开发前沿。动物干细胞是一类具有自我复制能力的多潜能细胞。在一定条件下，它可以分化成多种功能细胞。根据干细胞所处的发育阶段分为胚胎干细胞和成体干细胞。根据干细胞的发育潜能分为三类：全能干细胞、多能干细胞和单能干细胞（专能干细胞）。干细胞是一种未充分分化，尚不成熟的细胞，具有再生各种组织器官和人体的潜在功能，医学界称为“万用细胞”。干细胞在动物医学基础研究及疾病治疗等方面应用广泛。

#### （2）农业废弃物与生物质能源转化

属于农业工程学科，是新兴开发前沿。由于长期注重高消耗、高产出的发展模式，在实现农产品供给不断增长的同时，农作物秸秆、畜禽粪便等副产品和废弃物也呈现快速增长态势，农业废弃物不合理利用造成了严重的资源和环境问题。生物质能源开发技术目前主要集中在气化、压缩燃料、燃烧发电、生产燃料乙醇以及生物柴油五个方面。其中，生物质气化燃料及生物质压缩成型技术已趋成熟。

表 2.1.1 农业领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	动物干细胞利用技术	281	4232	15.06	2013.91
2	农业废弃物与生物质能源转化	209	4017	19.22	2012.86
3	作物转基因技术	738	14 216	19.26	2013.62
4	高效低毒作物病害防治化合物研制	170	1813	10.66	2013.29
5	动物模型及动物基因组编辑	135	4549	33.70	2013.46
6	抗病基因的导入与抗病新品种利用	308	4639	15.06	2013.40
7	农业设施中太阳能的高效利用	157	3299	21.01	2012.78
8	智能农机具的开发利用	595	12 540	21.08	2013.64
9	林业信息数据库构建与生态系统建设	210	765	3.64	2013.89
10	作物自交系与杂交新品种选育	301	4005	13.31	2013.45

表 2.1.2 农业领域 Top10 工程开发前沿的逐年施引专利数

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	动物干细胞利用技术	74	49	58	37	53	10
2	农业废弃物与生物质能源转化	102	56	35	12	3	1
3	作物转基因技术	187	185	173	115	73	5
4	高效低毒作物病害防治化合物研制	58	46	32	27	7	0
5	动物模型及动物基因组编辑	37	33	40	19	3	3
6	抗病基因的导入与抗病新品种利用	108	77	55	39	18	11
7	农业设施中太阳能的高效利用	82	40	23	11	1	0
8	智能农机具的开发利用	155	140	124	124	45	7
9	林业信息数据库构建与生态系统建设	40	43	56	47	19	5
10	作物自交系与杂交新品种选育	84	90	66	34	23	4

在燃烧发电方面，高效直燃发电被认为是最可行的生物质利用方式，是未来重要的发展方向。

### (3) 作物转基因技术

属于作物科学学科，是颠覆性开发前沿。转基因技术是利用现代生物技术，将人们期望的目标基因，经过人工分离、重组后，导入并整合到生物体的基因组中，从而改善生物原有的性状或赋予其新的优良性状。除了转入新的外源基因外，还可以通过对生物体基因的加工、敲除、屏蔽等方法改变生物体的遗传特性，获得人们希望得到的性状。这一技术的主要过程包括外源基因的克隆、表达载体的构建、遗传转化体系的建立、遗传转化体的筛选、遗传稳定性分析和回交转育等。

### (4) 高效低毒作物病害防治化合物研制

属于植物保护学科，是传统深入开发前沿。随着高毒有机磷农药品种的不断退出，国际农药市场对“环境友好”农药的需求大增。这也为新型“环境友好”农药的发展提供了更大的发展空间，并在一定程度上引起人们对新型农药的关注与研发投入。高效、低风险农药主要具备以下几个特点：

对靶标生物活性高，单位面积使用量小； 对人畜低毒； 对农作物本身安全，无药害； 对环境有益生物安全，如对蜂鸟鱼蚕毒性低； 易降解，且降解产物安全。病虫害对化学农药也会产生抗药性。

### (5) 动物模型及动物基因组编辑

属于动物医学学科，是颠覆性开发前沿。动物疾病模型主要用于实验生理学、实验病理学和实验治疗学（包括新药筛选）的研究。人类疾病的动物模型是生物医学科学研究所建立的具有人类疾病模似性表现的动物实验对象和材料。基因组编辑技术能对生物体内源基因进行精确靶向修饰，被广泛应用于生物医学研究领域。随着基因组学、基因组编辑技术的迅速发展以及显微注射技术、体细胞克隆技术的广泛应用，分子编写育种（BMW）可以高效创制新的遗传标记并对其进行快速验证，也可以对基因组进行精确到分子水平的编写并定向培育新品种。其结果不仅能打破生殖隔离、跨物种引入新的性状，更可以对物种内个体间基因组进行精确到单个碱基的插入、删除和替换，培育出更多的动物模型。

### (6) 抗病基因的导入与抗病新品种利用

属于植物保护学科，是传统深入开发前沿。植物抗病基因根据植物抗病基因编码蛋白的保守结构，将植物抗病基因分成 NBS-LRR、eLRR-TM、eLRR-TM-pkinase、STK 和其他五大类。不同类型的基因在细胞水平上的分布不一样，NBS、激酶和 LRR 在不同类型的基因之间结构差异也较大，但是它们通过各不相同的作用机理参与细胞对病原体

的防御。此外，聚合多个有效抗病基因，不仅可以提高作物的抗性，而且可以提高作物的产量和营养品质。尤其是在抗病方面，单基因长时间反复利用容易丧失其抗病性，多基因聚合有利于拓宽抗谱，提高作物的抗性。

### (7) 农业设施中太阳能的高效利用

属于农业工程学科，是新兴开发前沿。农地光伏太阳能是近年来刚刚兴起的将现代设施农业大棚、薄膜光伏太阳能发电和 LED 光照结合起来，既能运用农地直接低成本发电，也不影响大棚内农作物生长的一种新型农业设施。太阳能驱动喷灌机组将太阳能光伏发电技术与喷灌机进行有机结合，将传统农田灌溉方式转变为移动式喷灌，灌溉均匀度高。在节约能源的同时，节水效果亦相当显著。为了实现光电能的就地消纳，可以构建基于可时移农业负荷的光伏智慧农业大棚微型能源网。这种低碳农业发展新模式的开启，具有良好的生态效益和经济效益。

### (8) 智能农机具的开发与利用

属于农业工程学科，是新兴开发前沿。智能化农机具研究，主要利用精准变量控制技术、导航技术和作业状态实时监控技术等，开发支持精准作业的农业智能装备。融合了信息与通信技术、计算机网络技术、控制与检测技术等先进科技的智能农机是现代农业快速发展的重要保障，其自身的发展趋势包括智能农机大数据平台的建立，多机物连、协同作业，农业机器人技术和智能农机原创性技术开发等。

### (9) 林业信息数据库构建与生态系统建设

属于林业科学学科，是传统深入开发前沿。森林资源是林业的物质基础，它始终处于变化之中，为优化森林结构，合理布局，不断提高其质量与数量，必须强化森林资源管理并用计算机技术管理森林资源量化信息的存储，这种存储系统即林业信息数据库。林业信息数据库包括林业信息化中的森林资源调查管理系统、林地管理系统、林权管理

系统、林业综合决策支持系统等。林业信息化通过整合现有林业资源数据、转变传统的林业管理工作方式，可以有效增强林业资源监管能力，进一步提高林业工作管理水平及社会化服务能力。随着科技的进步，林业信息数据库还应和地理信息系统、遥感信息系统、预测预报模型系统相连接，为科学管理森林资源及森林生态系统的建设发挥更大作用。

### (10) 作物自交系与杂交新品种选育

属于作物科学学科，是传统深入开发前沿。作物自交系是指一个单株经连续自交后，所获得的性状整齐一致的后代。杂种优势利用是大幅提高作物单产、改良作物品质、提高作物抗逆性、增加作物适应性的重要途径。杂种优势的基础研究包括：

利用种质资源最大限度的开发和利用杂种优势；对杂种优势群进行深入研究，在分子水平上鉴定杂种优势群；筛选与产量因素相关的杂种优势形成 QTL；研究杂种优势的适宜遗传群体。基因表达谱研究有助于杂种优势形成分子机理的解析。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 动物干细胞利用技术

在众多类型的成体干细胞中，造血干细胞 (HSC) 是研究早且被公认有临床治疗效果的一类干细胞。造血干细胞是一类具有自我更新和多向分化成为各种血细胞潜能的成体干细胞，是造血系统中最为原始的细胞类型，是血液系统所有红细胞、血小板和免疫细胞（包括粒细胞、单核细胞和淋巴细胞）的来源，维系机体终身产生成熟血细胞的能力。造血干细胞主要存在于骨髓微环境 (Niche) 中，因此 HSC 的功能受内外多种因素调控。HSC 移植不仅可以治疗造血恶性疾病，还可应用于自身免疫性疾病、代谢病等多种疾病的治疗，在动物再生医学领域也有着重要地位。

本前沿专利项目以美国和中国公开量为主（见表 2.2.1）。美国约占 2/3，处于遥遥领先的位置。从核心专利的主要产出机构（见表 2.2.2）看，美国的 DUPO 公司公开量较多；而中国的中国农业大学核心专利的被引数较高，影响较大。从主要国家或地区间的合作网络图（见图 2.2.1）可以看出，美国和丹麦及智利合作广泛。从机构间的合作网络图（见图 2.2.2）可以看出，BROD 与 MASI 和 HARD 间联系紧密。

### 2.2.2 农业废弃物与生物质能源转化

生物质能，就是太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量形式，即以生物质为载体的能量。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，可转化为常规的固态、液态和气态燃料，取之不尽、用之不竭，是一种可再生能源，同时也是唯一一种可再生的碳源。生物质能源开发技术目前主要集中在气化、压缩燃料、燃烧发电、生产燃料乙醇以及生物柴油五个方面。其中，生物质气化燃料及生物质压

表 2.2.1 “动物干细胞利用技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	178	63.35%	2876	67.96%	16.16
2	China	54	19.22%	606	14.32%	11.22
3	Denmark	13	4.63%	223	5.27%	17.15
4	The Netherlands	11	3.91%	180	4.25%	16.36
5	France	9	3.20%	188	4.44%	20.89
6	Japan	9	3.20%	98	2.32%	10.89
7	Canada	5	1.78%	69	1.63%	13.80
8	Germany	5	1.78%	121	2.86%	24.20
9	UK	5	1.78%	56	1.32%	11.20
10	Switzerland	4	1.42%	59	1.39%	14.75

表 2.2.2 “动物干细胞利用技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	DUPO	USA	20	7.12%	331	7.82%	16.55
2	MASI	USA	16	5.69%	421	9.95%	26.31
3	BROD	USA	15	5.34%	412	9.74%	27.47
4	HARD	USA	12	4.27%	268	6.33%	22.33
5	REGN	USA	12	4.27%	169	3.99%	14.08
6	STAM	The Netherlands	7	2.49%	103	2.43%	14.71
7	CECT	France	6	2.14%	145	3.43%	24.17
8	Recombinetics Inc	USA	6	2.14%	99	2.34%	16.50
9	REGC	USA	5	1.78%	85	2.01%	17.00
10	STRD	USA	5	1.78%	88	2.08%	17.60

注：DUPO 表示 Dupont Nutrition Biosciences Aps；MASI 表示 Massachusetts Inst. Technology；BROD 表示 The Broad Institute Inc.；HARD 表示 Harvard College；REGN 表示 Regeneron Pharm Inc.；STAM 表示 Dsm Intellectual Property Assets Manage；CECT 表示 Cellectis；REGC 表示 Univ. California；STRD 表示 Univ. Leland Stanford Junior。

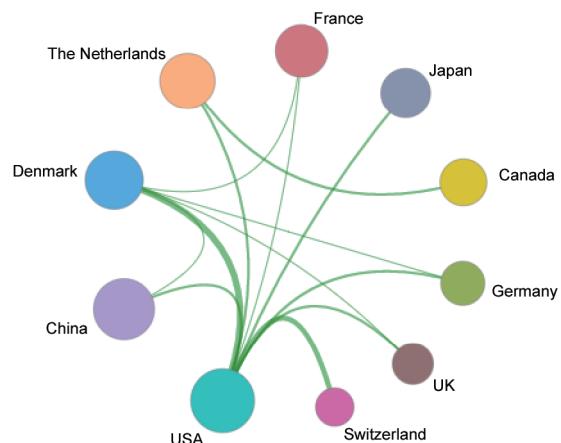


图 2.2.1 “动物干细胞利用技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

缩成型技术已趋成熟。在燃烧发电方面，高效直燃发电被认为是最可行的生物质利用方式，是未来重要的发展方向。而以林产废弃物为原料生产燃料乙醇目前转化效率仍然偏低，仍在实验阶段，开发木质纤维素为原料的乙醇生产技术将是未来研发的重点。以树木高含油种子为原料萃取生物柴油的技术仍在探索阶段，距离产业化还有一定的距离，属于今后研发的重点方向之一。

本前沿专利公开量美国最多，占绝对优势（见表 2.2.3），中国位居第 2，平均被引数国别间差异不大。从核心专利的主要产出机构（见表 2.2.4）可

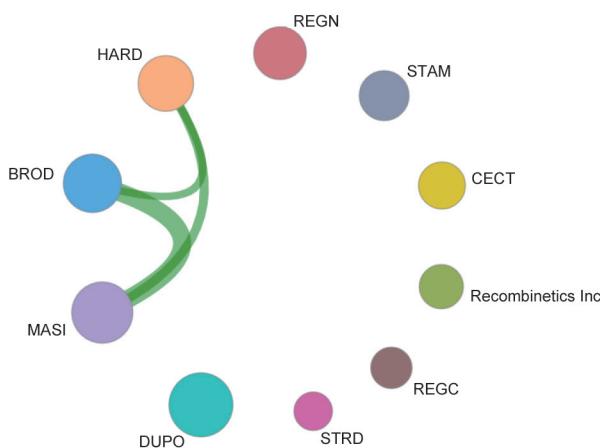


图 2.2.2 “动物干细胞利用技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

以看出，BUTA 公司公开量最多。从主要国家或地区的合作网络图（见图 2.2.3）可以看出，美国联合荷兰及英国合作紧密。从机构间的合作网络图（见图 2.2.4）可以看出，中国苏州的 2 家公司有一定的合作关系。

### 2.2.3 作物转基因技术

转基因技术是利用现代生物技术，将人们期望的目标基因，经过人工分离、重组后，导入并整合到生物体的基因组中，从而改善生物原有的性状或赋予其新的优良性状。除了转入新的外源基因外，还可以通过转基因技术对生物体基因的加工、敲除、

屏蔽等方法改变生物体的遗传特性，获得人们希望得到的性状。这一技术的主要过程包括外源基因的克隆、表达载体构建、遗传转化体系的建立、遗传转化体的筛选、遗传稳定性分析和回交转育等。

本前沿专利项目公开量以美国和中国为主（见表 2.2.5）。美国的专利项目公开量占比最大，平均被引数也较高。从核心专利的主要产出机构（见表 2.2.6）可以看出，机构间变化逐步下降。从国家或地区间合作网络图（见图 2.2.5）可以看出，美国和丹麦及智利合作密切。从机构间的合作网络图（见图 2.2.6）可以看出，MASI、Broad Inst Inc 与 HARD 间联系紧密。

## 第二部分 领域报告：农业

表 2.2.3 “农业废弃物与生物质能源转化”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	141	67.46%	2816	70.10%	19.97
2	China	32	15.31%	531	13.22%	16.59
3	The Netherlands	9	4.31%	166	4.13%	18.44
4	Canada	8	3.83%	167	4.16%	20.88
5	Germany	5	2.39%	99	2.46%	19.80
6	Denmark	4	1.91%	80	1.99%	20.00
7	UK	4	1.91%	116	2.89%	29.00
8	Australia	3	1.44%	77	1.92%	25.67
9	France	3	1.44%	37	0.92%	12.33
10	Japan	3	1.44%	52	1.29%	17.33

表 2.2.4 “农业废弃物与生物质能源转化”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	BUTA	USA	14	6.70%	350	8.71%	25.00
2	SHEL	USA	8	3.83%	216	5.38%	27.00
3	DUPO	USA	7	3.35%	141	3.51%	20.14
4	Suzhou Mingyue Pharm Technology Co Ltd	China	7	3.35%	109	2.71%	15.57
5	UNVO	USA	6	2.87%	114	2.84%	19.00
6	XYLE	USA	6	2.87%	116	2.89%	19.33
7	DOWC	USA	5	2.39%	75	1.87%	15.00
8	Suzhou Miracpharma Technology Co Ltd	China	5	2.39%	79	1.97%	15.80
9	ANGC	USA	4	1.91%	62	1.54%	15.50
10	Api Intellectual Property Holdings LLC	USA	4	1.91%	55	1.37%	13.75

注：BUTA 表示 Butamax advanced biofuels LLC；SHEL 表示 Shell Int. Res. Mij Bv；DUPO 表示 Dupont Nutrition Biosciences APS；UNVO 表示 UOP LLC；XYLE 表示 Xyleco Inc.；DOWC 表示 Dow Global Technologies LLC；ANGC 表示 Angus Chemical Company。

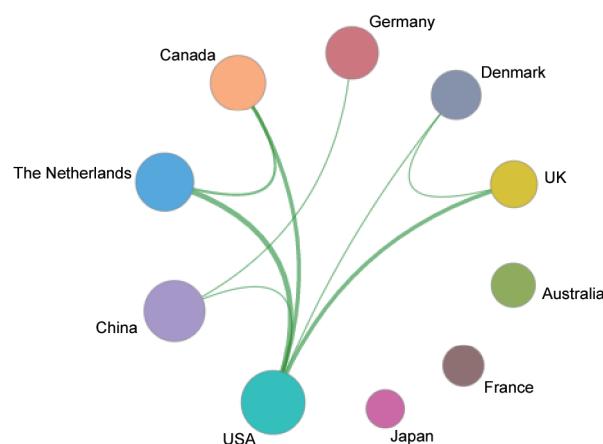


图 2.2.3 “农业废弃物与生物质能源转化”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

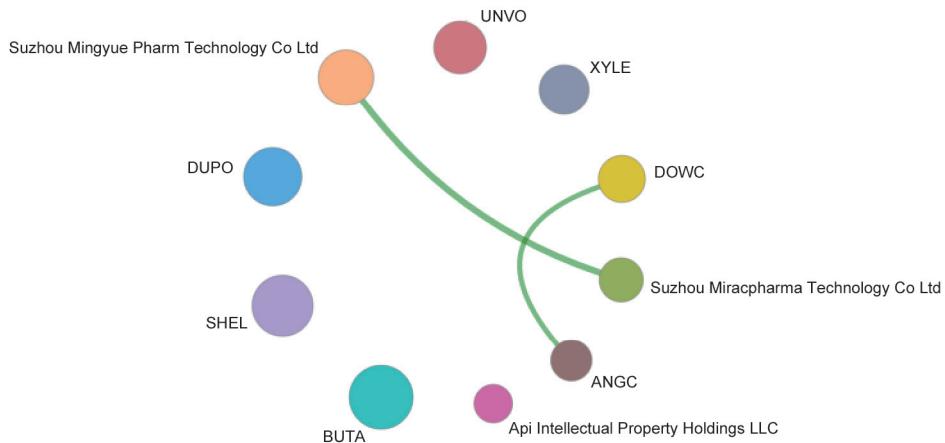


图 2.2.4 “农业废弃物与生物质能源转化”工程开发前沿主要机构间的合作网络

表 2.2.5 “作物转基因技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	462	62.60%	9959	70.05%	21.56
2	China	114	15.45%	1285	9.04%	11.27
3	Denmark	35	4.74%	717	5.04%	20.49
4	Germany	31	4.20%	721	5.07%	23.26
5	Switzerland	24	3.25%	592	4.16%	24.67
6	UK	24	3.25%	334	2.35%	13.92
7	The Netherlands	24	3.25%	456	3.21%	19.00
8	Japan	19	2.57%	307	2.16%	16.16
9	France	17	2.30%	325	2.29%	19.12
10	Canada	16	2.17%	202	1.42%	12.63

表 2.2.6 “作物转基因技术”工程开发焦点中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HARD	USA	35	4.74%	940	6.61%	26.86
2	NOVO	Denmark	34	4.61%	736	5.18%	21.65
3	DUPO	USA	32	4.34%	500	3.52%	15.63
4	Broad Inst Inc	USA	27	3.66%	954	6.71%	35.33
5	MASI	USA	27	3.66%	959	6.75%	35.52
6	BUTA	USA	26	3.52%	688	4.84%	26.46
7	Moderna Therapeutics	USA	14	1.90%	599	4.21%	42.79
8	HOFF	Switzerland	13	1.76%	287	2.02%	22.08
9	STAM	The Netherlands	13	1.76%	180	1.27%	13.85
10	CAGS	China	12	1.63%	149	1.05%	12.42

注：HARD 表示 Harvard College；NOVO 表示 Novozymes AS；DUPO 表示 Dupont Nutrition Biosciences APS；MASI 表示 Massachusetts Inst. Technology；BUTA 表示 Butamax Advanced Biofuels LLC；HOFF 表示 Hoffmann La Roche & Co Ag F；STAM 表示 Dsm Intellectual Property Assets Manage；CAGS 表示 Inst. Crop Sci. Chinese Acad. Agric. Sci.。

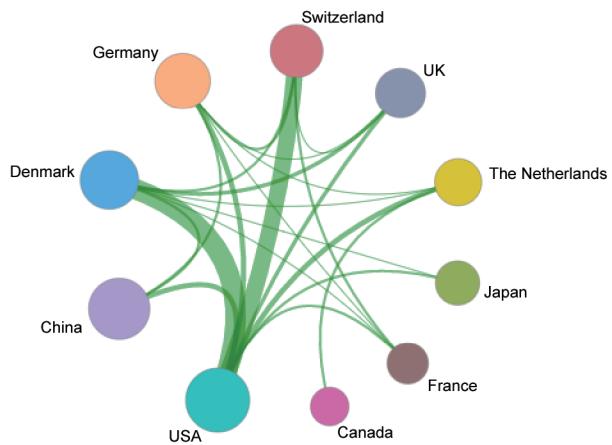


图 2.2.5 “作物转基因技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

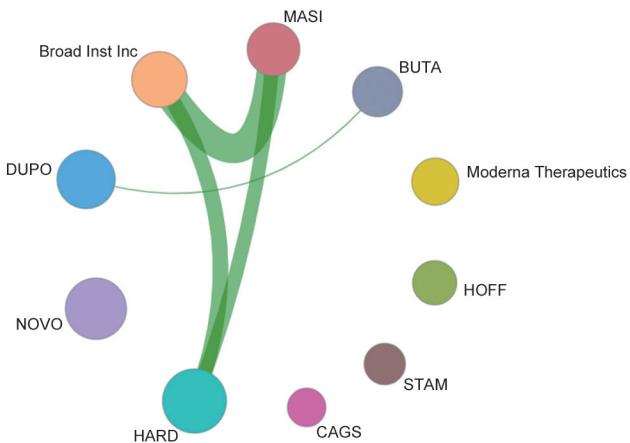


图 2.2.6 “作物转基因技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

### 领域课题组人员

领域课题组：

康绍忠 李召虎 刘旭 邓秀新 赵要风

黄海涛 缴续 梁真真 闻丹岩 许建香

袁文业 李晨英 师丽娟 刘子瑜 杨爱东

王岩 邢璐

领域咨询专家组：

陈焕春 陈温福 康绍忠 李玉 罗锡文

麦康森 南志标 沈国舫 沈建忠 宋宝安

唐启升 万建民 吴孔明 张福锁 张洪程

张守攻 赵春江 朱有勇

执笔组：

袁文业 李晨英 师丽娟 许建香 杨爱东

王岩 邢璐

# 八、医药卫生

## 1 工程研究前沿

### 1.1 Top9 工程研究前沿发展态势

医药卫生领域研判的 Top9 工程研究前沿见表 1.1.1，上述前沿涉及了基础医学、临床医学、医学信息学与生物医学工程、药学、公共卫生与预防医学、中医学等学科方向。包括了“肿瘤分子分型与靶向治疗”“干细胞与细胞治疗”“基于生物医学大数据的精准医学研究”“衰老的预防与干预”“中药安全性评价、风险控制与质量标准”“再生医学与再生微环境”“新发高致病病毒的发现及其疫情的预警与防控”“神经退行性疾病的分子机制研究”以及“肠道微生态和肿瘤的发生发展”。各个前沿所涉及的核心论文自 2012 至 2017 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

Top9 各医药卫生领域研究前沿的简要内涵分述如下。

#### (1) 肿瘤分子分型与靶向治疗

肿瘤分子分型属于精准医学体系中的“构建疾病新分类方法”，是精准医学体系构建的关键基础之一。它是基于肿瘤细胞的分子变异，综合其对肿瘤发生发展的驱动作用、可作为靶向靶点进行有效治疗综合而成的对肿瘤的新分类方法。创建肿瘤的分子分型，第一步是信息共享，拥有可供广泛研究的大量癌症患者的数据，探寻这些数据之间的内在联系，并将它们与分子生物学过程不断发展的知识结合起来，形成动态更新的知识网络，达到从分子水平对肿瘤实行可供临床决策应用的新分类。靶向治疗是在肿瘤分子分型的基础上，针对其中的特异性分子异常，设计出特异的靶向药物，选择合适人群进行特异性治疗，从而提高疗效、减少副作用的药物治疗方法。肿瘤分子分型和靶向治疗是不可分割的整体，分子分型是靶向治疗的基础，靶向治疗是验证分子分型是否成立的关键。第一个肿瘤靶向治疗出现于 2001 年，即治疗 BCR-Abl 融合基

表 1.1.1 医药卫生领域 Top9 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引次数	篇均被引数	平均出版年
1	肿瘤分子分型与靶向治疗	847	189 790	224.07	2014.69
2	干细胞与细胞治疗	189	31 559	166.98	2014.40
3	基于生物医学大数据的精准医学研究	768	165 076	214.94	2014.50
4	衰老的预防与干预	13	2054	158.00	2014.31
5	中药安全性评价、风险控制与质量标准	131	790	6.03	2014.88
6	再生医学与再生微环境	11	1492	135.64	2015.00
7	新发高致病病毒的发现及其疫情的预警与防控	34	6277	184.62	2014.32
8	神经退行性疾病的分子机制研究	68	9590	141.03	2014.56
9	肠道微生态和肿瘤的发生发展	55	9241	168.02	2014.76

## 第二部分 领域报告：医药卫生

表 1.1.2 医药卫生领域 Top9 工程研究前沿逐年核心论文数

序号	工程研究前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	肿瘤分子分型与靶向治疗	108	138	134	143	178	146
2	干细胞与细胞治疗	28	42	29	36	25	29
3	基于生物医学大数据的精准医学研究	127	121	131	146	116	127
4	衰老的预防与干预	1	4	3	1	3	1
5	中药安全性评价、风险控制与质量标准	15	13	22	25	35	21
6	再生医学与再生微环境	1	1	3	1	2	3
7	新发高致病病毒的发现及其疫情的预警与防控	4	9	7	4	6	4
8	神经退行性疾病的分子机制研究	11	12	11	10	10	14
9	肠道微生态和肿瘤的发生发展	3	13	8	11	10	10

因引起的慢性粒细胞白血病的伊马替尼。随后分子分型和靶向治疗在肺癌的研究上发展迅速：吉非替尼——表皮生长因子受体酪氨酸激酶抑制剂( EGFR TKIs )治疗 EGFR 突变型肺癌、克唑替尼——ALK 抑制剂治疗 ALK 融合基因型和 ROS1 融合基因型肺癌。之后更发现 ALK 融合基因可引起不同的癌症并创造出新词 ALKoma , 标志着癌症的一种新亚型出现了。晚期 ALK 肺癌的靶向治疗效果，总生存也从中位 10 个月提高到当今的 50 个月。肿瘤分子分型和靶向治疗涉及的领域，涵盖了对癌症本质的分子生物学研究、生物信息学和基因分析各种新技术的研究、药物靶点的发现和相应药物的研发、分子诊断方法的确立、创新型临床试验的设计和实施。这些领域，无一不是目前生命科学的最前沿，它几乎引导着未来 20 年医学科学的研究方向，而其中的靶点药物研究则可以说是永恒的课题。

### (2) 干细胞与细胞治疗

干细胞 ( stem cell ) 是一类具有自我更新和多向分化潜能的细胞，在一定条件下可以分化为多种功能细胞。干细胞根据其所处的发育阶段可大致分为胚胎干细胞 ( ESC ) 和成体干细胞 ( ASC ) 。从分化细胞重编程获得的类胚胎干细胞称为诱导多能干细胞 ( iPSC ) 。 ESC 或 iPSC 能够高度增殖并分化为机体的各种细胞类型； ASC 是一种存在于全

身多种组织的未分化细胞，具有有限的增殖能力，仅能向特定组织类型分化，参与维持机体组织器官的机能。干细胞由于具有再生人体各种组织和器官的潜在功能，在医学界常被称为“种子细胞”，干细胞技术就是利用干细胞自我更新和多向分化潜能对生物体受损的组织器官进行修复、替换或者其他干预。这种疗法对神经、血液、心脑血管、肝脏、肾脏等多个系统相关的大疾病治疗作了有益的尝试，为其有效治疗带来了新的希望，也因此成为各国政府高度关注和大力投入的战略必争领域，欧洲、美国及日本等发达国家和地区均已将干细胞研究提升为国家科技发展的重要战略进行部署并力推干细胞的临床应用。目前全世界已经开展了多项应用干细胞进行治疗的临床前研究和临床试验，例如用神经干细胞分化的多巴胺神经元治疗帕金森病、用脊髓神经干细胞治疗慢性脊髓损伤、将自体间质前体细胞用于受损组织的修复和再生等，也推动了若干干细胞药物的上市销售。各大型医药企业作为干细胞产业转化和研发的主体，都已针对干细胞及转化医学的发展趋势做出投资和布局的调整，全球超过 700 家公司正在开展干细胞及转化医学相关的研究，竞争日趋激烈。近几年来，干细胞产业一直保持快速发展的势头，根据最新预测，到 2020 年全球的干细胞市场规模将达到 4000 亿美元。

### (3) 基于生物医学大数据的精准医学研究

精准医学 (precision medicine) 是以个体化医疗为基础、随着基因组测序技术快速发展以及生物信息与大数据科学的交叉应用而发展起来的新型医学概念与医疗模式。2011年美国科学院组织编写的一份题为“迈向精准医学：为生物医学研究和新的疾病分类系统建立知识网络”的长篇报告首次提出精准医学。主要内容是通过获得大规模人群的临床和基因组及多种组学数据，将不同层次的单一或少数维度的组学信息与临床数据整合分析，构成能够揭示个体的疾病分子机制和遗传易感性的知识网络，产生基于生物学机制的疾病分类体系，并由此针对病人的基因组和其他个体特点进行预防和治疗。目的是基于个体信息和疾病分子机制进行准确预警和治疗的医疗模式，能够降低发病率，彻底解决治疗低效问题和降低医疗成本。作为未来的医疗模式和国民健康保障，精准医学将从多方面实现医疗健康的个性化服务。包括面向未患病人群即健康或亚健康个体，针对疾病特别是主要慢性病的预测预警，从而降低发病率；对于临床人群的早期诊断和精准治疗，从而提高疗效和治愈率，如根据每位患者的基因型给出最合适其病情的药物，并在最准确用药时间、最佳剂量、最小副作用下用药，对疾病的疗效和护理得到准确的反馈和评估；对于各种出生缺陷的产前检测和干预，大大降低新生儿患病风险。随着2015年奥巴马提出“精准医学计划”以来，精准医学开始在全球被广泛重视和关注，各国相继开展精准医学计划，包括英国10万人基因组计划、法国基因组医疗2025项目、韩国万人基因组计划、澳大利亚零儿童癌症计划等。中国也于2016年发布精准医学研究重点专项项目，针对我国常见高发、危害重大的疾病及若干流行率相对较高的罕见病，实施从队列、平台、技术、体系、示范应用等精准医学的全链条协同攻关，旨在显著提升人口健康水平，使精准医学成为经济社会发展新

的增长点。

### (4) 衰老的预防与干预

衰老不仅与人体生理、心理和社会功能的进行性下降有关，而且与许多残疾，乃至死亡风险的显著增加有关。追求长生不老，是人类的共同心愿，尽管人体衰老的速度各不相同，但是遗传因素和环境因素都是衰老的决定因素。采用多组学（基因组、表观遗传组、代谢组、宏基因组等）、多维度、多时间点的广义环境与健康大数据信息，并在大样本、多中心前瞻性队列数据验证的基础上，构建除年龄外更精确、更有用的衰老评价方法和寻找更有效可行的干预措施，将为衰老发生发展机制的阐明提供强有力的科学证据和为衰老预防干预提供技术手段及防治对策。本前沿研究，除了将有助于食物和生活方式评价、医疗和药物研发外，还可以应用到精准的个人健康评估和管理、公共健康政策的个性化制定和效用评估、人体衰老过程的评估和改善，如老年病、神经退行性等疾病的预防干预和机制研究。基于基因检测癌症的精准诊断和用药指导才刚刚开始显示其成效，基于个人的健康状况，评估和预防干预衰老仍严重缺乏科学证据和可行的措施，与衰老相关的疾病和人体衰老速度的研究还需要更多的投入，这将有助于提升国人对美好生活的向往和提升包括生态文明等的产业结构。采用多组学（基因组、表观遗传组、代谢组、宏基因组等技术）、包括生活方式、食物等的环境与健康大数据和结合前瞻性队列的验证，寻找除年龄外更精确、更简单的衰老评价方法，找到更有效、更可行的干预措施，采用食物、药物、生活方式和心理干预方法，并将机器学习与人工智能方法的应用与深度生物统计推断相结合是衰老预防干预研究的发展趋势和前沿。

### (5) 中药安全性评价、风险控制与质量标准

中药安全性问题一直是制约中药产业发展和公众健康的关键环节。然而中药本身物质基础的复杂

性和机体对其作用的难以预测性；中药多成分、多途径、多靶点复合作用的整体性；中药效应或毒性物质的角色转换和相互制约，与人体之间的非线性复杂作用等特点成为中药安全性评价的主要难点，制约了临床的合理应用。针对上述特点和难点，在药物非临床研究质量管理规范（GLP）评价体系的基础上，中药安全性评价应当着重阐明中药毒性特征，特别是确有疗效的“有毒”中药；应当加强控毒和减毒增（存）效研究，而不应简单的禁用；应当加强中药全环节的风险控制，重视研究的关联性和系统性。传统中药主要通过鉴定、炮制、配伍、辨证论治等方法进行风险控制。而随着风险意识的增强、质量认识的提高以及科技进步带来的变革，中药风险控制的环节已逐步扩展到毒性早期预测、实时动态监测、不良反应报告、终身追踪研究等质量控制的各个环节。因此，应以传统和现代相结合，为充分保障中药的安全和有效性，强调在中医药理论指导下，系统开展“有毒”中药及其方剂的“毒—效”表征及“方剂—单药—成分”物质基础研究，阐明“有毒”中药的毒性—功效—配伍—证候的关联关系，明确毒性特点和毒性发生、发展规律；阐明毒性物质体内代谢特点和中毒机制；建立保障安全性的质量标准、毒性早期预测和毒性防治方法；建立“有毒中药”用药风险科学评估模式和技术体系。为临床合理用药和建立有效的质量控制标准提供科学依据。

### （6）再生医学与再生微环境

再生医学是指利用生物学及工程学的理论方法创造丢失或功能损害的组织和器官，使其具备正常组织和器官的结构和功能。再生微环境是指丢失或功能损害的组织和器官再生过程中所需要的局部微环境。其关键的科学问题在于如何建立组织或器官再生的最佳再生微环境，最大限度的促进组织或器官的再生过程。20世纪以来，再生医学领域的研究表明了再生微环境与再生医学的密切联系。再生

的生物学机制离不开具有再生潜能细胞的参与及其存在的含有可溶性因子和细胞外基质的微环境。再生微环境中由细胞分泌的营养因子、粘附分子、细胞外基质分子及其他理化因子对组织或器官的再生具有重要作用，对再生微环境的研究已为再生医学的许多领域提供了关键理论及技术的指导。通过对再生微环境的研究，建立新的理论、技术、方法及产品，将为再生医学的发展开拓新的领域，从而造福人类。

### （7）新发高致病病毒的发现及其疫情的预警与防控

新发高致病病毒的发现及其疫情的预警与防控是指针对于人类高致病性病毒所实施的分离鉴定及其疫情的实时监测和防控策略的研究，最终达到及时发现、紧急预警和有效防治的目的。其关键科学问题包括对相关病毒的鉴定、传播途径和致病性的评估、流行状况的监测预警以及相关疫苗和药物等防治策略的研发等方面。随着经济全球化的高速发展，以及可能对人类生命健康、社会经济和稳定带来巨大威胁，高致病性病毒的发现及其疫情的预警和防控成为全球关注的抗击新发突发传染病的研究重点之一。目前，国际上对于新发病毒，已建立了相对成熟的测序技术和生物信息学研究体系，可快速明确基因信息及种属，并建立预警监测体系。并且，通过病毒的分离或拯救等技术，可及时获得相关毒株，从而对其进行病原学特征、传播及感染特征和致病力等方面进行深入研究。近年来在特异性抗体等蛋白类药物和疫苗的研发技术方面也取得了较大进展，可为患者的紧急救治和疫情的防控提供有效手段。近期，国际社会携手开启了“全球病毒组计划”，并且随着技术的高速发展，对新发高致病性病毒的发现和认知、疫情的监控和预警、以及防治策略的研究将会向更加精准、更短时间内完成和更加安全强效等方面向上发展。我国目前已建立了相对完善的病毒鉴

定及公共卫生监控体系，并发展了“关口前移”等国际预警策略，在防治技术上也建立了特色储备。

### (8) 神经退行性疾病的分子机制

中枢神经系统退行性疾病是以神经元慢性、进行性死亡为主要病理特征同时伴有神经炎症的一组神经系统疾病的总称，它包括阿尔茨海默病、帕金森病、多发性硬化等。衰老是这类疾病最大的风险因素。然而这类疾病起病隐匿，缺乏有效的早期诊断和治疗方法。加强对这类疾病分子机制的研究有望从根本上帮助摆脱这些困境。该领域的关键科学问题包括这类疾病致病因素的发现、发病过程关键环节的鉴别以及相应的疾病早期诊断和干预手段的建立。过去几十年来，随着一系列家族遗传性神经退行性疾病致病基因的发现，神经退行性疾病的分子机制研究从以往对专注于中枢神经系统组织病理特征的描述，发展到现在以这些致病基因为基础的生物学效应和分子机制的研究。近年来的国内外学术界在研究内容上呈现五个方面的重要变化。在分子水平上，从研究致病基因的特性和调控延伸到表观遗传学调控机制的探讨；在细胞水平上，从关注受病变最终累及的特定神经元到这些神经元与周边其他类型细胞（例如，神经胶质细胞等）之间的相互作用；在神经环路水平上，从探讨受疾病最终累及脑区到从疾病进展过程中不同脑区之间的相互作用；在系统水平上，则从侧重研究中枢神经系统本身延伸到外周组织和器官（如脑肠轴、免疫系统）对神经退行性疾病发生发展的影响；在研究手段上，利用分子标记正实现对各种神经细胞亚型的精细分类；动物模型是制约该领域发展的瓶颈之一，新的能更好模拟疾病进展过程和病理特征的动物模型正在酝酿和研制。时空分辨率更高、细胞类型特异性更强的脑影像技术发展迅速。神经退行性疾病分子机制的研究将为这些技术的建立以及疾病的早诊早治提供重要的理论基础。

### (9) 肠道微生态和肿瘤的发生发展

人体肠道微生物菌群是一个极其复杂的微生态系统，经过长期的协同进化，肠道菌群与宿主间形成了密切的共生关系，保持肠道菌群平衡对人体健康至关重要。肠道菌群失衡可能影响肿瘤的发生与发展，其关键科学问题包括肠道微生态中菌群对肿瘤发生、发展和抗肿瘤疗效影响的具体机制，哪些特定菌群发挥作用。自2007年美国首先提出人体微生物组学计划以来，肠道菌群研究已经成为了一大前沿。目前研究发现，肠道菌群既能调节机体的先天性免疫，又能通过细菌本身及其代谢产物刺激机体的获得性免疫应答。肠道菌群的失调可能导致机体免疫机制的异常，进而参与肿瘤的发生发展，特别是结直肠癌。特定的菌群还可以影响肿瘤化疗疗效，甚至影响耐药，但是目前还有很多问题悬而未决，有待于进一步深入、系统地阐明肠道菌群失衡参与肿瘤发生发展的确切机制，为肿瘤的早期防治提出新的思路与方向。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 肿瘤分子分型与靶向治疗

肿瘤分子分型属于精准医学体系中的“构建疾病新分类方法”，是精准医学体系构建的关键基础之一。它是基于肿瘤细胞的分子变异，综合其对肿瘤发生发展的驱动作用、可作为靶向靶点进行有效治疗综合而成的对肿瘤的新分类方法。创建肿瘤的分子分型，第一步是信息共享，拥有可供广泛研究的大量癌症患者的数据，探寻这些数据之间的内在联系，并将它们与分子生物学过程不断发展的知识结合起来，形成动态更新的知识网络，达到从分子水平对肿瘤实行可供临床决策应用的新分类。靶向治疗是在肿瘤分子分型的基础上，针对其中的特异性分子异常，设计出特异的靶向药物，选择合适人群进行特异性治疗，从而提高疗效、减少副作用。

用的药物治疗方法。肿瘤分子分型和靶向治疗是不可分割的整体，分子分型是靶向治疗的基础，靶向治疗是验证分子分型是否成立的关键。第一个肿瘤靶向治疗出现于 2001 年，即治疗 BCR-Abl 融合基因引起的慢性粒细胞白血病的伊马替尼。随后分子分型和靶向治疗在肺癌的研究上发展迅速：吉非替尼——表皮生长因子受体酪氨酸激酶抑制剂 (EGFR TKIs) 治疗 EGFR 突变型肺癌、克唑替尼——ALK 抑制剂治疗 ALK 融合基因型和 ROS1 融合基因型肺癌。之后更发现 ALK 融合基因可引起不同的癌症并创造出新词 ALKoma，标志着癌症的一种新亚型出现了。晚期 ALK 肺癌的靶向治疗效果，总生存也从中位 10 个月提高到当今的 50 个月。肿瘤分子分型和靶向治疗涉及的领域，涵盖了对癌症本质的分子生物学研究、生物信息学和基因分析各种新技术的研究、药物靶点的发现和相应药物的研发、分子诊断方法的确立、创新型临床试验的设计和实施。这些领域，无一不是目前生命科学的最前沿，它几乎引导着未来 20 年医学科学的研究方向，而其中的靶点药物研究则可以说是永恒的课题。

目前肿瘤分子分型和靶向治疗研究所面对的关键科学问题是：如何发展新的探测技术同时创新和应用生物信息学方法捕获肿瘤细胞和微环境的分子变异，构建肿瘤分子层面的全息图谱，可视化肿瘤的分子分型；如何整合和共享大规模的癌症患者数据和不断发展的肿瘤分子进化知识，构建新的可共享的癌症知识网络；寻找可药物作用的关键靶点和可成药的化合物；创新型临床试验和伴随诊断方法的确立。总体上的发展趋势是：由癌细胞的分子变异扩展到微环境的分子信息研究，将包括靶向治疗和免疫治疗这两大前沿的所有知识，全面一体化地融合从而构建全新的肿瘤分子分型，同时无缝连接药物研发全过程，加速靶向药物的上市，尽快造福患者。研究前沿包括：可用于肿瘤分子分型的新方法如单细胞测序、多维组织质谱成像技术、二代

甚至三代测序技术、液体活检技术等的转化应用；新靶点的发现和功能确定；成药性化合物的优化设计和筛选；免疫检查点治疗生物标志物的研究以期能精准化免疫治疗；真实世界临床大数据和分子进化数据的计算机处理和深度学习；创新性临床试验如篮子试验、伞状试验、无缝链接试验等的组织和实施。

“肿瘤分子分型与靶向治疗”研究前沿，核心论文产出国家排名前 15 位中，美国遥遥领先，占比为 77.59%，排名第一。其次是法国和德国。亚洲国家有 3 个，分别是韩国、日本和中国。中国在该领域排名第 14 位。“肿瘤分子分型与靶向治疗”研究前沿的核心论文篇均被引频次都高达 205.52~294.63（见表 1.2.1）。“肿瘤分子分型与靶向治疗”核心论文发文量排在前 10 位的机构中，有 9 个都是来自美国，另一个是法国的古斯塔夫-鲁西研究所（Institut Gustave Roussy）。其中排列前 3 位的是：德州大学 MD 安德森癌症中心（Univ Texas MD Anderson Cancer Center）、纪念斯隆-凯特琳癌症中心（Mem Sloan Kettering Cancer Center）和丹娜法伯癌症研究院（Dana Farber Canc Inst）（见表 1.2.2）。更为关键的是，近年来全球新上市的靶向药物，原始靶点的发现和药物的研发，几乎为欧美国家和日本所垄断，说明这些国家的创新能力极为强大，引领着全球这一前沿的发展方向。中国的原创性能力与他们相比差距甚大。围绕“肿瘤分子分型与靶向治疗”，发文量前 10 位的国家和发文量前 10 位的各机构之间的合作关系非常紧密（见图 1.2.1 和图 1.2.2），说明这一研究前沿全球合作的重要性和紧迫性。

从技术和发展趋势上看，中国目前处于跟跑阶段。我国入选的最重要核心论文，几乎都是大规模临床试验的结果，排位前列的研究机构，也多是以临床试验见长，这恰恰是因为我国巨大的患者资源

表 1.2.1 “肿瘤分子分型与靶向治疗”研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	658	77.59%	159 929	84.24%	243.05
2	France	298	35.14%	83 149	43.80%	279.02
3	Germany	286	33.73%	73 802	38.88%	258.05
4	UK	261	30.78%	65 664	34.59%	251.59
5	Italy	239	28.18%	64 624	34.04%	270.39
6	Spain	203	23.94%	55 926	29.46%	275.50
7	Canada	184	21.70%	49 067	25.85%	266.67
8	Australia	176	20.75%	51 855	27.31%	294.63
9	Belgium	144	16.98%	32 407	17.07%	225.05
10	South Korea	135	15.92%	35 398	18.65%	262.21
11	Switzerland	115	13.56%	23 635	12.45%	205.52
12	Japan	109	12.85%	26 706	14.07%	245.01
13	Poland	103	12.15%	30 047	15.83%	291.72
14	China	102	12.03%	21 767	11.47%	213.40
15	The Netherlands	93	10.97%	23 672	12.47%	254.54

表 1.2.2 “肿瘤分子分型与靶向治疗”研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Texas MD Anderson Cancer Center	167	19.69%	44 188	23.28%	264.60
2	Mem Sloan Kettering Cancer Center	161	18.99%	50 392	26.54%	312.99
3	Dana Farber Canc Inst	153	18.04%	42 927	22.61%	280.57
4	Massachusetts Gen Hosp	91	10.73%	29 236	15.40%	321.27
5	Univ Calif Los Angeles	80	9.43%	26 751	14.09%	334.39
6	Mayo Clin	77	9.08%	22 088	11.63%	286.86
7	Univ Calif San Francisco	64	7.55%	16 326	8.60%	255.09
8	Inst Gustave Roussy	61	7.19%	21 581	11.37%	353.79
9	Univ Penn	59	6.96%	17 214	9.07%	291.76
10	Weill Cornell Med Coll	55	6.49%	16 523	8.70%	300.42

之故。如果西方国家联合全球资源进行临床试验，我们这一优势也不会存在，这是值得特别关注的。

对“肿瘤分子分型与靶向治疗”领域发展的建议：加强肿瘤分子分型和靶向治疗关键技术如单细胞测序、多位质谱成像技术、新知识框架的研究和转化，尤其需要研究机构和临床中心从源头的实

质性合作；加强生物信息学人才的培养，这可能是未来制约这一领域发展的最大瓶颈；加强加快新药特别是原创性靶向药物研发，将伴随诊断和新药开发捆绑在一起，清除一切妨碍研发的体制性障碍；信息共享和全球合作的激励实施；选取1~2个方向，探索以临床应用结局为导向，由目前

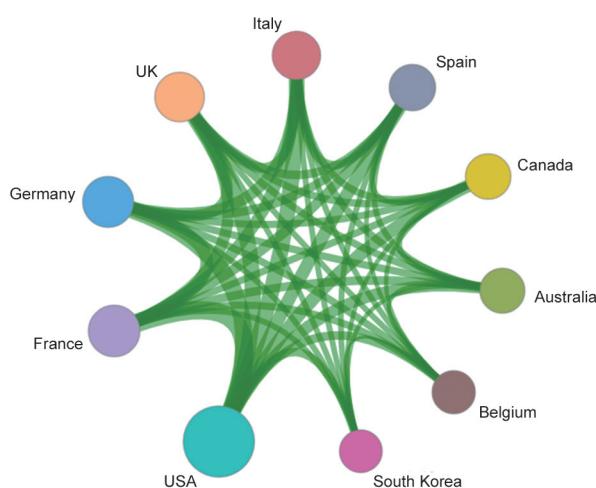


图 1.2.1 “肿瘤分子分型与靶向治疗”研究前沿主要国家或地区间的合作网络

国内相应研究力量最强的机构指令性完成。

### 1.2.2 干细胞与细胞治疗

干细胞 (stem cell) 是一类具有自我更新和多向分化潜能的细胞，在一定条件下可以分化为多种功能细胞。干细胞根据其所处的发育阶段可大致分为胚胎干细胞 (ESC) 和成体干细胞 (ASC)。从分化细胞重编程获得的类胚胎干细胞称为诱导多能干细胞 (induced pluripotent stem cell，即 iPSC)。ESC 或 iPSC 能够高度增殖并分化为机体的各种细胞类型；ASC 是一种存在于全身多种组织的未分

化细胞，具有有限的增殖能力，仅能向特定组织类型分化，参与维持机体组织器官的机能。

干细胞由于具有再生人体各种组织和器官的潜在功能，在医学界常被称为“种子细胞”，干细胞技术就是利用干细胞自我更新和多向分化潜能对生物体受损的组织器官进行修复、替换或者其它干预。这种疗法对神经、血液、心脑血管、肝脏、肾脏等多个系统相关的大疾病治疗作了有益的尝试，为其有效治疗带来了新的希望，也因此成为各国政府高度关注和大力投入的战略必争领域，欧、美及日本等发达国家均已将干细胞研究提升为国家科技发展的重要战略进行部署并力推干细胞的临床应用。目前全世界已经开展了多项应用干细胞进行治疗的临床前研究和临床试验，例如用神经干细胞分化的多巴胺神经元治疗帕金森病、用脊髓神经干细胞治疗慢性脊髓损伤、将自体间质前体细胞用于受损组织的修复和再生等，也推动了若干干细胞药物的上市销售。各大型医药企业作为干细胞产业转化研发主体，都已针对干细胞及转化医学的发展趋势做出投资和布局的调整，全球超过 700 家公司正在开展干细胞及转化医学相关的研究，竞争日趋激烈。近几年来，干细胞产业一直保持快速发展的势头，根据最新预测，到 2020 年全球的干细胞市场规模将达到 4000 亿美元。

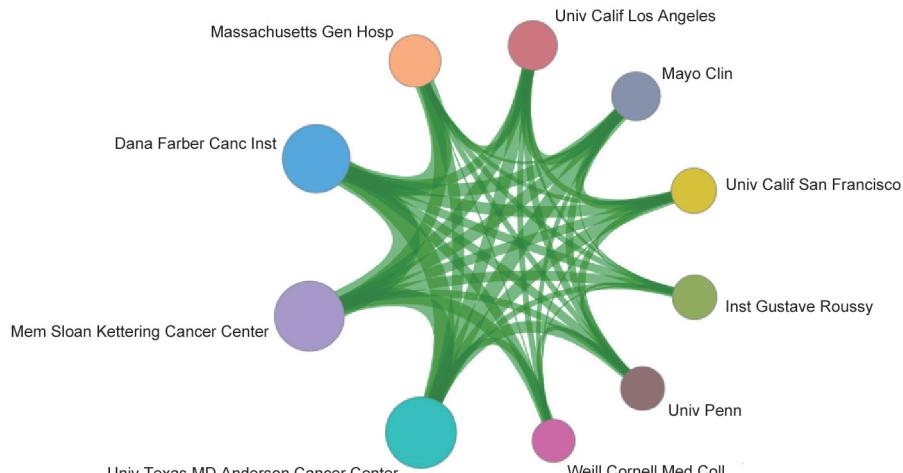


图 1.2.2 “肿瘤分子分型与靶向治疗”研究前沿主要机构间的合作网络

纵观国内外发展态势，目前干细胞研发拟解决的关键技术问题包括：临床级别的多能干细胞的建立与培养方法：多能干细胞的多能性特别是基态（ground state）的维持机制，体外重编程方法的优化，多能干细胞特征性的表面分子抗原、转录因子，多功能性的退出、谱系分化机制以及成瘤性问题；

临床级别的组织干细胞的分离与培养方法：组织干细胞本身存在异质性和表面标志物不明确，目前体外培养方法不能长期维持干细胞的生长和扩增；

多能干细胞定向分化：利用多能干细胞的多系分化潜能，在体外利用生长因子、药物干预等方法，建立由多能干细胞定向分化为特定细胞或组织的方法，比如胰岛细胞、内皮细胞、造血干细胞等；

转分化：利用机体自身的成熟体细胞作为起始细胞，通过表达一些特定的基因或者用药物诱导从而转变成为另外一种细胞的方法，近年来又有报道使用原位转分化使受损组织的其他细胞转变为目的地细胞起到治疗的作用；体外形成复杂结构：干细胞在体外利用3D培养技术，在一些特殊的材料支持下，可以自发形成类器官，具有一些类似于正常机体组织和器官的功能和结构，为日后的人造组织和器官移植打下基础；干细胞的遗传和表观遗传的操控技术：由于干细胞特殊的生物学特性，如何利

用新兴的基因编辑技术对干细胞进行操控，实现基因治疗，具有重大的临床价值。这些关键问题也正是当今的研究前沿。

在“干细胞与细胞治疗”研究中，核心论文发表数量位于前3位的是美国、中国和英国。“干细胞与细胞治疗”研究前沿的核心论文篇均被引频次均较高（122.71~253.82），说明多个国家都非常重视这个领域的研究，篇均被引频次排名前3的国家为意大利、澳大利亚和荷兰，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为122.71（见表1.2.3）。从核心论文产出国的合作网络来看，核心论文数量排名前10的国家之间都有密切的合作关系（见图1.2.3）。“干细胞与细胞治疗”核心论文发文量排在前10位的机构中，排列前3位的来自美国和中国，分别是：美国哈佛大学（Harvard University）、美国斯坦福大学（Stanford University）和上海交通大学（Shanghai Jiao Tong University）（见表1.2.4）。从核心论文产出机构排名前10的合作网络图来看，机构间部分有合作（见图1.2.4）。

由以上统计分析结果可见，在“干细胞与细胞治疗”研究前沿，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势。“十二五”“十三五”期间，国

表1.2.3 “干细胞与细胞治疗”研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	115	60.53%	19 537	61.88%	169.89
2	China	28	14.74%	3436	10.88%	122.71
3	UK	23	12.11%	3855	12.21%	167.61
4	Germany	22	11.58%	3282	10.40%	149.18
5	Japan	22	11.58%	3920	12.42%	178.18
6	Italy	17	8.95%	4315	13.67%	253.82
7	The Netherlands	16	8.42%	2986	9.46%	186.63
8	France	15	7.89%	2382	7.54%	158.80
9	Canada	14	7.37%	1831	5.80%	130.79
10	Australia	13	6.84%	2521	7.98%	193.92

表 1.2.4 “干细胞与细胞治疗”研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	23	12.11%	4010	12.70%	174.35
2	Stanford Univ	14	7.37%	2252	7.13%	160.86
3	Shanghai Jiao Tong Univ	8	4.21%	801	2.54%	100.13
4	Howard Hughes Med Inst	7	3.68%	1094	3.47%	156.29
5	Univ Hlth Network	7	3.68%	604	1.91%	86.29
6	Univ Toronto	7	3.68%	708	2.24%	101.14
7	Johns Hopkins Univ	6	3.16%	1578	5.00%	263.00
8	Univ Med Ctr Utrecht	6	3.16%	1512	4.79%	252.00
9	Univ Miami	6	3.16%	1084	3.43%	180.67
10	Boston Childrens Hosp	6	3.16%	956	3.03%	159.33

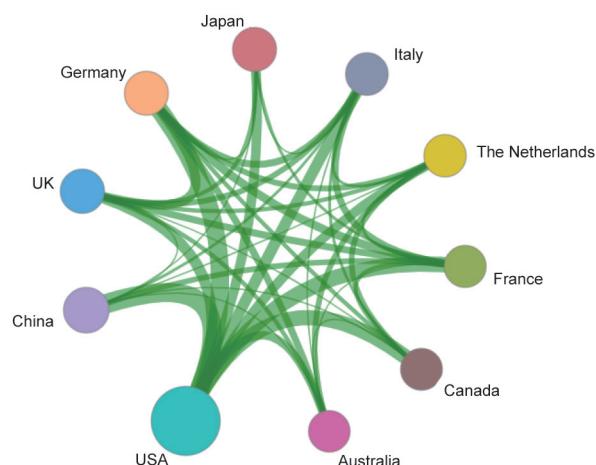


图 1.2.3 “干细胞与细胞治疗” 研究前沿的主要国家或地区间合作网络

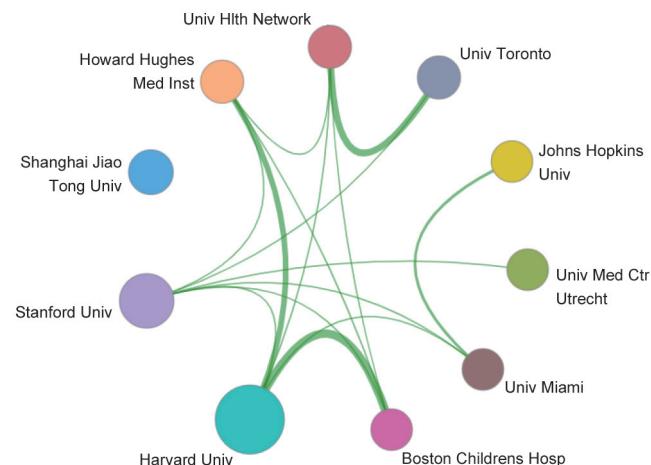


图 1.2.4 “干细胞与细胞治疗” 研究前沿主要机构间的合作网络

家进一步加大了对干细胞研究的投入，并专门设立了“干细胞研究国家重大科学计划”“干细胞与再生医学战略性科技先导专项”等重大科技计划，在干细胞的基础研究、关键技术和资源平台建设等方面已取得了一定进展。但与美国、欧洲、日本等发达国家和地区相比，仍存在很大差距，具体表现为研发投入相对较低，基础研究成果转化滞后，干细胞转化研究的核心技术与原创成果不足；在干细胞的转化应用和产业化布局方面大多还集中在组织干细胞存储领域，依靠资源收集、规模扩张作为盈利的主要手段，目前尚无规范化的干细胞转化应

用和干细胞产品上市；在临床试验方面，我国注册的干细胞相关临床试验也多以较成熟的成体干细胞为主，在代表干细胞与再生医学发展趋势的多能干细胞转化应用方面较为欠缺；此外，我国干细胞治疗相关的技术规范、标准、伦理等研究相对滞后，特别是缺乏专门从事干细胞质控和标准研究的队伍和学术机构，一些逃避政府监管、缺乏临床前研究数据的干细胞治疗屡禁不止，使我国的干细胞及转化医学研究在国际上备受诟病，这些都影响了我国干细胞及转化医学的健康发展。

近几年来，干细胞产业一直保持快速发展的势

头。美国等发达国家占据干细胞产业的主要市场，我国干细胞生物技术产业还主要是上游产业，以干细胞存储为主。尽管我国政府针对干细胞基础研究成果转化步伐缓慢的现状已经出台了一系列具有创意的法规和政策，但国内干细胞临床转化的步伐仍有待进一步加快。临床转化的主要瓶颈之一就是缺乏对于各类干细胞产品的严格行业和国家标准，因此，倡导干细胞产品质控标准研究和加强相关专业的人才培养是推动中国干细胞和转化医学研究及产业发展的重要措施。

### 1.2.3 基于生物医学大数据的精准医学研究

精准医学（Precision Medicine）是以个体化医疗为基础、随着基因组测序技术快速发展以及生物信息与大数据科学的交叉应用而发展起来的新型医学概念与医疗模式。2011年美国科学院组织编写的一份题为“迈向精准医学：为生物医学研究和新的疾病分类系统建立知识网络”的长篇报告首次提出精准医学。主要内容是通过获得大规模人群的临床和基因组及多种组学数据，将不同层次的单一或少数维度的组学信息与临床数据整合分析，构成能够揭示个体的疾病分子机制和遗传易感性的知识网络，产生基于生物学机制的疾病分类体系，并由此针对病人的基因组和其他个体特点进行预防和治疗。目的是基于个体信息和疾病分子机制进行准确预警和治疗的医疗模式，能够降低发病率，彻底解决治疗低效问题和降低医疗成本。作为未来的医疗模式和国民健康保障，精准医学将从多方面实现医疗健康的个性化服务。包括面向未患病人群即健康或亚健康个体，针对疾病特别是主要慢病的预测预警，从而降低发病率；对于临床人群的早期诊断和精准治疗，从而提高疗效和治愈率，如根据每位患者的基因型给出最合适其病情的药物，并在最准确用药时间、最佳剂量、最小副作用下用药，对疾病的疗效和护理得到准确的反馈和评估；对于各种出生缺陷的产前检测和干预，大大降低新

生儿患病风险。随着2015年奥巴马提出精准医学计划，精准医学开始在全球被广泛重视和关注，各国相继开展精准医学计划，包括英国10万人基因组计划、法国基因组医疗2025项目、韩国万人基因组计划、澳大利亚零儿童癌症计划等。中国也于2016年发布精准医学研究重点专项项目，针对我国常见高发、危害重大的疾病及若干流行率相对较高的罕见病，实施从队列、平台、技术、体系、示范应用等精准医学的全链条协同攻关，旨在显著提升人口健康水平，使精准医学成为经济社会发展新的增长点。

目前基于生物医学大数据的精准医学研究所面临的关键科学问题是生物医学大数据存储分散、标准不规范、共享和利用率低、生命组学和医疗信息有机融合的大数据资源尚未形成体系。生命科学领域的年数据生产能力在短短十余年中实现了从GB级到EB级九个数量级的跨越。承载精准医学数据收集、管理、整合、利用职能的数据中心的建设已经成为各精准医学计划中不可或缺的基础支撑平台。在基础生物组学数据收集和共享方面，自20世纪80年代开始，美国、欧洲和日本即已分别建立了三大生物数据中心——NCBI、EBI、DDBJ，掌管着全世界绝大多数生物数据和知识资源。在临床医学数据收集和共享方面，美国国立卫生研究院（NIH）早在2004年就资助建立了临床数据仓库i2b2，以实现各类健康管理系统的数据。目前，i2b2开发的扩展框架已经可以融合基因组数据，辅助肿瘤等疾病的个性化治疗。除此之外，目前欧盟还在积极建设生物大数据中心BioMedBridges。在生命组学数据与医疗信息融合方面，HL7 V3标准正在从医疗领域向健康和组学领域扩展；Ensemble等主流医疗信息集成引擎正在发展基于语义的集成配置技术；美国“从大数据到知识”（BD2K）计划研究数据整合、管理、分析和共享相关的方法和软件工具；英国医学研究理事会2014年设立“医学生物信息学计划”，研究组学数据和健康记录

的整合方法。中国目前已经建成针对不同研究目的的数据中心，如中国科学院北京基因组研究所生命健康大数据中心、中国科学院生物物理研究所的 NONCODE 数据库、北京大学生物信息中心、上海生物信息技术研究中心、深圳华大基因研究院的生物信息综合分析平台、基础医学科学数据中心等。中国通过《卫生信息数据集元数据规范》《卫生信息数据集分类与编码规则》《卫生信息数据元标准化规则》《电子病历基本架构与数据标准（试行）》等一系列标准推进医疗数据的标准化和医疗数据的共享，创建了基于 HL7、DICOM 等接口技术的集成引擎，将分散的医疗数据进行有机整合。目前基于生物医学大数据的精准医学研究包括以下几项重要环节：规模型的表型和组学数据积累是前提，包括大量临床人群队列和自然人群前瞻性队列；建立大数据集中管理与共享服务平台或者目前已有的数据中心之间的连通接口是精准医学研究的基础；研发基于异构计算、云计算、人工智能、区块链等先进技术的高效处理利用、深度解析、有机融合生物医学大数据的标准化技术体系是精准医学研究的关键；建立以疾病为中心的，面向临床决策的精准医学知识库与临床决策支持系统是基础研究

到临床应用快速转化的出发点和最终落脚点。精准医学大数据的存储整合、深度挖掘与转化应用，为未来健康科学研究与实现国家全民健康目标发挥巨大作用。

在“基于生物医学大数据的精准医学研究”研究中，核心论文发表位于前三位的是美国、英国和加拿大，美国遥遥领先于其他国家，处于领跑位置。中国处于第四，表明中国目前处于跟跑阶段。近年来，随着中国“精准医学研究”生物医学重点专项的开展，中国在这一领域的研究发展迅速，核心论文发表量每年快速递增。“基于生物医学大数据的精准医学研究”研究前沿的核心论文篇均被引频次均较高（122.52~285.03），说明多个国家都非常重视这个领域的研究（见表 1.2.5）。从核心论文产出国的合作网络来看，核心论文数量排名前十的国家之间都有密切的合作关系（见图 1.2.5）。

“基于生物医学大数据的精准医学研究”核心论文发文量排在前十位的机构中，排列前三位均来自美国，分别是：美国哈佛大学（Harvard University）、丹娜法伯癌症研究院（Dana-Farber Cancer Institute）、纪念斯隆-凯特琳癌症中心（Memorial Sloan-Kettering Cancer Center）（见表 1.2.6）。从核心论文产出机构排名前 10 的合作网络图来看，

表 1.2.5 “基于生物医学大数据的精准医学研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	577	74.74%	136 758	82.84%	237.02
2	UK	158	20.47%	44 160	26.75%	279.49
3	Canada	116	15.03%	31 964	19.36%	275.55
4	China	107	13.86%	13 110	7.94%	122.52
5	Germany	104	13.47%	25 253	15.30%	242.82
6	Italy	81	10.49%	22 652	13.72%	279.65
7	Australia	70	9.07%	17 717	10.73%	253.10
8	The Netherlands	68	8.81%	19 007	11.51%	279.51
9	France	68	8.81%	18 494	11.20%	271.97
10	Spain	63	8.16%	17 957	10.88%	285.03

表 1.2.6 “基于生物医学大数据的精准医学研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	142	18.39%	50 610	30.66%	356.41
2	Dana Farber Canc Inst	123	15.93%	38 814	23.51%	315.56
3	Mem Sloan Kettering Canc Ctr	96	12.44%	28 722	17.40%	299.19
4	Univ Texas MD Anderson Canc Ctr	93	12.05%	22 483	13.62%	241.75
5	Massachusetts Gen Hosp	71	9.20%	20 971	12.70%	295.37
6	Brigham & Womens Hosp	66	8.55%	20 917	12.67%	316.92
7	Univ Calif San Francisco	59	7.64%	16 021	9.70%	271.54
8	NCI	52	6.74%	14 251	8.63%	274.06
9	Univ Cambridge	52	6.74%	16 478	9.98%	316.88
10	MIT	51	6.61%	20 359	12.33%	399.20

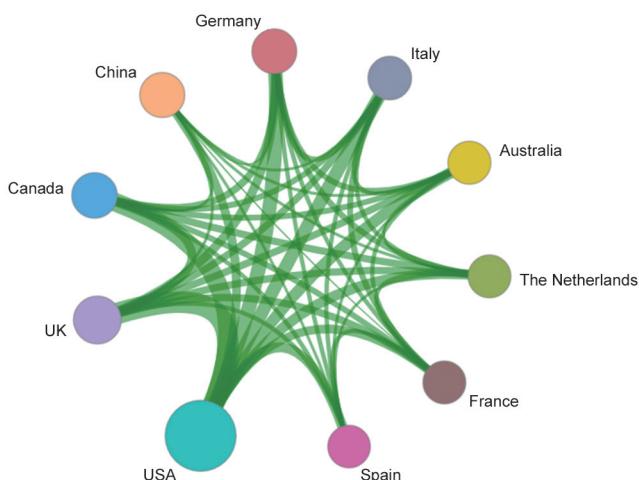


图 1.2.5 “基于生物医学大数据的精准医学研究”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

机构间也都有密切合作（见图 1.2.6），说明现阶段“基于生物医学大数据的精准医学研究”的研究越来越深入、越来越复杂，领跑型的研究不能完全靠一个机构单独完成，必须加强机构之间的合作，提醒中国研究机构在注重国内机构合作外，同时也应该加强国际机构的合作。

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

医药卫生领域研判的 Top10 工程开发前沿见

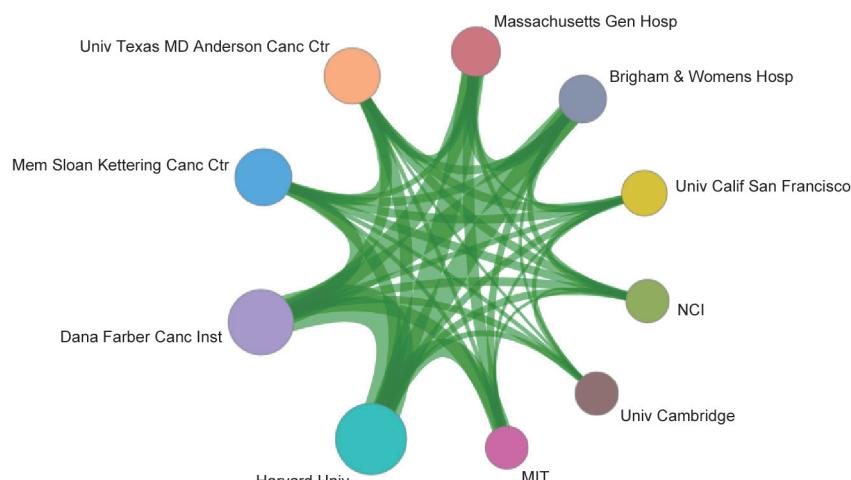


图 1.2.6 “基于生物医学大数据的精准医学研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 2.1.1，涉及基础医学、临床医学、药学、医学信息学与生物医学工程和公共卫生与预防医学等学科方向。其中“人工智能与疾病诊断”和“人工智能与健康管理”是新兴前沿，“干细胞技术”“生物医用材料”“肿瘤免疫治疗”“基因编辑”“机器人手术系统”“远程医疗”“个体化肿瘤治疗疫苗”和“医用 3D 打印技术”是传统研究的深入。

各个前沿所涉及的专利自 2012 至 2017 年的逐年专利公开量见表 2.1.2。

### (1) 干细胞技术

干细胞技术 (Stem Cell Technology) 是通过对干细胞进行分离、培养、诱导以及分化等过程，实现修复、改善或再生人体组织器官以及治疗疾病目标一种技术。干细胞具有自我更新和多分化潜能的特性，能够分化成体内所有类型细胞，因此它可能为解决人类面临的许多医学难题提供保障，如血液系统疾病（如白血病）、神经系统疾病（如帕金森氏病）、心血管疾病（如心肌梗死）、内分泌疾病（如糖尿病）等，干细胞技术有可能从根本上攻克这些疾病。除以上细胞治疗之外，干细胞在组织器官修复、疾病模型、药物筛选、精准医疗领域都有广阔的应用前景。随着干细胞技术不断提高，与其相关的治疗有望成为继药物治疗和手术治疗后的第三种

疾病治疗途径，引领现有临床治疗模式的深刻变革。巨大的应用前景激发世界各国对于干细胞研究的支持，推动干细胞技术的快速发展。在干细胞获取方式、干细胞命运调控机制、功能性细胞的获得等多项干细胞关键技术领域都取得了重要进展。基础研究的快速发展加快了干细胞在临床治疗领域的步伐，造血干细胞移植已经是成熟的治疗方案，一系列干细胞临床试验已经展现出良好的治疗效果，科学家已经可以利用干细胞技术改善患者视力，实现了干细胞在临床应用的飞跃性的第一步。此外，干细胞相关药物已达 350 种。

### (2) 人工智能与疾病诊断

人工智能与疾病诊断 (Artificial intelligence and disease diagnosis) 是运用人工智能技术，开展医学数据（包括医学影像及其他医学信息）驱动下的健康筛查与预警、病理检测与分析、疾病诊断与分类、手术计划与治疗、术后评估与康复等过程的自主学习，实现疾病的精准诊断和智能诊断。人工智能技术在医疗领域的应用，显著提升了医师的工作效率，有望缓解医师短缺的困境，提升诊断与治疗的准确性，促进优质医疗资源的优化配置，推动医疗进入量化分析的新高度，引领医疗技术进入新时代。

表 2.1.1 医药卫生领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引频次	平均公开年
1	干细胞技术	8458	8943	1.06	2014.88
2	人工智能与疾病诊断	747	2064	2.76	2015.48
3	生物医用材料	2326	2696	1.16	2015.19
4	肿瘤免疫治疗	8508	23 004	2.70	2014.89
5	人工智能与健康管理	745	2053	2.76	2015.48
6	基因编辑	2529	12 042	4.76	2015.89
7	机器人手术系统	2976	35 337	11.87	2014.96
8	远程医疗	2195	5102	2.32	2014.91
9	个体化肿瘤治疗疫苗	460	844	1.83	2015.06
10	医用 3D 打印技术	1896	2121	1.12	2016.05

表 2.1.2 医药卫生领域 Top10 工程开发前沿的逐年专利公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	干细胞技术	1145	1117	1122	1433	1537	2104
2	人工智能与疾病诊断	58	69	68	95	175	282
3	生物医用材料	208	266	276	398	481	697
4	肿瘤免疫治疗	1088	1108	1239	1353	1630	2090
5	人工智能与健康管理	58	68	68	94	175	282
6	基因编辑	55	90	227	400	679	1078
7	机器人手术系统	298	374	507	483	593	721
8	远程医疗	229	285	307	432	522	420
9	个体化肿瘤治疗疫苗	50	51	73	59	101	126
10	医用 3D 打印技术	22	50	109	289	591	835

### (3) 生物医用材料

生物医用材料 (biomedical materials) 是用来对生物体进行诊断、治疗、修复或替换人体损坏的组织、器官或增进其功能的一类材料。生物医用材料起源于 20 世纪 40 年代中期，产业形成在 20 世纪 80 年代。生物医用材料的应用不仅挽救了大量的危重患者的生命，显著降低了心血管病、癌症、创伤等重大疾病的死亡率，而且显著提高了人类的健康水平和生命质量，同时对当代医疗技术的革新和医疗卫生系统的改革正在发挥引导作用，并显著降低医疗费用，是解决当前看病难、看病贵及建设和谐稳定社会的重要物质基础。生物医用材料的发展主要经历了以下几个阶段，采用部分氧化物陶瓷、医用碳素材料、及大多数医用金属和高分子材料等普遍具有生物惰性的材料阶段，主要采用具有较高的生物相容性及可控降解性的生物活性玻璃、生物陶瓷及其复合物等多种生物活性材料阶段。到目前针对生物医用材料的开发研究主要集中在改进和发展传统生物医用材料以及开发基于细胞、分子水平的第三代生物医用材料。

### (4) 肿瘤免疫治疗

肿瘤免疫治疗是指应用免疫学原理和方法，提高肿瘤细胞的免疫原性和对效应细胞杀伤的敏感性，激发和增强机体抗肿瘤免疫应答，并将免疫细

胞或效应分子输入患者体内，协同机体免疫系统杀伤肿瘤细胞，从而抑制肿瘤生长的疗法。其包括免疫检查点单克隆抗体抑制剂、治疗性抗体、免疫细胞治疗、肿瘤疫苗和小分子抑制剂等。肿瘤免疫细胞治疗近年来因其疗效显著而备受关注，已成为科学界与医药企业界的热门领域。2013 年 12 月，《科学》杂志将肿瘤免疫治疗列为年度十大科学突破之首。2016 年 4 月，肿瘤免疫治疗登上美国《时代》杂志封面。至今，美国食品药品监督管理局 (FDA) 和欧洲药监部门相继批准了三种 PD-1 抑制剂、双特异性抗体药物 Blinatumomab 治疗白血病、溶瘤病毒疗法 T-vec 治疗黑色素瘤。各类主要免疫激活和抑制信号分子已成为肿瘤免疫疗法的研究对象，而新的免疫检查点药物、各类嵌合抗原受体免疫疗法以及小分子抑制剂是目前竞争较为激烈的领域。相比肿瘤的传统治疗方式，肿瘤免疫治疗具有反应快、副作用小、疗效持久等优势。但肿瘤免疫治疗也存在一些不足，如机体过度免疫反应、肿瘤组织免疫抑制性微环境和肿瘤细胞存在异质性等，如何进一步提高疗效与特异性、控制不良反应、扩大适应证，是未来研究的方向。具体而言，未来需要对免疫细胞进行精准工程化修饰，筛选更多生物标志物，传统肿瘤治疗方法与免疫治疗相结合或者不同免疫疗法相结合的探索等。总之，肿瘤免疫疗法被认为是

与手术、化疗和放疗并列齐驱的“第四种治疗方法”，未来有可能在晚期、复发性和难治性肿瘤患者中获得根治性治疗效果。

### (5) 人工智能与健康管理

人工智能健康管理是指利用人工智能、大数据等技术，以数字化、智能化的方式，针对个人或人群的健康危险因素进行全面管理的过程。随着计算机技术的不断发展，健康管理经历了由互联网技术为基础的健康管理1.0时代，到以移动互联网为基础的健康管理2.0时代，再到以人工智能、大数据为基础的健康管理3.0新时代。随着大数据、人工智能、区块链等技术的进一步发展，人工智能健康管理正在由实验室研发走入市场，逐步应用于亚健康人群、老年群体以及慢性疾病和高危人群，有效地降低个人的患病风险，同时降低医疗开支。据测算，到2020年前后健康服务业将达到8万亿元的市场规模，年均增长26%。尤其是国内掌握健康大数据资源的第三方体检机构正在加速布局与探索。随着以人工智能等信息技术的不断发展、现代医学疾病谱的不断完善以及医学管理科学新理念新思想的涌现，未来人工智能健康管理将会得到蓬勃发展，在显著降低医疗成本的同时提升全民的健康素质，最终达到疾病预防的目的，从而实现大健康。

### (6) 基因编辑

基因编辑是指对基因组中的特定DNA片段进行敲除、加入、替换等。从1994年第一代巨核酶技术的出现，再到2012年CRISPR/Cas技术的问世，基因编辑技术逐渐成熟并快速发展。目前基因编辑技术已经可以简易、高效地在活细胞内对基因组单个或多个位点进行编辑。同时，以CRISPR/Cas技术为基础发展起来的其他相关技术，如基因激活、基因抑制、RNA编辑、表观遗传编辑、单碱基编辑等，为生物学研究、疾病发生和发展机制研究及疾病治疗提供了强有力的工具。目前，基因编辑技术已广泛应用于动物模型的构建、新药靶点的筛

选、动植物育种等方面，并逐步从实验室走入临床，应用于抗病毒治疗、CAR-T细胞治疗、血液疾病治疗等。通过体外对病人细胞进行基因编辑，再将编辑后的细胞输回病人体内，CRISPR/Cas基因编辑技术将很快应用于地中海贫血和癌症的临床治疗。基因编辑应用于体内基因治疗面临的挑战包括体内精确编辑效率的提高、脱靶的降低以及新型高效的递送体系的建立。这些问题的解决无疑将加速基因编辑针对如遗传性失明、耳聋、脊髓性肌萎缩症、杜氏肌营养不良症等罕见遗传病的治疗。建立严格的操作标准和伦理准则、开发自主产权的基因编辑工具以及建立完备的临床级生产体系用于基因工具的递送，将促进基因编辑技术应用于疾病治疗中。

### (7) 机器人手术系统

机器人手术系统指用于辅助外科医生进行复杂微创手术的智能操作系统。自1984年第一台机器人辅助外科手术开展以来，机器人手术系统历经不同科技公司的多代革新，直至目前已在心脏外科及心脏电生理、结直肠外科、胃肠外科、乳腺外科、妇科、儿科、整形外科、脊柱外科、移植外科及泌尿外科等医学领域有较为广泛的应用。如今，医生可以借助机器人手术系统在远离术区的控制台前，借助三维视觉，双手控制主操作摇杆，将手部动作传达到机械臂及手术器械，完成手术操作。这种直观同向的主从控制工作方式增加了操作的精确性和平稳性，同时配合可由术者自行调整的三维立体高清术野，使得传统方式下微创手术的复杂性降低，缩短了医生的手术学习曲线。机器人手术系统的问世，突破了传统微创手术的局限性，协助医生以近似开放手术的方式，在狭小的手术空间进行精细操作，不仅降低了部分高风险手术的围术期并发症发生率，同时也为一些高难度微创手术开展提供了可能。随着机器人手术系统的不断完善，机械臂整体结构将向小型化、轻量化改进，携带触觉反馈的传感系统的开发将进一步还原医生的操作手感。同

时借助机器人手术系统的远程手术会诊、专业手术教学，也将进一步提高医疗效率，实现有限医疗资源更加合理的分配。

#### (8) 远程医疗

远程医疗即应用远程通信技术来交互式传递信息，以开展远距离医疗服务，是一种将现代医学、计算机技术和通信技术紧密结合的新型医疗服务模式。远程医疗需要针对性发展互联网、无线通信、物联网、虚拟现实、电子病历、云计算、医疗大数据、人工智能等先进技术，开发智能终端（计算机、手机、平板电脑、虚拟现实设备等）和智能健康医疗产品（如远程血压仪、远程心电仪、远程胎心仪等），实现患者与医务人员、医疗机构、医疗设备之间的智能化医疗互动。远程医疗的应用范围非常广泛，其主要内容包括：以检查诊断为目的的远程医疗诊断系统、以咨询会诊为目的的远程医疗会诊系统、以治疗为目的的远程手术系统、以教学培训为目的的远程医疗教育系统和以家庭病床为目的的远程病床监护系统，其最终目的是实现医疗资源的优化配置，为医疗资源欠缺地区提供智能化的高质量医疗服务。我国远程医疗起步相对较晚，普遍认为我国最早的远程医疗技术运用是在1986年。如今随着各项技术的成熟，远程医疗加速发展，我国已在远程诊断、远程会诊、医学影像远程会诊、人工智能辅助诊断、远程挂号、远程教学和信息共享等方面取得重要进展。远程医疗的未来发展方向已从疾病救治发展到疾病预防的阶段，面向个人提供个性化和智能化的医疗服务，实现日常医疗预防、医疗监控服务和智能化诊疗服务。

#### (9) 个体化肿瘤治疗疫苗

个体化肿瘤治疗疫苗是指为单个肿瘤患者量身定做的治疗性疫苗。该类疫苗是通过对患者肿瘤细胞和正常细胞进行测序发现肿瘤细胞的特异性突变基因，筛选出能够引起免疫反应的突变靶点并制备出具有独特表位的肿瘤新抗原疫苗。2017年7月，

Nature杂志刊登了美国和德国科学家的两项个体化黑色素瘤疫苗的I期临床试验结果（Nature, 2017, 547:217–221；Nature, 2017, 547:222–226），分别以多肽和mRNA为基础制备的肿瘤新抗原疫苗在少数患者中成功地减少或延缓了黑色素瘤手术后复发或者转移，标志着个体化肿瘤治疗疫苗首次在临幊上取得成功。作为一种全新的肿瘤治疗方法，该技术理论上适用于任何癌症，尤其在预防复发和转移方面具有巨大的临幊潜力。而恶性肿瘤在治疗后的复发和转移仍是目前面临肿瘤治疗的重大问题。该技术同时有望弥补现有肿瘤免疫疗法存在的不足，如免疫检查点抑制剂复杂的作用机制、CAR-T细胞疗法涉及复杂的基因工程改造等。个性化肿瘤疫苗正在成为肿瘤免疫疗法新的研究前沿，也代表了精准医学未来的发展方向。当然，该领域的研究仍然面临诸多挑战：包括疫苗定制周期较长，平均需3个月，可能会使其应用限制在增长缓慢的癌症上；另外，尚需确定哪些肿瘤类型能从中获益，目前研究主要集中在突变较多的肿瘤如黑色素瘤。该技术的发展仍需大量的基础性研究：以个体化肿瘤特异性T细胞表位的快速发现、更为高效的T细胞表位递送途径为突破口，研究肿瘤细胞单细胞表达谱的快速检测技术，结合云计算与人工智能研究个体可应答T细胞表位的快速高效分析技术，研究高效的T细胞表位疫苗的胞内导入途径，最终加速个体化肿瘤治疗性疫苗的研发和临床转化。

#### (10) 医用3D打印技术

医用3D打印技术是指以医学应用为导向，基于患者的医学影像学数据制作可适用个性化三维医疗产品的增材制造技术。3D打印在医学领域面临的挑战以及未来的研究前沿集中在3D打印机的性能优化、新型可打印材料的研制、精准建模软件开发、多细胞及生长因子的精准3D打印等。随着精准及个性化医学的发展、新型生物材料及打印设备的研发，医用3D打印技术在制备医学模型、康复医疗器械、手术导板、3D打印植人物、人造组织

器官以及药品筛选等领域得到广泛的应用，已有通过 FDA 和 CFDA 认证的医用 3D 打印产品包括 3D 打印骨科金属植入物、3D 打印陶瓷义齿、3D 打印硬脑膜补片等，而生物 3D 打印的人工组织、器官目前还停留在实验研究阶段。与国外相比，当前国内 3D 打印行业呈现为设备研发热情高、装备性能接近国际先进水平、服务和应用积极，但打印材料种类较少、品质较差、缺乏研发；医学应用市场规模小、支付体系与医保不衔接；国内相关企业规模小、研发投入少、在国际上的竞争力不足；缺乏相应的 3D 打印产品的标准与注册规范。随着 3D 打印技术的发展，医用 3D 打印制品在不久的将来不仅可以实现“尺寸与外形”的个性化，还能逐渐满足解剖结构、力学性能、生物学功能等诸多差异化需求，产品种类也已从医疗模型向生物 3D 打印人工器官发展。医用 3D 打印技术的这些进展对于再生医学的发展具有重大而深远的意义，它有可能在未来二十年内从根本上改变再生医学的现状。

### 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

#### 2.2.1 干细胞技术

干细胞技术（Stem Cell Technology）是通过对干细胞进行分离、培养、诱导以及分化等过程，实现修复、改善或再生人体组织器官以及治疗疾病目标一种技术。干细胞具有自我更新和多分化潜能的特性，能够分化成体内所有类型细胞，因此它可能为解决人类面临的许多医学难题提供保障，如血液系统疾病（如白血病）、神经系统疾病（如帕金森氏病）、心血管疾病（如心肌梗死）、内分泌疾病（如糖尿病）等，干细胞技术有可能从根本上攻克这些疾病。除以上细胞治疗之外，干细胞在组织器官修复、疾病模型、药物筛选、精准医疗领域都有广阔应用前景。随着干细胞技术不断提高，与其相关的治疗有望成为继药物治疗和手术治疗后的第三

种疾病治疗途径，引领现有临床治疗模式的深刻变革。巨大的应用前景激发世界各国对于干细胞研究的支持，推动干细胞技术的快速发展。在干细胞获取方式、干细胞命运调控机制、功能性细胞的获得等多项干细胞关键技术领域都取得了重要进展。基础研究的快速发展加快了干细胞在临床治疗领域的步伐，造血干细胞移植已经是成熟的治疗方案，一系列干细胞临床实验已经展现出良好的治疗效果，科学家已经利用干细胞技术改善患者视力，实现了干细胞在临床应用的飞跃性的第一步。此外，干细胞相关药物已达 350 种。

干细胞技术研发拟解决的关键技术问题主要包括：改进和优化干细胞获取和干性维持问题，探究干细胞定向分化和调控等机制问题，组织干细胞获得、功能和调控问题，解析组织与器官形成机理问题，构建人工组织器官技术平台问题，干细胞移植后体内功能建立和调控问题，建立安全性和有效性评估技术问题。目前国际上研究的前沿分支领域包括：  
· 多能干细胞诱导方法：利用化学小分子、转录因子以及 CRISPR 等快速获取高质量多能干细胞技术；获得可临床应用的人诱导多能干细胞的安全方法；处于基态的人胚胎干细胞的定义及其诱导方法。  
· 干细胞状态维持：完善干细胞多能性网络维持需要的表观遗传调控因素，解析它们如何协同调控细胞命运转变因子；成体干细胞（如间充质、造血、神经干细胞等）的鉴定、获取、体外维持及规模化扩增。  
· 干细胞定向分化：通过改进培养方法或优化诱导策略将干细胞分化为特定胚层和特定功能的细胞；确定干细胞分化过程规模化扩增的物理学和生物学条件，逐步实现智能化诱导分化和功能细胞获取的技术。  
· 干细胞移植后体内功能的建立与调控：建立细胞移植后追踪技术，明确特定类型细胞对疾病的治疗效果。  
· 基于干细胞的组织和器官功能修复：采用微器官培养技术或结合生物材料，构建脑、胰腺、肝和牙齿等功能性模块修复组织和器官。干细胞具有巨大的市场前景。得益于近十年快速发

展，干细胞研究逐渐从实验室走向临床，走向产业化。全球干细胞产业近两年的潜在市场约为 800 亿美元，到 2020 年前后可高达 4000 亿美元。在我国，干细胞产业同样前景可期。有研究报告认为，我国干细胞产业已经形成了从上游存储到下游临床应用的完整产业链，预计未来 5 年干细胞产业收入将从目前的 20 亿元增长到 300 亿元，年均增长率达 17%。

“干细胞技术”工程开发前沿的专利，排名前 3 的国家或地区为中国、美国、韩国，其中中国作者申请的专利占比达到了 41.55%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，但平均被引频次仅为 0.63（见表 2.2.1），证明专利质量尚有提高空间。从专利产出的国家之间的合作网络（见图 2.2.1）来看，美国和日本、瑞士以及韩国合作较为密切。

专利产出排名前 3 的机构分别是广州赛莱拉干细胞科技股份有限公司（Guangzhou Saliai Stemcell Science and Technology Co. Ltd.）、日本京都大学（Kyoto University）和美国南加州大学（University of Southern California）（见表 2.2.2）。而从主要机构间的合作网络（见图 2.2.2）来看，本开发前沿主要机构之间只有首尔国立大学工业基金会（Seoul National University Industry Foundation）和韩国

Konkuk 大学工业合作公司（Konkuk University Industrial Cooperation Corp.）之间存在合作关系。综合以上统计分析结果，“干细胞技术”开发前沿，我国目前处于与国外同类专利领跑的态势，在专利数量方面比重较大，是该开发前沿的重点国家之一。

## 2.2.2 人工智能与疾病诊断

人工智能与疾病诊断（Artificial intelligence and disease diagnosis）是运用人工智能技术，开展医学数据（包括医学影像及其他医学信息）驱动下的健康筛查与预警、病理检测与分析、疾病诊断与分类、手术计划与治疗、术后评估与康复等过程的自主学习，实现疾病的精准诊断和智能诊断。人工智能技术在医疗领域的应用，显著提升了医师的工作效率，有望缓解医师短缺的困境，提升诊断与治疗准确性，促进优质医疗资源的优化配置，推动医疗进入量化分析的新高度，引领医疗技术进入新时代。

人工智能与疾病诊断研究拟解决的关键技术问题主要包括：医学数据标注的准确性和规范性问题、有限或不完整医学数据的机器学习问题、多源医学数据的混合学习问题、人工智能在不同疾病应用中的特征选择问题、医学数据的隐私保护和安全问题、

表 2.2.1 “干细胞技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	3514	41.55%	2203	24.63%	0.63
2	USA	1694	20.03%	3123	34.92%	1.84
3	South Korea	1181	13.96%	824	9.21%	0.70
4	Japan	863	10.20%	1094	12.23%	1.27
5	Taiwan of China	169	2.00%	179	2.00%	1.06
6	Germany	111	1.31%	176	1.97%	1.59
7	France	90	1.06%	118	1.32%	1.31
8	UK	85	1.00%	110	1.23%	1.29
9	Russia	82	0.97%	15	0.17%	0.18
10	Switzerland	70	0.83%	156	1.74%	2.23

## 第二部分 领域报告：医药卫生

表 2.2.2 “干细胞技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	Guangzhou Saliai Stemcell Science and Technology Co. Ltd.	209	2.47%	72	0.81%	0.34
2	Kyoto University	103	1.22%	247	2.76%	2.40
3	University of Southern California	87	1.03%	156	1.74%	1.79
4	Seoul National University Industry Foundation	81	0.96%	29	0.32%	0.36
5	LG Chem Co. Ltd.	66	0.78%	76	0.85%	1.15
6	The Catholic University of Korea Industry-Academic Cooperation Foundation	55	0.65%	4	0.04%	0.07
7	Industry-Academic Cooperation Foundation Yonsei University	52	0.61%	20	0.22%	0.38
8	Konkuk University Industrial Cooperation Corp	49	0.58%	1	0.01%	0.02
9	Zhejiang University	47	0.56%	22	0.25%	0.47
10	Agency for Science Technology and Research	44	0.52%	100	1.12%	2.27

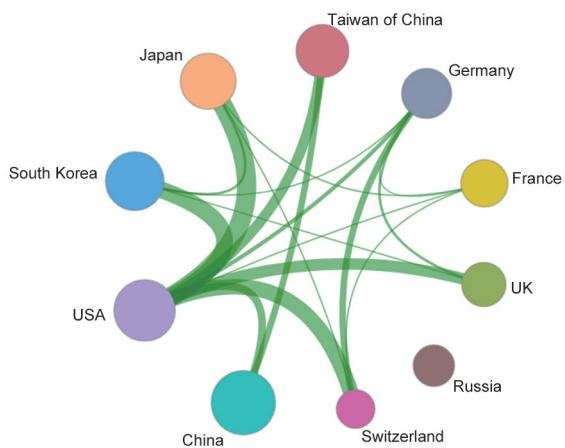


图 2.2.1 “干细胞技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

人工智能在手术介入和康复中的应用问题等。目前国际上研究的前沿分支领域包括： 眼部疾病：采用深度网络学习技术对视网膜眼底图像进行学习，可用于青光眼、黄斑变性和糖尿病性视网膜病变等疾病的诊断。 肿瘤治疗：通过整合患者病理样本特征提取和基因组测序数据，结合临床指南和循证医学，针对肿瘤患者制定个体化、权威化诊疗方案。该方案已经用于肺癌、食管癌等疾病的治疗。 病

理诊断：通过特征提取、深度学习等方法将定量化诊断、疾病预后有机结合，已用于肺癌、宫颈癌、乳腺癌、胃癌以及肠癌等疾病的病理诊断，可降低误诊率、降低人力成本。 医学影像：通过大数据库以及深度学习，许多人工智能（AI）算法被成功用于多种医学影像，如脑部磁共振成像（MRI）的阿厄兹海默病分类精确度已达 91.67%；美国 Arterys 公司的 AI 辅助心脏 MRI 成像系统已经通过 FDA 认证。 皮肤疾病：AI 技术通过相应模型进行迁移学习，对皮肤癌、黑色素瘤进行诊断，准确率达 90% 以上，极大地节省了医疗检测成本。

手术机器人：以美国 Intuitive Surgical 公司开发的达芬奇手术机器人系统为代表的一系列手术机器人已经应用于泌尿、心血管、骨科以及神经外科等领域，手术视野更清晰，手术效率更高。AI 与医疗市场的市场需求非常巨大，近年来每年以 40% 的速度在增长，但美国等西方国家仍占据高中端市场。

“人工智能与疾病诊断”工程开发前沿的专利排名前 3 的国家为中国、美国和韩国，其中，中国和美国作者申请的专利占比分别达到了

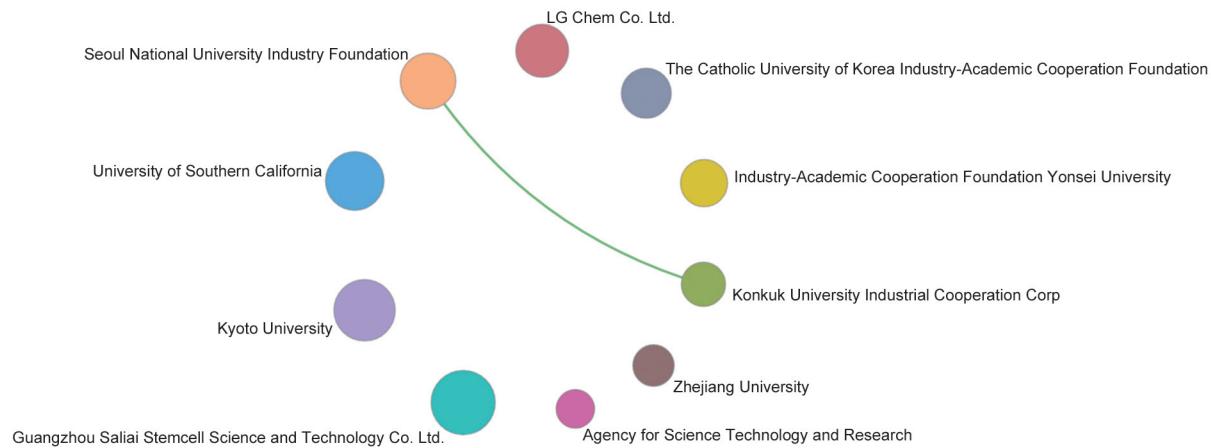


图 2.2.2 “干细胞技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

41.37% 和 33.07%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家，但中国的平均被引频次为仅为 1.66，在前 10 国家中名列第 9，远低于以色列(13)、美国(4.73)和瑞士(4.2)(见表 2.2.3)。从专利产出的国家之间的合作网络(见图 2.2.3)来看，美国与德国以及印度的合作较为密切。

专利产出排名前 3 的机构分别是西门子健康股份有限公司(Siemens Healthcare Gmbh)、中国国家电网有限公司(State Grid Corporation, China)和美国国际商业机器公司(International Business Machines Corporation, US)(见表 2.2.4)。从主要机构间的

合作网络(见图 2.2.4)来看，本开发前沿主要机构之间基本不存在合作关系。

### 2.2.3 生物医用材料

生物医用材料(Biomedical Materials)是用来对生物体进行诊断、治疗、修复或替换人体损坏的组织、器官或增进其功能的一类材料。生物医用材料起源于上世纪 40 年代中期，产业形成在上世纪 80 年代。生物医用材料的应用不仅挽救了大量的危重患者的生命，显著降低了心血管病、癌症、创伤等重大疾病的死亡率，而且显著提高了人类的健康水平和生命质量，同时对当代医疗技术的革新和

表 2.2.3 “人工智能与疾病诊断”开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	309	41.37%	513	24.85%	1.66
2	USA	247	33.07%	1168	56.59%	4.73
3	South Korea	46	6.16%	33	1.60%	0.72
4	Germany	32	4.28%	95	4.60%	2.97
5	Japan	22	2.95%	58	2.81%	2.64
6	India	21	2.81%	48	2.33%	2.29
7	Canada	16	2.14%	51	2.47%	3.19
8	Israel	7	0.94%	91	4.41%	13.00
9	Switzerland	5	0.67%	21	1.02%	4.20
10	France	5	0.67%	16	0.78%	3.20

## 第二部分 领域报告：医药卫生

表 2.2.4 “人工智能与疾病诊断”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	Siemens Healthcare GmbH	33	4.42%	81	3.92%	2.45
2	State Grid Corporation	19	2.54%	11	0.53%	0.58
3	International Business Machines Corporation	15	2.01%	34	1.65%	2.27
4	HeartFlow Inc	11	1.47%	57	2.76%	5.18
5	Iteris Inc	10	1.34%	19	0.92%	1.90
6	General Electric Co.	7	0.94%	33	1.60%	4.71
7	Merge Healthcare Inc.	7	0.94%	3	0.15%	0.43
8	Beihang University	7	0.94%	8	0.39%	1.14
9	Microsoft Corporation	6	0.80%	26	1.26%	4.33
10	Jilin Agriculture Science & Technology College	5	0.67%	0	0.00%	0.00



图 2.2.3 “人工智能与疾病诊断”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

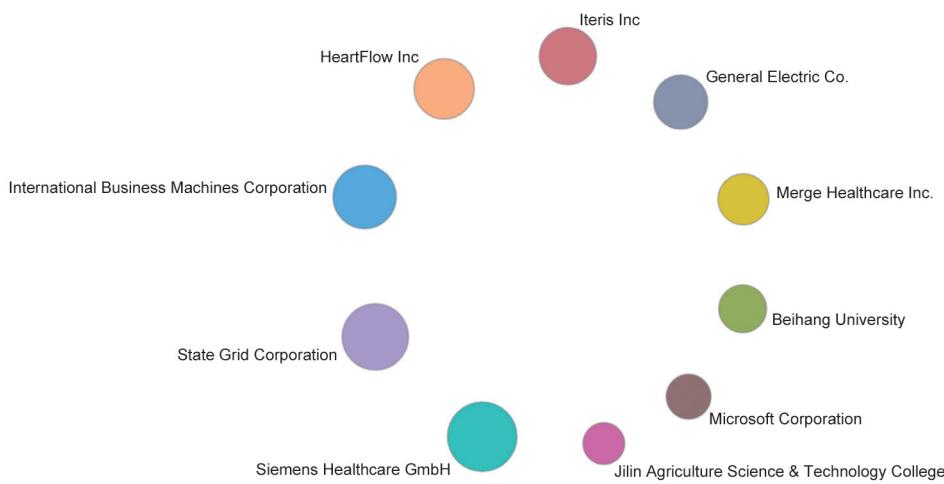


图 2.2.4 “人工智能与疾病诊断”工程开发前沿主要机构间的合作网络

医疗卫生系统的改革正在发挥引导作用，并显著降低医疗费用，是解决当前看病难、看病贵及建设和谐稳定社会的重要物质基础。生物医用材料的发展主要经历了以下几个阶段，采用部分氧化物陶瓷、医用碳素材料、及大多数医用金属和高分子材料等普遍具有生物惰性的材料阶段，主要采用具有较高的生物相容性及可控降解性的生物活性玻璃、生物陶瓷、及其复合物等多种生物活性材料阶段。到目前针对生物医用材料的开发研究主要集中在改进和发展传统生物医用材料以及开发基于细胞、分子水平的第三代生物医用材料。

生物医用材料研发拟解决的关键技术问题主要包括：改进和发展传统生物医用材料的生物相容性评价问题，设计与合成新的降解材料问题，研发具有全面生理功能的人工器官和组织材料问题，研发新的药物释放体系和药物载体材料问题，材料表面改性的技术问题，纳米医用材料问题。全球医疗器械市场增长迅速。生物医用材料产业作为一种低原材料消耗、低能耗、高技术附加值的新兴产业，近年来呈现良好的发展趋势，市场需求非常巨大。近 10 年来，一直在以 8% 的年增长率递增，2013 年已达 1300 亿美金，2016 年已达 2200 亿美金。美国等西方国家占据生物医用材料的高中端市场，中国国产生物医用材料市场占有率为 3%，主要是产品的低端市场。但在研发上来看，2012—2017 年生物医用材料开发前沿的专利中国申请数量排名第一，申请的专利占比达到了 69.91%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，但在专利质量上仍待进一步提高，在专利被引用总量及平均被引数量上还和美国差距较大。生物医用材料目前国际上发展的前沿领域包括：

生物降解材料：植入人体并经过一段时间后，能逐渐被分解或被代谢的材料。被植入的这种异物在完成使命后，会自动分解成无毒无害的物质，从体内排出。组织工程材料与人工器官：是指用工程的原理与方法构建生物装置，以替代受损组织或器

官功能，包括生物支架、种子细胞、生长因子等，建立由细胞与生物材料构成的三维空间复合体，发展方向是生物相容性好并被人体逐步降解吸收的生物材料。组织工程骨与软骨修复材料：结合电纺丝技术与 3D 打印技术，利用工程的原理，针对骨与关节的缺损，利用脂肪、成骨、软骨干细胞等，结合电纺丝技术，开发人工成骨、软骨以及人工膝关节、髋关节、半月板、人工韧带、人工肌肉等。

口腔修复材料：开发针对颌面部、下颌骨、牙齿缺损等修复的系列生物材料。控制释放材料：药物以恒定速度、在一定时间内从材料中释放的过程。材料分为天然材料和合成高分子材料。仿生智能材料：根据生物大分子的协同相互作用，模仿其协同行为来构思生物医用材料，可使材料具有所期望的宿主响应，即实现智能化。抗菌膜生物材料：植入材料表面易形成一种菌膜，会保护细菌，从而引起术后感染，大约 2%~3% 的发生率，如何设计制备相应的生物材料，解决此抗菌膜的问题，具有巨大的临床需求。纳米生物医用材料，是一个新的交叉领域，不仅涉及基因与蛋白质的结构与功能，包括它们的识别、结合、相变、特殊因子的释放、生物电化学信号的产生与传导、生物力学与热力学特性，而且还涉及新技术工具的发展。随着经济水平的提高，以及人口老龄化形式的日益严峻，世界各国对医疗市场的需求日益增大。尤其在我国，人们对生物医用材料的发展需求急剧增加，中国目前也已经成为全球第二大生物医用材料市场。发展生物医用材料产业对提高人民生活品质，改善病人愈后生活质量，延缓并改善老龄化带来的一系列社会问题意义重大。同时生物医用材料作为一种低能耗高附加值的高新技术产业，也同样具有极大的发展潜力与经济价值；另一方面，我国在传统生物医学材料的发展上已经取得了一系列的进步，在某些高端领域也实现国产化对进口的取代，但与当前临床应用实际需求相比，还有很大差距。随着材料学，分子生物学，尤其是干细胞、3D 打印等新技术的发

## 第二部分 领域报告：医药卫生

展，在生物医用材料的发展上也在进行一些新研究、新尝试，对我国的生物医用材料发展来说也存在着新的挑战和机遇。

“生物医用材料”工程开发前沿的专利排名前3的国家为中国、美国、日本，其中中国作者申请的专利占比达到了69.91%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为0.78（见表2.2.5）。美国申请专利的数量仅次于中国，但是平均被引数达到了3.27。说明我国在专利质量上还有待加强。从专利产出的国家之间的合作网络（见图2.2.5）来看，

美国和日本、中国合作较为密切。专利产出排名前3的机构分别是四川大学华西医院（West China Hospital Sichuan University）、日本德山牙科公司（Tokuyama Dental Corporation）和合肥创沃科技有限公司（Hefei Chuangwo Technology Co. Ltd.）（见表2.2.6）。从主要机构间的合作网络（见图2.2.6）来看，本开发前沿主要机构之间只有中国科学院上海硅酸盐研究所（Shanghai Institute of Ceramics Chinese Academy of Sciences）和上海交通大学（Shanghai Jiao Tong University）存在合作关系。

表2.2.5 “生物医用材料”工程开发前沿中专利的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	1626	69.91%	1273	47.22%	0.78
2	USA	223	9.59%	730	27.08%	3.27
3	Japan	169	7.27%	196	7.27%	1.16
4	South Korea	107	4.60%	51	1.89%	0.48
5	Taiwan of China	28	1.20%	45	1.67%	1.61
6	Germany	25	1.07%	54	2.00%	2.16
7	UK	25	1.07%	88	3.26%	3.52
8	Switzerland	19	0.82%	30	1.11%	1.58
9	France	17	0.73%	14	0.52%	0.82
10	India	16	0.69%	1	0.04%	0.06

表2.2.6 “生物医用材料”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	West China Hospital Sichuan University	39	1.68%	48	1.78%	1.23
2	Tokuyama Dental Corporation	36	1.55%	36	1.34%	1.00
3	Hefei Chuangwo Technology Co. Ltd.	30	1.29%	0	0.00%	0.00
4	South China University of Technology	25	1.07%	32	1.19%	1.28
5	Donghua University	23	0.99%	40	1.48%	1.74
6	Wuhu Yangzhan New Material Technology	21	0.90%	0	0.00%	0.00
7	Zhejiang University	20	0.86%	1	0.04%	0.05
8	Soochow University	18	0.77%	28	1.04%	1.56
9	Shanghai Institute of Ceramics Chinese Academy of Sciences	17	0.73%	4	0.15%	0.24
10	Shanghai Jiao Tong University	17	0.73%	15	0.56%	0.88



图 2.2.5 “生物医用材料”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络



图 2.2.6 “生物医用材料”工程开发前沿主要机构间的合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：陈赛娟 杨宝峰

院士专家：

张伯礼 徐建国 丁 健 付小兵 郝希山  
 刘志红 王红阳 陈香美 程 京 詹启敏  
 夏照帆 王广基 张志愿 宁 光 李 松  
 顾晓松 孙颖浩 黄璐琦 田志刚 李兆申  
 董家鸿

其他专家：

周荣斌 郭德银 易 凡 刘 兵 廖 专  
 邹文斌 王月英 施 健 应颂敏 张 澄

谢渭芬 王林辉 肖 亮 蒋建新 李青峰  
 吴 皓 徐 駿 白 果 沈洪兵 戚中田  
 邵中军 邬堂春 宋宏彬 钟 武 夏宁邵  
 黄 彬 蒋建东 李 冰 周辛波 郑海荣  
 李 刚 欧阳宏伟 王秀梅 解慧琪 张俊华  
 肖小河 郭兰萍 高 月 杨洪军 张卫东  
 段金廒 瘦石山 萧 伟 李海燕 果德安  
 中国工程院机关：李冬梅 张文韬 赵西路  
 Frontiers of Medicine 期刊编辑部：  
 奚晓东 严晓昱  
 上海交通大学医学院图书馆：仇晓春 邓珮雯  
 吴 慧 樊 嵘 寇建德 刘 洁

## 第二部分 领域报告：医药卫生

---

中国科学院上海科技查新咨询中心：江洪波 陆 娇  
上海交通大学医学院附属瑞金医院：黄金艳  
陈银银 代雨婷 乔 纽  
前沿报告执笔人：  
研究前沿：  
肿瘤分子分型与靶向治疗：吴一龙  
干细胞与细胞治疗：程 涛  
基于生物医学大数据的精准医疗研究：  
方向东 黄金艳  
衰老的预防与干预：邬堂春  
中药安全性评价、风险控制与质量标准：  
黄璐琦 高 月  
再生医学与再生微环境：顾晓松  
新发高致病病毒的发现及其疫情的预警与防控：  
姜世勃 陆 路  
神经退行性疾病的分子机制研究：周嘉伟

肠道微生态和肿瘤的发生发展：李兆申 施 健  
谢渭芬  
开发前沿：  
干细胞技术：裴端卿 王 波  
人工智能与疾病诊断：田 伟 韩晓光 刘文勇  
生物医用材料：崔大祥  
肿瘤免疫治疗：李兆申 廖 专 邹文斌  
人工智能健康管理：明 东  
基因编辑：杨 辉  
机器人手术系统：孙颖浩 董家鸿 王林辉  
吴震杰 肖 亮 张 旭 季加孚 田 伟  
罗清泉  
远程医疗：滕皋军 焦 蕴  
个体化肿瘤治疗疫苗：李 松 夏宁邵  
医用 3D 打印技术：戴尅戎 王金武

## 九、工程管理

### 1 工程研究前沿

#### 1.1 Top10 工程研究前沿发展态势

在工程管理领域中，全球工程研究前沿集中于以下 10 个部分，分别是制造企业服务导向战略研究、电动汽车充电策略、共享社会经济路径下的土地资源利用、气候变化对干旱地区水资源的影响研究、基于移动设备传感器的精神疾病状况诊断、区域环境治理战略规划研究、基于分布式微型电网技术的能源管理、水 – 能源 – 粮食关联关系研究、生态系统服务在生态风险评估中的应用、建成环境对通勤的影响研究，其核心论文情况见表 1.1.1 和表 1.1.2。这 10 个工程研究前沿集中包含了机械、电气、能源、环境、医学、建筑、农业等众多学科。其中制造企业服务导向战略研究、电动汽车充电策略、共享社会经济路径下的土地资源利用为重点解读的前沿，后文会详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

#### (1) 制造企业服务导向战略研究

随着经济的发展，大部分顾客不再满足于物品本身，而是需要更多的服务，需要与物品相伴随的服务。把提供物重新界定为物品—服务包，符合顾客的期望，有助于满足顾客的需求。所以越来越多的传统制造企业开始重视服务，通过向顾客提供更多的增值服务，制造企业从原有的产品同质化向服务差异化，从出售单一产品向提供整体解决方案转变。制造服务化是制造与服务深度融合的一种先进制造模式，是面向制造的服务和面向服务的制造协同发展的新型产业形态。当前，制造服务化研究前沿中的关键问题为：制造服务化商业模式竞争力影响机理研究、产品与服务优化匹配与设计、制造与服务集成化优化决策控制、产品服务化供应链协同管理研究、新信息技术在服务化转型中的作用研究等。

#### (2) 电动汽车充电策略

伴随世界石油资源的供需紧张和车辆排放法规

表 1.1.1 工程管理领域 Top10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年	常被引论文占比	被专利引用的文献占比
1	制造企业服务导向战略研究	13	288	22.15	2015.92	23.1%	0.00
2	电动汽车充电策略	18	406	22.56	2015.50	0.0%	0.00
3	共享社会经济路径下的土地资源利用	13	381	29.31	2015.54	7.7%	0.00
4	气候变化对干旱地区水资源的影响研究	4	206	51.50	2016.25	25.0%	0.00
5	基于移动设备传感器的精神疾病状况诊断	5	172	34.40	2015.40	20.0%	0.00
6	区域环境治理战略规划研究	4	51	12.75	2016.75	0.0%	0.00
7	基于分布式微型电网技术的能源管理	4	42	10.50	2016.75	50.0%	0.00
8	水 – 能源 – 粮食关联关系研究	5	57	11.40	2016.40	0.0%	0.00
9	生态系统服务在生态风险评估中的应用	4	38	9.50	2016.75	0.0%	0.00
10	建成环境对通勤的影响研究	4	64	16.00	2016.25	0.0%	0.00

表 1.1.2 工程管理领域 Top10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	制造企业服务导向战略研究	0	1	1	3	1	7
2	电动汽车充电策略	0	0	2	8	5	3
3	共享社会经济路径下的土地资源利用	2	0	3	0	0	8
4	气候变化对干旱地区水资源的影响研究	0	0	0	0	3	1
5	基于移动设备传感器的精神疾病状况诊断	0	0	0	3	2	0
6	区域环境治理战略规划研究	0	0	0	0	1	3
7	基于分布式微型电网技术的能源管理	0	0	0	0	1	3
8	水 – 能源 – 粮食关联关系研究	0	0	0	0	3	2
9	生态系统服务在生态风险评估中的应用	0	0	0	0	1	3
10	建成环境对通勤的影响研究	0	0	1	0	0	3

的日趋严格，以电动汽车为代表的新能源汽车已成为汽车工业发展的趋势所在。为降低电动汽车的用电能耗并提高电网供电安全性，世界各国纷纷将电动汽车充电策略作为本国的战略研究方向之一。电动汽车作为一种新型的交通工具，同时又是一种用电负荷，在实际使用中面临如下两方面问题。第一，当前电动汽车的能量补给方式包括慢充、快充以及更换电池三种，电动汽车在行驶途中的耗电量受到多种因素的影响，如单位里程耗电量、载重负荷以及道路状况等。以充电成本最小为目标，根据不同电动汽车充电需求，确定合理的充电方式是促进电动汽车发展的重要环节。第二，电动汽车的无序充电会造成电力系统峰谷差加大、局部地区电压跌落等负面影响。为此，实施电动汽车有序充电成为实现电力系统削峰填谷和电动汽车经济运行最为方便和可行的途径之一。

### (3) 共享社会经济路径下的土地资源利用

共享社会经济路径（SSP）是土地利用 – 生态环境 – 气候变化大系统研究的新情景框架。SSP 视野描述了未来社会的发展趋势，展示了主要因果关系的内部逻辑，包括以往难以通过模型捕获的趋势，是定量模型预测的重要补充。其主要通过对人口、人类发展、经济和生活方式、政策和制度、技术、

环境和自然资源的未来变化的五个定性描述为关键要素，构建模型定量 SSP 预测的基础和意义。根据未来社会经济面临的适应性和减缓气候变化的挑战，SSP 可分为可持续发展、区域竞争、不平等、化石燃料发展和中间道路发展五种路径，以涵盖缓解和适应气候变化的各种挑战组合，为未来的社会经济发展提供不同的途径，实现气候变化研究和政策分析。共享社会经济路径下土地资源利用充分涵盖了未来的可能发展情景，响应了农业和工业发展需求，为未来市场的法规体系、需求定位、生产力提升、环境影响、贸易和全球化程度提供指导。研究前沿以土地利用变化数据、空中场景分类（Aerial Scene Classification）、遥感场景分类等技术为基础，集中在能源系统的发展、农业生产体系的改善、温室气体排放、环境影响、气候变化、城镇化等方面，为气候政策与其他社会目标的结合、生物多样性保护、提高生态系统服务价值、土地利用可持续化等问题提供解决方案。

### (4) 气候变化对干旱地区水资源的影响研究

气候变化将改变大气降水的空间分布和时间变异特性，从而改变水循环，影响水资源时空分布格局。同时，在社会经济发展和全球气候变化共同影响下，干旱地区水资源需求和水资源压力日益增加，

干旱的影响进一步增强。当前，气候变化对干旱地区水资源影响研究主要集中在海洋 – 大气 – 陆地界面过程及其干旱地区水资源响应与环境生态效应、全球及区域气候模式对干旱地区气候特征模拟能力评估、利用多种水文模型预估不同气候变化情景下干旱地区水资源的时空响应格局、辨析气候模式和评估模型对影响预估带来的不确定性特征、气候变暖背景下干旱灾害监测预测和预警技术等。在气候变化背景下，定量研究干旱地区水资源的时空响应特征，特别是极端水文过程的频率、周期、强度、持续时间和影响范围的演变情势，对水文极端灾害预警以及防灾减灾、保障社会稳定和经济可持续发展具有重大意义。

#### (5) 基于移动设备传感器的精神疾病状况诊断

传感器主要是指能够接受相关信号或是相关刺激并且获得相应反应的器件，能够在特定的时间和空间将等待测量的物理量或化学量转化为另外一种相对应输出的装置，以满足信息的传输、存储和处理等要求。智能手机、电脑和可穿戴传感器等移动设备可以持续监测与精神疾病相关的行为成分（如活动减少、精神运动迟缓、睡眠变化）和动机状态（如快感缺失），还可以监测精神疾病患者的心率、体温和皮肤电反应等生理状态，这些监测到的数据信息可以帮助精神科医生对患者进行实时监控和行为干预，从而更好地对精神疾病患者进行病情控制。移动设备传感器正成为一种诊断精神疾病的高新技术被广泛应用，但其挑战依然存在，最大的挑战就是无法将掌控的大量数据信息与患者的感受联系起来；另一方面的挑战就是无法保证患者对设备治疗过程的忠诚度。移动设备传感器的应用前景是通过使用物联网等来鼓励健康行为，从而可以帮助改善每个人的精神健康状况。基于移动设备传感器对精神疾病进行诊断和干预仅仅是一个开端，新一代技术将会为数字精神病学实践带来革命性改变，这种技术可以得到改进和普及，并与我们的文化相适应，以服务于全球人口。

#### (6) 区域环境治理战略规划研究

随着经济发展日益区域化，环境问题的区域性特点日益彰显。区别于传统环境治理模式，以特定的自然区域整体为治理对象的区域环境治理越发受到重视。区域环境治理规划要求以根据自然疆界划分的生态区域为治理对象，生态区域内的环境主体（尤其是地方政府）服务于生态区域的整体环境利益，分区、合作治理是其基本特点。环境问题的特殊性要求按自然区域进行有区别、针对性的分区治理，自然生态区内的各行政区域实现生态区域的整体环境目标而进行的环境治理合作。当前，区域环境治理规划研究集中于生态文明、大气污染、雾霾治理等问题，研究前沿的关键问题为：区域环境治理的法律保障和问责机制、跨区域环境治理中地方政府合作、复合激励机制构建等。在区域环境治理背景下，研究自然区域内地方政府之间的多元协同管理模式以及责任划分、法律保障，对进一步加强各地方政府之间通力合作、联防联控本区域环境污染问题有重大意义。

#### (7) 基于分布式微型电网技术的能源管理

分布式微型电网是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统。微电网与常规配电网和供电网的最大区别在于它可以在保证电能质量的前提下独立运行。微电网结合了现代的能源转换、电力电子、电网和自动控制等技术，已成为未来世界能源技术发展的重要方向。基于分布式微型电网技术的能源管理技术发展方向包括：加大对控制策略研究；对超额发出热能的弃用制订惩罚方案；使电网具备灵活性、可接入性、可靠性及经济性；企业从只做售电成为可以从发电，到配电、管电、售电，集四种功能为一体的企业，通过高效分布式能源集成，实现灵活的微电网控制，并支持新供应模式。研究前沿包括：分布式微网将可再生能源、储能系统及局部负荷并入电网优化配置；利用微电网突破新能源穿透功率极限限制；多个微电网的并联；微电网

在并网和孤岛运行时的稳定性；利用微电网提高电能质量；采用随机能源管理，解决随机供与需的不确定性及全系统的供需平衡；提高电能质量、能源利用、自主性、适应性等；多微网协调控制策略，提高多微网稳定性；交互功能更突出的能源管理系统；解决基于时间需求响应的优化策略；研制新型电力电子设备作为配套设施，如并网逆变器、静态开关和电能控制装置。用于微电网的超导储能技术，超级电容等。

### (8) 水 – 能源 – 粮食关联关系研究

水 – 能源 – 粮食关联关系 (water-energy-food nexus) 意味着水安全、能源安全和粮食安全的密不可分。任何单一资源系统的运行、决策和变迁都会与另外两个系统的变化相关联，而任何单一资源系统的应对策略往往造成资源问题在资源系统间转移，形成资源治理困境。Nexus 方法要求从纯粹追求单一部门效率转变为采用跨部门、连贯和综合的视角探索资源问题解决方案，是资源治理理念的一次根本性转变，也对全球、区域和（次）国家层面的现有结构、政策和程序提出了挑战。对水 – 能源 – 粮食关联关系的理解包含三个核心层面：水、能源和粮食在生产、消费和废物处理过程中相互影响的核心关联关系；人口、贸易和气候变化要素驱动核心关联作用机制所形成的内在影响关系；关联关系变化作用于社会 – 经济 – 生态大系统所形成的外在影响关系。目前对全球、流域以及家庭层面关联关系研究的积累增长很快，城市和区域层面的数据积累与研究工具刚刚起步。未来，随着关联数据统计口径标准化、各时空维度 WEF-Nexus 模型整合及数据监控、多资源供需协同一体化模型的开发、基础设施（绿色、灰色和蓝色）系统韧性与可持续性的增强、智慧决策系统的发展，WEF-Nexus 范式将成为服务于人类可持续发展的重要领域。

### (9) 生态系统服务在生态风险评估中的应用

生态系统服务 (ES) 指人类通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和

服务，包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务，这些服务功能的可持续供给是经济社会可持续发展的基础，对人类提供的直接福利。ES 明确了人类福祉与生态系统结构和过程之间的联系，其在生态风险评估中的应用体现在：明确生态风险评价中所应受到保护的环境价值，生态系统结构、过程与功能受到外界压力干扰展开风险分析，在风险分析过程中关注生态系统复杂作用过程，综合考虑生态系统整体性和复杂性，依据生态风险整体性表征评估如何影响服务的产出，相对应的是如何促进更全面的环境保护、明晰环境决策、政策和实施行动、推导环境质量标准、实现人类人体健康与生态风险评估的综合行动政策。在生态系统过程和服务学科领域主要关注生态系统服务分类及权衡关系、形成和提供机制、定量分析与评估方法、尺度效应与区域集成、生态系统服务的优化调控等。当前生态系统服务在生态风险评估中应用的关键问题为：全面评价生态系统不同风险源与受体之间的直接或间接的作用关系，建立生态系统生态风险的模拟及评价体系；外界压力作用下系统物质能量流动和循环速率，如何运用生态生产函数 (EPF) 评价特定外界压力干扰对生态系统服务产出的影响与风险程度；把握生态系统过程与社会经济之间的因果关系，建立各子系统间的非线性风险评价模型，提高评价过程与社会生态管理过程的对接性，推动生态系统服务在生态风险评估后续阶段作用的研究，将不同利益攸关者的博弈策略纳入到评估过程中。

### (10) 建成环境对通勤的影响研究

相对于交通拥堵收费、车辆单双号限行以及燃油税费等出行需求管理策略而言，发挥建成环境对交通出行影响的正面作用，降低人们对小汽车的依赖，被认为是解决交通问题的根本所在。建成环境形成会对居民日常出行行为产生根深蒂固的影响，在宏观层面决定了城市居民活动的空间分布，并且城市建成环境一旦形成就很难去改变，会对交通出行具有长久的“锁定效应”。鉴于通勤出行是人们

日常活动出行中最重要且最具规律性的组成部分，如何通过优化城市建成环境来影响通勤出行需求，减少小汽车拥有和使用以及促进居民向绿色出行的转变进而缓解交通问题，已成为城市交通规划及相关领域的国际前沿问题。近年来，大数据和时空行为科学等的新进展为深入研究建成环境与通勤出行的关联机制提供了可行的数据获取及研究手段。当前，建成环境对通勤影响研究的关键问题为：多尺度建成环境对通勤出行影响的微观机理、建成环境与交通需求管理对通勤出行影响的协同效应、建成环境对多维度交通行为的影响机理、轨道交通导向下建成环境与通勤出行的关联机制等。在中国城市发展背景下，研究中国典型城市建成环境对通勤的影响，可为现阶段我国土地利用与交通规划以及交通需求管理策略制定提供理论依据和决策支持。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 制造企业服务导向战略研究

制造服务化的概念首先由 Vandermerwe 和 Rada 于 1988 年提出。后来，剑桥大学的 Andy Neely 将制造服务化定义为：制造服务化是通过从出售产品到提供产品及其相关的服务，即产品服务系统的转型，为顾客和企业创造价值的组织能力和过程的创新。制造服务化在战略上，可提高与客户合作关系，有助于企业可持续发展；经济上，服务的利润空间高，而且收益流持久稳定；环境方面，服务化下制造企业实施的产品全生命周期管理会导致企业减少资源消耗。《中国制造 2025》明确指出，生产性服务业是制造业转型升级的重要支点，是产业链提升的必由之路。

制造服务化包含三种主要模式，以飞利浦核磁共振设备为例，面向产品的制造服务化模式下飞利浦向医疗结构出售设备，同时提供设备使用过程中的维护维修等服务；面向使用的模式下飞利浦出租

设备给医疗机构，按照使用时间收取租赁费用；面向结果的模式下飞利浦直接提供检查服务和最终的检查诊断结果。

制造服务化的研究早期主要集中在欧洲，2008 年左右中国学者也开始了制造服务化研究，把制造企业向服务化转型的业务模式称为服务型制造。主要有上海交通大学和西安交通大学等高校的知名学者，其中上海交通大学 2013 年完成了我国服务型制造方面的一个国家自然科学基金重点项目。无论是研究论文发表数量还是指导企业实践方面，都处于世界前列。

下面对制造服务化中三个主要研究前沿进行分析，包括制造服务化商业模式竞争力研究、产品服务化供应链、新信息技术与制造服务化研究。

#### (1) 制造服务化商业模式竞争力研究

虽然制造服务化商业模式的优势得到了学术界和企业界的广泛认可，但在很多知名制造企业如 IBM、罗尔斯罗伊斯和陕鼓成功转型的同时，也出现许多企业如 Intel 和 Interface 在服务化转型中利润下降，甚至最终彻底放弃服务化业务的情形，被学界称为服务化悖论。关于制造服务化商业模式竞争力的研究对于指导企业选择合适的服务化模式，具有重要的理论指导意义。前沿问题包括：服务化类型的选择；服务广度选择以及与产品的配置；服务投入、市场竞争环境、产品特性和行业特征等对服务化绩效的影响研究。

#### (2) 产品服务系统配置研究

产品服务系统是指制造服务化企业提供的产品服务包，强调产品与服务融合，甚至整体解决方案，实现  $1+1>2$  的集成效应。产品服务系统配置始于理解客户需求，并转化为产品和服务特性需求，进而通过知识工程或优化模型来进行优化配置。随着新信息技术的发展，产品服务配置应该聚焦在产品—服务的全生命周期，通过从数据发现用户需求，集成商业模型、产品、服务、信息等多方面的优化，实现产品—服务—信息三者的真正融合和无缝集成。

关于产品服务系统及产品与服务优化配置研究前沿问题包括：产品服务系统模式及其选择决策；产品服务系统的优化配置；产品服务系统个性化定制方法等方面。

### (3) 制造与服务的控制和协同研究

服务型制造由于制造与服务融合，需要对制造与服务过程进行集成优化控制，它要求制造能力与服务能力有机结合，并形成完整系统功能，达到系统整体最优。制造与服务集成化控制由于顾客介入，还需要考虑顾客的行为。而且产品流与服务流耦合下会相互影响、相互作用，需对两者进行协同管理。信息技术的快速发展有助于制造企业实现制造与服务集成化控制和协同管理。关于制造与服务集成化控制和协同管理研究前沿问题包括：产品与服务需求联合预测；制造与服务混合系统资源优化配置以及实时分配；新信息技术下的制造与服务集成化控制系统优化；产品制造商与服务提供商协同机理等。

### (4) 基于新信息技术的制造服务化研究

以大数据、云计算、物联网为代表的新一代信息技术不仅增强了产品服务的功能和效果，而且通过提供基于新信息技术的服务，创造了新的增值价值，同时也产生了新型服务运行模式。因此，开展新信息技术背景下服务模式及其选择方法研究，对于推动企业向智能化和服务化转型、强化产品与服务集成、提升企业市场竞争力具有重要意义。关于新信息通信技术与服务化的研究前沿问题包括：研究运用新信息通信技术实现产品与服务融合；研究新信息通信技术背景下新型服务形态；研究制造企业价值创造模式；研究信息通信技术背景下制造企业服务化转型研究等。

目前随着新信息技术的迅猛发展，研究信息技术对制造企业服务化的影响是研究前沿。当前研究主要是新信息技术推进服务化转型的机理，包括新信息技术在服务化转型中的能力等。此外，需要进一步考虑客户使用行为和需求，不断完善产品设计、

制造和服务的集成优化理论；产品服务化供应链需要实现制造系统、维护系统、备件供应系统以及物流系统的协调，特别是使用 / 结果导向的产品服务系统下的供应链协调。还应进一步加大计算机科学、运筹学、管理科学、工程学等学科的跨学科的交叉研究，也是未来研究发展的方向。从应用的角度，我国在大飞机、高铁、船舶、核电等高端装备制造领域推进服务型制造，势在必行，前景广阔。

“制造企业服务导向战略研究”工程研究前沿中的核心论文数量排名前 3 的国家分别为芬兰、英国、美国（见表 1.2.1），篇均被引频次排名前 3 的国家 / 地区分别是新西兰、加拿大、瑞士（见表 1.2.1）。从核心论文产出国和合作网络图（见图 1.2.1）来看，在核心论文发表量排名前 10 的国家 / 地区中，英格兰、西班牙、芬兰、瑞典和瑞士之间的合作较多。

核心论文数量排名前 3 的机构分别为：林雪平市大学（Linkoping Univ）、阿尔托大学（Aalto Univ）、剑桥大学（Univ Cambridge）（见表 1.2.2），根据核心论文产出机构合作网络图（见图 1.2.2）来看，在核心论文发表量排名前 10 的机构中，波士顿大学、达特茅斯学院和麻省理工学院之间合作较多。

根据表 1.2.3 可以看出，中国的施引核心论文数量还未进入前十的行列，处于非跟跑地位。

### 1.2.2 电动汽车充电策略

当前世界化石燃料供需紧张，以电动汽车为代表的新能源汽车已成为汽车工业发展的必然趋势。相对传统燃油汽车，电动汽车拥有独特的优势，如无污染、低噪声、高能效及易维修。这些特点使得电动汽车的保有量不断增长，2017 年中国累计销售 77.7 万辆，同比增长 53.3%。然而，电动汽车行驶里程受到电池所储电量的限制，制约了其市场份额的进一步提升。并且电动汽车充电需求具有较强的随机性，展现出充电方式的多样性以及充电站址选择的复杂性等特征。为此，制定科学的电动汽车充电策略将是促进电动汽车规模化推广的重要技术

表 1.2.1 “制造企业服务导向战略研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Finland	5	38.46%	100	34.72%	20.00
2	UK	5	38.46%	59	20.49%	11.80
3	USA	4	30.77%	116	40.28%	29.00
4	Switzerland	3	23.08%	110	38.19%	36.67
5	Sweden	3	23.08%	70	24.31%	23.33
6	Spain	3	23.08%	32	11.11%	10.67
7	Italy	2	15.38%	12	4.17%	6.00
8	Canada	1	7.69%	45	15.63%	45.00
9	New Zealand	1	7.69%	55	19.10%	55.00
10	Ireland	1	7.69%	20	6.94%	20.00

表 1.2.2 “制造企业服务导向战略研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Linkoping Univ	3	23.08%	70	24.31%	23.33
2	Aalto Univ	3	23.08%	35	12.15%	11.67
3	Univ Cambridge	3	23.08%	47	16.32%	15.67
4	Boston Univ	2	15.38%	102	35.42%	51.00
5	Dartmouth Coll	2	15.38%	102	35.42%	51.00
6	MIT	2	15.38%	102	35.42%	51.00
7	Hanken Sch Econ	2	15.38%	65	22.57%	32.50
8	Univ Granada	2	15.38%	12	4.17%	6.00
9	HEC Montreal	1	7.69%	45	15.63%	45.00
10	IMD Int	1	7.69%	45	15.63%	45.00

表 1.2.3 “制造企业服务导向战略研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	UK	39	20.31%	2016.6
2	USA	28	14.58%	2016.0
3	Finland	27	14.06%	2016.5
4	Sweden	21	10.94%	2016.6
5	Germany	20	10.42%	2016.7
6	Italy	19	9.90%	2016.6
7	Spain	14	7.29%	2016.5
8	Switzerland	10	5.21%	2016.3
9	Denmark	7	3.65%	2016.9
10	Australia	7	3.65%	2016.9

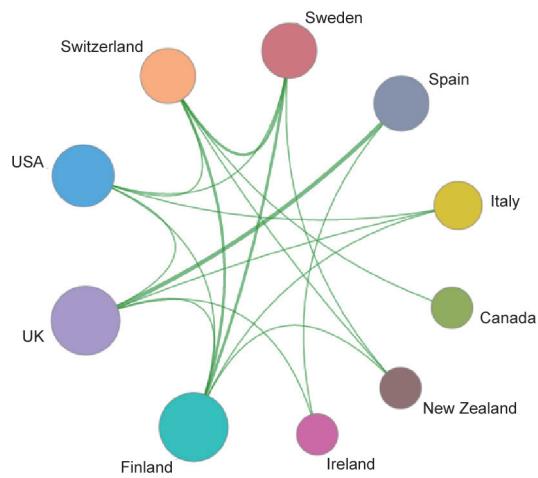


图 1.2.1 “制造企业服务导向战略研究”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

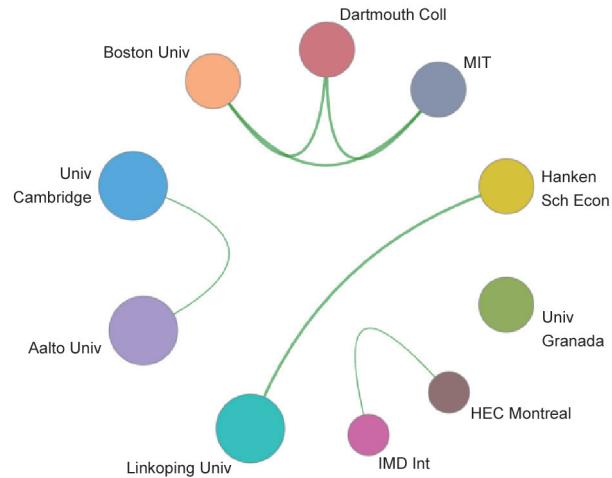


图 1.2.2 “制造企业服务导向战略研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

保障。

### (1) 充电方式优化选择

慢速充电方式可有效延长电池使用寿命，充分利用低谷时段电价充电，高峰时段电价放电，从而降低充电成本，提高放电收益。但是该方式充电时间长，无法满足车辆在行驶途中的充电需求。快速充电方式充电时间短，可以大容量充电或放电。但该方式充电效率低、充电成本高，且在充电过程中产生的大电流会降低电池使用寿命，影响电力系统的电能质量。更换电池模式换电时间短，大幅提高了用户使用的方便性和快捷性。但由于短时间内难以实现电池外形和各项参数的标准化，且配套基础设施成本高，制约了该方式的推广应用。为此，以充电成本最小、行驶路线最短为目标，考虑电池容量、充电时间、配电系统节点电压、电力系统潮流、用户满意度等约束，建立电动汽车充电方式选择模型。并根据用户的不同目标和偏好，在不同场景下优化选择快速充电方式、慢速充电方式或换电方式。

### (2) 电动汽车路径选择与充电导航优化安排

在交通路况信息事先确定的情况下，考虑路径选择、电池容量及充放电状态互斥约束，构建不同电价机制下用户出行时间最短和充电成本最小的多目标决策模型。同时，根据电网负荷高峰、平段、

低谷等系统运行状态，制定不同的电价以鼓励用户有序充电，达到系统削峰填谷、提高电网供电安全性和经济性的目的。

### (3) 基于群智感知的电动汽车路径优化及充电导航

在交通路况信息事先不确定的情况下，用户在出行过程中，利用自带手机内置的 GPS 等移动智能设备，将感知的实时交通路况和充电预约信息主动上传至决策中心（云平台）。并利用在充电站和充电桩中安装的红外线感知器确认等待充电的电动汽车数量和正在充电的电动汽车数量，获取实时交通速率信息和充电站信息。并且进一步考虑路径选择、行驶时间、电池容量和配电系统节点电压等约束，构建以路径行驶时间成本、充电站排队等候时间成本、电动汽车电池损耗成本及充电成本之和最优的路径优化及充电导航决策模型。通过合理引导用户有序充电和放电，缓解大量电动汽车接入对电力系统运行造成负面影响。

近年来，对于电动汽车充电策略的改进各国学者展开了针对性研究。土耳其学者 Bunyamin Yagcitekina, Mehmet Uzunoglu 在 2016 年提出了电动汽车双层智能充电策略，即运用电动汽车的智能充电管理算法（SCMA）实现两级控制，以确定电动汽车

车的最优充电路径，达到降低充电成本的目的。第一级控制用于电动汽车充电之前，考虑了变压器容量、充电站状态以及最短到达充电站的路线。第二级控制用于电动汽车的充电过程，保证充电的稳定安全，以减小对电网的负面影响，并防止变压器过载。韩国学者 Sang KeunMoon, Jin Kim 在 2017 年提出了一种电动汽车充电需求管理方法，通过建立电价波动对充电需求波动的影响曲线，找寻用户充电成本和电力负荷都达到理想状态的平衡点，并且减少充电操作的工作次数。美国学者 Mostafa Majidpour, Charlie Qiu 等人于 2016 年通过收集的客户收费数据以及充电站出站口的站点记录数据，开展了基于站点测量或用户信息的电动汽车充电负荷预测研究。通过运用四种不同的预测算法，即基于临近时间点的加权算法（TWDPNN），时间序列预测算法（MPSF），支持向量回归算法（SVR）和随机森林算法（RF）开展分析，研究表明，电动汽车用户数据可以有效提高充电负荷预测的精度，但也增加了电动汽车用户个人隐私泄露的风险。伴随着电动汽车保有量持续增长、用户类型不断增加、行驶覆盖范围不断扩大，后续拟通过电动汽车行驶路径优化、充电方式选择以及充电基础设施规划等，进一步深化电动汽车充电策略研究，以同时

实现电力与交通系统的协同运作，提高两个系统的综合运营效率。

“电动汽车充电策略”工程研究前沿中核心论文数量排名前 3 的国家分别为中国、美国、德国（见表 1.2.4），从核心论文数来看，中国基本处于领跑地位，篇均被引频次排名前 3 的国家 / 地区分别是：比利时、德国和美国（见表 1.2.4）。从核心论文产出国合作网络图（见图 1.2.3）来看，中国和美国之间的合作较多。

核心论文数量排名前 3 的机构分别为：卡迪夫大学（Cardiff Univ）、香港大学（Univ Hong Kong）、维尔茨堡大学（Univ Wurzburg）（见表 1.2.5）。从核心论文产出机构合作网络图（见图 1.2.4）来看，卡迪夫大学和天津大学之间的合作较多。

2012—2017 年间，我国发表的与“电动汽车充电策略”工程研究前沿相关的论文核心论文为 6 篇（见表 1.2.4），主要由香港大学、天津大学和湖南大学发表（见表 1.2.5）。

### 1.2.3 共享社会经济路径下的土地资源利用

土地系统面临着来自各方面的新挑战，面临满足人类对粮食的需求、保护景观功能、保护甚至提高生态系统服务价值、减缓气候变化等要求。由于

表 1.2.4 “电动汽车充电策略”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	6	33.33%	153	37.68%	25.50
2	USA	4	22.22%	109	26.85%	27.25
3	Germany	4	22.22%	115	28.33%	28.75
4	UK	4	16.67%	39	9.61%	16.00
5	Croatia	1	5.56%	27	6.65%	27.00
6	Switzerland	1	5.56%	27	6.65%	27.00
7	Belgium	1	5.56%	31	7.64%	31.00
8	Italy	1	5.56%	24	5.91%	24.00
9	Australia	1	5.56%	13	3.20%	13.00
10	Bosnia & Herceg	1	5.56%	13	3.20%	13.00

表 1.2.5 “电动汽车充电策略”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Cardiff Univ	3	16.67%	39	9.61%	13.00
2	Univ Hong Kong	2	11.11%	73	17.98%	36.50
3	Univ Wurzburg	2	11.11%	61	15.02%	30.50
4	Tianjin Univ	2	11.11%	24	5.91%	12.00
5	Argonne Natl Lab	1	5.56%	40	9.85%	40.00
6	Hunan Univ	1	5.56%	40	9.85%	40.00
7	FZI Res Ctr Informat Technol	1	5.56%	34	8.37%	34.00
8	Univ Zagreb	1	5.56%	27	6.65%	27.00
9	China Elect Power Res Inst	1	5.56%	18	4.43%	18.00
10	Tianjin Elect Power Res Inst	1	5.56%	6	1.48%	6.00

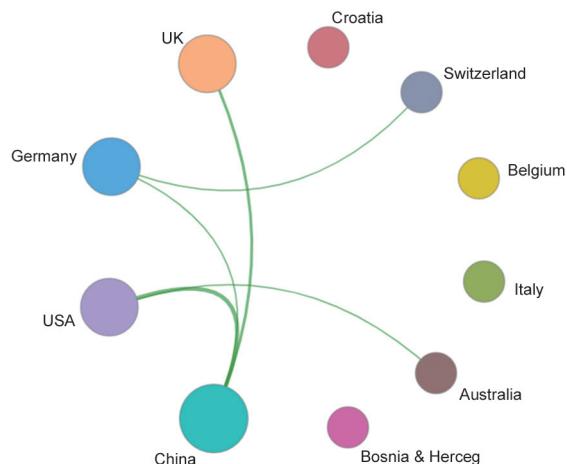


图 1.2.3 “电动汽车充电策略”工程研究前沿主要国家或地区的合作网络

人口、经济、技术、政策、土壤等土地利用驱动因素不确定性较大，传统模型难以准确模拟土地利用动态变化趋势。共享社会经济路径下的土地资源利用研究能够综合多方面影响因素，分析不同路径下土地的动态变化，是近两年学界关注的新课题，在能源利用、环境保护、城镇化等方面已取得了一些成果，但从理论和实际应用方面来看，还迫切需要进一步深入的研究。

下面主要对共享社会经济路径下土地资源利用的未来趋势，以及在环境保护、能源利用、城镇化等方面的研究进行更加深度的分析。

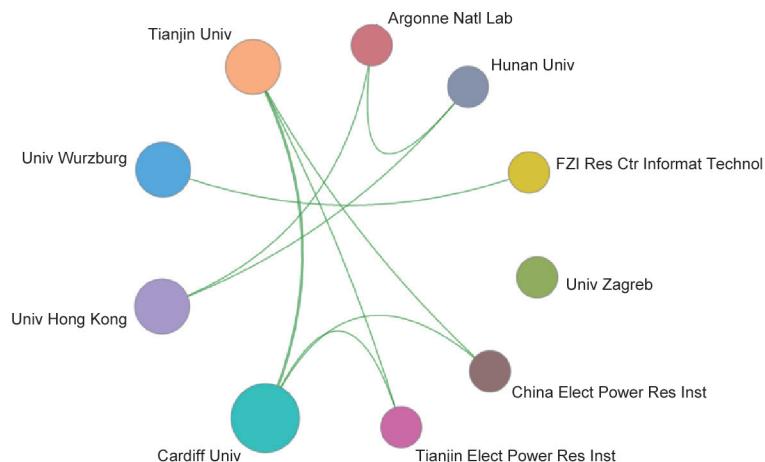


图 1.2.4 “电动汽车充电策略”工程研究前沿主要机构间的合作网络

### (1) 土地资源利用对环境保护的影响

土地利用和土地利用变化对生物多样性保护、温室气体排放、土壤质量和粮食生产等都具有直接影响，目前林地向农业用地的转变所导致的碳排放是全球变暖的重要原因，为弥补这种农业扩张限制，农业生产力提高问题亟需解决。全球土地利用模型 MAgPIE（“农业生产模型及其对环境的影响”）是评估土地利用对经济和环境影响的重要工具，在不同 SSP 情景下，污染物排放、温室气体排放对景观变化、生态系统服务价值的影响程度不同，但都证明法规的完善、天然林的保护、碳汇和低碳技术的开发提高是保护环境的重要措施。

### (2) 土地资源利用对能源利用的影响

能源对于人类的基本需求、发展和福祉至关重要，人类对能源储量和需求特征的未来变化从根本上由社会经济条件、可用能源资源、能源供应、转型技术和能源最终用途等多因素的影响。同时，温室气体（GHG）排放和其他环境、社会外部因素也影响到能源供给与需求。因此，能源系统的发展受到社会需求变化和战略政策选择的影响。目前全球土地利用模型和全球能源 – 经济 – 气候模型是能源利用研究的重要工具。

### (3) 土地资源利用对城镇化的影响

对大都市城郊地区的研究发现，非农业用地的扩张主要以工业用地的增长为特征，造成了耕地和林地的大量流失。其中国家主导的增长在非农业用地的扩张中发挥了主导作用，而自下而上发展的影响显著性较差，部分原因是规划在调节空间以适应不断增长的人口和经济增长需求的同时，在促进空间增长以吸引外部投资方面也发挥了关键作用。中国快速城镇化伴随着农民外迁和耕地使用强度的变化。目前农民外迁和耕地强度之间的关系仍不明确，已有研究表明，农民外迁与耕地利用强度呈现倒 N 型关系，家庭责任制（HRS）带来的生产率提高的积极影响是耕地利用强度增加的主要原因，农村劳动力过度流失而导致的劳动力短缺是耕地使用强度

下降的重要原因，但增加的肥料和农药投入或作物类型的变化最终可以弥补劳动力短缺的负面影响，并促进耕地利用强度的提高。此外，农田的过度集约利用对生态环境和国家粮食安全产生了负面影响。

遥感图像是土地资源利用研究的数据基础，随着卫星传感器技术的快速发展，高空间分辨率遥感（HSR）数据在军事和民用领域引起了广泛的关注，为充分利用这些数据，场景分类成为一项重要的先行任务。在利用大规模的数据集形成传感图像场景分类基础上，运用非监督学习方法研究用于遥感场景分类的反卷积网络：首先，利用浅加权反卷积网络，通过最小化输入影像和卷积结果之间的重建误差，来学习每个图像的特征图和滤波器，这些特征图可以捕获高空间分辨率图像丰富的边缘和纹理信息；然后，利用空间金字塔模型（SPM）聚合不同尺度的特征，以维持 HSR 图像场景的空间布局，通过组合所提出的加权反卷积模型和 SPM 来获得 HSR 图像的差别化表达；最后，将表示向量纳入支持向量机模型以完成分类。也有研究者描述了用于遥感场景分类的大规模数据集——航空影像数据集（AID），通过收集并注释超过 10000 个遥感影像场景，提出了关于 AID 的典型遥感场景分类和深度学习方法的性能分析。

解决高分辨率（HR）光学卫星图像的自动语义标注问题的难度在于：卫星影像的复杂和模糊部分难以区分，完全监督的注释方法需要大量高质量像素级标签的训练样本。为了应对这些挑战，研究者结合判别性的高级特征学习和弱监督的特征转移提出了一个统一的注释框架。

土地利用和土地覆盖变化（LUCC）模拟模型是用于分析各种情景下未来景观动态的有效且可重复的工具，但仍有一些缺陷需要改进。未来土地利用模拟（FLUS）模型明确模拟了多个 LUCC 的长期土地利用空间变化，采用自上而下的系统动力学和自下而上的元胞自动机两种模型的结合应用，在 CA 模型中采用自适应惯性和竞争机制，以处理不同土

## 第二部分 领域报告：工程管理

地利用类型之间的复杂竞争和相互作用，提高了模型准确模拟未来土地利用模式的能力。逐渐将气候变化、土壤条件等影响因素纳入模型，促进不同空间土地利用优化的识别能力提升是未来的发展趋势。

“共享社会经济路径下的土地资源利用”工程研究前沿中核心论文数量排名前3的国家分别为：德国、美国、澳大利亚（见表1.2.6）。篇均被引频次排名前3的国家/地区分别是：德国、美国和乌克兰（见表1.2.6）。从核心论文产出国的合作网络图（见图1.2.5）来看，在论文数量中排名前十的国家/地区之间的合作都较为紧密。

核心论文数量排名前3的机构分别为：波茨坦气候影响研究所（Potsdam Inst Climate Impact Res）、洪堡特大学（Humboldt Univ）、澳大利亚联邦科学与工业研究院（Commonwealth Sci & Ind Res Org）（见表1.2.7）。从核心论文产出机构的合作网络图（见图1.2.6）来看，在论文数量中排名前十的机构之间的合作都较为紧密。

从“共享社会经济路径下的土地资源利用”施引核心论文数量（见表1.2.8）来看，中国发表了24篇施引核心论文，排名第9，基本处于跟跑地位。

表1.2.6 “共享社会经济路径下的土地资源利用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国或地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Germany	10	76.92%	328	86.09%	32.80
2	USA	7	53.85%	172	45.14%	24.57
3	Australia	5	38.46%	115	30.18%	23.00
4	Japan	5	38.46%	104	27.30%	20.80
5	The Netherlands	4	30.77%	83	21.78%	20.75
6	Austria	4	30.77%	82	21.52%	20.50
7	Italy	3	23.08%	54	14.17%	18.00
8	Ukraine	2	15.38%	47	12.34%	23.50
9	South Korea	2	15.38%	26	6.82%	13.00
10	Norway	2	15.38%	42	11.02%	21.00

表1.2.7 “共享社会经济路径下的土地资源利用”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Potsdam Inst Climate Impact Res	10	76.92%	328	86.09%	32.80
2	Humboldt Univ	4	30.77%	159	41.73%	39.75
3	Commonwealth Sci & Ind Res Org	4	30.77%	97	25.46%	24.25
4	Univ Utrecht	4	30.77%	83	21.78%	20.75
5	PBL Netherlands Environm Assessment Agcy	3	23.08%	71	18.64%	23.67
6	Graz Univ Technol	3	23.08%	70	18.37%	23.33
7	Int Inst Appl Syst Anal IIASA	3	23.08%	59	15.49%	19.67
8	Natl Inst Environm Studies	3	23.08%	63	16.54%	21.00
9	Pacific Northwest Natl Lab	3	23.08%	56	14.70%	18.67
10	Mercator Res Inst Global Commons & Climate Change	3	23.08%	54	14.17%	18.00

表 1.2.8 “共享社会经济路径下的土地资源利用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Germany	89	20.75%	2015.9
2	USA	75	17.48%	2016.1
3	The Netherlands	45	10.49%	2016.2
4	Austria	43	10.02%	2016.0
5	England	35	8.16%	2016.1
6	Australia	34	7.93%	2016.1
7	France	31	7.23%	2015.9
8	Japan	31	7.23%	2016.4
9	China	24	5.59%	2016.4
10	Italy	22	5.13%	2016.2

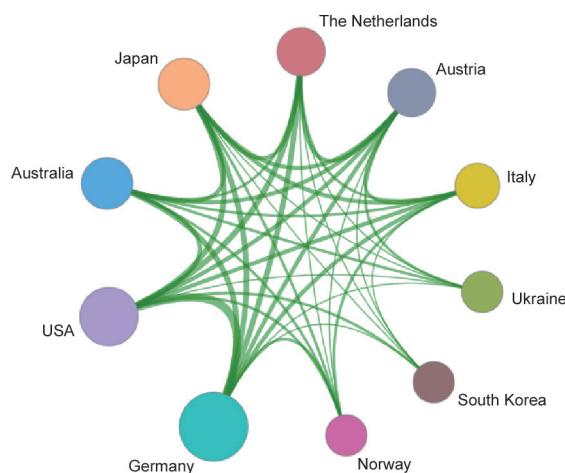


图 1.2.5 “共享社会经济路径下的土地资源利用”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top10 工程开发前沿发展态势

在工程管理领域中，全球工程开发前沿集中于以下 10 个部分，分别是电动汽车充电管理方法与系统、智能健康管理方法与系统、智能网联汽车技术、风险管理方法与系统、基于 BIM 的建造管理系统、基于定位技术的监控系统开发、能源管理控制方法与系统、物流管理方法与系统、医疗服务管理方法与系统、智能医疗管理方法与系统。其核心专利情况见表 2.1.1 和表 2.1.2。这 10 个工程开发前沿集中包含了机械、运输、能源、医学、建筑、

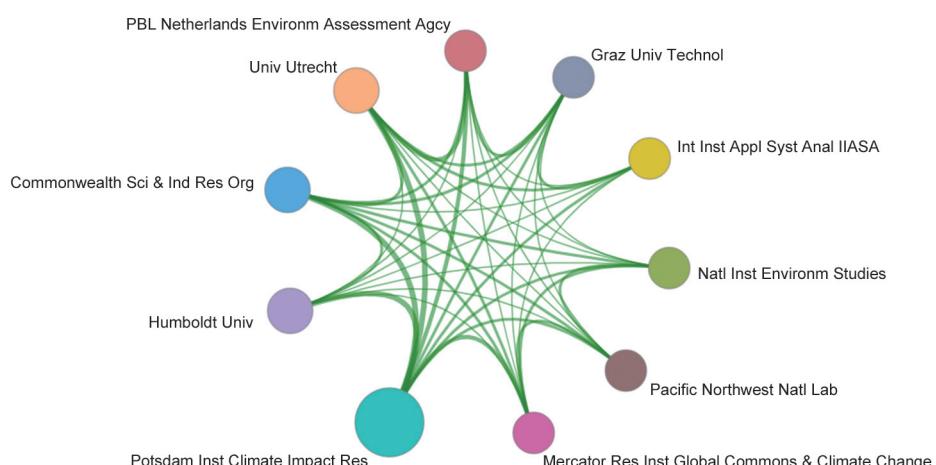


图 1.2.6 “共享社会经济路径下的土地资源利用”工程研究前沿主要机构间的合作网络

## 第二部分 领域报告：工程管理

表 2.1.1 工程管理领域 Top10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	电动汽车充电管理方法与系统	17	104	6.12	2013.24
2	智能健康管理方法与系统	20	98	4.90	2014.35
3	智能网联汽车技术	13	30	2.31	2013.77
4	风险管理方法与系统	14	148	10.57	2013.57
5	基于 BIM 的建造管理系统	8	58	7.25	2013.88
6	基于定位技术的监控系统开发	13	59	4.54	2013.23
7	能源管理控制方法与系统	55	279	5.07	2013.40
8	物流管理方法与系统	42	195	4.64	2013.83
9	医疗服务管理方法与系统	17	81	4.76	2013.76
10	智能医疗管理方法与系统	25	177	7.08	2013.84

表 2.1.2 工程管理领域 Top10 工程开发前沿的逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
1	电动汽车充电管理方法与系统	6	5	4	0	2	0
2	智能健康管理方法与系统	1	2	7	9	1	0
3	智能网联汽车技术	3	4	2	2	1	1
4	风险管理方法与系统	4	3	3	3	1	0
5	基于 BIM 的建造管理系统	1	2	3	1	1	0
6	基于定位技术的监控系统开发	5	4	0	4	0	0
7	能源管理控制方法与系统	14	17	13	10	1	0
8	物流管理方法与系统	5	15	8	11	2	1
9	医疗服务管理方法与系统	4	1	8	3	1	0
10	智能医疗管理方法与系统	5	6	4	8	2	0

电子等众多学科。其中电动车充电管理方法与系统、智能健康管理方法与系统、智能网联汽车技术为重点解读的前沿，后文会详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

### (1) 电动汽车充电管理方法与系统

伴随世界石油资源的供需紧张和温室气体排放法规的日趋严格，以电动车为代表的新能源汽车已成为汽车工业发展的趋势所在。电动汽车是以车载电源为动力，通过电机驱动车轮行驶的一种新型交通工具。电动汽车通过充换电进行能量补给，行驶里程受到电池所储电量的限制，制约了电动汽车的

规模化推广应用。因此，开展电动汽车充电管理方法研究，引导电动汽车有序充电是提升新能源车辆行驶稳定性和可靠性，降低充电成本的重要研究方向。

### (2) 智能健康管理方法与系统

智能健康管理坚持预防为主、促进健康和防治疾病相结合，通过开发医疗与健康管理设备，以移动信息化技术为手段，形成自我健康管理及健康监测、健康风险评估和远程医疗协助有机结合的循环系统，实现对个体健康的全程监控，为全民健康水平的提高提供强有力的科技支撑。我国目前已完成

多种智能健康管理系统的建设，主要技术有基于云计算的个人智能健康管理系统；基于信息集成、物联网、云技术的多功能信息化数据库健康管理系统；基于 Hadoop 与虚拟化存储等技术搭建的多维智能健康管理平台；基于 O2O 健康管理的健康报告智能提示系统等。但作为建设智慧城市的重要载体，智能健康管理系统也面临质量、信息整合、信息安全等方面问题。未来智能健康管理系统的建设不仅要在技术方法上取得突破，还要提高全国范围内医院、社区、家庭智能健康系统的普及率，不仅仅实现个人全生命周期的健康管理，还可通过大数据的融合，为医疗、用药、护理、康复等多方面提供有力证据，对疾病起到预测、监控及管理的作用。

### (3) 智能网联汽车技术

智能网联汽车 ( Intelligent connected vehicles , ICV )，是指搭载先进的车载传感器、控制器、执行器等装置，融合现代通信与网络技术，实现车与人、车、路、云端等智能信息交换共享，具备复杂的环境感知、智能决策、协同控制和执行等功能，实现安全、舒适、节能、高效行驶，并最终可替代人来操作的新一代汽车。ICV 技术体系由环境感知系统、智能决策系统、控制执行系统三个层次组成，涵盖汽车、信息交互与基础支撑三大领域，集中了环境感知、导航定位、智能决策控制和车联网等关键技术。ICV 不仅是未来汽车技术的发展方向，也是汽车走向智能化（自动驾驶）和网联化（车联网）相互融合的发展。根据全球知名咨询公司 Gartner 的智能机器领域新兴技术生命周期预测，未来 ICV 技术产业期望极高，被视为最具发展前景的新兴技术之一，世界各国已将 ICV 产业的发展提升至国家战略层面。

### (4) 风险管理方法与系统

风险管理是通过风险识别、风险估测、风险评价，并在此基础上选择与优化组合各种风险管理技术，对风险实施有效控制和妥善处理风险所致损失

的后果，从而以最小的成本收获最大的安全保障。学者们在风险管理的研究中采用了多样化的分析方法，如蒙特卡洛模拟、层次分析法、人工神经网络、模糊数学、遗传算法、贝叶斯网络等。其中，为降低主观因素对风险评估结果的影响，引入模糊评价方法，以降低在使用专家打分、德尔菲法和层次分析法的过程中，主观因素对风险评估结果造成的影响；加强风险偏好、风险态度等个体特征与风险感知和评估结果的关系的研究，引入心理学研究的相关理论，研究主观因素对风险评估结果的影响。另外，在风险管理中考虑风险因素之间的相关性、动态性和传递路径，以及在风险发生概率和影响程度的基础上，进一步考虑风险的可管理性、可预测性等特征，对风险评估模型进行改进。随着管理思想、方法和现代计算机技术的高速发展，更加集成和复杂的风险管理方法开始出现，用于处理更复杂的风险管理系统。

### (5) 基于 BIM 的建造管理系统

BIM 以建筑工程项目的各项相关信息数据为基础建立建筑模型，通过数字信息仿真，模拟建筑物所具有的真实信息。BIM 是以从设计、施工到运营协调、项目信息为基础而构建的集成流程，它具有可视化、协调性、模拟性、优化性和可出图性五大特点。随着 BIM 技术在行业应用的不断推进，BIM 技术已从单一的 BIM 软件应用转向多软件集成应用，从桌面应用转向云端和移动客户端，从单项应用转向综合应用，并呈现出 BIM+ 的新特点。实现 BIM 模型的信息共享，搭建集成交付平台、设备信息管理模块、维护管理模块、操作维护知识库模块和应急计划管理模块等，提升多方协同的工作效率，施工、监理甚至物业从业人员可以识别特定设备的物理位置，有效地实现大量建筑设备信息的维护和应急预案的管理。基于 Web 的 BIM 系统，其在执行特定项目管理的过程中，将进度和成本与提供给 Web 的三维模型连接起来，可以在 Web 上进行三维模型的仿真，向便携式设备提供 2D 或 3D

图纸、工程进度信息和成本信息等，提高信息的流动性。将施工信息输入 BIM 系统，自动生成施工计划和施工绩效等信息，从而可以更有效地规划和管理建筑物的建造，最大化地体现信息的价值。

### (6) 基于定位技术的监控系统开发

基于定位技术的监控系统是指一种采用各类定位技术对监控客体的位置信息、状态信息等进行集成监控的信息系统。其主要构成部分包含：监控客体的辨识子系统、数据传输子系统、数据存储子系统及集成展示和控制子系统。目前在货物运输、垃圾收集运输监控、公交车辆运营、校车及学生安全监控等方面较广泛地应用。定位技术分为室内定位和室外定位两大类。室内定位技术包括：红外线、超声波、RFID、蓝牙、Wi-Fi、ZigBee、UWB 超宽带等；室外定位技术主要包括：GPS 和北斗民用定位技术。在工程管理领域特别是现场施工安全管理应用中，基于定位技术的监控系统将成为新的应用前沿。对于施工场地中人员、设备的安全监控，首要考虑的是定位精度和成本的问题，GPS 的定位精度在 10 米，北斗民用定位的精度在无基站条件下达到平面 10 米内，高程 10 米内，若部署基站，成本又急剧上升，无法满足工程需要。一种较可行的技术是采用蓝牙 + 相控阵，定位精度可达到亚米级，通过部署二级基站和定位标签，可对人员行动轨迹，设备的具体位置进行定位监控，成本也在可接受范围。

### (7) 能源管理控制方法与系统

能源管理是为了完成国家能源战略所采取的手段，涉及国家经济发展战略，是能源战略在不同阶段的外在具体体现。就能源管理而言，一方面，要保障充足的供应，为国民经济的发展提供可靠的能源保障。另一方面，要高效合理地利用能源，以促进社会经济健康发展和生活环境、生活质量稳步提升。主要技术方向体现在合同能源管理（Energy Performance Contracting，简称 EPC；在国内又称 EMC）、信息化能源管理系统、分布式能源管理系

统等方面。合同能源管理是一种基于市场的节能新机制，即由专业的节能服务公司与用能单位签订合同，为其提供节能项目用能状况的诊断、设计、融资、改造、施工、设备采购、安装调试、运行管理、人员培训、节能量测量和验证等服务并保证节能量或节能率，用能单位保证以节能效益向节能服务公司支付项目投资和合理利润的市场化节能机制。信息化能源管理系统是以信息网络为支撑，利用计算机网络技术、数据库技术等物流信息技术开发，实现数据维护、数据查询、数据统计、数据分析和节能管理等功能模块。分布式能源管理系统以分布式可再生能源发电为基础，构建可以实现实时、高速、双向的电力数据读取和可再生能源接入的能源互联网系统。能源互联网系统由智能能量管理系统、分布式可再生能源、储能装置、变流装置和智能终端等组成。通过以上技术保障低碳高效的能源消费。未来除在以上具体方向上需继续深化，还需建立完整高效的海外能源供给辅助体系，提高未来我国能源供给管理水平。

### (8) 物流管理方法与系统

物流是物品从供应地向接收地的实体流动过程，物流服务的基本功能包括将运输、储存、装卸、搬运、包装、流通加工、配送、回收、信息处理等。在现代社会经济发展中，物流服务在生产与生活中发挥着越来越重要的作用，先进的物流管理方法与物流系统具有广泛的应用前景。目前，物联网、移动互联网等技术的深化应用以及互联网驱动下的管理和商务变革，给物流管理方法和系统的开发提出了挑战，物流信息化、自动化、智能化、集成化呈现出趋势性要求。在企业物流服务方面，供应链结构下的上下游物流资源集成以及服务协同、搭建供应链物流集成控制平台是企业运营的基础。在生活物流服务方面，广泛的物流资源共享和服务协同是未来可行的方向。在区域物流管理方面，既要考虑区域物流资源的有效组织，现代信息技术支撑下考虑生态目标基于大数据的多式联运组织优化决策是

物流服务效率、服务水平、节能降耗的重要保证，又要考虑区域空间资源的有效利用，地表、空中与地下智能物流系统的有机融合将是重要方向。物流单项技术和单环节管理方法已趋成熟，区块链技术支撑下的广域物流服务模型和综合优化决策方法与技术有待开发，大数据环境下物流动态风险分析与控制方法的应用将能提升实时物流服务质量。

### (9) 医疗服务管理方法与系统

医疗服务是具有资质的医疗机构及其医务人员运用各种卫生资源为服务对象提供的疾病诊断、治疗、康复和护理等临床服务活动总称。医疗服务管理方法与系统旨在通过采取有效的科学技术和先进的医疗管理模式，以提高医疗服务质量和效率。目前，医疗服务管理方法与系统正在向信息化、智能化、整合化、精准化方向发展。强调利用互联网+技术，构建区域医疗服务大数据和云计算平台，通过医疗服务系统的各种终端，构建整合型和智慧型医疗服务递送体系。随着远程医疗、精准医疗和互联网医疗的发展，医疗服务管理需要在标准化、精准化与医学问题复杂性之间找到均衡。在最佳医疗实践指导下，基于循证医学和成本控制要求，标准化的临床路径管理得到大力实施，缩小了弹性治疗的空间。对医疗大数据和互联网+的利用，进一步强化了医院诊疗系统的智能化和精准化，减少了服务的延迟和资源浪费，患者服务体验和满意度得到了提升。但鉴于疾病的发生和发展机制的复杂性、不确定性和个体差异性，尤其是慢性病发展更是难以预测，同时伴随着医疗成本上升和患者权益保护，医疗服务管理方法与系统的改进将面临更多挑战。

### (10) 智能医疗管理方法与系统

智能医疗是指通过先进的人工智能、物联网技术和数据融合技术，实现医疗服务要素之间的信息互动，进而借助数字化手段达到临床服务的智能化和自动化。目前智能医疗管理方法与系统的开发尚处于探索阶段，但人工智能和大数据技术在医疗卫生领域深入应用是势不可挡的。鉴于优质人力资源

的缺乏、人力服务效率的低下和卫生资源的浪费，智能医疗管理系统的出现将会进一步提升医疗服务效率和服务质量，优化卫生资源配置和共享，降低社会医疗成本。目前智能医疗管理系统在智能诊断、智能治疗、智能护理以及智能保健领域进行一些富有成效的探索，相继出现了智能药品、智能穿戴和手术机器人、读片机器人以及虚拟医生等智能化服务项目，通过给医务人员赋能和提供辅助，提高了临床决策和医疗实践的高效性和精准性。但现阶段智能医疗管理系统的开发受到医疗环境和健康问题复杂性的影响，加之医疗服务要素之间配合千变万化，智能化管理系统还难以很好适应复杂的医疗实践活动。对医疗服务领域的人工智能来说，仍处于“弱人工智能”阶段，不能进行多任务学习，同时要依赖大数据学习，但随着精准医疗的发展，“小数据”学习可能成为未来发展方向。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 电动汽车充电管理方法与系统

与传统的燃油汽车相比，以车载电源为动力并使用电机驱动车轮行驶的电动汽车具有低污染、低噪声、高能效、易维修等独特的优势。电动汽车作为一种新型的交通工具，在遵循交通网络流量控制的同时，满足人们的出行需求。而且，大量电动汽车接入电力系统，充电时作为负荷从电网获取电能，放电时作为电源回馈电能。电动汽车的有序充电和放电有利于降低电力系统峰谷差、消纳间歇性可再生能源发电。为此，开展电动汽车充电管理方法的研究对综合提升电力系统和交通系统的运营效率，促进能源、经济、环境的协调发展，具有重要的现实意义。

由于电动汽车保有量、用户类型、行驶覆盖范围不同，充电方式呈现出多样化的特点，充电需求具有较大的不确定性。当前电动汽车的能量补给方式包括慢充、快充以及电池更换三种，不同补给模

式下电动汽车的充电时间、充电成本和电池寿命均存在差异。电动汽车充电管理方法是以充电成本最小为目标，开展充电设施定价决策以及选址定容优化研究，在满足车辆行驶需求的同时，遵循电力系统的安全约束，实现电动汽车以及充换电站的经济运行。

### (1) 满足行驶需求的电动汽车有序充放电优化决策

在满足电动汽车行驶路径需求的前提下，考虑电池容量、电池充放电互斥约束，建立以充电成本和电力峰谷差最小为目标的充放电决策方法，以减轻无序充电带来的电力系统峰谷差加大、局部地区电压跌落等负面影响，提高电力系统的运行效率。

### (2) 考虑电动汽车用户需求响应的充电站定价决策

考虑电动汽车用户需求细分的差异性，通过价格和业务组合捆绑方式，设计充电站停车、充电以及放电的组合套餐，构建以充电站运行成本最小为目标的定价决策模型，以引导电动汽车有序充电和放电，在减少用户充电成本的同时，增加充电站的经济收益。

### (3) 考虑电动汽车能量补给特点的充换电站规划

充换电站作为交通路网节点服务设施和电力网络的负荷 / 电源节点，通过实施合理的选址规划来提高电动汽车充电效率。基于电动汽车的充电需求特性，考虑交通网络流量约束和电力网络运行约束，建立包括充换电站建设成本、运营成本以及新增路网和电网建设成本、运营成本的多目标充换电站选址定容决策模型，以确定与不同电动汽车充电需求相匹配的充电方式（快速充电、慢速充电、更换电池），减少电动汽车用户购电成本，同时为电动汽车充换电服务设施的规划建设提供技术支持。

当前，欧美及日本等国家都在大力发展战略电动汽车充电管理方法及其应用研究。美国的研究主要侧

重于对电动汽车电池系统的改进，2012 年埃瓦尔有限责任公司（Elwha LLC）研发了一种可远程操控的电动汽车电池管理系统，通过对电池系统加载数据包，记录电池运行数据，评估电池的使用状态，并以此为用户提供充电策略建议。德国主要关注通过对电动汽车实现最优化充电路径规划，以减少充电时间和成本，其依靠强大的汽车工业并配合电力产业集聚优势来大力推进电动汽车产业的发展。至 2013 年，德国已经建成充电站 4454 座，庞大的充电站数量为电动汽车选择最佳的充电路径提供了保障。罗伯特博世有限公司（Robert Bosch GmbH）开发了一款基于电池充电状态和导航数据的最优化充电路径装置。该装置具有电池状态输出设备和持续更新的导航数据输出系统，依据电动汽车电池剩余电量和导航数据，为用户确定达到目的地的最优化充电路径，从而节约充电时间和充电成本。日本的研究侧重于对电动汽车电池零件的科学管理，2012 年丰田汽车公司开发了一套电动汽车电池零件管理系统，该系统由车辆管理装置、数据存储器和控制器三部分组成。该系统记录电池各部分零件的使用状态，并提示用户及时对陈旧或损坏零件进行修理更换。目前，国内外学者正开展对电动汽车的电池性能提升以及充电设施改进等问题的研究，而电动汽车充电基础设施共享、定价及规划的研究仍较为初步、分散，尚未形成能够协助电动汽车用户进行车辆与充电设施共享和有序充放电的定价和规划决策理论体系。因此，开展电动汽车充电基础设施共享、定价和规划研究，是立足于国内外经济可持续发展的重大现实需求，在未来具有重要的科学价值和经济价值。

“电动汽车充电管理方法与系统”工程开发前沿中核心专利产出数量排名前 3 的国家 / 地区分别是日本、韩国、美国，中国排名第四（见表 2.2.1）。根据核心专利主要产出国家 / 地区的合作网络图（见图 2.2.1）可以看出，各国之间的合作并不紧密，仅以色列和瑞士之间有一定合作。

表 2.2.1 “电动汽车充电管理方法与系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	Japan	7	41.18%	23	22.12%	3.29
2	South Korea	3	17.65%	33	31.73%	11.00
3	USA	3	17.65%	6	5.77%	2.00
4	China	2	11.76%	7	6.73%	3.50
5	Switzerland	1	5.88%	31	29.81%	31.00
6	Germany	1	5.88%	4	3.85%	4.00
7	Israel	1	5.88%	31	29.81%	31.00

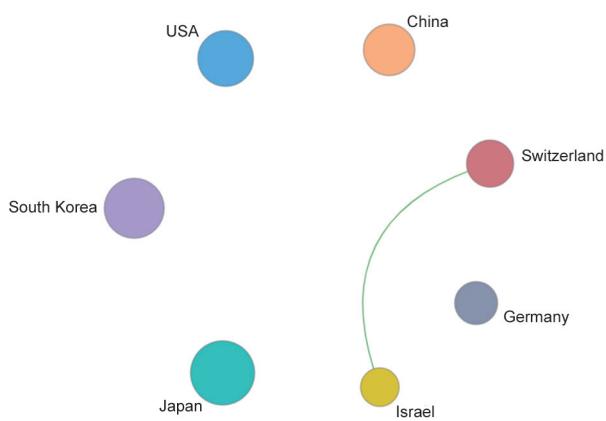


图 2.2.1 “电动汽车充电管理方法与系统”工程开发前沿主要国家或地区的合作网络

## 2.2.2 智能健康管理方法与系统

自 20 世纪六七十年代，欧美管理领域的学者开始关注健康领域的管理问题。随着老龄化社会的进入、健康需求的增长、医疗支出的增加，各个国家都面临着前所未有的压力。近十年来，越来越多的学者开始关注这一领域，投身于健康领域的管理问题研究，包括关键医疗资源的管理优化、医疗决策的辅助优化以及公共卫生政策的优化。移动互联技术、云平台以及智能穿戴设备技术日新月异的发展，使得个体健康信息的实时获取与海量医疗信息的存储分析得以实现，在此基础上智能健康管理方法与系统有了长足的发展。智能健康管理方法与系统能够为居民提供健康数据采集、存储、分析、健康咨询等全面的服务，支持居民健康智能管理、慢

病管理以及面向医院关键资源的智能管理。下面就个人健康信息管理、面向智慧医院的智能管理系统、面向社区医院的智能管理系统、智能养老服务系统四个方面展开讨论。

### (1) 个人健康智能管理系统

个人健康智能管理是近五年来智能健康管理方法与系统的发展重点，主要是通过智能化可穿戴设备，实时收集个人健康信息，包括血糖、血压、脉搏、血氧、BMI、腰臀比、体温等生理指标，通过无线或蓝牙上传到健康管理平台或终端设备。在此基础上，对这些信息进行存储与分析，用户可通过网站和移动 APP 查阅个人的健康体征测量数据、饮食建议与推荐菜谱、健身建议、近期的健康趋势图等资讯。当居民健康状况出现异常时，如体征指标超出正常界限时，可通过手机短信方式，及时提醒用户关注，通过及时调整作息、饮食习惯等，实现对用户健康异常情况的及时响应，实现数字化和科学化健康管理。

### (2) 智慧医院系统

智能健康设备将链接智能化的云端医院，通过互联网平台来建立覆盖患者诊疗全流程的数据库。患者通过互联网，在智慧医院系统进行挂号、诊疗等活动，而医生则可以通过该系统进行远程会诊等行为。通过线上完成的医疗环节就可以提高医疗工作的效率，减缓医疗资源紧张的现状。智慧医院系统将通过互联网云平台为每一个患者建立属于自己

的个人健康云档案，采用便携式智能健康设备进行检测，并将各项数据上传至个人健康云档案，方便医生进行复诊，并以此来调整治疗方案及药剂。同时，这份档案还可以使病人直观地了解自己身体数据的变化情况，更好地保障自己的健康。

### （3）面向社区医院的智能管理系统

在欧美医疗体系中，社区医院有着“守门人”（gate-keeper）之称。社区医院作为居民健康的“守门人”，在为居民提供基础医疗服务的同时，也提供了预防、保健、康复、健康教育等卫生保健服务。面向社区医院的智能管理系统一般是通过在线或离线收集居民健康或就诊信息，通过在系统中构建居民健康档案，实现对居民全生命周期的健康监护，方便居民随时查询自己的健康数据与在线就诊，医护人员可以掌握管辖的社区居民的个人健康状况和群体健康态势，当居民身体状况异常时，及时提醒相关医生关注，并将医生的干预建议，包括饮食注意事项、药物调整、需及时到医院就诊等，及时通知用户个人或家属；当预判到社区某种流行病或社区居民健康出现某种不利迹象时，立即采取干预措施。另外我国没有传统的家庭健康体系，也极少有家庭有定期体检的习惯。通过构建家庭健康云档案，可以形成“商业医疗保险 – 云端家庭医生 – 社区医院”的完整家庭健康医疗与预防体系。在线上设立家庭医生，对每个家庭成员进行定期的诊断，由医生长期提供定向服务。对于不能在线上解决的问题，如抽血化验等，则可通过社区医院提供线下诊所服务。社区医院的布局可以让在线诊断、线下导诊和保险支付形成闭环，可以为用户提供一站式就医解决方案。这一体系的筹建也被认为是一种值得期待的变现方式。

### （4）智能养老系统

在养老企业中，智能健康设备的作用也至关重要。通过智能健康管理系统完成基本的信息采集，建立老年人信息数据库，对老年人健康数据进行监控、日常检测，来保证老年人的健康生活。通过可

穿戴式智能健康便携式设备的检测，对老年人进行紧急求援、生活照料、家政服务、精神关怀、健康管理等，能够有效整合社会服务资源，建立完善的养老服务体系。

随着人工智能的发展，智能健康管理方法是近年来医疗健康服务工程研发的前沿，目前尚在智能管理的初步阶段。随着健康管理研究的深入，其不仅能应用于个人健康信息收集管理、健康咨询服务、远程医疗、门诊预约挂号和老年人健康管理等，其优越性还体现在与医疗相关的多个领域，如病情预测、智能导诊、智能诊断、用药管理、流行病预防等，所以未来的研发将侧重于智能医疗系统，将智能健康管理系统融入到智能医疗系统中。通过智能健康管理系统，医院管理者可以收集、存储海量医疗数据（包括临床数据与管理数据），这些为智能医疗（包括智能医疗决策与智能医疗管理）奠定了基础。通过机器学习，对个人健康大数据和图像检查结果进行智能分析，可以智能预测患者病情，优化医生诊断决策，减少误诊率，提高医疗服务效率和服务水平。

“智能健康管理方法与系统”工程开发前沿中核心专利产出数量排名前 2 的国家 / 地区分别是 中国、韩国，其中中国产出的核心专利数量为 19 篇，处于绝对领跑地位（见表 2.2.2）。我国在该领域产出的核心专利最多的机构为易特科（前海安测）信息技术有限公司（Anycheck Information Technologies Co Ltd），篇均被引数为 2（见表 2.2.3）。

### 2.2.3 智能网联汽车技术

自全球第一辆自动驾驶概念车出现以来，智能网联汽车（ICV）经历了近 80 年的发展历程，并依次经历概念推出、基础性研发、运行测试等阶段，即将进入市场化阶段。随着互联网技术的快速推进，通信、感知等技术的不断发展，ICV 技术走上了向“智能 + 网联”的无人驾驶汽车发展道路。

ICV 技术发展包括两大方面：一是智能化（即

表 2.2.2 “智能健康管理方法与系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	19	95%	97	98.98%	5.11
2	South Korea	1	5%	1	1.02%	1.00

表 2.2.3 “智能健康管理方法与系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	Anycheck Information Technologies Co Ltd	中国	4	20%	8	12.25%	2.0
2	Hangzhou Yinjiang Intelligence Medical	中国	2	10%	5	5.10%	2.5
3	Jiaxing Zhiheng Precision Instr Co Ltd	中国	2	10%	7	7.14%	3.5

自动驾驶），逐步实现车辆代替人进行驾驶操作，国际自动机工程师学会（SAE）将自动驾驶技术分为从驾驶支援到完全自动驾驶的 5 个发展阶段，通常所说的“无人驾驶”是指自动驾驶技术的最高阶段 Level 5；二是网联化（车联网），实现车辆与外界的智能信息交换，包括车车通信（V2V）、车路通信（V2I）等。

目前，无人驾驶发展已分化出两大技术派别：一是以通用、大众、奔驰等传统车企为代表的 ADAS 和自主智能技术，二是以谷歌、苹果、百度等互联网企业为代表的人工智能和网联化技术。前者主要由现有的汽车技术出发，配合感知和机器决策，逐步实现智能化无人驾驶；后者则通过计算机及互联网实现对传统汽车的控制和改造。两类技术虽然起点有异，但最终会融合，实现完全无人驾驶。

ICV 技术集中了汽车工程、人工智能、计算机、微电子、自动控制、通信与数据平台等领域技术，是一个集环境感知、规划决策、控制执行、信息交互等于一体的技术综合体，拥有相互依存技术链和产业链体系。

ICV 技术体系由环境感知系统、智能决策系统、控制执行系统三个层次组成，按技术发展路径分为三个方向：网联式智能（connected vehicle, CV），

自主式智能（autonomous vehicle, AV），及智能网联汽车（Intelligent connected vehicles, ICV）。ICV 融合了自主式智能汽车与网联式智能汽车的技术优势，涉及汽车、信息交互与基础支撑三大领域技术，实现这些功能主要依赖于环境感知、导航定位、智能决策、控制执行、信息融合和车联网等关键技术：

### （1）环境感知与导航定位技术

该技术主要是对行驶中的智能网联汽车进行实时导航定位。环境感知系统是将先进的通信技术、信息传感技术、计算机控制技术结合起来，利用摄像头、毫米波雷达、激光雷达、超声波等主要车载传感器以及 V2X 通信系统感知周围环境，通过提取路况信息、检测障碍物，为 ICV 提供决策依据；在辅助和无人驾驶系统中，将北斗导航系统与电子地图、无线电通信网络、计算机车辆管理信息系统相结合，基于北斗系统的高精度定位，为自动驾驶车辆提供低成本广覆盖的高精度定位方案，实现车辆跟踪和交通管理等功能。

### （2）智能决策技术

ICV 决策控制技术是通过信息的采集、处理等，对驾驶行为进行决策指导控制，其技术系统涉及信息融合技术、路径规划技术和车辆控制技术等关键技术，是整个 ICV 系统的核心部分。

### (3) 控制执行技术

车辆控制主要通过控制车辆动力、底盘和电子电器等系统的执行动作，实现车辆一体化控制并自动运行。

### (4) 信息融合技术

大数据是 ICV 决策的前提，信息融合技术是通过整合不同来源的数据，提高系统的可靠性、安全性和信息的精度和可信度。

### (5) 车联网技术（即网联化）

车联网是以车内网、车际网和车载移动互联网为基础，按照约定的通信协议和数据交互标准，在车与人、车、路及云等之间进行无线通讯和信息交换，实现智能化交通管理、智能动态信息服务和车辆智能化控制的一体化网络。车联网涉及传感器技术及传感信息整合、开放智能的车载终端系统平台、语音识别技术、服务端计算与服务整合技术、通信及其应用技术和互联网技术等关键技术。

目前，欧美日等国将发展 ICV 产业提升到国家战略层面高度。美国于 2015 年发布的《美国智能交通系统战略规划（2015—2019 年）》，将实现车联网、推进车辆自动化定为两大战略重点；欧盟于 2011 年颁布《欧盟一体化交通白皮书》，重点发展车辆智能安全、信息化及交通安全管理，并将信息安全与可靠性和大规模示范应用验证作为重点技术研究，2013 年推出的《地平线 2020 科研计划》，从标准体系、基础设施、网络安全等全方位推进 ICV 技术的研发；日本于 20 世纪 90 年代开始研究 ICV 和智能交通系统，2013 年提出的建立一个最先进的 IT 国家战略中，包括了一些关于 ICV 的元素和目标，2020 年日本自动驾驶汽车将行驶在高速公路。在 ICV 技术领域，欧美日已形成三足鼎立的局面。美国重点在网联化，其通过政府强大的研发体系，快速形成了基于 V2X 的网联化汽车产业能力；欧洲形成了具有世界领先的汽车电子零部件供应商和整车企业，其在自主式自动驾驶技术相对领先；日本借助良

好的交通基础设施方面建设，积极推进、提高自动驾驶方面技术水平。

相对于欧美日等发达国家，中国的 ICV 技术研发起步较晚，我国于 2015 年发布了《中国制造 2025》，将 ICV 与节能汽车、新能源汽车并列作为我国汽车产业发展的重要战略方向，并明确指出：2020 年掌握智能辅助驾驶总体技术及各项关键技术，初步建立 ICV 自主研发体系及生产配套体系；2025 年掌握自动驾驶总体技术及各项关键技术，建立较完善的 ICV 自主研发体系、生产配套体系及产业群，基本完成汽车产业转型升级。

从技术层面看，随着人工智能、信息通信、定位导航、大数据、云计算等技术在汽车领域的广泛应用，汽车由人工机械操作加速向电子信息系统控制转变，这是 ICV 技术发展的必然趋势。从产业层面看，随着互联网技术的快速推进，通讯、感知等技术的不断发展，传统汽车产业顺应融合大势，加速与信息通信、智能交通等跨界合作全面展开，汽车产业链面临重构，价值链不断延伸拓展，产业发展呈现智能化、平台化、网络化特征。ICV 产业将是汽车、电子、信息、交通、定位导航、网络通信、互联网应用等行业领域深度融合的新型产业，是全球创新前沿和未来发展的制高点。

“智能网联汽车技术”工程开发前沿中核心专利产出数量排名前 3 的国家 / 地区分别是中国、韩国、日本，其中中国产出的核心专利数量为 9 篇，处于绝对领跑地位（见表 2.2.4）。根据核心专利主要产出机构情况，机构均只产出 1 篇专利，其中天津安联程通信息技术有限公司（Tianjin Anlian Chengtong Information Technology Co Ltd）、济钢集团（JGJT）、上海哲山电子科技有限公司（Shanghai Zheshan Electronic Technology）篇均被引数均为 5，排在前三（见表 2.2.5）。根据核心专利主要产出机构的合作网络图（见图 2.2.2）可看出，各机构之间的合作较少。

表 2.2.4 “智能网联汽车技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	9	69.23%	24	80.00%	2.67
2	South Korea	3	23.08%	4	13.33%	1.33
3	Japan	1	7.69%	2	6.67%	2.00

表 2.2.5 “智能网联汽车技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	JGJT	中国	1	7.69%	5	16.67%	5
2	Shanghai Zheshan Electronic Technology	中国	1	7.69%	5	16.67%	5
3	Tianjin Anlian Chengtong Information Technology Co Ltd	中国	1	7.69%	5	16.67%	5
4	Hunan Chuanxin Electronic Technology Co Ltd	中国	1	7.69%	3	10.00%	3
5	WSGC	中国	1	7.69%	3	10.00%	3

Tianjin Anlian Chengtong Information Technology Co Ltd

Shanghai Zheshan Electronic Technology

Hunan Chuanxin Electronic Technology Co Ltd

JGJT

WSGC

图 2.2.2 “智能网联汽车技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

## 领域课题组人员

课题组组长：何继善 孙永福 丁烈云

课题组成员：

陈晓红 傅志寰 郭重庆 胡文瑞 栾恩杰  
 刘人怀 凌文 陆佑楣 王安 王基铭  
 王陇德 王礼恒 吴启迪 王玉普 王众托

向 巧	许庆瑞	徐寿波	汪应洛	袁晴棠
殷瑞钰	杨善林	朱高峰	郑静晨	周建平
赵晓哲	毕 军	陈 劲	蔡 莉	丁进良
杜文莉	方东平	方鹏骞	高自友	黄海军
黄季焜	黄 伟	胡祥培	华中生	江志斌
吕建中	骆汉宾	李启明	刘晓君	李一军
李永奎	李 政	任 宏	石 勇	盛昭瀚

## 第二部分 领域报告：工程管理

---

唐加福 唐立新 吴德胜 王慧敏 王红卫  
吴建军 王崑声 王孟钧 王先甲 魏一鸣  
王要武 于泽华 叶 强 曾赛星  
执笔组成员：  
丁烈云 王红卫 骆汉宾 钟波涛 贺 领

杨洪明 江志斌 方鹏骞 周建中 李红波  
李玉龙 杨立兴 胡平放 刘振元 郭 健  
余宏亮 刘军安 王周康 耿 娜 温 祂  
刘文黎 曹 澈 侯佳伟 訾春艳 黑永健  
吴海涛 赵 能

# 总体组成员

项目组长：钱旭红

项目组成员：

段正澄 郭东明 潘云鹤 卢锡城 王静康 薛群基 翁史烈 倪维斗  
彭苏萍 崔俊芝 陈以一 郝吉明 康绍忠 李召虎 邓秀新 陈赛娟  
杨宝峰 何继善 孙永福 丁烈云 韩 篓 吴 向 涂善东 周炜星  
吉久明 蔡 方 蒋志强 孙济庆 赵 星

综合组执笔：

周炜星 吉久明 蔡 方 蒋志强 穆智蕊 郑文江

数据支持：

科睿唯安

工作组：

组 长：吴国凯 韩 篓 安耀辉

副组长：吴 向 周炜星 丁 宁 周 源 郑文江

成 员：

王晓俊 范桂梅 王爱红 宗玉生 唐海英 张 健 黄海涛 赵西路  
于泽华 闻丹岩 延建林 杨 波 穆智蕊 陈冰玉 刘宇飞

致谢：

感谢中国工程院各学部和学部办公室、《中国工程科学》杂志社、中国工程院院刊（系列）编辑部、中国工程科技知识中心、华东理工大学、华中科技大学、浙江大学、国防科技大学、天津大学、上海交通大学、同济大学、清华大学、中国农业大学的大力支持！



- 机械与运载工程
- 信息与电子工程
- 化工、冶金与材料工程
- 能源与矿业工程
- 土木、水利与建筑工程
- 环境与轻纺工程
- 农业
- 医药卫生
- 工程管理