

九、工程管理

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

在工程管理领域，本年度 10 个全球工程研究前沿分别是工业互联网平台赋能产业数字化转型研究，数字时代全球供应链安全风险研究，人工智能场景下的大数据治理方法研究，数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究，双碳战略下的可持续交通系统研究，全球性公共卫生危机的形成机理、演化规律与治理策略，基础性、典型战略性资源中长期可持续供给路径及政策，社交网络下的群体共识机制，基于大数据的金融风险评估，社会技术系统理论视角下的基础设施智能运维管理研究。其核心论文发表情况见表 1.1.1 和表 1.1.2。其中，工业互联网平台赋能产业数字化转型研究、数字时代全球供应链安全风险研究、人工智能场景下的大数据治理方法研究、数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究为重点解读前沿，后文对其目前发展态势以及未来趋势进行详细解读。

(1) 工业互联网平台赋能产业数字化转型研究

工业互联网平台是场景驱动新一代信息技术与制造业深度融合的载体，是数字技术和数据要素协同驱动产业数字化、网络化、智能化转型升级的关键基础设施。随着数字经济和新一轮科技革命在全球范围内向纵深演进，以亚马逊 AWS、通用电气（GE）Predix、西门子 MindSphere、海尔 COSMOPlat、阿里 supET、三一重工 ROOTCLOUD、用友 ERP、华为 FusionPlant 等为代表的工业互联网平台成为打造产业数字化动态能力、加速产业数字化转型的关键引擎、重要途径和全新载体。工业互联网平台通过数字化的综合赋能平台，实现人、机、物的全面互联和全产业链、全价值链、全创新链、全员全要素的全面链接，促进数字经济与实体经济深度融合，能够以更高效率、更低成本和动态性地满足多元工业场景的复杂综合性和个性化需求，推动形成全新的工业生产制造和数智化服务体系。工业互联网平台赋能产业数字化转型的研究主要集中在工业互联网平台的技术架构、赋能产业数字化转型的过程机制、产业数字化动态能力、大中小企业融通创

表 1.1.1 工程管理领域 Top 10 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
1	工业互联网平台赋能产业数字化转型研究	115	10 561	91.83	2018.3
2	数字时代全球供应链安全风险研究	12	710	59.17	2017.9
3	人工智能场景下的大数据治理方法研究	33	2 789	84.52	2018.3
4	数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究	199	17 231	86.59	2019.2
5	双碳战略下的可持续交通系统研究	96	7 830	81.56	2017.9
6	全球性公共卫生危机的形成机理、演化规律与治理策略	6	668	111.33	2017.3
7	基础性、典型战略性资源中长期可持续供给路径及政策	14	1 039	74.21	2018.3
8	社交网络下的群体共识机制	14	1 835	131.07	2017.8
9	基于大数据的金融风险评估	238	18 885	79.35	2018.4
10	社会技术系统理论视角下的基础设施智能运维管理研究	29	713	24.59	2018.0

表 1.1.2 工程管理领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	工业互联网平台赋能产业数字化转型研究	13	20	26	27	22	5
2	数字时代全球供应链安全风险研究	3	2	3	2	1	1
3	人工智能场景下的大数据治理方法研究	5	5	8	6	9	0
4	数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究	10	20	19	56	56	38
5	双碳战略下的可持续交通系统研究	21	21	21	14	18	1
6	全球性公共卫生危机的形成机理、演化规律与治理策略	1	3	1	1	0	0
7	基础性、典型战略性资源中长期可持续供给路径及政策	2	1	6	1	4	0
8	社交网络下的群体共识机制	2	5	3	2	2	0
9	基于大数据的金融风险评估	37	35	36	48	55	21
10	社会技术系统理论视角下的基础设施智能运维管理研究	5	3	8	4	5	2

新生态建设、工业互联网平台治理等议题。卫星互联网、联邦学习、隐私增强计算、Web 3.0 和元宇宙等新一代数字技术的发展和绿色低碳发展的需求趋势，使得行业云原生平台、工业元宇宙、场景驱动的创新等成为工业互联网平台赋能产业数字化转型研究的未来趋势。

（2）数字时代全球供应链安全风险研究

在新一轮科技革命与产业变革中，数字技术正推动全球供应链行业发生巨大变革，供应链迎来数字化、网络化、智能化的“数字蝶变”。尽管数字化技术创新正逐步将全球产业服务的期望推向顶峰，但随之而来的全球供应链安全问题也日益突出。一方面，在国际贸易摩擦加剧、不确定因素增加、各产业面向高质量转型的关键时期，关键技术薄弱带来的供应链风险问题也逐渐暴露。究其根源，关键技术“卡脖子”问题来源于关键产业链布局的不完善，特别是在当前逆全球化、发达国家供应链主动脱钩等趋势下，如何确保全球高技术行业的供应链安全成为日益紧迫的问题。另一方面，数字经济的出现虽然有效地推动供应链向透明化、智慧化发展，但数据集成带来的信息泄露问题频发，国与国之间的数字鸿沟不断扩大，数字主权争夺也进入白热化阶段，影响了全球智慧供应链的快速发展。在近年的学术研究中，供应链关键技术产业链布局方

法、逆全球化经济竞争加剧下高技术行业供应链的安全问题、数据集成带来的供应链数据泄露和信息安全威胁是重点研究方向。

（3）人工智能场景下的大数据治理方法研究

大数据治理（big data governance）是组织中涉及大数据使用的一整套管理行为。其包含了两种定义：一种是“对大数据进行治理”，即采取一定的方法或者形式，对大数据本身进行数据源汇入、清洗加工、数据规范化、数据存储、数据计算、数据服务应用等环节予以持续的治理，提升数据的质量和價值，有利于后续对大数据的利用；另一种则是“依靠大数据进行治理”，也就是运用大数据、云计算、人工智能等先进技术，实现流程规范、效率提升和社会治理手段的智能化。首先，在人工智能场景下大数据治理的关键技术上，主要包括数据结构化处理、数据质量评估及数据清洗、数据规范化、数据融合与摘取、数据整理和数据共享等全流程服务环节。其次，通过构建大数据知识图谱，实现理解数据、解释现象和知识推理，从而发掘深层关系，实现智慧搜索与智能交互。再次，人工智能场景下大数据治理面临着安全可控问题。需要着重解决隐私泄露、数据确权、算法偏见、技术滥用等数据安全与算法安全问题，从而促进社会智慧化治理与产业智能化转型。最后，在大数据治理的典型人工智

能应用场景上,应用在金融、医疗、城市管理、舆情监控等更复杂的高价值的场景,用于解决经营决策、资源配置、流程优化、运维保障和风险控制等管理需求。

(4) 数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究

数字孪生模型是现实世界实体或系统的数字化表现,可用于理解、预测、优化和控制物理世界的实体或系统,因此,数字孪生模型的构建是实现模型驱动的基础。数字孪生模型构建是在数字空间实现物理实体及过程的属性、方法、行为等特性的数字化建模。模型构建可以是“几何-物理-行为-规则”多维度的,也可以是机械、电气、液压等多领域的。数字孪生模型应涵盖多维度和多领域模型,从而实现对物理对象的全面真实刻画与描述。当构建相对复杂对象的模型时,需解决如何从简单模型组装和融合形成复杂模型的难题。为保证数字孪生模型的正确有效,需对模型进行校验和演化,以保证模型描述及刻画物理对象的状态或特征是正确,即保证模型的虚实一致性。因此,主要研究方向可围绕数字孪生模型“建—组—融—验—校—管”六个阶段,进行多维度/多领域数字孪生模型精准构建、全要素/多尺度孪生数字模型组装与融合,数字孪生模型虚实一致性验证与校正,数字孪生模型交互迭代与动态演化等方向研究。数字孪生必须准确地表示当前状态下的物理系统,这要求数字孪生模型通过快速可靠地精准反映物理系统的变化和更新。未来,数字孪生模型的构建及演化必将朝着提升建模效率和精度的方向发展。

(5) 双碳战略下的可持续交通系统研究

可持续交通系统的推进过程是寻求更科学的能源结构与用能机制、更低的排放和更方便的系统排放物治理或自我吸收固化途径及技术的过程,包括政策、标准以及法律法规的制定与实施等。

1992年,中国成为最早签署《联合国气候变化框架公约》的缔约方之一。2002年,中国政府

核准了《京都议定书》。在中国的积极推动下,2015年,世界各国达成应对气候变化的《巴黎协定》;2016年,中国率先签署该协定。2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布,中国“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。这一“双碳”战略为可持续交通系统的研究与推进提出了新方向。

围绕可持续交通系统,在环境层面的研究主要集中在三个方面:一是减少污染排放;二是转移排放;三是排放物治理。从减少污染排放的角度,从陆上交通,到航空,再到水运,都在推广更清洁的能源,研究如何克服技术或成本的制约,让比传统能源更清洁的能源得到更广泛的使用;持续优化车辆、设备的使用,设施的建设、养护与使用,以及时间、空间与相关资源的分配;通过技术提升以降低能耗。在“双碳”战略背景下,该研究从区域性空气质量问题逐渐向全球性气候变化问题转移,关注点越来越聚焦在碳排放上。从转移排放的角度,推广新能源车、设置海上污染排放控制区均属于该研究范畴,该领域的研究往往不以降低碳排放为出发点,而将重点放在降低有害气体在人口高密度区域的排放。从排放物治理的角度,主要是对有害气体的研究,针对碳中和的研究方兴未艾。

(6) 全球性公共卫生危机的形成机理、演化规律与治理策略

全球性公共卫生危机是指由公共卫生突发事件诱发,给全球大部分国家的社会系统常态运行带来严重冲击(甚至导致停摆),对国际经贸交流、国家安全等造成严重影响的事件。主要研究方向包括:

1) 全球性公共卫生危机的形成演化机理研究。该方向关注地方性卫生事件转化成全球性公共卫生危机的演化机理,经济、交通、信息等复杂系统的耦合对演化过程的作用机制,已有监测预警和风险治理体系的失效机制,以及危机中不同人群的脆弱性分析。

2) 全球性公共卫生危机的治理策略研究。该

方向关注巨灾峰值需求场景的稀缺性管理、增产扩能、供应链失灵等资源优化配置和体制机制设计问题，全球性公共卫生危机治理中的国际参与及国际合作协调机制，典型场景的多元主体研判决策规律与机制，以及典型政策工具执行对多元主体的心态和行为的干预影响分析。

3) 全球性公共卫生危机后的学习、变革与韧性提升研究。该方向可关注危机后的公私组织、制度与社会的恢复和学习机制，财税等政策工具组合对个体、企业和产业链恢复的影响机制，危机后多元主体变革及适应规律、应对体系的顶层设计与模式重构，以及韧性治理提升策略。

全球性公共卫生危机发生概率低，各国政府及其他主体对制度建设和能力储备工作缺少长期关注，如何以新型冠状病毒肺炎（以下简称“新冠肺炎”）疫情危机为契机推动研究、制度建设和能力储备将是未来值得关注的议题。

（7）基础性、典型战略性资源中长期可持续供给路径及政策

基础性、典型战略性资源一般指关系全球生计、在资源系统中居支配地位的资源，其可持续供给取决于资源禀赋、供求状况、经济发展、储备效能和国际物资可得性等因素。传统意义上能源、矿产、水和土地等资源是最为典型的基础性、典型战略性资源，但随着科技进步和全球经济发展，数据资源、高技能专业劳动者、碳排放权等同样被纳入基础性、典型战略性资源范畴。当前，围绕基础性、典型战略性资源的中长期可持续供给路径与政策开展了系统研究，从生产端和消费端两个维度构建了可持续供给路径与政策分析框架，重点讨论了基础性、典型战略性资源的生命周期测度与管理、资源利用效率提升、环境健康与废物循环利用、供应链安全风险评估、政府调控与资源优化配置、可持续供给绩效评估等议题。基于系统性思维和人工智能等技术方法，从中长期视角探索一套针对基础性、典型战略性资源可持续供给及管理政策的思维范式、实践

范式和研究范式，成为未来研究突破的重点。基础性、典型战略性资源全生命周期效益与成本优化、可持续供应链建模与治理路径、绿色技术创新与循环经济、全球气候变化减缓与资源可持续供给、区块链视角下的资源优化配置、资源安全和政策模拟分析、人工智能与可持续管理决策系统等关键科学问题，是多学科交叉的前沿研究热点。

（8）社交网络下的群体共识机制

群体共识致力于协调决策者观点之间的冲突，寻求使多数人意见统一的群体决策方案。传统的群体共识模型认为决策者是互相独立的，然而实际上决策者处在一个社会网络中，彼此之间的相互关系以及所处网络的结构特征是影响群体共识的重要因素。

近些年来，社交媒体的广泛普及加速了决策个体间的交互和信息传递，群体共识面临越来越多的冲突和挑战，比如决策群体规模的扩大化、利益群体的多样化、个体偏好的差异化、决策问题的复杂化。社交网络能够准确刻画决策者之间的相互关系（利益关系、信任关系、冲突关系、情感关系等），为群体共识机制的发展提供了新的研究视角。在大数据背景下，将社交网络分析方法引入群体决策场景，能够广泛应用于重大舆情事件应急决策、社会热点与异常事件的自动发现等场景。

目前，社交网络下的群体共识机制的主要研究方向包括：群体共识模型在动态社交网络环境下的研究；社交网络环境下共识补偿以及非合作行为；社交网络环境下的恶意操纵行为。此外，随着人工智能和元宇宙技术的发展，社交网络上除了真实人类，还有社交机器人以及网络虚拟人。这些新的社交关系（如人机交互、机机交互）如何影响群体共识过程，亟须进行深入研究。

（9）基于大数据的金融风险评估

数据是通过观测得到的数字性的特征或信息，随着数字化技术的发展及在金融领域的广泛应用，具有类型多样、海量异构、关系复杂、价值密度低、

高噪声、非正态等特征的金融数据持续高速涌现，形成金融大数据浪潮。在此背景下，金融科技在金融风险的监测、评估、预警中的研究和应用愈发深入，赋能增效的同时也导致新型、潜在危害大的金融风险问题出现。金融风险具有复杂性、隐蔽性、跨域性、传导性、动态性等特点，导致其难表征、难认知、难识别、难追踪、难建模、难推理、难评估。当前金融风险的监测、评估和预警都是基于对海量金融数据的分析处理，通过建立算法模型来对风险进行识别和预测，研究主要集中在海量金融数据的安全防护、安全存储、安全传输、实时处理分析和共享流通；基于图数据、文本数据、流数据等非结构数据的金融风险快速识别方法；图模型和统计模型在系统性金融风险的防范预警研究；运用数据科学开展金融信用风险评估研究等方面。未来研究趋势主要包括：分业管理体制下的金融数据共享与溯源方法研究；自主可控的金融数据智能孪生及敏感特征遮蔽技术研究；金融孪生数据隐私风险及数据质量评估技术研究；金融数据孪生安全环境构建及数据存证技术研究；基于金融数据孪生的近似查询处理与下一代金融数据库测试基准构建技术研究；金融风险行为表征、认知和金融网络风险传导、建模与评估研究；大数据驱动的金融科技产品风险快速识别与分析技术研究；通过金融大数据，构建大规模金融风险认知图谱系统体系等。

（10）社会技术系统理论视角下的基础设施智能运维管理研究

现代基础设施系统以工程设施为载体，依靠复杂的技术与设备发挥功能，为社会生产和居民生活提供重要支撑。而其运维管理涉及运营、维护、消费服务等多个环节，受到技术人员、管理团队、终端用户等各类干系人决策与行为的影响，以及经济、社会、环境等外部条件的制约。因此，基础设施具有典型的社会技术系统特征。随着基础设施的不断发展，其社会组分与技术组分间的交互耦合关系日趋频繁和复杂，对于基础设施的效能与安全产生日

益关键的影响。近年来，国内外学界在基础设施的社会技术系统建模仿真、基础设施与干系人交互的运维情景构建与推演、基于人因工程和行为决策理论的基础设施运维优化、基于信息物理社会融合系统的基础设施安全韧性管理、基础设施对社会经济发展与安全的作用路径与管理策略、基础设施绿色低碳发展的政策与体制机制等热点研究方向上取得了显著进展。在物联网、云计算和人工智能等信息技术快速发展的背景下，如何进一步推动基于物理-社会-信息多维融合的基础设施运维管理范式、方法和技术创新，优化基础设施技术组分与社会组分的交互模式与效率，实现基础设施智能化与低碳化转型和效能与安全水平的不断提升，有望成为未来重要的研究热点。

1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读

1.2.1 工业互联网平台赋能产业数字化转型研究

工业互联网平台赋能产业数字化转型研究的重点是工业互联网平台如何通过打造数字技术、数据要素和智能制造深度协同的数智化综合服务平台，瞄准多元产业应用场景需求，加快产业数字化、网络化、智能化转型的过程机制和大中小企业融通创新生态建设及其有效治理。2012年通用电气（GE）提出“工业互联网”的概念后，国内外政策和学术领域逐步达成共识，认为工业互联网是继消费互联网之后从供给侧视角驱动制造业数智化转型的关键新引擎。此后，GE联合IBM、思科、英特尔等国际龙头企业成立了工业互联网联盟（IIC），工业互联网平台在全球呈现井喷趋势。我国在“中国制造2025”的基础上，日益重视工业互联网对深入推进两化融合以及产业数字化转型的牵引性作用。2021年，全国工业互联网平台突破600个，具备一定行业、区域影响力的平台超过100个。工业和信息化部分别于2021年、2022年印发《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》和《工业互联

网创新发展行动计划（2021—2023年）》，均将工业互联网平台作为重点方向。尤其是在全球产业链供应链阻链断链风险加剧、制造业数字化转型进入深水区的趋势下，工业互联网平台赋能产业数字化转型升级成为更加重要且紧迫的议题。

近年来，国内外学者重点关注的议题包括工业互联网平台的技术架构、赋能数字化转型的过程机制、产业数字化动态能力、大中小企业融通创新生态建设、工业互联网平台治理等。其中，工业互联网平台的技术架构研究重点关注 IaaS、PaaS、SaaS 和正在涌现的 AIaaS 等不同技术架构，关键共性数字核心技术突破，以及平台软件国产化及其赋能产业数字化的差异化商业模式；赋能产业数字化转型过程机制的研究重点关注数字技术、数据要素和平台模块有机整合和多元产业场景应用的机制；产业数字化动态能力研究重点关注领军企业如何通过数字化技术能力体系、数字化管理能力体系和数字化场景应用能力体系建设，实现自身转型的同时，赋能产业链、价值链全方位转型；大中小企业融通创新生态建设研究重点关注如何支持缺少数据要素和关键数字技术的中小企业参与工业互联网平台生态建设、加快数字化转型，保障产业链供应链安全韧性发展；工业互联网平台治理研究则重点关注数据隐私、平台垄断、平台互联互通和治理标准体系等内容。

展望未来，随着新一代数字技术的不断涌现和工业互联网平台与产业数字化转型共演的加速，行业云原生平台、工业元宇宙、场景驱动的创新成为值得重视和前瞻布局的研究方向。

（1）行业云原生平台

行业云原生是云计算和工业互联网领域的新兴概念，是工业互联网平台建设和服务应用的全新思维与创新模式，是平台服务的关键基础设施，能够实现工业互联网平台面向行业个性化需求的应用敏捷开发、迭代效率提升和交付速度。行业云原生平台目前仍处于快速兴起和探索阶段，需要进一步关

注即服务交付模式、持续的软件定义交付、基于行业云原生平台的分布式企业以及标准化、高度自动化的云服务和智能决策系统建设。

（2）工业元宇宙

工业元宇宙是在新一代人工智能技术引领下，将元宇宙相关技术和软件在工业领域的应用，能够实现工业领域中的物理空间、虚拟空间和赛博空间的虚实映射以及交互融合，从而实现以虚促实、以虚强实的工业全产业链、全价值链、全要素智慧协同开放互联和场景融合的新型数字工业经济系统。工业元宇宙是智能制造的未来典型形态之一，是数字孪生的进阶和升维。当前，工业元宇宙研究正处于概念验证、基础设施建设和模式探索的阶段，亟待进一步破局。

（3）场景驱动的创新

场景驱动的创新既是将现有数字技术和工业互联网平台服务应用于特定场景，进而创造更大价值的过程，也是基于未来趋势与愿景需求，驱动战略、技术、平台 and 市场需求等创新要素及情境要素整合共融，突破现有工业互联网平台技术瓶颈，开发新技术、新产品、新渠道、新商业模式，乃至开辟新市场和新领域的过程。场景驱动的创新为工业互联网平台赋能产业数字化转型提供了新的突破方向，未来要更加关注工业互联网平台赋能“碳达峰、碳中和”、共同富裕、军民融合、乡村振兴等重大社会发展民生需求场景的机遇和机制。

“工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”工程研究前沿中，核心论文数排名前三位的国家分别是中国、美国和英国（表 1.2.1），核心论文主要产出机构为阿尔托大学、华南理工大学、北京航空航天大学等（表 1.2.2）。从主要国家间的合作网络（图 1.2.1）来看，美国、中国和其他国家间的合作较多；从主要机构间的合作网络（图 1.2.2）来看，华南理工大学、沙特国王大学、梅西纳大学合作较为紧密。由表 1.2.3 可以看出，中国的施引核心论文数排名第一。由表 1.2.4 可以看出，施引

表 1.2.1 “工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	32	27.83	2 553	79.78	2018.6
2	美国	24	20.87	2 360	98.33	2017.9
3	英国	16	13.91	1 794	112.12	2018.3
4	德国	10	8.70	577	57.70	2018.0
5	加拿大	9	7.83	1 269	141.00	2018.8
6	芬兰	9	7.83	866	96.22	2018.7
7	印度	8	6.96	606	75.75	2018.8
8	西班牙	8	6.96	471	58.88	2018.1
9	韩国	7	6.09	785	112.14	2017.3
10	意大利	7	6.09	429	61.29	2018.9

表 1.2.2 “工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”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	篇均被引频次	平均出版年
1	阿尔托大学	5	4.35	446	89.20	2019.6
2	华南理工大学	5	4.35	404	80.80	2018.4
3	北京航空航天大学	4	3.48	445	111.25	2019.0
4	瓦萨大学	4	3.48	420	105.00	2017.5
5	奥克兰大学	3	2.61	565	188.33	2017.7
6	沙特国王大学	3	2.61	232	77.33	2018.7
7	梅西纳大学	3	2.61	214	71.33	2018.7
8	瑞典皇家理工学院	3	2.61	207	69.00	2017.0
9	巴黎国立高等工艺学院	2	1.74	466	233.00	2019.0
10	蒙特利尔综合理工学院	2	1.74	466	233.00	2019.0

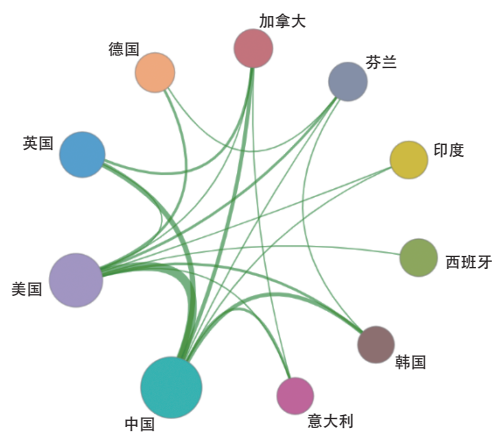


图 1.2.1 “工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

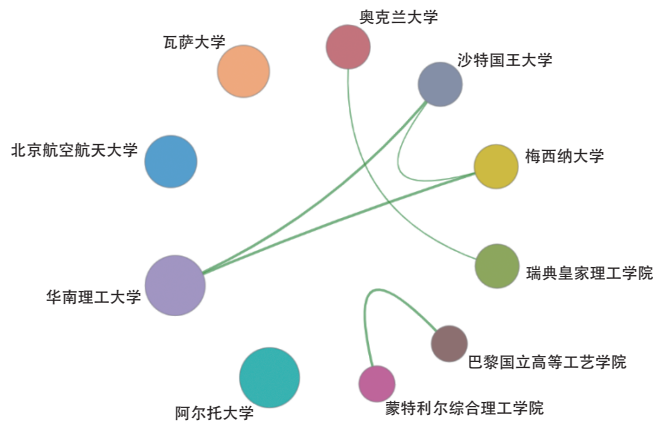


图 1.2.2 “工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	2 705	31.44	2020.2
2	美国	1 091	12.68	2020.0
3	印度	942	10.95	2020.2
4	英国	777	9.03	2020.1
5	意大利	624	7.25	2020.1
6	韩国	460	5.35	2020.1
7	德国	430	5.00	2020.1
8	加拿大	419	4.87	2020.1
9	西班牙	402	4.67	2020.0
10	澳大利亚	401	4.66	2020.1

表 1.2.4 “工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”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	中国科学院	126	12.32	2020.2
2	北京邮电大学	120	11.73	2020.1
3	北京航空航天大学	113	11.05	2019.6
4	上海交通大学	108	10.56	2019.7
5	南洋理工大学	93	9.09	2020.1
6	香港理工大学	93	9.09	2020.2
7	沙特国王大学	92	8.99	2020.2
8	清华大学	74	7.23	2020.1
9	浙江大学	73	7.14	2020.4
10	华中科技大学	66	6.45	2019.9

核心论文数排名靠前的机构是中国科学院、北京邮电大学、北京航空航天大学。图 1.2.3 为“工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”工程研究前沿的发展路线。

1.2.2 数字时代全球供应链安全风险研究

供应链管理涉及商流、物流、信息流，包括生产、运输、仓储等诸多过程，其中任何一个过程出现问题都会影响供应链安全，造成供应链风险。在数字化时代，数字化分析方法与工具为抵御供应链风险提供了技术保障。但技术本身易受外界复杂系统影响，特别是在逆全球化、发达国家供应链主动脱钩等趋势下，如何确保全球高技术行业的供应链安全成为日益紧迫的问题。

当前，全球各国学者已经为应对数字化时代全球供应链风险提供了不少解决方案。从核心论文的主要产出国家来看，排名前三位分别为英国、中国和加拿大（表 1.2.5）。从核心论文的主要产出机构来看，排名前三位分别为不列颠哥伦比亚大学、圭尔夫大学和俄亥俄州立大学（表 1.2.6），三家机构核心论文被引频次高于 90 次。

从主要国家间的合作网络（图 1.2.4）来看，

法国和德国、中国和比利时、英国和伊朗之间均存在合作。从主要机构间的合作网络（图 1.2.5）来看，只有东英吉利大学和俄亥俄州立大学没有与其他机构进行过合作。由表 1.2.7 可以看出，施引核心论文数排名前三位分别为中国、英国和美国，其施引核心论文数均达 100 余篇，尤其是中国的施引核心论文比例高达 20% 以上。由表 1.2.8 可以看出，排名靠前的机构分别是哈马德-本-哈利法大学、波尔多大学和中国科学院。

在回顾已有文献的基础上，针对数字化时代如何对全球供应链风险识别、评估、防范等方面进行更加深入的分析，并针对未来发展趋势提出见解。具体的研究趋势如下。

(1) 复杂情境下基于数字化技术的全球供应链风险识别方法

在供应链风险的识别中，数字化技术较为直观的体现是大数据算法。其根据供应链网络中信息流的收集分析供应链风险特征，组建风险预测体系，预先判断供应链是否存在安全风险。常用的供应链风险识别算法有模糊综合评价法、神经网络等，应用领域倾向于供应链金融中的信用风险、流动风险识别，企业运营风险预测等方面。在当前新冠肺炎

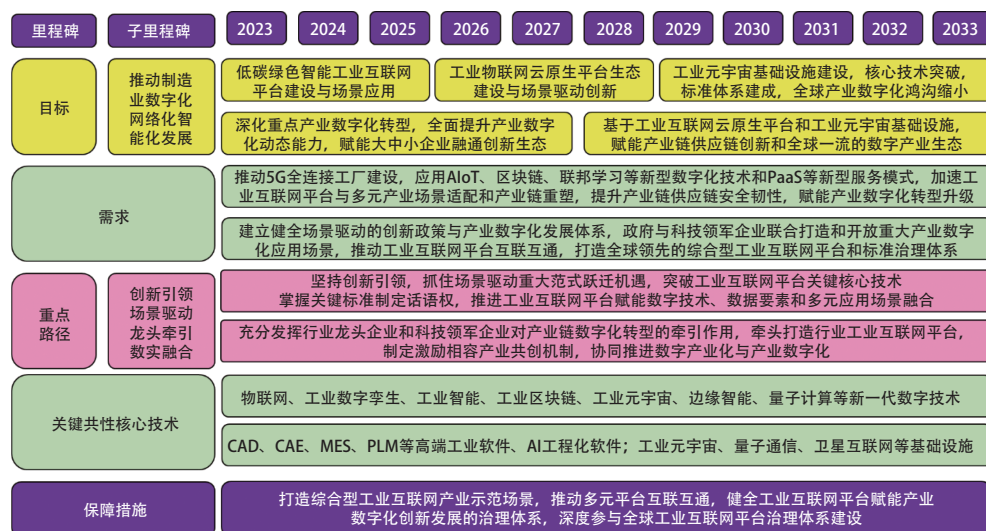


图 1.2.3 “工业互联网平台赋能产业数字化转型研究”工程研究前沿的发展路线

表 1.2.5 “数字时代全球供应链安全风险管理研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	英国	4	33.33	213	53.25	2017.5
2	中国	2	16.67	82	41.00	2019.0
3	加拿大	1	8.33	99	99.00	2019.0
4	美国	1	8.33	98	98.00	2020.0
5	西班牙	1	8.33	70	70.00	2017.0
6	法国	1	8.33	60	60.00	2016.0
7	德国	1	8.33	60	60.00	2016.0
8	波兰	1	8.33	48	48.00	2016.0
9	伊朗	1	8.33	41	41.00	2016.0
10	比利时	1	8.33	40	40.00	2021.0

表 1.2.6 “数字时代全球供应链安全风险管理研究”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	篇均被引频次	平均出版年
1	不列颠哥伦比亚大学	1	8.33	99	99.00	2019.0
2	圭尔夫大学	1	8.33	99	99.00	2019.0
3	俄亥俄州立大学	1	8.33	98	98.00	2020.0
4	东英吉利大学	1	8.33	73	73.00	2018.0
5	IE 商学院	1	8.33	70	70.00	2017.0
6	萨拉戈萨物流研究中心	1	8.33	70	70.00	2017.0
7	贝尔法斯特女王大学	1	8.33	60	60.00	2018.0
8	Youngs Seafood 公司	1	8.33	60	60.00	2018.0
9	法国国家科学研究中心	1	8.33	60	60.00	2016.0
10	奥格斯堡大学	1	8.33	60	60.00	2016.0

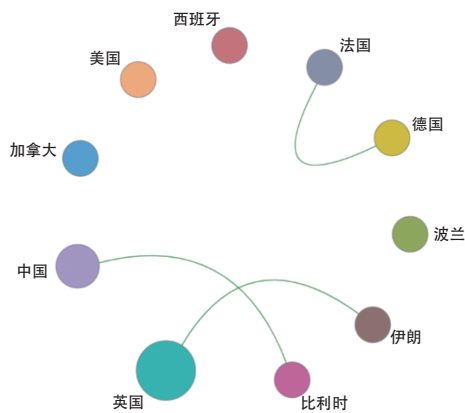


图 1.2.4 “数字时代全球供应链安全风险管理研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

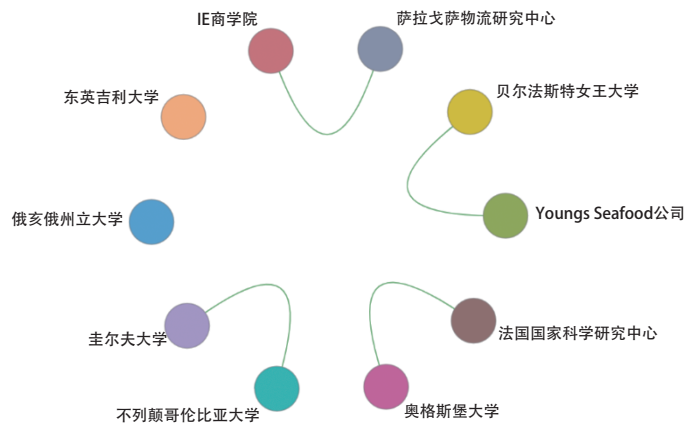


图 1.2.5 “数字时代全球供应链安全风险研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “数字时代全球供应链安全风险研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	144	20.20	2020.3
2	英国	107	15.01	2019.9
3	美国	106	14.87	2020.2
4	印度	56	7.85	2020.2
5	德国	56	7.85	2019.8
6	澳大利亚	46	6.45	2020.2
7	法国	45	6.31	2019.7
8	意大利	45	6.31	2020.4
9	波兰	42	5.89	2019.7
10	加拿大	39	5.47	2020.3

表 1.2.8 “数字时代全球供应链安全风险研究”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	哈马德-本-哈利法大学	17	12.14	2020.5
2	波尔多大学	16	11.43	2019.4
3	中国科学院	16	11.43	2019.8
4	滑铁卢大学	13	9.29	2019.2
5	伊朗国立大学	13	9.29	2020.1
6	波兰国家科学院	13	9.29	2019.5
7	柏林工业大学	13	9.29	2019.5
8	克兰菲尔德大学	10	7.14	2020.1
9	法国国家科学研究中心	10	7.14	2019.6
10	根特大学	10	7.14	2020.1

疫情背景下，运用多方法、多技术对供应链制造能力、生产水平等多方面进行风险识别，以及不同方法的优化、结果间的比较是研究的主流。

（2）基于数字化技术的全球供应链风险影响评估

数字化技术可以将供应链全过程虚拟化、可视化，通过大数据、模拟仿真等技术评估供应链中潜在风险。近年来，评估供应链风险影响的数字技术更具系统化特征，如应用射频识别、传感器等智能设备收集实时数据，结合历史维护数据、派生数据，实时模拟供应链运作过程，全面评估供应链中存在的未知风险及影响。通过决策支持系统、追踪系统以及数字孪生技术评估供应链风险已成为研究热点。在当前国际贸易摩擦加剧、不确定因素增加、各产业面向高质量转型的关键时期，如何评估在当前逆全球化、发达国家供应链主动脱钩等趋势下，全球高技术行业的供应链安全风险成为日益紧迫的问题，这一问题值得深入研究。

（3）数字化背景下的全球供应链中断与安全防范

数字化技术实现了数据共建共享，推动了供应链的多链协作，也提高了供应链集成化决策能力，这对于防范供应链风险至关重要。在新冠肺炎疫情时期，3D打印、云物流，以及自动导引车（automated guided vehicle, AGV）、射频识别（radio frequency identification, RFID）等无接触配送相关技术与设备为防止供应链中断提供了解决重要支持。这一领域的研究热点主要包括如何防止供应链中断，设计并实践基于区块链、云平台等技术的供应链架构等。因此，在近年的学术研究中，关键技术产业链供应链布局方法、逆全球化经济竞争加剧下的高技术行业供应链安全问题、数据集成带来的供应链数据泄露和信息安全威胁是重点研究方向。

（4）数据驱动下全球供应链风险影响规律与控制机制

作为识别、评估、防治供应链风险的重要工具，

应用数字化技术管理供应链风险已经被学者们广泛地研究，但仍然存在一些方面需要思考。从微观层面来看，数字技术尚有漏洞，存在数据泄露和信息安全威胁。从宏观层面来讲，智慧供应链创新和政府产业布局对于全球供应链风险的影响与解决机制尚不明确，需要构建适用于数字化时代的供应链风险管理标准。在数据驱动下，未来研究将着力解决数字化关键技术薄弱的问题，特别是数字化时代下供应链韧性的基础理论与方法、中美贸易摩擦对全球供应链的影响规律和仿真模拟、中国关键产业的供应链安全评估与预警机制、全球供应链断链风险、系统预测与安全治理体系等方面，这些问题值得深入研究。

图 1.2.6 为“数字时代全球供应链安全风险治理研究”工程研究前沿的发展路线。

1.2.3 人工智能场景下的大数据治理方法研究

回顾已有的文献，并对当前发展境况和未来趋势加以分析，人工智能场景下的大数据治理方法研究主要聚焦于以下几个方面。

（1）人工智能场景下大数据治理的关键技术

数据全流程服务包括数据结构化处理、数据质量评估及数据清洗、数据规范化、数据存储和数据共享等环节。数据结构化处理首先要对多源异构数据源进行解析，使用信息抽取技术提取出需要的信息，再进一步将其转换成结构化数据。数据质量评估的关键技术是数据可视化技术。用户定义一些数据清洗规则，批量化地处理数据中存在的质量问题，提高数据清洗的效率。在数据库研究领域，也有研究借助众包的思路提升数据清洗的效率。在数据清洗过程中，需要多轮次的人机交互，系统的交互界面和交互方式对于数据清洗算法的有效性尤为重要。数据的规范化处理根据应用的需求特点，确定数据粒度和表达方式。考虑大数据保存时间与存储空间平衡，识别对业务有关键影响的数据元素。建立数据治理标准体系，解决数据难以共享的体制

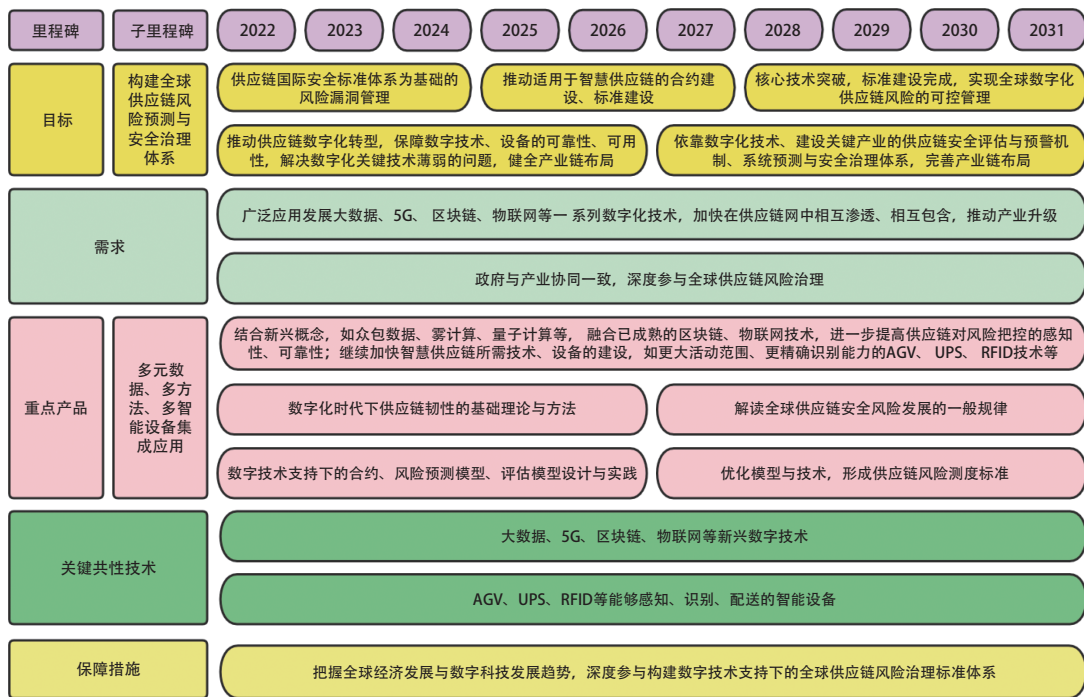


图 1.2.6 “数字时代全球供应链安全风险研究”工程研究前沿的发展路线

和技术难题。

(2) 人工智能场景下的大数据知识图谱构建

通过构建大数据知识图谱，实现理解数据、解释现象和知识推理，从而发掘深层关系，实现智慧搜索与智能交互。首先，基于企业和社交等元数据信息，通过自然语言处理、机器学习、模式识别等算法，以及业务规则过滤，提高处理效率，提升知识提取准确度。其次，以本体形式表示和存储知识，自动构建成知识图谱。最后，通过知识图谱关系，利用图计算进行知识发现、知识推理和挖掘等工作，借助智能搜索、关联查询手段，为最终用户提供更加精确的数据。

(3) 人工智能场景下的大数据安全可控问题

需要着重解决隐私泄露、数据确权、算法偏见、技术滥用等数据安全和算法安全问题。首先，密码学技术、智能合约、隐私计算是实现数据安全的关键技术。利用公钥密码等技术对数据进行加密，可以定义数据主体身份，有效支撑数据确权。多方安全计算等隐私计算技术，可以在不转移原始数据的

前提下实现对数据的开发利用，推动数据所有权和使用权分离。通过融合隐私计算与可信隐私计算技术，可以有效解决匿名化后个人信息重新被识别的问题，实现“可算不可识”。运用合约理论和激励机制，可以平衡安全保护与利益共享，实现“数据可用不可见”。其次，算法模型存在难以解释、难以控制、难以问责的特征，导致歧视、脆弱不稳定、操纵剥削、信息茧房等安全风险。利用知识、数据、算法和算力四个要素，建立新的可解释和鲁棒的人工智能理论与方法，进一步发展安全、可信、可靠和可扩展的人工智能技术。

(4) 大数据治理的典型人工智能应用场景

大数据治理已经应用在金融、医疗、零售、城市管理、舆情监控等更复杂的高价值的人工智能场景中，用于解决经营决策、资源配置、流程优化、运维保障和风险防控等管理需求。在经营决策领域，应用大数据可视化技术，实现复杂分析过程和分析要素的有效传递；在资源配置领域，依托大数据采集和计算能力实现资源配置的动态管理；在流程优

化领域，发现业务流程的瓶颈，提升运营效率和客户体验；在运维保障领域，基于流数据处理技术实现运行情况的即时监控；在风险防控领域，通过可视化技术发现识别风险线索，提升风险预警能力。在大数据治理的上述典型人工智能应用场景中，一方面系统化的大数据治理框架尚未形成，开放共享、安全与隐私保护、质量评估、价值预测等关键技术远未成熟；另一方面，存在着互联网公司垄断监管问题、金融数字业务监管问题、网络舆情监管与引导问题、数据安全和隐私保护等人工智能应用问题。

“人工智能场景下的大数据治理方法研究”工程研究前沿中核心论文数排名前两位的国家分别是美国和英国，其次是中国（表 1.2.9），篇均被引

频次排名前三位的国家分别是法国、韩国和瑞典。其中，美国、荷兰、英国、澳大利亚与别国之间的合作关系较多（图 1.2.7）。机构的核心论文数分布比较均匀，排名靠前的机构主要集中在中国、欧洲和美国（表 1.2.10），其中美国的加利福尼亚大学旧金山分校、北卡罗来纳大学合作关系最多，另一个合作区域为欧洲地区的伦敦帝国理工学院、伦敦卫生与热带医学院、阿姆斯特丹大学和牛津大学。相比之下，中国高校参与国际合作偏少（图 1.2.8）。由表 1.2.11 可以看出，美国和中国的施引核心论文数名列前茅，反映出其在人工智能和大数据研究领域的领先地位。由表 1.2.12 可以看出，施引核心论文数排名靠前的机构是中国科学院和哈佛大学。图

表 1.2.9 “人工智能场景下的大数据治理方法研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	13	39.39	1 178	90.62	2018.7
2	英国	10	30.30	685	68.50	2017.9
3	中国	8	24.24	561	70.12	2019.0
4	荷兰	7	21.21	380	54.29	2018.6
5	法国	5	15.15	542	108.40	2017.0
6	澳大利亚	5	15.15	326	65.20	2018.2
7	韩国	3	9.09	302	100.67	2018.7
8	德国	3	9.09	178	59.33	2018.0
9	奥地利	3	9.09	177	59.00	2018.3
10	瑞典	2	6.06	187	93.50	2018.5

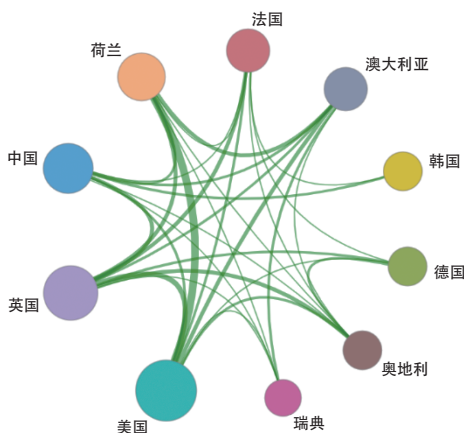


图 1.2.7 “人工智能场景下的大数据治理方法研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10 “人工智能场景下的大数据治理方法研究”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	篇均被引频次	平均出版年
1	浙江大学	3	9.09	288	96.00	2019.0
2	帝国理工学院	3	9.09	258	86.00	2018.7
3	伦敦卫生与热带医学院	3	9.09	210	70.00	2017.0
4	阿姆斯特丹自由大学	3	9.09	164	54.67	2018.7
5	牛津大学	2	6.06	136	68.00	2017.5
6	伦敦大学学院	2	6.06	131	65.50	2018.0
7	密歇根大学	2	6.06	116	58.00	2019.0
8	加利福尼亚大学旧金山分校	2	6.06	111	55.50	2017.5
9	北卡罗来纳大学	2	6.06	111	55.50	2017.5
10	郑州大学	2	6.06	110	55.00	2019.0

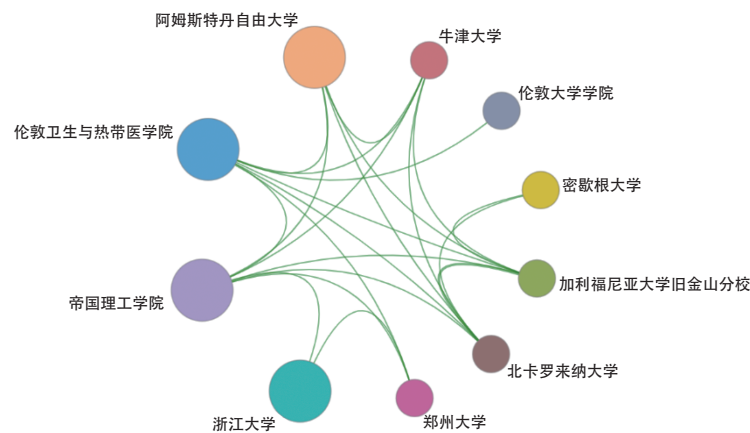


图 1.2.8 “人工智能场景下的大数据治理方法研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “人工智能场景下的大数据治理方法研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	美国	686	22.96	2020.1
2	中国	595	19.91	2020.4
3	英国	361	12.08	2020.0
4	意大利	237	7.93	2020.0
5	澳大利亚	219	7.33	2020.3
6	德国	174	5.82	2020.0
7	印度	171	5.72	2020.4
8	加拿大	163	5.46	2020.2
9	法国	141	4.72	2019.7
10	西班牙	124	4.15	2020.0

表 1.2.12 “人工智能场景下的大数据治理方法研究”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	中国科学院	49	11.32	2020.4
2	哈佛大学	47	10.85	2019.9
3	墨尔本大学	45	10.39	2020.1
4	伦敦大学学院	44	10.16	2019.8
5	悉尼大学	44	10.16	2020.1
6	索邦大学	39	9.01	2019.3
7	帝国理工学院	39	9.01	2020.1
8	华中科技大学	36	8.31	2019.9
9	约翰斯·霍普金斯大学	31	7.16	2019.6
10	牛津大学	30	6.93	2019.4

1.2.9 为“人工智能场景下的大数据治理方法研究”工程研究前沿的发展路线。

1.2.4 数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究

数字孪生是以多维模型和融合数据为驱动来实现监控、仿真、预测、优化等服务和应用需求，其中数字孪生模型构建是实现数字孪生实践和落地应用的前提。数字孪生模型可以通过接收来自物理对象的数据而实时演化，从而与物理对象在全生命周期保持一致。基于数字孪生模型可进行分析、预测、诊断、训练等，并将仿真结果反馈给物理对象，从而帮助对物理对象进行优化和决策。模型是数字孪生的核心基础，但建模技术自 20 世纪 50 年代就已出现，经过几十年的发展已形成了模型工程、数据驱动建模、高性能建模、复杂系统建模等 10 多种新建模式、技术与业态。数字孪生的出现进一步促进了建模技术的发展。数字孪生建模的目的就是消除各种物理实体特别是复杂系统的不确定性。

数字孪生模型构建是在数字空间实现物理实体及过程的属性、方法、行为等特性的数字化建模。模型构建可以是“几何—物理—行为—规则”多维度的，也可以是“机械—电气—液压”多领域的。复杂实体的建模往往是跨领域、跨类型、跨尺度的，涉及多个维度，通过单一维度的建模效果欠佳，还

需从多层次、多粒度上通过模型组装和融合实现更复杂对象模型的构建，以实现复杂物理对象各领域特征的全面刻画。为保证数字孪生模型的正确有效，需对构建以及组装或融合后的模型进行验证来检验模型描述以及刻画物理对象的状态或特征是否正确。若模型验证结果不满足需求，则需通过模型校正使模型更加逼近物理对象的实际运行或使用状态，保证模型的精确度。因此，围绕数字孪生模型“建—组—融—验—校—管”六个阶段，主要研究方向为多维度 / 多领域数字孪生模型精准构建、全要素 / 多尺度孪生数字模型组装与融合，数字孪生模型虚实一致性验证与校正，数字孪生模型交互迭代与动态演化等。

构建数字孪生模型不是目的，而是手段，是通过数字孪生模型的分析，来改善其对应的现实对象的性能和运行效率。未来的重要发展方向包括复杂实体的多维深度融合建模、建模效率和精度的不断提升、模型的互操作和交互演化、模型和物理实体的互迭代与动态演进、统一的模型语义和语法等。数字孪生正处于发展的上升期，技术体系不断完善，产业融合持续提速，行业应用加速渗透。应用场景包括航空航天、智能制造、健康医疗、智慧城市、能源电力、综合交通等各个领域。

“数字孪生模型精准构建与演化理论方法研

究”工程研究前沿中核心论文数排名前三的国家分别是中国、美国和德国（表 1.2.13），核心论文的主要产出机构为广东工业大学、北京航空航天大学

和奥克兰大学等（表 1.2.14）。从主要国家间的合作网络（图 1.2.10）来看，中国和其他国家间的合作非常密切，从主要机构间的合作网络（图 1.2.11）

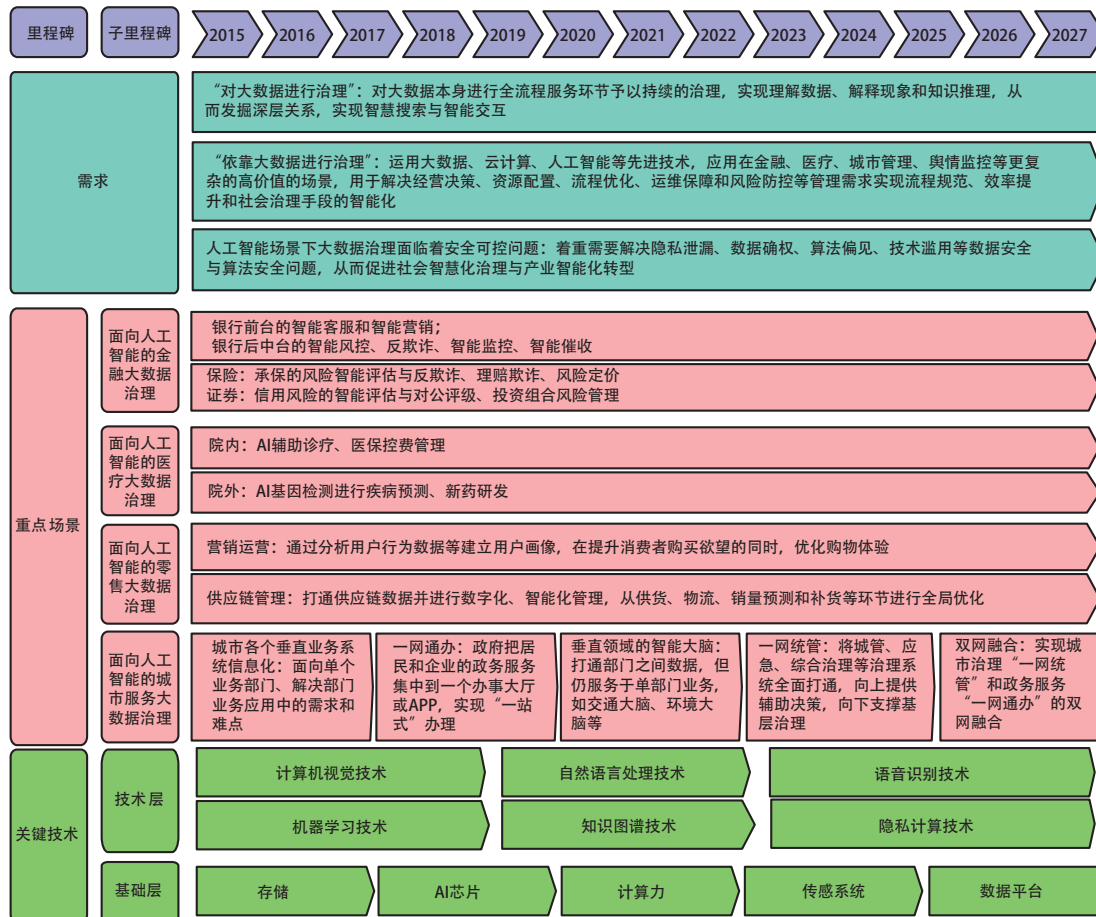


图 1.2.9 “人工智能场景下的大数据治理方法研究”工程研究前沿的发展路线

表 1.2.13 “数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例/%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	72	36.18	6 501	90.29	2019.8
2	美国	33	16.58	2 526	76.55	2019.0
3	德国	25	12.56	3 209	128.36	2018.1
4	英国	19	9.55	1 699	89.42	2019.0
5	瑞典	13	6.53	980	75.38	2019.4
6	新加坡	10	5.03	1 359	135.90	2020.0
7	澳大利亚	10	5.03	1 262	126.20	2019.9
8	意大利	9	4.52	448	49.78	2018.9
9	法国	8	4.02	1 178	147.25	2019.5
10	韩国	8	4.02	358	44.75	2018.9

表 1.2.14 “数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”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	篇均被引频次	平均出版年
1	广东工业大学	10	5.03	1 041	104.10	2019.5
2	北京航空航天大学	9	4.52	2 094	232.67	2019.4
3	奥克兰大学	7	3.52	743	106.14	2019.7
4	新加坡国立大学	6	3.02	1 077	179.50	2020.2
5	香港城市大学	6	3.02	475	79.17	2020.0
6	柏林经济与法律学院	5	2.51	1 097	219.40	2020.2
7	香港理工大学	5	2.51	363	72.60	2019.6
8	帕特拉斯大学	5	2.51	270	54.00	2019.2
9	香港大学	5	2.51	230	46.00	2020.4
10	密歇根大学	5	2.51	221	44.20	2020.2

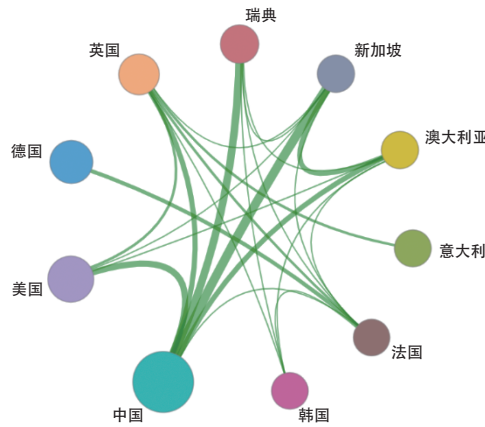


图 1.2.10 “数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

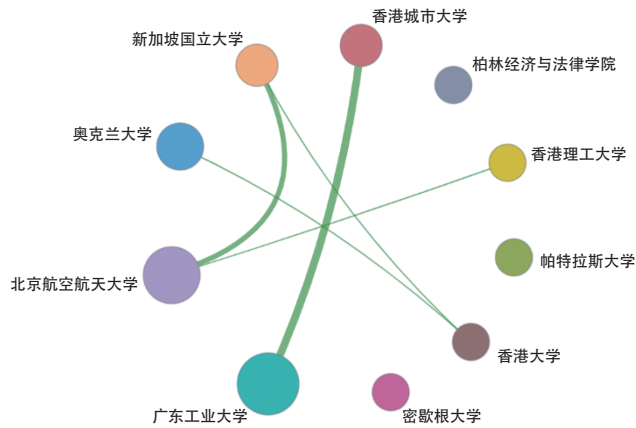


图 1.2.11 “数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

来看，广东工业大学与香港城市大学、新加坡国立大学与北京航空航天大学之间的合作较为密切。由表 1.2.15 可以看出，中国的施引核心论文数排名第一。由表 1.2.16 可以看出，施引核心论文数

排名靠前的机构是美国西北理工大学、北京航空航天大学上海交通大学。图 1.2.12 为“数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”工程研究前沿的发展路线。

表 1.2.15 “数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	2 720	32.12	2020.5
2	美国	1 281	15.13	2020.3
3	德国	900	10.63	2020.2
4	英国	811	9.58	2020.4
5	意大利	550	6.50	2020.4
6	印度	481	5.68	2020.4
7	法国	411	4.85	2020.3
8	澳大利亚	384	4.53	2020.4
9	西班牙	336	3.97	2020.3
10	韩国	307	3.63	2020.4

表 1.2.16 “数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”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	美国西北理工大学	115	11.09	2020.3
2	北京航空航天大学	113	10.90	2020.1
3	上海交通大学	111	10.70	2020.5
4	中国科学院	104	10.03	2020.5
5	香港理工大学	97	9.35	2020.4
6	米兰理工大学	95	9.16	2020.3
7	清华大学	87	8.39	2020.4
8	香港大学	87	8.39	2020.4
9	华中科技大学	80	7.71	2020.6
10	亚琛工业大学	76	7.33	2020.4

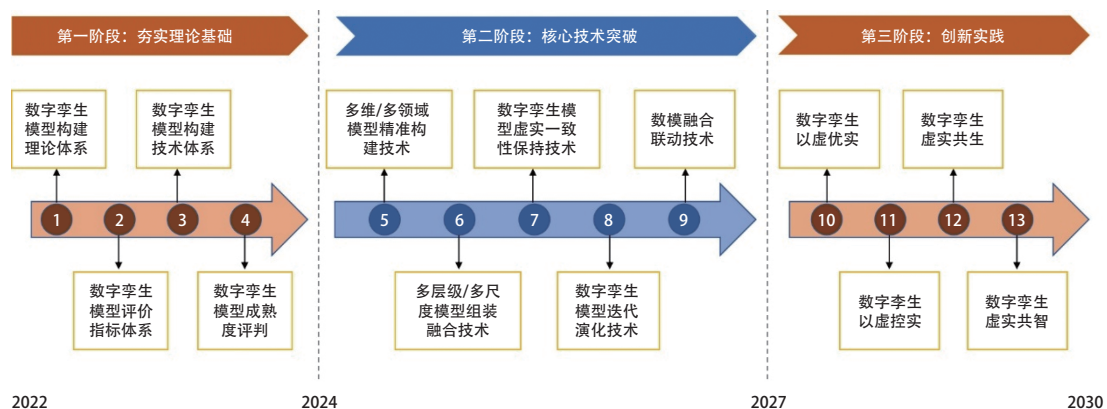


图 1.2.12 “数字孪生模型精准构建与演化理论方法研究”工程研究前沿的发展路线

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

在工程管理领域中，本年度 10 个全球工程开发前沿分别是基于知识图谱的产品与服务推荐系统、“出行即服务”自主式交通系统构建、高威胁环境下网络安全态势感知技术、自进化学习人机共驾系统开发、重大传染性疾病预防网管控系统、健康建筑环境人-信息-物理系统研发、基于数字孪生的工厂预警系统、基于云平台的工业互联网生产管理系统、沉浸式建筑环境建模与智能评审系统、面向特定应用的智能合约与自动生成方法。其核心专利情况见表 2.1.1 和表 2.1.2。这 10 个工程开发前沿包含了医学、建筑、交通、计算机等众多学科。其中基于知识图谱的产品与服务推荐系统、“出行即服务”自主式交通系统构建、高威胁环境下网络安全态势感知技术、自进化学习人机共驾系统开发为重点解读前沿，后文会对其目前发展态势以及未来趋势进行详细解读。

(1) 基于知识图谱的产品与服务推荐系统

知识图谱可以对复杂的语义关联进行准确的组织和表示。基于知识图谱的产品与服务推荐系统是

指利用知识图谱建立用户、产品与服务之间的复杂知识关联，理解用户的个性化偏好和需求，帮助用户筛选出感兴趣的产品和服务的智能系统。收集多源异构数据，抽取和融合用户、产品和服务的知识及其关联，构建知识图谱；通过对知识图谱的分析，准确地为用户推荐个性化的产品与服务，提高推荐的准确率和可解释性。基于知识图谱的产品与服务推荐系统存在数据多源异质、价值密度稀疏、用户安全隐私保护难、应用场景复杂等问题，使得系统开发面临诸多挑战。因此，多源数据获取与集成、数据迁移与交互的跨领域推荐、文本信息理解与处理、知识图谱智能数据分析、动态推荐技术、多任务学习模型开发、以智能设备为媒介的用户信息获取与处理，以及用户隐私安全与保护等方面的创新与优化，是未来开发的重要方向。

(2) “出行即服务”自主式交通系统构建

近年来，随着全球城市化的加速推进，出行服务逐渐呈现出去中心化、精细化、轻量化、异质化等显著特点。“出行即服务”（mobility as a service, MaaS）是以用户为中心的智能化出行管理和分配系统，将多种出行服务一体化，通过数据界面提供给终端用户，使用户无缝规划出行并进行支付。自主式交通系统（autonomous transportation

表 2.1.1 工程管理领域 Top 10 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	基于知识图谱的产品与服务推荐系统	56	239	4.27	2020.3
2	“出行即服务”自主式交通系统构建	40	527	13.18	2019.7
3	高威胁环境下网络安全态势感知技术	158	2 162	13.68	2019.2
4	自进化学习人机共驾系统开发	68	434	6.38	2019.8
5	重大传染性疾病预防网管控系统	39	176	4.51	2018.9
6	健康建筑环境人-信息-物理系统研发	37	191	5.16	2019.0
7	基于数字孪生的工厂预警系统	120	302	2.52	2019.6
8	基于云平台的工业互联网生产管理系统	134	1 332	9.94	2020.0
9	沉浸式建筑环境建模与智能评审系统	139	1 672	12.03	2019.0
10	面向特定应用的智能合约与自动生成方法	119	892	7.50	2019.8

表 2.1.2 工程管理领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	基于知识图谱的产品与服务推荐系统	1	1	1	5	20	28
2	“出行即服务”自主式交通系统构建	2	4	3	4	11	16
3	高威胁环境下网络安全态势感知技术	8	11	28	37	40	34
4	自进化学学习人机共驾系统开发	0	0	6	16	33	13
5	重大传染性疾病预防网管控系统	5	5	7	5	7	10
6	健康建筑环境人-信息-物理系统研发	1	5	11	6	5	9
7	基于数字孪生的工厂预警系统	2	7	16	23	41	31
8	基于云平台的工业互联网生产管理系统	3	6	11	22	26	66
9	沉浸式建筑环境建模与智能评审系统	7	21	25	30	26	30
10	面向特定应用的智能合约与自动生成方法	0	1	9	30	51	28

system, ATS) 基于自主感知、学习、决策、响应的业务逻辑, 通过自组织运行与自主化服务完成交通运输, 实现安全、高效、便捷、绿色和经济等目标。与现有交通系统相比, “出行即服务”自主式交通系统具有一站式出行、预约式出行、自主化决策、自主式服务、即时需求响应、供需动态匹配等功能, 通过信息服务平台融合多种交通方式, 鼓励绿色、低碳、慢行出行模式, 快速、精准匹配出行需求和交通供给, 减少了交通系统的人为被动干预, 提高了交通系统的自主能力, 缓解了传统交通系统分散出行需求与集约交通供给的矛盾、灵活出行需求与计划交通服务的矛盾, 提升了用户的智能出行体验效果, 对于实现交通出行智慧化转型具有重要意义。基于 MaaS 自主式交通系统构建技术出现了两大研究热点: 在个体出行的多维决策变量环境中, 基于异质性用户画像, 优化设计面向需求端的“千人千面”个性化出行方案; 在移动互联网环境下, 基于用户预约出行信息、实时交通网络态势研判、车辆供给状态等多源交通信息, 依托实时动态仿真技术以及数学优化算法, 自主构建预约出行动态供需匹配与协同系统。

(3) 高威胁环境下网络安全态势感知技术

在全球网络空间博弈日益激烈、现实冲突与网络冲突相互交织的背景下, 网络安全面临由黑客

群体到国家级高级持续性威胁 (advanced persistent threat, APT) 组织等多层级攻击行为体共存的高威胁环境。网络安全态势感知是一种动态洞悉安全风险的能力, 通过持续监测网络系统状态及安全事件, 结合威胁情报以及国际关系与地缘政治等信息, 理解威胁攻击意图并评估影响范围, 对后续行动和影响做出预测预警, 以辅助决策和行动。网络安全态势感知主要包括安全数据采集、安全数据处理、安全数据分析、可视化技术等。安全数据采集是获取与安全紧密关联的海量基础数据, 包括流量、日志、漏洞、样本等; 安全数据处理是对采集的海量安全数据进行清洗、分类、标准化等操作; 安全数据分析利用数据挖掘、智能分析等技术提取网络威胁特征和指标, 综合评估网络安全风险; 可视化技术则是将安全风险直观展示出来。传统网络安全态势感知受数据源、处理能力、部署环境等因素限制, 对态势的感知与预测能力不足。高威胁环境下网络安全态势感知依托数据采集获取、海量数据存算平台、智能态势评估预测等建立系统架构, 在技术方法上采用主动发现与被动采集结合、静态分析与动态分析结合、分布部署与集中处理结合等方式, 兼顾宏观与中观层面, 将实时监测数据采集与情报、经验和知识积累相结合, 以实现自动化、智能化的行动响应和策略调整。

（4）自进化学习人机共驾系统开发

狭义而言，人机共驾是指驾驶员和智能驾驶系统均具有部分或全部的车辆控制权，通过恰当的协调机制共同决定车辆的运动。广义而言，人机共驾指纯人类驾驶车辆、狭义上的人机共驾的车辆和纯智能系统驾驶的车辆共同行驶在道路上。

新一代人工智能、车用无线通信和车路协同等技术的飞速发展将加速人机共驾的实现落地，有望减轻驾驶员的生理和心理负担。传统的驾驶辅助系统仅仅考虑帮助驾驶员简化实施特定控制动作，即控制增强。而从研究者提出先进驾驶辅助系统（advanced driver assistant systems, ADAS）开始，智能汽车开始向替代感知增强、辅助决策、特定功能乃至完全替代人类驾驶等方面发展。与纯无人驾驶不同，人机共驾的主要目标是在现有人类驾驶不可或缺的情况下，整合驾驶员和机器的优势，实现人机智能的混合增强，达到“1+1>2”的驾驶效果。

由于很多驾驶人希望保留全时段或者部分时段完全自动驾驶的意愿，且当前人工智能的发展水平尚难以实现在复杂交通环境下的完全无人驾驶，相关法律与法规也还在进一步发展完善中，狭义和广义的人机共驾将在未来一段时间成为地面私家车、出租车、物流卡车等车辆的主要运行模式。因此，相关研究具有重要的科学价值和应用前景。

（5）重大传染性疾病的医联网管控系统

重大传染性疾病的医联网管控系统是指分布在不同医疗健康机构或社区、家庭等空间中，利用重大传染性疾病“防—控—治”相关的人、财、物、信息等要素，针对突发的重大传染性疾病展开精准化风险评估与监测预警、协同化物资调配和防控治协同优化的智慧疫情管理系统。

相关学者依托云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术，将医联网这一全新的学术概念融入重大传染性疾病管控系统，面向重大传染性疾病防控逐步形成了疫情管控的多主体数据治理、跨区域救治协同和全过程防控监管等一系列技术方向，推

动重大传染性疾病管控模式的变革。例如，2020年新冠肺炎疫情暴发初期，合肥工业大学联合相关企业共同搭建武汉市疫情防控大数据治理平台，快速完成了火神山、雷神山等70家医院以及公安、民政的数据解析接入工作，显著提升了疫情的管控效率。

随着重大传染性疾病的医联网管控系统的持续演进，未来将逐步构筑“高覆盖、高敏捷、高协同”的医疗服务体系，并在智慧精准的非接触式监测技术和上下联动的传染性疾病防控机制方面不断提升管控系统的防控能力，促进医疗服务体系从“人适应系统”向“系统服务人”转变，打破各级医院的信息壁垒，有效实现各级医疗健康资源的调动与共享，形成“基层哨点预警，监测数据驱动，全域联防联控”的重大传染性疾病医联网常态化管控。

（6）健康建筑环境人—信息—物理系统研发

建筑是为满足居住者的安全和健康以及生活生产过程的需要而创建的微环境。随着科学技术的发展和进步，人们开始依赖设备主动地改造可以受控的建筑环境。目前人们所说的建筑环境主要指室内物理环境，即通过人体感觉器官对人的生理发生作用和影响的物理因素，内容包括室内热湿环境、空气质量、气流环境、光环境、声环境等。人与室内物理环境发生作用和影响，主要依靠的是信息技术。信息技术的主体是感测技术、通信技术、计算机技术和控制技术。其中，感测技术获取信息，赋予建筑感官器官的功能；通信技术传递信息，赋予建筑神经系统的功能；计算机技术处理信息，赋予建筑思维器官的功能；控制技术使用信息，赋予建筑效应器官的功能。因此，健康建筑人—信息—物理系统就是以健康为目标，以智能化技术为手段，具有感知、推理、判断和决策综合智慧能力，并能实现人与室内物理环境相互协调的建筑智能化系统，其理论支撑包括建筑环境理论、控制理论、信息理论、系统理论等。计算机网络技术的不断更新发展，促进健康建筑人—信息—物理系统技术向控制网络与

信息网络集成技术发展,以实现智能化的系统监控、信息共享和集约管理,基于物联网技术的智能电网也正对建筑人-信息-物理系统的应用和发展产生深刻影响。

(7) 基于数字孪生的工厂预警系统

工厂危险包括设备和声、光、火、电、毒等对人与环境造成损害的可能,也包括人给物料、设备和生产带来损害的可能。与传统依赖现场人员感受和经验的方法不同,基于数字孪生的工厂危险预警系统通过物理实体、虚拟实体、预警服务、孪生数据和连接的五维模型,可远程、准确、快速地实现工厂危险预警。当前主要的研究包括但不限于:①基于数字孪生的车间设备远程诊断;②模块化的工厂数字孪生低代码平台快速构建;③基于建筑信息模型(built information model, BIM)技术的工厂建筑环境健康监测与管理;④工厂环境不确定对象智能识别与预警;⑤多元孕灾数字孪生感知辨识与预警;⑥数据驱动的关重件寿命预测与健康管埋;⑦基于数字孪生的疏散方案设计与演练;⑧工厂运维监控与仿真云平台;⑨人-机交互安全预警与控制;⑩工厂物流仿真与动态实时调度。随着全球化智能工厂的建设,基于数字孪生的工厂危险预警系统需求激增,基于数字孪生技术更全面反映危险,更快速、准确预测危险,更科学设计危险预案,是必然的发展趋势。要达到这一目的,迫切需要吸纳传感技术、感知技术、通信技术、人工智能技术、仿真技术、大数据技术等领域的成果,在增强对各类工业生产规律认知的基础上,为智能工厂危险预警提供支撑。

(8) 基于云平台的工业互联网生产管理系统

工业互联网是全球工业系统与高级计算、分析、感应技术以及互联网连接融合。工业互联网的本质是通过开放的、全球化的工业级网络平台把设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密地连接和融合起来,高效共享工业经济中的各种要素资源。云平台是基于云计算信息技术实现制造资源的高度

共享平台,将巨大的制造资源通过工业互联网连接在一起,实现制造资源与服务的开放协作、社会资源高度共享。生产管理系统是包括生产计划、组织、协调、控制的综合管理。通过合理组织生产过程,有效利用生产资源,经济合理地进行生产活动,以达到预期的生产目标。

当前生产管理系统大多基于专家知识和启发式规则针对封闭静态领域管理,难以适应复杂多变的个性化制造任务,缺少对制造资源大数据潜在知识的有效运用。以云计算、大数据、人工智能为代表的新一代信息技术与制造业深度融合,工业互联网借助底层各类工业系统互联与上层云制造平台,推动制造系统从封闭走向开放互联,实现全产业链制造资源开放共享与全流程生产管理。为高端装备制造等需要高度协同的生产管理提供支撑技术。生产管理系统作为工业互联网云平台的核心,是实现工业互联网开放环境下大规模分布式制造资源智能化配置、企业降本增效的核心支撑引擎,提高对动态变化的适应能力、对复杂约束条件的可扩展能力,从数据与人工智能双轮驱动的新技术角度全面有效地解决现代制造调度所面对的高实时性、高复杂性、高动态性等核心问题。

发展趋势是基于制造大数据和人工智能驱动的高效、可迁移、自适应生产管理系统的研究,包括边云协同分布式人工智能处理框架(以实现兼顾制造云端与边缘侧异构制造资源的智能动态协同调度、合作组织之间应用的无缝集成)、共享业务数据和联合进行管理(以实现跨组织业务流程协同,使整个跨组织工作实现高效率、低成本、高质量),以及基于深度强化学习的多元化需求建模方法与融合企业内部调度模型、生产要素数据、人工排产经验的人机协同生产管理技术。

(9) 沉浸式建筑环境建模与智能评审系统

“沉浸式”是指基于虚拟现实(virtual reality, VR)技术,使用户的视觉等感官通道沉浸在计算机生成的内容之中并可与之互动,从而产生

具有置身虚拟世界的感官体验。相较于二维图纸或计算机的呈现效果，VR能够在设计付诸实施前就使项目各利益相关方以真实空间尺度体验和评价建筑设计方案，从而能更好地满足用户对建筑的功能、审美与舒适要求，促进设计管理水平的提升。

沉浸式的建筑评审需要解决建模、交互和知识提取三个层面的技术问题。首先，需完成建筑及环境三维模型的快速构建，并实现主流建模软件与虚拟现实相关软件的数据互通。其次，需解决沉浸式环境下的人与虚拟建筑环境的自然交互问题，通过各种外部交互设备，实现第一人称视角下对建筑及构件的尺寸、布局、材质等属性的观察，并能同建筑模型以及其他用户进行基于动作、语音等信号的自然互动。最后，在沉浸式体验过程中，用户与建筑、环境及其他用户的交互过程会产生大量数据，对这些交互数据进行储存、整合、表达和重用并形成设计知识，将为研究智能评审算法和系统提供支持。

随着虚拟现实技术的不断发展，未来VR设备的便携性、舒适性、流畅性将得到进一步改善，沉浸式设计体验系统也会更加普及，形成对现有工程设计工作方式的有力补充。VR技术提供的沉浸式工作空间，也将使分布式多方协同设计更为便利。

（10）面向特定应用的智能合约与自动生成方法

智能合约是运行在区块链平台上的一段由事件驱动、具有状态的程序，可以保存并处理区块链账本上的数据资产，被广泛应用于工程管理、医疗、金融等领域。区块链上的智能合约具有去中心化、去信任、可编程、不可篡改等特性，可实现高效的信息交换、价值转移和资产管理。在技术上，不同区块链平台上智能合约使用的编程语言也不尽相同。例如，比特币使用特定的比特币脚本开发，以太坊使用Solidity语言开发，超级账本可以使用多种编程语言开发智能合约。智能合约的自动生成能够在很大程度上降低编写智能合约代码的难度，提升其友好性。但是，智能合约的开发语言众多且不

同领域的智能合约应用设计区别较大，导致智能合约自动生成的难度较大，不利于大型工程项目中的标准化设计和多个区块链平台协同使用。针对智能合约的自动生成，可以根据领域特征对智能合约进行分类，针对不同合约分类的数据进行大数据和人工智能分析，同时根据分析结果选取特定的编程语言生成统一的、针对领域的智能合约模板。在应用领域，智能合约被广泛应用于工程管理、医疗、金融等各个领域，可以针对特定应用场景开发具有特定功能的智能合约。例如，相对于传统金融领域，智能合约能够实现较低的法律开销和交易开销，同时降低用户使用门槛；而在大型工程建设应用领域，工程开发者能够利用智能合约解决工程监管中事故追责以及反腐败等问题。在未来的发展中，智能合约主要面临隐私监管和性能两大方面的问题。智能合约处理的数据通常是完全公开透明的，任何人都可由公开查询获取账户余额、交易信息和合约内容等，这些公开的操作和数据在特定应用场景中可能导致用户数据的泄露以及攻击者对区块链或智能合约的去匿名攻击。此外，在性能方面，目前绝大多数区块链在基础架构上的吞吐量较低，但是可以根据特定的应用场景优化智能合约的设计，从而降低合约执行成本，提高系统效率。

2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读

2.2.1 基于知识图谱的产品与服务推荐系统

基于知识图谱的产品与服务推荐系统是知识驱动的推荐平台，通过深度挖掘数据价值，使产品与服务推荐更加智能化、精准化、个性化且具备可解释性。从专利分析来看，目前的主要研究领域集中以下方面。

（1）基于知识图谱的智能问答与数据分析技术

基于知识图谱的智能问答技术通过自然交互得到用户需求，检索知识图谱存储的事实，得到问题答案。基于知识图谱的数据分析技术将数据孤岛串

联起来, 提供一个完整的数据分析视图, 获取数据洞察力、改善决策制定、提高推荐质量。现有技术包括数据库储存、数据挖掘、异构数据处理等。因此, 海量知识图谱储存、多源异构数据采集与处理分析技术的开发成为重点。

(2) 基于知识图谱的产品与服务智能推荐技术

基于知识图谱的产品与服务智能推荐通过对知识图谱中海量的知识关联进行分析, 发现用户与产品、服务之间的潜在关联, 为用户提供高质量的推荐。开发的热点涵盖了大数据、云计算、机器学习、深度学习等关键技术。

(3) 不同业务场景的产品与服务推荐系统开发

系统开发主要分布在智能医疗、电子商务、智慧生活等领域。智能医疗领域的开发虽涵盖医疗信息提供、医疗物资分配、疾病预测与医疗辅助等方面, 但用户隐私安全保护技术开发较少。电子商务领域在智能客服、推荐系统方面已经较为完备, 但受静态推荐、用户复杂环境影响等问题制约; 媒介

设备的语音、视频、图像、情感信息采集与处理技术、知识图谱动态更新技术开发应予以重视。智慧生活领域涉及家居物品推荐等方面技术开发, 多与智能机器人、电子设备相辅相成。如何通过媒介设备采集信息, 分析用户需求, 精准推荐产品与服务, 以及终端服务器开发等成为开发重点。

从核心专利的数量来看, 专利公开量最多的国家为中国, 平均被引数最高的国家是美国(表 2.2.1)。专利公开量排名前三位的机构分别为中国平安财产保险股份有限公司、腾讯科技(深圳)有限公司和北京大学(表 2.2.2)。各国家、机构之间均无合作关系。

中国侧重于知识图谱、大数据与医疗融合发展的智慧医疗, 如医疗健康服务推荐方法、系统、电子设备及存储介质研发, 基于医学知识图谱的临床检验结果分析方法及系统等。韩国注重智能家居和智慧旅游产品与服务推荐系统, 如装修、电视、宠物、社交、饮食健康智能管家等产品与

表 2.2.1 “基于知识图谱的产品与服务推荐系统” 工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	52	92.86	75	31.38	1.44
2	韩国	3	5.36	2	0.84	0.67
3	美国	1	1.79	162	67.78	162.00

表 2.2.2 “基于知识图谱的产品与服务推荐系统” 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	中国平安财产保险股份有限公司	4	7.14	3	1.26	0.75
2	腾讯科技(深圳)有限公司	4	7.14	3	1.26	0.75
3	北京大学	3	5.36	1	0.42	0.33
4	珠海格力电器股份有限公司	2	3.57	0	0.00	0.00
5	美国 Viasat 公司	1	1.79	162	67.78	162.00
6	桂林电子科技大学	1	1.79	13	5.44	13.00
7	陕西师范大学	1	1.79	13	5.44	13.00
8	南京硅基智能科技有限公司	1	1.79	8	3.35	8.00
9	山东舜网传媒股份有限公司	1	1.79	6	2.51	6.00
10	阿里巴巴集团	1	1.79	5	2.09	5.00

服务系统，交通、住宿、景区等各方面个性化推荐与服务等。美国比较关注有关智能设备和电子商务的应用，如用于将第三方服务与数字助理集成的系统和方法、计算设备的自动化辅助系统、电子购物推荐的精准营销等。

图 2.2.1 为“基于知识图谱的产品与服务推荐系统”工程开发前沿的发展路线。

2.2.2 “出行即服务”自主式交通系统构建

“出行即服务”自主式交通系统构建技术旨在满足人们对于出行的智能化、舒适性、个性化、立体化等要求，以提供多模式、全链条、预约出行服务为特征，通过联程票务优惠套餐服务等经济激励手段，引导个体集约化出行，调控多模式出行需求并优化服务供给，实现城市交通可持续。在管理侧，针对多方式、多目标的组合出行优化，建立快速优化决策模型；在供给侧，研究出行资源时空优化配置；在用户端，提高信息实时性及个性化程度，满足个性化出行需求。下面从 MaaS 多方式供给资源协同优化、个性化与一体化的智慧出行服务、自主式交通系统多分辨率仿真三个角度进行更加深入的分析。

(1) MaaS 多方式供给资源协同优化

MaaS 的重要特征是以高效运营的公共交通为骨架，将各种交通方式和服务体系进行整合，与传统交通网络不同，多层复合网络可以实现物理层（道路网、轨道网等）和方式层（小汽车、公共汽车、地铁）分离。跨交通方式供给资源协同优化是基于方式链综合出行成本测算来解析方式转移机理、估计转移矩阵，融合复合网络重构交通流分配模型，并以网络交通流时空分布为基础优化供给资源配置。近年来，随着共享出行的日益普及，研究理念由静态单一交通方式时空资源配置向基于预约和实时响应的共享资源配置转变。

(2) 个性化与一体化的智慧出行服务

基于交通网络实时感知信息，精准把控出行需

求与多模式交通供给的匹配关系，实现动态供需匹配优化算法在线迭代与更新。分析供需匹配优化方案对各出行方式自身的出行时长、等待时长、换乘次数、载具拥挤度等影响，对其他相关出行方式的影响，以及对路况的影响。建立出行者出行方式选择预测模型，开发基于大数据的城市多模式交通动态需求预测技术，推演全体客流出行分布，并基于此评估各出行方式的运营服务水平与全局优化效果，实现移动互联网环境下基于实时交通信息的个性化、一体化智慧出行服务。

(3) 自主式交通系统多分辨率仿真

当前正以数字孪生城市为导向推进智慧城市建设，从多源数据接入层到计算仿真层，再到决策应用层，为自主式交通系统提供具有高保真度的多分辨率数字孪生平台。基于对静态、动态数据的全息感知，实现基于孪生数据的情景再现，对孪生场景进行衍生和泛化，加速实现共享自动驾驶技术，助力自主式交通系统构建。利用以数字孪生技术为驱动的宏观、中观、微观多分辨率仿真系统，并借助高效率仿真优化技术，优化设计一站式与预约式服务的运力组织运营方案。

“‘出行即服务’自主式交通系统构建”工程开发前沿中的专利公开量排名前三位的国家分别是美国、韩国和日本，其次是部分亚洲国家和欧洲国家，专利平均被引数排名前三位的国家分别是中国、塞浦路斯和德国（表 2.2.3）。其中，日本和英国之间的合作关系较多（图 2.2.2）。专利的主要产出机构为 Mobileye 视觉科技有限公司、索尼集团、丰田汽车公司、LG 电子公司等（表 2.2.4），各个机构间并没有建立相关合作。

展望未来，新型移动互联环境下的 MaaS 自主式交通系统构建将出现重大技术变革，特别是随着移动传感器、通信网络、人工智能、大数据分析、云计算、深度学习、强化学习等技术的快速发展，交通出行动态信息精准获取与智能分析能力得到极大提高，基于这些新兴技术的 MaaS

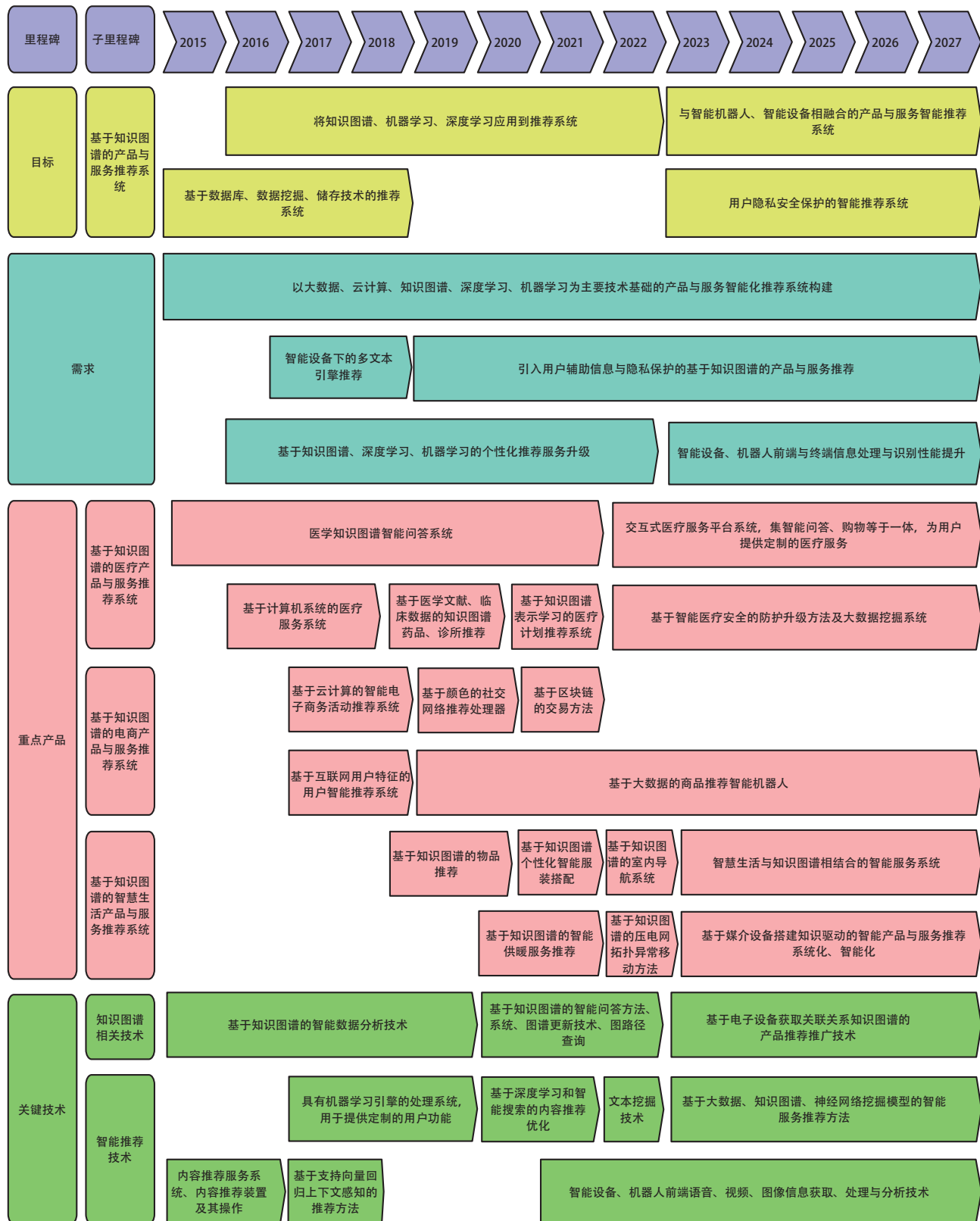


图 2.2.1 “基于知识图谱的产品与服务推荐系统”工程开发前沿的发展路线

表 2.2.3 “‘出行即服务’自主式交通系统构建”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	20	50.00	75	14.23	3.75
2	韩国	6	15.00	3	0.57	0.50
3	日本	5	12.50	1	0.19	0.20
4	德国	4	10.00	115	21.82	28.75
5	中国	3	7.50	301	57.12	100.33
6	塞浦路斯	1	2.50	32	6.07	32.00
7	英国	1	2.50	0	0.00	0.00
8	以色列	1	2.50	0	0.00	0.00

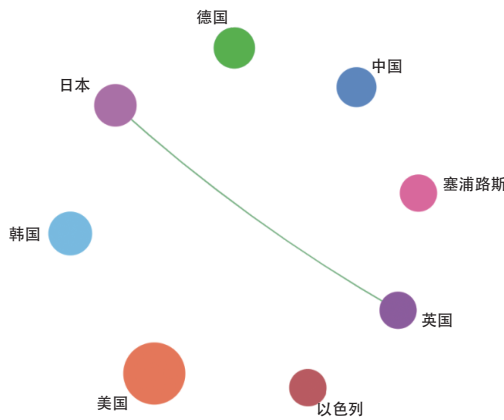


图 2.2.2 “‘出行即服务’自主式交通系统构建”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 2.2.4 “‘出行即服务’自主式交通系统构建”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	Mobileye 视觉科技有限公司	7	17.50	4	0.76	0.57
2	索尼集团	4	10.00	1	0.19	0.25
3	丰田汽车公司	4	10.00	0	0.00	0.00
4	LG 电子公司	3	7.50	2	0.38	0.67
5	滴滴出行科技公司	2	5.00	58	11.01	29.00
6	谷歌公司	2	5.00	43	8.16	21.50
7	施乐集团	2	5.00	14	2.66	7.00
8	优步出行科技公司	2	5.00	9	1.71	4.50
9	上海兆芯半导体有限公司	1	2.50	243	46.11	243.00
10	西门子集团	1	2.50	112	21.25	112.00

自主式交通系统数智监管、个性化出行需求管理以及平台在线决策优化将得以实现，有力推动面向未来城市交通的一站式智慧出行服务。研究大数据和人工智能双驱动的一站式出行与预约式交通出行优化方法，建立自适应感知的多任务动态学习方法和去中心化多智能体强化学习框架，提

出智慧出行服务平台高效匹配、优化调度、方式组合、动态定价等多种策略动态优化方法，搭建新兴技术个性化出行需求管理以及预约出行在线决策优化平台，形成面向未来自主式交通系统的MaaS技术体系。图 2.2.3 为“‘出行即服务’自主式交通系统构建”工程开发前沿的发展路线。

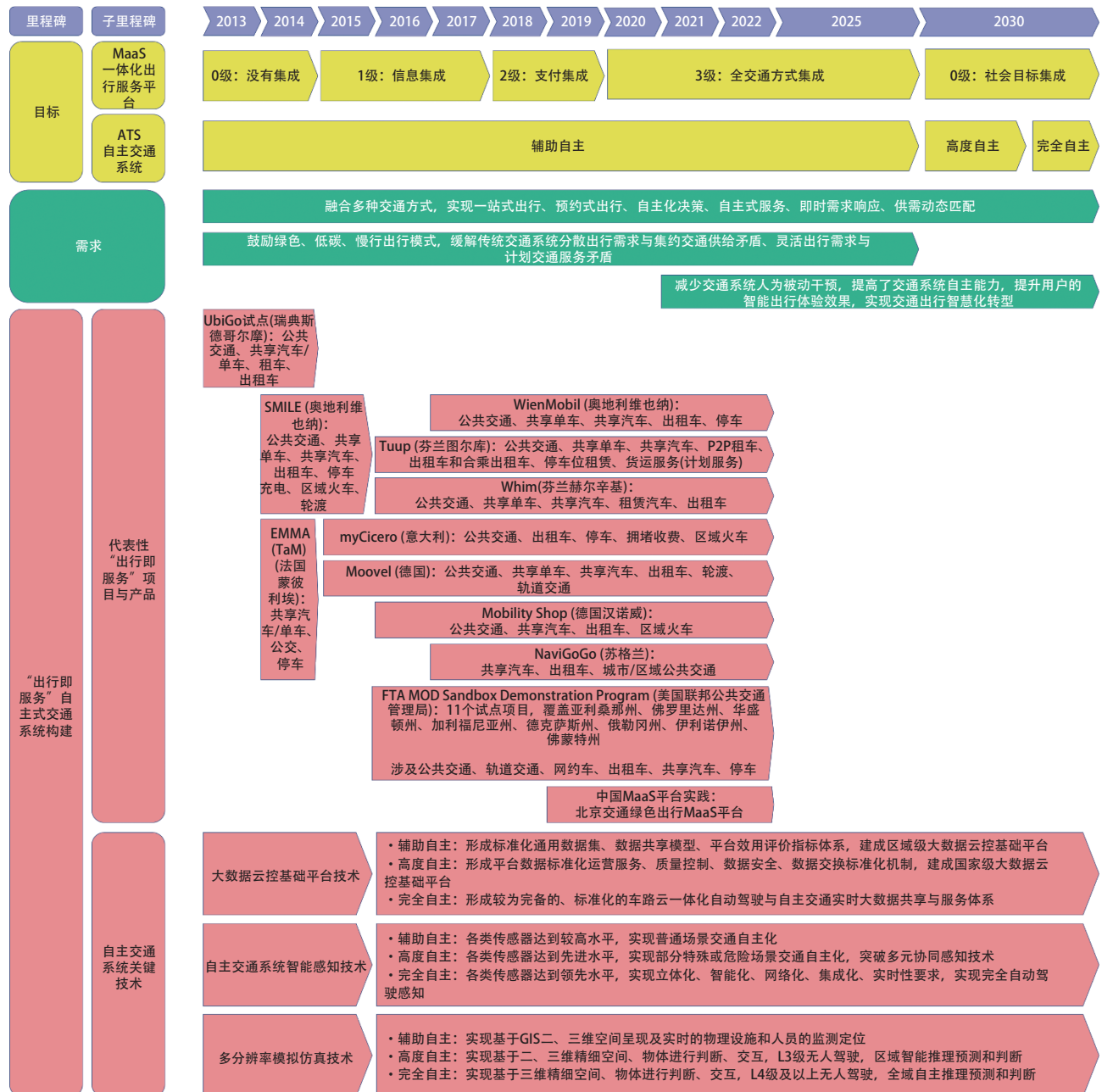


图 2.2.3 “‘出行即服务’自主式交通系统构建”工程开发前沿的发展路线

2.2.3 高威胁环境下网络安全态势感知技术

习近平总书记指出要“全天候全方位感知网络安全态势，增强网络安全防御能力和威慑能力”。网络安全态势感知对引发网络安全状态变化的要素进行获取、理解、展示并预测发展趋势，辅助决策和行动，是实现网络安全保障的重要条件。在多层次攻击行为体共存的高威胁环境中，感知威胁、防控风险面临诸多挑战，需进行前瞻技术探索和工程实践。

高威胁环境下网络安全态势感知聚焦于特定场景数据采集、威胁检测、综合评估、预测预警、智能响应等技术。比较成熟的有网络威胁分析/检测响应、终端检测响应、扩展威胁响应、安全编排与自动响应、基于技术战术过程的APT检测等解决方案；典型的数据采集包括深度流检测技术、深度包检测技术、蜜罐/蜜场/蜜网技术、互联网资产探测技术等；以大数据技术为基础进行海量安全信息和事件管理，以威胁情报为支撑，运用智能分析等技术实现综合评估与预警，形成威胁检测、安全分析与共享协作的态势感知能力。

从专利分析来看，网络安全态势感知涉及数据采集与处理、态势评估与预测、特定行业的网络安全态势感知等方面。

1) 数据采集与处理。接收网络和系统状态信息以及设备日志信息，经大数据平台进行预处理、

聚合、关联分析等，实现态势感知要素提取，为态势评估与预测提供数据基础。

2) 态势评估与预测。通过构建分析模型实现对安全态势的评估与预测，主要包括：基于神经网络的方法，如BP神经网络、RBF神经网络等；基于专家知识的方法，如知识图谱、博弈论等；基于模式识别的方法，如灰色关联法、粗糙集理论等。

3) 特定行业的网络安全态势感知。以电力行业为例，如电力通信网络、电力监控系统网络、电力物联网、电力无线专网和电力移动终端网络的安全态势感知与评估方法。

从专利公开量来看，排名靠前的国家为中国和美国（表2.2.5），中国主要涉及网络安全态势评估与预测模型，美国主要涉及态势感知系统架构与实现。各国之间没有进行过相关合作。专利公开量排名靠前的机构为国网电子商务有限公司和广西电网责任有限公司（表2.2.6）。从主要机构间的合作网络（图2.2.4）来看，中国的国网电子商务有限公司和北京邮电大学、华北电力大学联系较紧密。

展望未来，高威胁环境下网络安全态势感知平台在结构上涵盖数据采集获取、海量数据存算平台、智能态势评估预测等部分，在技术方法上将综合采用主动发现与被动采集结合、静态分析与动态分析结合、分布部署与集中处理结合等方式，探索人工

表 2.2.5 “高威胁环境下网络安全态势感知技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	130	82.28	738	34.14	5.68
2	美国	22	13.92	1 301	60.18	59.14
3	英国	2	1.27	100	4.63	50.00
4	以色列	1	0.63	13	0.60	13.00
5	爱尔兰	1	0.63	7	0.32	7.00
6	瑞士	1	0.63	3	0.14	3.00
7	波兰	1	0.63	0	0.00	0.00

表 2.2.6 “高威胁环境下网络安全态势感知技术”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 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	国网电子商务有限公司	12	7.59	121	5.60	10.08
2	广西电网有限责任公司	8	5.06	46	2.13	5.75
3	湖北央中巨石信息技术有限公司	4	2.53	36	1.67	9.00
4	北京理工大学	4	2.53	19	0.88	4.75
5	盛庞卡 (Splunk) 公司	3	1.90	76	3.52	25.33
6	北京邮电大学	3	1.90	29	1.34	9.67
7	中国民航大学	3	1.90	15	0.69	5.00
8	杭州安恒信息技术有限公司	3	1.90	12	0.56	4.00
9	加利福尼亚大学	3	1.90	8	0.37	2.67
10	华北电力大学	3	1.90	5	0.23	1.67

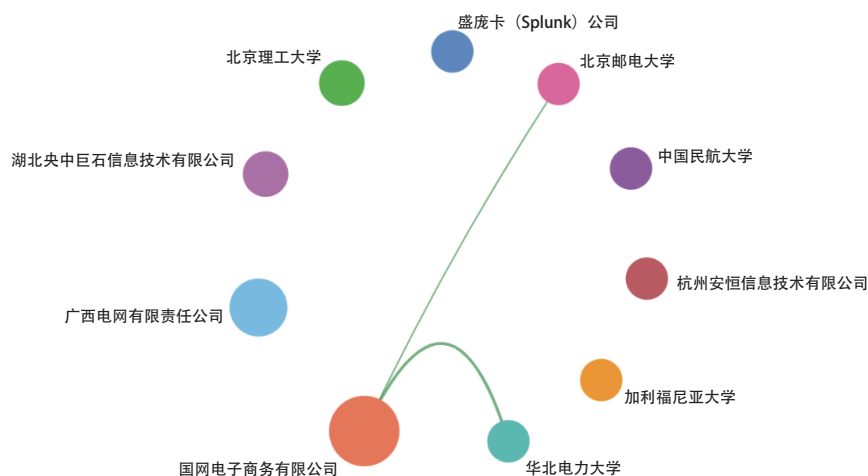


图 2.2.4 “高威胁环境下网络安全态势感知技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

智能、边缘计算、隐私计算等技术的应用，兼顾宏观与中观，将实时数据与情报、经验和知识积累相结合，支撑实现自动化、智能化的行动响应和策略调整，形成对互联网、物联网的全覆盖（图 2.2.5）。

2.2.4 自进化学习人机共驾系统开发

(1) 狭义人机共驾和智能汽车自主性分级

美国汽车工程师协会（SAE）2016 年发布了智能汽车自主性的六级分级原则。中国工业和信息化部 2022 年发布《汽车驾驶自动化分级》推荐性国家标准，将智能汽车自主性分为六级：0 级

为应急辅助；1 级为部分驾驶辅助，驾驶自动化系统在其设计运行条件内能够持续地执行车辆横向或纵向运动控制；2 级为组合驾驶辅助，除上述功能外，还具备部分目标和事件探测与响应的能力，在 0 级至 2 级自动驾驶中，监测路况并做出反应的任务都由驾驶员和系统共同完成，并需要驾驶员接管动态驾驶任务；3 级为有条件自动驾驶，驾驶自动化系统在其设计运行条件内持续地执行全部动态驾驶任务，用户能够以适当的方式执行动态驾驶任务接管；4 级为高度自动驾驶，在其设计运行条件内，系统能够持续地执行全部

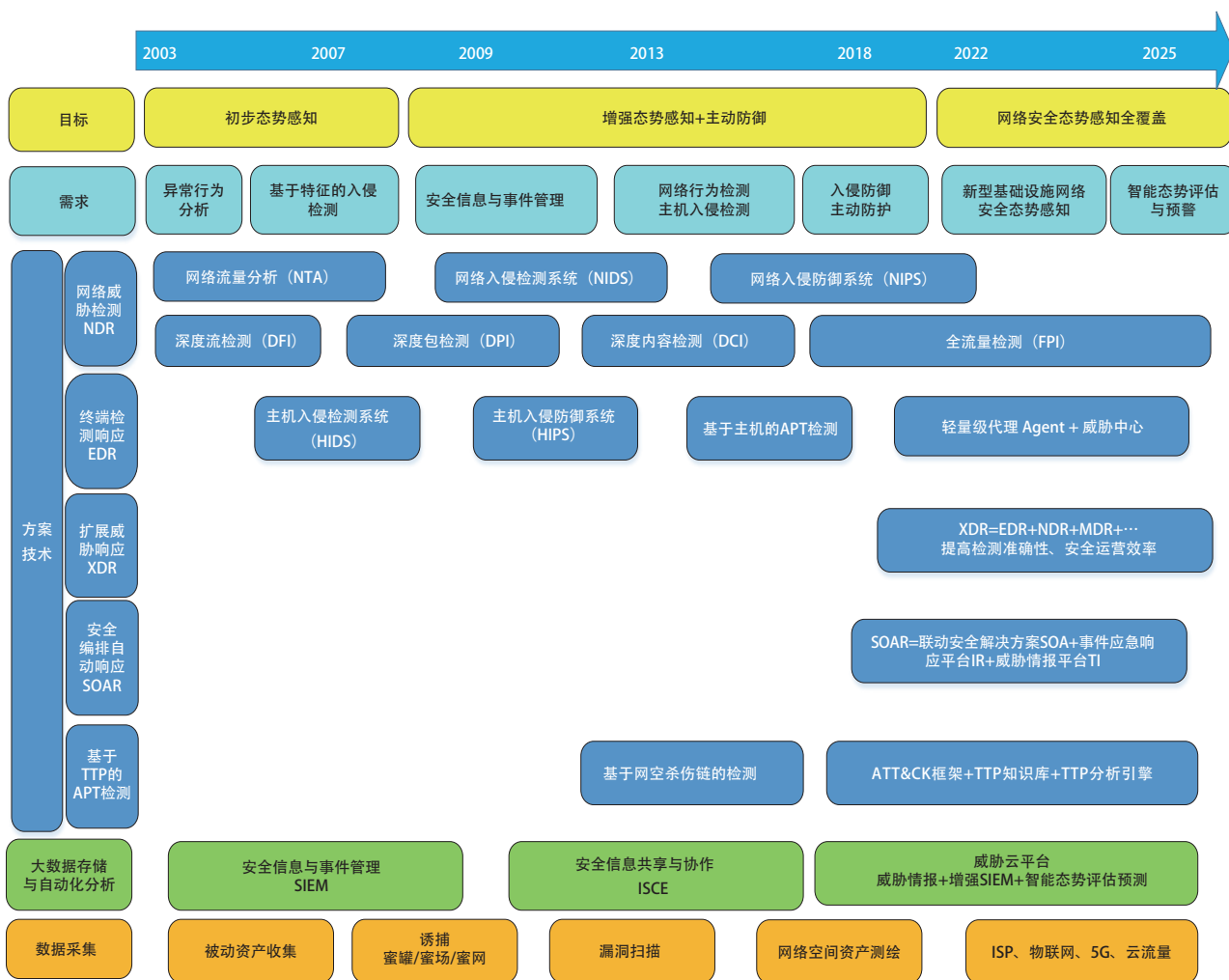


图 2.2.5 “高威胁环境下网络安全态势感知技术”工程开发前沿的发展路线

动态驾驶任务和执行动态驾驶任务接管。当系统发出接管请求时，若乘客无响应，系统具备自动达到最小风险状态的能力；5级为完全自动驾驶。在4级和5级自动驾驶中，驾驶人完全转变为乘客的角色，车辆甚至可以不再装备方向盘和脚踩刹车。

狭义的人机共驾研究主要集中在上述2至4级智能驾驶（也有学者认为，4级智能驾驶已经不属于狭义的人机共驾范畴）。由于人类驾驶行为易受心理和生理状态等因素的影响，2级人机共驾研究的重点在于结合智能系统的不会分心走

神、能够执行规范化决策和精准化控制的特点，在紧急情况下接管车辆，实现人类智能和机器智能的优势互补，减少人为交通事故的发生，也被称为后备式人机共驾。随着智能系统能力的提升，3级人机共驾研究的重点在于人机主导权的切换，在合理的条件下，让智能系统接管部分驾驶任务，减少人类的驾驶负担，也被称为分工人机共驾。而在智能系统能力的进一步提升下，4级人机共驾研究的重点在于通过车用无线通信和车路协同等多种技术，实现超越人类驾驶的场景感知和决策能力，在大多数情况下，长时间替代人类驾驶

车辆，显著提高汽车的安全性、舒适性等性能，也被称为分时人机共驾。

(2) 人类驾驶员的状态监控和意图理解

人类驾驶员的驾驶行为由其生理状况和心理活动所决定，并同时产生相应的车辆行驶行为。早期的研究主要关注人类驾驶员的驾驶行为和驾驶状态的实时监测和智能评估，尽早发现可能的操作失误，避免交通事故的发生。由于直接观测和定量描述驾驶员的驾驶行为较为困难，相关研究主要集中在较为简单的评估驾驶员是否保持安全合理的行车间距的纵向驾驶行为分析，监测预警驾驶员拐弯特性以避免冲出车道的横向驾驶行为分析，以及检测驾驶员是否疲劳驾驶、酒后驾驶、驾驶时分心（如驾驶时拨打或者接听移动电话）的生理和心理状态监控。

随着人工智能技术的发展，研究者近年来开始深入分析复杂道路环境中人类驾驶员感知周边驾驶环境，采取合理驾驶行为的心理生理认知过程。各大智能汽车厂商和研究机构均采集大量的人类驾驶员真实驾驶数据进行分析与学习，希望让智能汽车从人类驾驶员的驾驶行为中“学”到更多驾驶技术和驾驶形势判断及决策经验。通过这样模仿学习得到的正确驾驶意图理解模型不仅对于人机协同共驾，同时也对完全无人驾驶有着重大

应用价值。

由于自动驾驶的场景和任务非常复杂，目前的人机共驾系统大多将规则式设置和数据驱动学习相结合，通过不断在新的场景和任务中测试系统来逐步提升人机共驾能力。而自主探索新的场景和任务并加以自我改进提升构成的闭环自进化学习不仅在人机共驾和无人驾驶领域中大放异彩，同样也在其他很多领域取得了突破。

(3) 人机切换和人机互信

人机共驾同样涉及 2021 年中国工程院选取的工程管理领域 Top 10 工程研究前沿中提及的“人机协同决策中的人机信任与合作机制研究”。从目前量产的人机协同共驾车辆事故数据来看，很多人类驾驶员过高地信任了车辆的智能自主水平，不能在危急时刻及时接管车辆的操控，导致时有事故发生。随着人工智能系统在生产生活中的不断推广应用，自动化系统的信任问题（over-trust in automation）将是未来的研究重点之一。

“自进化学习人机共驾系统开发”工程开发前沿中专利公开量排名前三的国家分别是韩国、美国和中国（表 2.2.7），专利公开量排名前三的机构分别是 StradVision 公司、百度在线网络技术（北京）有限公司和丰田汽车公司（表 2.2.8）。各主要产出国家间没有进行过相关合作。机构方面，只有

表 2.2.7 “自进化学习人机共驾系统开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	韩国	23	33.82	73	16.82	3.17
2	美国	19	27.94	271	62.44	14.26
3	中国	11	16.18	49	11.29	4.45
4	日本	11	16.18	32	7.37	2.91
5	德国	2	2.94	7	1.61	3.50
6	以色列	2	2.94	2	0.46	1.00

现代汽车公司和起亚汽车公司之间进行过合作（图 2.2.6）。

从文献和专利调研来看，人机共驾目前的研究重点在于以下四点。其一，驾驶场景和驾驶任务的正确理解，这也是全无人自动驾驶所面临的研究难点。其二，驾驶人员的状态检测和意图理解，需要及时识别不正常的驾驶人员状态，以便

实施干预，并能迅速识别多变的驾驶意图，进行驾驶辅助。其三，驾驶主导权的切换时机和切换机制研究，减少人类驾驶员的认知冲突和应急心理/生理负担。其四，人机共驾中的信任问题，研究如何使人类驾驶员理解何时应自己操控车辆。图 2.2.7 为“自进化学习人机共驾系统开发”工程开发前沿的发展路线。

表 2.2.8 “自进化学习人机共驾系统开发”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	StradVision 公司	12	17.65	45	10.37	3.75
2	百度在线网络技术（北京）有限公司	7	10.29	72	16.59	10.29
3	丰田汽车公司	5	7.35	14	3.23	2.80
4	现代汽车公司	4	5.88	9	2.07	2.25
5	起亚汽车公司	4	5.88	9	2.07	2.25
6	Mobileye 视觉科技有限公司	3	4.41	9	2.07	3.00
7	英伟达公司	2	2.94	102	23.50	51.00
8	马自达汽车公司	2	2.94	11	2.53	5.50
9	东风日产汽车公司	2	2.94	11	2.53	5.50
10	华为技术有限公司	2	2.94	7	1.61	3.50

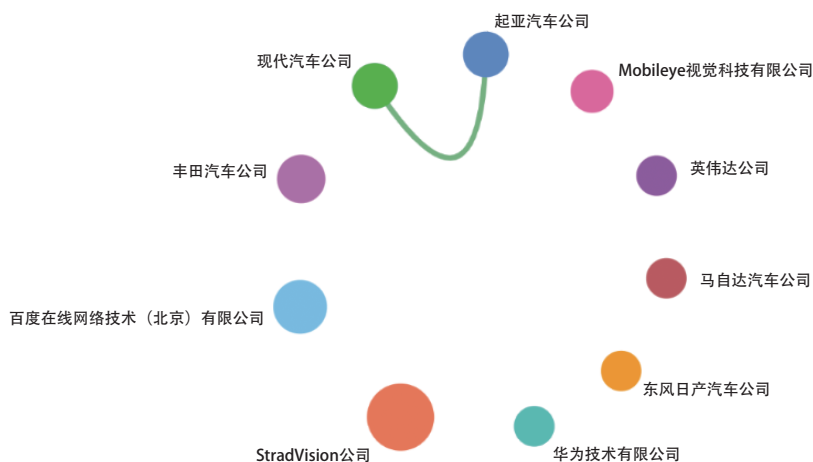


图 2.2.6 “自进化学习人机共驾系统开发”工程开发前沿主要机构间的合作网络

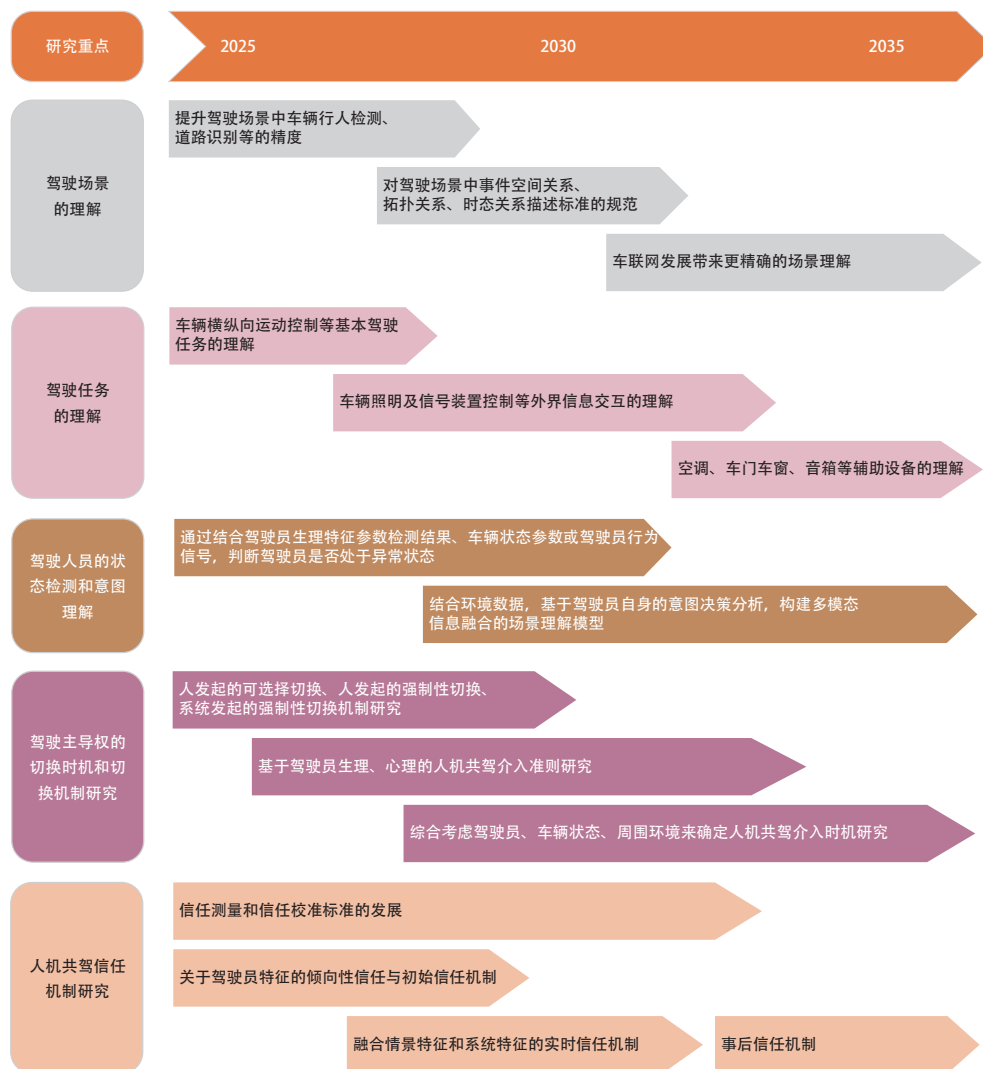


图 2.2.7 “自进化学习人机共驾系统开发”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长: 丁烈云 何继善 胡文瑞 向 巧

课题组成员:

陈晓红 柴洪峰 陈清泉 傅志寰 刘人怀
 陆佑楣 栾恩杰 凌 文 孙永福 邵安林
 王基铭 王礼恒 王陇德 汪应洛 王众托
 薛 澜 许庆瑞 徐寿波 杨善林 殷瑞钰
 袁晴棠 朱高峰 郑静晨 赵晓哲

Mirosław Skibniewski Peter E. D. Love

毕 军 蔡 莉 陈 劲 程 哲 丁进良
 杜文莉 方东平 冯 博 高自友 胡祥培
 华中生 黄季焜 黄 伟 黄思翰 江志斌
 康 健 骆汉宾 李 恒 李永奎 李 政
 李慧敏 李 果 李小冬 李玉龙 刘晓君
 刘炳胜 刘德海 罗小春 吕 欣 林 翰
 马 灵 欧阳敏 裴 军 任 宏 司书宾
 唐加福 唐立新 唐平波 王红卫 王慧敏

王孟钧 王先甲 王要武 王宗润 魏一鸣
吴德胜 吴建军 吴启迪 吴泽洲 吴杰
许立达 肖辉 杨海 杨洪明 杨剑波
叶强 杨阳 於世为 袁竞峰 曾赛星
周建平 张跃军 镇璐 周鹏 朱文斌

工作组成员：

钟波涛 王红卫 骆汉宾 聂淑琴 常军乾
郑文江 穆智蕊 张丽南 李勇 董惠文
孙峻 陈珂 潘杏 杨静 郭家栋
胡啸威

执笔组成员：

研究前沿：

尹西明 陈劲 刘伟华 刘德海 戚庆林
柴洪峰 水源 葛颖恩 李楠 吕孝礼
刘建国 金贵

开发前沿：

黄殿中 崔甲 洪亮 吴建军 陈喜群
李力 张颖伟 陈维亚 陈嘉耕 丁帅
罗西 赵宁