

## 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，全球工程研究前沿集中于以下 10 个部分，分别是工业 4.0 下的可持续发展研究、机器视觉驱动的施工管理、基础设施系统韧性、大数据在远程健康监测系统的应用、高速铁路网络对城市发展的影响、共享社会经济路径描述及其扩展、建筑信息模型与安全管理、能源互联网分析研究、“一带一路”下的物流贸易和海运管理、用于能源交易的区块链联盟研究，其核心论文情况如表 1.1.1 和表 1.1.2 所示。其中工业 4.0 下的可持续发展研究、机器视觉驱动的施工管理、基础设施系统韧性为重点解读的前沿，后文会详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

##### (1) 工业 4.0 下的可持续发展研究

工业 4.0 是德国首先提出的面向未来发展的制造业发展战略，本质是工业生产的数字化，即通

过充分利用信息通信技术和信息物理系统（Cyber-Physical System）相结合的手段，推动传统制造业向智能化转型。它被认为是继蒸汽机的应用、电力广泛应用的大规模化生产和基于电子信息技术自动化生产等三次工业革命后，以生产高度数字化、网络化、机器自组织为标志的第四次工业革命。工业 4.0 的核心目标是智能制造，核心特征是互联，代表了全新的“互联网+制造业”智能生产模式，是新一代信息通信技术与工业生产制造技术的交互镶嵌，虚拟世界与现实世界的智能结合，体现了人机关系的深刻变革以及网络化和社会化组织模式的演进。工业 4.0 的推进，带来了产量及效率的快速提升、生产及人力成本的大幅降低，也对传统工程管理的生产方式、价值链体系、产业形态、商业模式以及管理升级提出了全新的要求。特别是随着平台技术的成熟，以及基于工业场景的应用日益丰富，不同应用之间的互操作成为瓶颈，提供与平台对应的生态能力，建立完整的应用生态和商业生态成为

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 4.0 下的可持续发展研究	22	486	22.09	2017.2
2	机器视觉驱动的施工管理	17	424	24.94	2016.6
3	基础设施系统韧性	28	691	24.68	2017.3
4	大数据在远程健康监测系统的应用	33	703	21.30	2016.1
5	高速铁路网络对城市发展的影响	34	771	22.68	2015.4
6	共享社会经济路径描述及其扩展	20	789	39.45	2016.6
7	建筑信息模型与安全管理	8	100	12.50	2017.1
8	能源互联网分析研究	6	143	23.83	2017.0
9	“一带一路”下的物流、贸易和海运管理	9	107	11.89	2017.6
10	用于能源交易的区块链联盟研究	5	108	21.60	2017.6

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	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
1	工业 4.0 下的可持续发展研究	0	0	1	4	7	10
2	机器视觉驱动的施工管理	0	0	0	9	6	2
3	基础设施系统韧性	0	0	0	0	21	7
4	大数据在远程健康监测系统的应用	4	2	5	4	11	7
5	高速铁路网络对城市发展的影响	2	8	9	7	6	2
6	共享社会经济路径描述及其扩展	2	8	9	7	6	2
7	建筑信息模型与安全管理	0	0	0	1	5	2
8	能源互联网分析研究	0	0	1	1	1	3
9	“一带一路”下的物流、贸易和海运管理	0	0	0	2	0	7
10	用于能源交易的区块链联盟研究	0	0	0	0	2	3

下一阶段的关键。全球范围内掀起的工业 4.0 大潮，预示着未来制造业将回归各国战略重心，成为全球经济稳定增长的重要引擎，并将影响国际产业分工与价值分配，重构全球化格局。

### （2）机器视觉驱动的施工管理

机器视觉是用计算机实现人的视觉功能——对客观世界三维场景进行感知、识别和理解，实现对数字图像的采集、处理、分析。相较于传感技术（例如无线射频识别技术（RFID）、全球定位系统（GPS）和超宽带（UWB）），机器视觉可以提供更加丰富的图像和视频信息，并且不需要佩戴传感器。随着摄像设备的发展和深度学习算法的成熟，机器视觉在建筑领域也被广泛应用，主要集中于施工过程中的安全监测、生产力分析以及大型基础设施（道路、桥梁、隧道等）缺陷检测，其中基于机器视觉的施工过程中风险识别和监测是研究热点。传统施工依赖周期性的人工巡检，巡检过程耗时耗力且不能实现全天性的监控，而基于机器视觉的自动化监控能更好地提高安全管理。目前机器视觉研究往往依赖于利用算法提取特征信息，而未能实现语义较高程度的场景理解。此外，由于深度学习算法往往需要大量的数据训练模型，因此公开图形数据库的缺乏，也极大地制约了机器视觉技术的进一步发展。

### （3）基础设施系统韧性

基础设施系统是指为社会生产与居民生活提供基本服务的工程设施网络，包括电力、天然气、交通、给排水与通信等系统。近年来，这些系统因自然灾害、气候变化、快速城镇化等因素引起的故障风险逐年增加；同时，这些系统相互关联，使得单个系统内部的故障会在不同系统之间扩散与蔓延，造成多个系统同时受损，严重影响城市乃至整个国家的经济和人民生活。在过去的十年间，许多国家或地区，如美国、欧洲、加拿大、澳大利亚等均提出了基础设施系统保护计划。韧性的基础设施系统，即系统灾后仍能维持一定的基本功能且能快速恢复正常功能，已成为许多国家积极建设的目标；如何评估、提升基础设施系统韧性等关键科学问题是目前城市规划、土木工程、工业工程等多学科交叉的国际前沿研究热点。

### （4）大数据在远程健康监测系统的应用

随着信息技术迭代发展，远程健康监测系统正在成为卫生健康领域信息化建设高地。对偏远地区或山区的普通居民，尤其患者来说，远程健康监测系统提高了卫生服务地理和经济可及性，使主治医师能够实时分析服务对象的医疗及健康数据，在节约卫生经费前提下输出高质量服务。在医疗健康领

域，大数据技术的应用正在成为卫生发展共识，健康及医疗大数据是一座永不枯竭的金矿，必将为卫生健康服务高质量发展提供新动能。一般来说，远程健康监控系统主要包括健康信息的采集模块、处理健康信息的监护终端模块以及远程医疗服务平台模块，其中数据采集和传输是整个系统的关键。随着5G技术运用，远程健康监测系统将面临更大发展机遇，建立基于云端的区域健康大数据平台，通过远程健康监测系统可实现医院、医生、家庭及患者、医疗设备间的交互和连通，为患者提供更精准的诊断建议和更优的个性化治疗方案，实现用户健康管理闭环，直接助力基层卫生机构开展智能医疗健康管理服务。目前，健康大数据应用还处于探索阶段，远程健康监测系统也很不成熟，研究难点和热点主要包括健康数据智能化集成、健康大数据平台构建、健康管理闭环建设、基于多医疗机构数据交互和健康数据挖掘技术等。

#### （5）高速铁路网络对城市发展的影响

近年来，以中国为典型国家的高速铁路建设取得了巨大发展，对城市社会经济及空间结构产生显著的影响，给城市可持续发展带来新机遇与新挑战。研究表明，快速便捷的高铁网络，可以促进城市间经济要素往来、优化地理空间布局、重构城市空间联系、带动城市群增长。从全球范围看，现有研究从交通可达性、连通性、站点选取等角度，阐释高铁与城市内及城市间空间结构的内在联系；立足经济结构、人口流动、环境保护、居民行为等维度，揭示高铁对城市发展及城市化质量的作用机理；评估高铁与航空等交通工具的替代效应，分析不同交通方式的交互界面，建构便捷高效的城市内外交通运输体系。除此之外，现有研究也给出值得关注的要点：优化高铁网络促进城市转型发展；优化高铁布局助力城市均衡建设；完善高铁建设引导城市良性竞争；规避城市量化增长及短期利益导向下的高铁发展模式；在大数据及人工智能背景下利用部门力量联合开发综合运营系统，实现高铁、航空、普

通铁路等的无缝对接；在高铁选址与设计融入城市发展战略，增强高铁站点的选择、设计、建设与城市当地的生态环境、经济环境、社会文化环境的有机联系。

#### （6）共享社会经济路径描述及其扩展

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，其可以描述未来社会的发展趋势，揭示气候变化与社会经济要素之间的相互关系及内在逻辑。SSP框架考虑了建立未来社会经济情景的6个关键要素：人口、人类发展、经济和生活方式、政策和体制、技术、环境和自然资源，包括5种路径，即可持续路径（SSP1），中间路径（SSP2），区域竞争路径（SSP3），不均衡路径（SSP4）和化石燃料为主发展路径（SSP5）。当前国内外学者依据共享社会经济路径框架情景，综合使用人口—发展—环境分析（PDE）模型、柯布—道格拉斯（Cobb-Douglas）经济预测模型、综合评估模型（IAM）、可计算一般均衡（CGE）模型、全球经济模型（GLOBIOM和IMPACT）、全球变化评估模型（GCAM）和未来土地利用模拟模型（FLUS）等多种模型在全球不同尺度范围内进行人口、经济、能源、温室气体排放、城市化水平等不同方面的预测研究及其驱动因素分析。基于土地资源利用为载体研究共享社会经济路径多因素耦合机制，分析不同路径下土地动态变化，是近几年研究的热点。共享社会经济路径是气候变化研究领域建立的新情景框架的一部分，旨在为气候变化影响、风险、适应和减缓研究提供基础数据，为未来社会经济发展提供不同路径，并为相关气候变化对策和措施的选择，实现可持续发展提供参考依据。

#### （7）建筑信息模型与安全管理

重大安全事故与伤害防范越发成为各行业关注的焦点，工程施工行业因其职业健康安全形式严峻致其管理一直是世界性关注的难题。随着人工智能与信息通信技术的发展，探索分析信息通信技术及

智能方法在建筑设计、工程设计与施工服务行业尤其是安全管理中的应用，是当前研究的前沿。建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）被认为是当前提升安全管理效果最具价值方法之一，BIM 技术方法以设计、施工到运营协调中的项目过程信息为基础，从而可构建安全管理相关的完整数字化集成过程流程（过程可视、模拟优化、交互协同等）。随着 BIM 技术方法在工程行业应用的不断推进，呈现出 BIM+ 其他技术方法，如：与 RFID、GIS 等定位技术，VR、AR、眼动仪技术以及云计算、机器视觉方法等；并在安全管理相关问题上进一步深入的特点。当前，建筑信息模型与安全管理研究热点中的关键问题为：建筑信息模型自动安全审查方法、3D-nD 工程安全仿真与模拟分析方法、集成其他技术与建筑信息模型的安全管理信息控制方法、基于图像数据的工程安全风险场景解析方法等。建筑信息模型推动了数据驱动的管理范式和技术方法转变，研究建筑信息模型等技术方法对工程建设过程中信息统一、可视、共享、交付、集成、运算等特点对工程全过程安全管理问题的影响特点、变化规律及控制要求等科学问题，对当前建设工程项目全生命周期安全建造与管理有着重要的意义。

### （8）能源互联网分析研究

随着对能源市场化和绿色经济发展模式的重视，社会发展的可持续性对能源系统在能源安全、环境污染、气候变化等方面的表现提出了更高的要求。能源互联网作为崭新的产业形式，是推动能源革命、提高能源利用效率的重要途径。能源互联网是以电力为核心的能源系统和以电子信息技术为基础的互联网深度融合的新型能源系统，同时实现了两个层面的互联，即多能流物理互联和能源资源透明化的数据互联。虽然能源互联网的定义还在不断完善，但是其凭借对可再生能源网络、天然气网络、交通网络等系统的紧密耦合，已经成为当前国际科学研究和产业发展的新焦点。目前，能源互联网的

技术创新研究热点包括总体架构与标准体系建设，组网与互操作模型构建，建模仿真与分析技术开发，运行与控制装备研制，安全防护体系建设等方面。能源互联网的系统性和复杂性较高，需要统一的规划和顶层设计。在未来，能源互联网需要在能源类型、使用者、标准和接口方面更加开放，开发更丰富的应用，实现多能源互联和多用户互联。随着科学技术的成熟和相关政策的完善，未来能源互联网将在能源生产、传输、消费、存储、转换等能源交易供应链的各个节点发挥重要作用。

### （9）“一带一路”下的物流、贸易和海运管理

我国逐渐走入世界舞台中心，顺势而为发起共建“一带一路”倡议。随着“一带一路”建设的纵深推进，物流通道的基础战略意义得以表达，它作为沿线地区的经济纽带实现了区域经济的协同发展。“一带一路”倡议顺应世界经济发展规律得以迅速成长，但也对物流风险管理提出了挑战。“一带一路”物流通道是交通强国战略实现的重要组成部分，为提升我国物流产业的影响力与竞争力，提升行业标准成为区域标准甚至国际标准，推动物流标准的国际化研究是未来的发展方向；不仅如此，物流行业也应完善人才的供应链建设，以对接国际组织和匹配沿线国家为核心，着手建立组织型人才与技术性人才培养体系，将人才外输渠道建设纳入研究重点，动态对标国际需求实现人才供应链创新发展是今后的研究方向。物流通道不仅是物资流通，还承载着我国经贸对外发展的机遇，构建“交通-经贸”走廊模式将是重要方向，以“物流、经贸、产业”的协同创新发展为目标，如何实现国内外廊道经济的闭环发展？在战略执行层面，陆海新通道的桥接作用已凸显，借助通信发展推动大数据与物联网的深入应用，打造“数据供应链”实现综合优化是未来可行的方向。另外，地缘政治、汇率、生态等诸多因素对“一带一路”倡议形成威胁，如何通过表征变动预警风险发生，在快速响应的决策体系下实现“一带一路”下的物流、贸易和海运风险管理。

## （10）用于能源交易的区块链联盟研究

随着商业社会的演进，以第三方机构为核心的中心化交易组织架构暴露出隐私泄露、成本过高和所有权不明三方面的问题。计算机技术的发展使分布式数据库成为去中心化的关键。区块链是一种分布式的数据管理方式，将管理交易参与者的方式从集中管控转变为分布式协同。多方共享机制使参与者形成区块链联盟，每个联盟都能够访问、维护、共享数据库。对数据库更新者信任信息的审计跟踪，提升了交易和信息共享的安全性。随着绿色经济、共享经济的发展，能源企业的传统业务模式不再适应当代低碳化经济格局的需求，以能源企业和能源用户为主导的能源变革应运而生。能源部门应用区块链技术是为了提供一种分布式的能源系统，使能源供应合同可以直接在生产者和消费者之间传递。区块链技术和能源部门的结合衍生出丰富的能源交易的应用，如将区块链技术用于能源企业资本管理、能源用户购能管理、能源网络供应链管理、可再生能源发电管理、能源共享管理等。区块链技术在为能源部门的资本运作和交易管理开拓更多渠道的同时，如何提高区块链的计算能力、存储能力、处理能力，以及明确跨行业的开放标准等，对于推动区块链技术在能源领域的深度商业应用具有重要意义，也是未来的重要研究方向。

## 1.2 Top3 工程研究前沿重点解读

### 1.2.1 工业 4.0 下的可持续发展研究

从研究主题来看，工业 4.0 下工程可持续发展研究主要聚焦全球工业发展战略、体系框架与关键技术、与循环经济耦合、建筑工业化 4 个典型领域。

#### （1）全球工业发展战略

工业 4.0 概念最早于 2013 年由德国联邦教研部与联邦经济技术部提出，旨在提高德国工业的竞争力。工业 4.0 的提出在全球范围内引发了新一轮

的工业转型竞赛，各个国家纷纷提出了各自的“再工业化”战略，在大数据革命、云计算、移动互联网时代背景下，实现对企业进行智能化、工业化相结合的改进升级，突破世界现有生产力增长瓶颈。

美国公布了“先进制造业国家战略计划”（National Strategic Plan for Advanced Manufacturing），并提出“工业互联网”，通过机器互联、软件及大数据分析，提升生产效率，创造数字工业的未来。英国推出“英国工业 2050 战略”（Future of Manufacturing），聚焦高价值制造业，通过个性化的低成本产品、生产重新分配和制造价值链的数字化提振制造业来带动社会经济可持续发展。欧盟发起了“未来工厂”计划（Factory of Future），支持先进生产技术的研发、开发与创新，并进一步推出“单一数字市场”战略，提高数字商品和服务的易用性，培育繁荣数字网络和服务的环境，打造具备长期增长潜力的欧洲数字经济和数字社会。日本制定了“第五期科学技术基本计划”（The 5th Science and Technology Basic Plan），是通过网络空间和现实空间的融合，创造出新的产业与服务，致力于打造全新的“超智能社会”。中国颁布了“中国制造 2025”，加快新一代信息技术与制造业深度融合，推进智能制造，强化工业基础能力，提高综合集成水平，促进产业转型升级。全球工业发展战略研究主要基于政策研究视角，涵盖了各个国家“再工业化”战略的核心理念、异同比较、战略选择与路径优化、实施方法、支持体系、开放合作、管理变革、对国家以及全球社会经济的可持续发展影响等主要议题。

#### （2）工业 4.0 的体系框架、关键技术与发展变革

工业 4.0 是一项复杂而重大的系统工程，有不同的对象和主体。其对象既包括工业领域不同标准下的工艺、流程和自动化；也包括信息、通信和互联网技术等。工业 4.0 参考架构模型（RAMI4.0，Reference Architecture Model Industrie 4.0）从产品

生命周期 / 价值链、全层级工业系统和信息物理系统能力等级三个维度，分别对工业 4.0 进行多角度描述。RAMI4.0 明确了新的标准和技术框架，为企业部署新的基础设施、应用新的技术、形成新的标准指明方向。工业 4.0 的体系框架明确了由集中式控制向分散式增强型控制的基本模式转变，目标是建立一个高度灵活的个性化和数字化的产品与服务的生产模式。

目前工业 4.0 的发展主要集中于四大方面：

基于智能化、网络化生产系统以及网络化分布式生产设施的“智能工厂”；利用生产物流管理、人机互动以及 3D 打印技术等新兴技术的“智能生产”；通过物联网、物流网和互联网整合需求和服务匹配的“智能物流”；集成多方面信息技术应用，以客户需求为目的跨平台、多元化的“智能服务”。其关键技术主要包括工业物联网、云计算、工业大数据、工业机器人、3D 打印、知识工作自动化、工业网络安全、虚拟现实和人工智能等领域。工业 4.0 成功实施还涉及三个密切相关的行动领域——数字主权、互操作性和可持续性。数字主权是市场参与者的自主决策和参与公平竞争自由，主要考虑数字基础设施、安全性和技术进步。互操作性是不同利益相关者通过灵活联网来构建敏捷的价值网络，是工业 4.0 中数字业务流程的核心要素，主要考虑标准和集成、监管框架、分布式系统和人工智能。可持续性涵盖了经济、环境和社会的可持续性，主要涉及良好的就业和教育、社会参与、气候变迁。

### （3）工业 4.0 与循环经济耦合

工业 4.0 的发展正在重构传统的经济系统，智能化技术的广泛应用能使经济系统更便捷、和谐地融入到自然生态系统的物质循环过程之中，实现经济活动的生态化。典型的工业 4.0 与循环经济耦合模型有基于 ReSOLVE 框架 (Regenerate, Share, Optimise, Loop, Virtualise, Exchange) 的发展模式。其主要步骤有 5 项：面向 ReSOLVE 的策略选择；确定合适的工业 4.0 核心技术；可持续运营管

理 (Sustainable Operations Management, SOM) 决策采纳；推进供应链合作；制定绩效指标和可实现的目标。其核心是整合并优化基于设计的方法与基于流程的方法，实现整个产品生命周期中材料的循环利用，使得工业 4.0 成为循环经济关键使能因素。工业 4.0 与循环经济耦合涉及了技术层面、社会层面及商业范式层面的变革。重要研究问题包括工业 4.0 背景下的循环经济评价体系、生产者责任延伸制度、绿色供应链、无废城市、源头控制解决方案、污染物过程控制、良性干扰方法、生态关键链接技术等。

### （4）建筑工业 4.0

作为工业 4.0 行业细分下的重要板块，建筑工业化在工程管理领域受到了特别关注。建筑工业 4.0 是建筑产业的信息化和工业化，体现了传统建筑行业人工的操作方式向建筑自动化转变，由集中式控制向分散式增强型控制治理模式转变，面向高度灵活的个性化和数字化的建筑产品与服务的生产模式转变。工业 4.0 背景下的建筑工业化的本质是通过数据流动自动化技术，从规模经济转向范围经济，以同质化规模化的成本，构建出异质化定制化的建筑产业。目标是通过技术链整合、产业链再造、价值链提升，实现建筑产品节能、环保、全生命周期价值最大化的可持续发展。建筑工业 4.0 的可持续研究有两个重要主题：BIM (Building Information Modeling) 和装配式建筑。作为建筑业的核心技术平台，BIM 与工业 4.0 核心技术的融合将推动建筑业的颠覆性革命。BIM 提供了准确的建筑信息、连续的数字记录和协同工作平台，保障了建筑全生命周期的精致化、智能化、绿色化管理。装配式建筑是建造方式的变革式创新，通过标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用，实现建筑产业的可持续发展。重要的研究问题涵盖了政策扶持机制、管理模式、多元化治理、设计技术体系、绿色关键技术及集成技术、协同创新网络、人力资源培育等。

工业 4.0 下工程可持续发展领域的研究目前还处于起步阶段。

从发表的核心论文数量来看,近三年快速增加。核心论文数量排名前 3 的国家/地区分别为:德国、美国、法国(见表 1.2.1)。篇均被引频次排名前 3 的国家/地区分别是:瑞典、德国、巴西(见表 1.2.1)。从核心论文产出国的合作网络图(见图 1.2.1)来看,还没有构成较为紧密的合作网络,但是出现了初步的区域特征,美国和亚洲国家之间有合作关系,而德国、法国以及巴西之间出现了合作关系。核心论文数量排名前 3 的机构分别为:柏林工业大学(Tech

Univ Berlin)、弗里德里希亚历山大大学(Friedrich Alexander Univ Erlangen Nurnberg)、蒙彼利埃高等商学院(Montpellier Business Sch)(见表 1.2.2)。从核心论文产出机构的合作网络图(见图 1.2.2)来看,还没有构成较为紧密的合作网络,但同样出现了初步的区域特征,与国家/地区的分布一致。在这方面,中国还处于跟跑地位。

工业 4.0 下的可持续发展领域施引核心论文数量排名前 3 的国家/地区分别为:美国、德国、中国(见表 1.2.3)。施引核心论文的主要产出机构包括约翰内斯堡大学(Univ Johannesburg)、里斯

表 1.2.1 “工业 4.0 下的可持续发展”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	Germany	6	27.27%	195	40.12%	32.50
2	USA	4	18.18%	50	10.29%	12.50
3	France	4	18.18%	85	17.49%	21.25
4	Brazil	3	13.64%	75	15.43%	25.00
5	China	2	9.09%	17	3.50%	8.50
6	South Korea	2	9.09%	22	4.53%	11.00
7	Japan	1	4.55%	7	1.44%	7.00
8	Italy	1	4.55%	4	0.82%	4.00
9	Spain	1	4.55%	3	0.62%	3.00
10	Sweden	1	4.55%	33	6.79%	33.00

表 1.2.2 “工业 4.0 下的可持续发展”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	Tech Univ Berlin	2	9.09%	97	19.96%	48.50
2	Friedrich Alexander Univ Erlangen Nurnberg	2	9.09%	30	6.17%	15.00
3	Montpellier Business Sch	2	9.09%	22	4.53%	11.00
4	Beijing Inst Technol	1	4.55%	7	1.44%	7.00
5	Doshisha Univ	1	4.55%	7	1.44%	7.00
6	Univ Texas Dallas	1	4.55%	7	1.44%	7.00
7	UFSCar Fed Univ Sao Carlos	1	4.55%	14	2.88%	14.00
8	Sapienza Univ Rome	1	4.55%	4	0.82%	4.00
9	Univ Tuscia Viterbo	1	4.55%	4	0.82%	4.00
10	Fraunhofer Inst Reliabil & Microintegrat	1	4.55%	10	2.06%	10.00

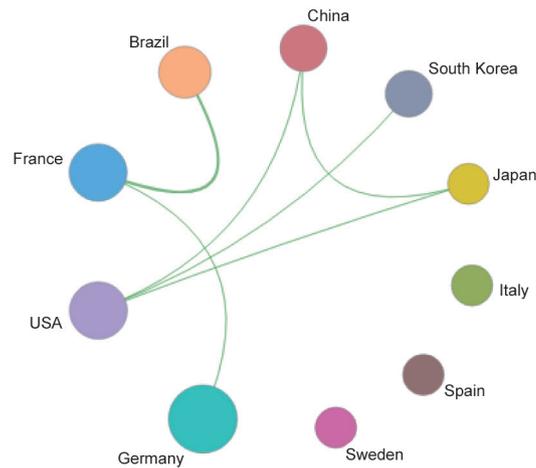


图 1.2.1 “工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

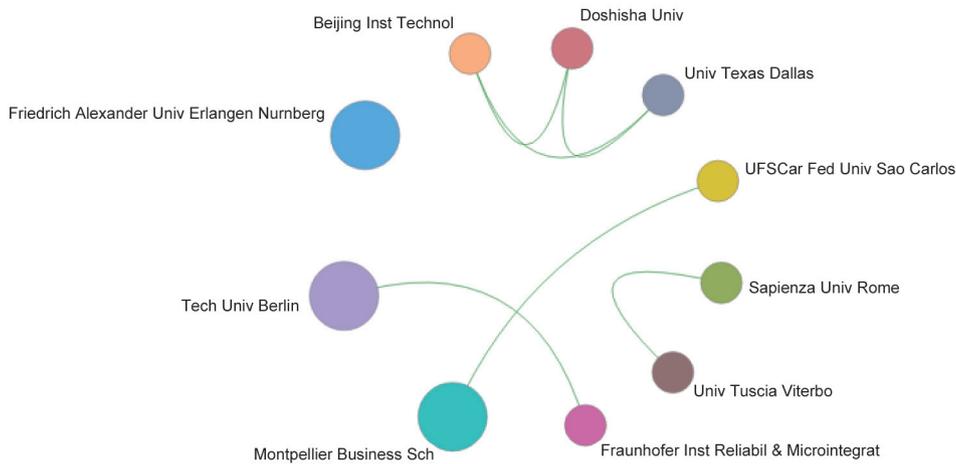


图 1.2.2 “工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “工业 4.0 下的可持续发展”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	USA	42	15.27%	2018.0
2	Germany	39	14.18%	2017.7
3	China	37	13.45%	2017.8
4	Italy	32	11.64%	2017.9
5	UK	27	9.82%	2017.9
6	France	22	8.00%	2017.7
7	Brazil	21	7.64%	2017.8
8	Spain	17	6.18%	2017.5
9	Portugal	14	5.09%	2017.5
10	Russia	12	4.36%	2017.6

本新大学 (Univ Nova Lisboa)、柏林经济法律大学 (Berlin Sch Econ & Law) 等等 (见表 1.2.4)。

### 1.2.2 机器视觉驱动的施工管理

随着信号处理理论和计算机技术的发展,人们开始尝试使用摄像机获得周围环境图像,并将其转化为数字信号,使得计算机可以通过一幅或者多幅图像来提取环境信息,其主要任务分为图像处理,模式分类和场景分析。机器视觉系统在工业界中被大量使用,列入自动化生产线中的产品检测,人脸识别,医学图像自动理解等。机器视觉在建筑行业的应用成为人们关注的新课题,它可以提高建筑领域的自动化水平。下面主要对机器视觉在建筑领域的主流算法,热点研究问题以及研究现状进行进一步的讨论。

#### (1) 机器视觉主流算法

机器视觉的重要一步是目标物体检测,即从图像中识别出特定目标。目标检测的算法众多,主要可以分为两种:浅层次机器学习和深度学习。前者主要的算法有方向梯度直方图(HOG)、光流直方图(HOF)、支持向量机(SVM)、近邻分类等,但这些方法需要人工的创建特征,这个过程较为耗时,且难以兼顾检测精度和计算效率。此外,施工现场普遍存在的不确定性和不断变化的施工场

景会影响图像中的特征提取,例如视点方差,尺度方差,类内方差或背景杂波,导致物体检测精度降低。作为一种端到端学习方法,深度学习具有强大的特征表示能力和较高的学习精度,是目前建筑行业机器学习研究中的主流算法,例如单次多盒检测器(SSD)、单次目标检测器(YOLO)、卷积神经网络(CNN)。其中CNN是深度学习算法的基本元素,包括多重卷积层、整流线性单元、池化层以及全连接层。卷积神经网络的出现,使得机器视觉在目标检测中取得较大的提升。基于卷积神经网络,各自算法也逐步被开发出来,例如RNN, Fast R-CNN, Mask R-CNN等。

#### (2) 基于机器视觉的施工安全管理

建筑行业是高危行业之一,极易引发安全事故和人员伤亡。如何利用机器视觉,实现施工过程的自动化安全监管,及时发现施工过程中的不安全行为或不安全状态,并及时反馈给管理人员是一大研究热点。

研究内容分为物体检测,物体追踪和动作识别。其中物体检测是物体追踪和动作识别的前提,需要对图像进行分割,提取特征,然后利用深度学习算法对特征进行分类。物体追踪研究旨在提高项目实体位置估计的精度,相较于传感器技术,它的覆盖范围更广,且可以实现多目标物体的追踪,也不需

表 1.2.4 “工业 4.0 下的可持续发展”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 Johannesburg	6	10.34%	2017.8
2	Univ Nova Lisboa	6	10.34%	2017.7
3	Berlin Sch Econ & Law	6	10.34%	2017.3
4	Univ Fed Santa Catarina	6	10.34%	2017.8
5	Norwegian Univ Sci & Technol	6	10.34%	2017.2
6	Worcester Polytech Inst	5	8.62%	2018.0
7	Seoul Natl Univ	5	8.62%	2017.6
8	Friedrich Alexander Univ Erlangen Nurnberg	5	8.62%	2018.2
9	Old Dominion Univ	5	8.62%	2018.0
10	Kyonggi Univ	4	6.90%	2017.5

要安置介入式传感器。动作识别旨在从图像中提取工人或者机械的运动信息，依赖于图像特征的提取和分类。

### （3）基于机器视觉的生产力分析

生产力分析旨在避免因施工中出现的等待、闲置、过度运输等问题而导致的效率低下。研究主要集中于两方面：项目的施工进度跟踪，分析进度偏差；项目运行过程中工人或设备的使用效率测量，以进行有效的管理，达到最大的运营效率。生产力分析需要对建筑施工场地实时数据进行收集，并将这些数据转化为生产力信息，例如工作顺序和持续时间等。随着摄像技术在工地的普及应用，利用机器视觉技术对记录的图像和视频进行生产力自动分析得到了广泛的关注。

### （4）基于机器视觉的缺陷检测

缺陷检测旨在检查基础设施构件上存在的缺陷和破坏（开裂、剥落、缺陷接缝、腐蚀、凹坑等），以及缺陷的大小（数量、宽度、长度等），有助于辅助投资规划，并分配有限的维修和保养资源，是确保基础设施满足其服务性能的主要手段。基于机器视觉的缺陷检测主要涉及图像处理技术，如模板匹配、直方图变换、背景减法、滤波等以及特征分类。研究对象主要集中于混凝土桥梁、隧道、管道以及沥青路面等基础设施。但是目前桥梁的图像和视频数据采集未完全实现自动化，图片质量因相机姿态、距离、环境条件而异，如何实现复杂几何部位的缺陷检测依旧是一个难题；对于隧道和管道，图片中光照条件差、背景图案和对比度不规则、数据质量低是目前存在的主要问题；对于沥青路面，如何在实时环境下对路面缺陷进行全面、自动化的检测和分类依旧是一个难题。

### （5）发展现状和未来趋势

目前，机器视觉作为一种实现施工管理自动化的手段，被广泛的应用于建筑各个环节，例如安全监测、生产力分析、缺陷检测等。但是其发展过程中，依旧存在一些亟待解决的问题。

第一，深度学习算法需要依赖大量的数据训练模型，但是目前依旧缺乏可以公开使用的数据集，这极大的阻碍了机器视觉的发展。第二，目前机器视觉的研究局限于某一特定的行为或场景，例如工人是否佩戴安全帽等，但实际应用往往需要监测多种任务和风险。第三，机器视觉驱动下的安全监测往往基于特征提取，而未能实现一个语义程度较高的场景理解。随着施工风险定义逐步复杂，机器视觉需要集成规范知识，提高场景理解能力和风险推理能力。本体作为一种领域知识的规范化表达，可以将文本规范知识和专家经验等处理为计算机可读模式，因此如何有效的集成本体和机器视觉，使得本体能够有效的为计算机视觉的图像理解提高背景和先验知识是未来的一个研究趋势。

从发表的核心论文数量来看，核心论文数量排名前3的国家分别为中国、美国、澳大利亚（见表1.2.5）。篇均被引频次排名前3的国家/地区分别是：美国、波兰和中国（见表1.2.5）。从核心论文产出国合作网络图（见图1.2.3）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，美国与德国之间、中国与澳大利亚之间已有合作关系。核心论文数量排名前3的机构分别为：华中科技大学（Huazhong Univ Sci & Technol）、哥伦比亚大学（Columbia Univ）、香港理工大学（Hong Kong Polytech Univ）（见表1.2.6）。从核心论文产出机构的合作网络图（见图1.2.4）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，但同样出现了初步的区域特征。

机器视觉驱动的施工管理领域施引核心论文数量排名前3的国家/地区分别为：中国、美国、韩国（见表1.2.7）。施引核心论文数量排名前3的机构分别为：华中科技大学（Huazhong Univ Sci & Technol）、香港理工大学（Hong Kong Polytech Univ）、同济大学（Tongji Univ）（见表1.2.8）。

### 1.2.3 基础设施系统韧性

“韧性”（Resilience）一词起源于拉丁语

表 1.2.5 “机器视觉驱动的施工管理”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	7	41.18%	172	40.57%	24.57
2	USA	6	35.29%	169	39.86%	28.17
3	Australia	2	11.76%	49	11.56%	24.50
4	Canada	2	11.76%	38	8.96%	19.00
5	Poland	1	5.88%	26	6.13%	26.00
6	Germany	1	5.88%	19	4.48%	19.00
7	South Korea	1	5.88%	19	4.48%	19.00

表 1.2.6 “机器视觉驱动的施工管理”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	Huazhong Univ Sci & Technol	3	17.65%	75	17.69%	25.00
2	Columbia Univ	2	11.76%	87	20.52%	43.50
3	Hong Kong Polytech Univ	2	11.76%	48	11.32%	24.00
4	Univ Nottingham Ningbo	1	5.88%	30	7.08%	30.00
5	Univ Michigan	1	5.88%	28	6.60%	28.00
6	Curtin Univ	1	5.88%	27	6.37%	27.00
7	Hubei Engrn Res Ctr Virtual Safe & Automated Const	1	5.88%	27	6.37%	27.00
8	Tongji Univ	1	5.88%	26	6.13%	26.00
9	AGH Univ Sci & Technol	1	5.88%	26	6.13%	26.00
10	Queensland Univ Technol	1	5.88%	22	5.19%	22.00

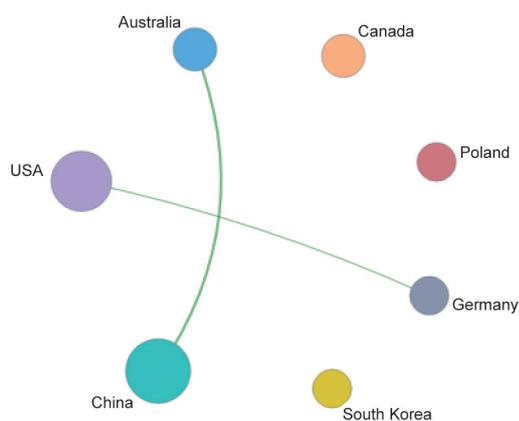


图 1.2.3 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

“Resilio”，本意是“回复到原始状态”。加拿大生态学家 Holling 教授首次将韧性思想应用于系统生态学，用以定义生态系统的稳态特征。随后，韧性思想被应用于不同学科领域，包括工程韧性、经济韧性与基础设施系统韧性等领域。基础设施系统韧性可以理解为系统灾后仍能维持一定的基本功能且能快速恢复正常功能的综合能力。由于基础设施系统维系城市的社会和经济功能，是城市大动脉，所以韧性的基础设施系统是实现韧性城市的核心与关键。

下面主要对基础设施系统的韧性评估与提升进行更加深度的分析，然后总结基础设施系统韧性研

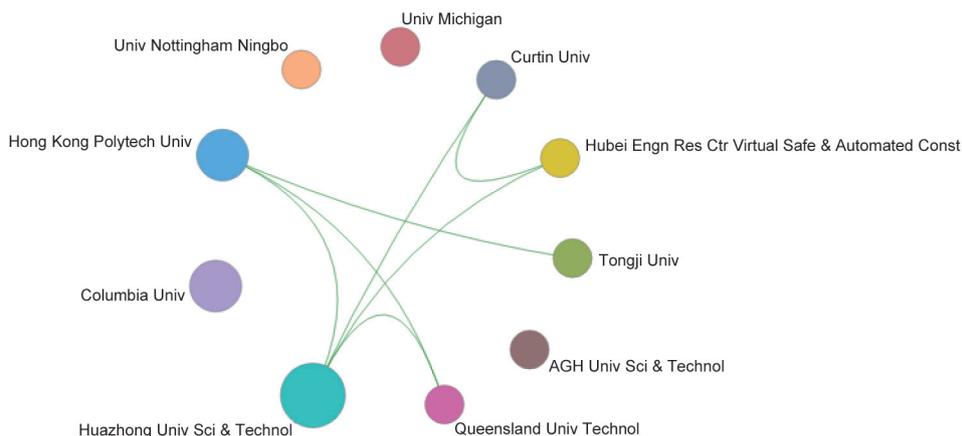


图 1.2.4 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “机器视觉驱动的施工管理”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	128	36.26%	2018.1
2	USA	80	22.66%	2017.9
3	South Korea	32	9.07%	2017.9
4	UK	29	8.22%	2018.0
5	Australia	26	7.37%	2018.1
6	Canada	16	4.53%	2017.8
7	Spain	15	4.25%	2018.1
8	Germany	10	2.83%	2017.6
9	Italy	7	1.98%	2017.9
10	Turkey	5	1.42%	2017.8

表 1.2.8 “机器视觉驱动的施工管理”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	Huazhong Univ Sci & Technol	21	16.28%	2018.2
2	Hong Kong Polytech Univ	19	14.73%	2018.2
3	Tongji Univ	17	13.18%	2018.1
4	Curtin Univ	15	11.63%	2018.1
5	Harbin Inst Technol	11	8.53%	2018.4
6	Columbia Univ	9	6.98%	2017.0
7	Dalian Univ Technol	8	6.20%	2017.9
8	Zhejiang Univ	8	6.20%	2017.4
9	Cent S Univ	8	6.20%	2018.3
10	Yonsei Univ	7	5.43%	2017.7

究的未来发展趋势。

### (1) 基础设施系统韧性评估研究

尽管韧性存在不同定义，但是当评估基础设施系统韧性时，文献中的韧性指标几乎都是基于系统在灾害事件下的实际功能曲线以及在无灾害情形下的期望功能曲线而提出的。事件之前，系统正常运行，功能指标为 100%；事件发生时，可能存在一个故障产生与蔓延过程，直到功能指标降到最低值；事件之后，系统破坏状况被评估并逐步修复，恢复后的系统功能指标可能小于、等于或大于事件之前 100%。基于实际功能变化曲线与期望功能曲线，学者们提出了各种韧性指标以及相应的韧性评估方法。基础设施系统韧性评估的研究热点主要包括：面向多灾害的基础设施系统韧性评估，考虑系统关联性的基础设施系统韧性评估，基础设施系统韧性目标的设定，基础设施系统韧性评估模型的验证与测试系统的构建。

### (2) 基础设施系统韧性提升研究

定义、评估基础设施系统韧性的主要目的之一是为了研究如何提高系统的韧性。为了提升基础设施系统的韧性，许多国家的基础设施保护计划文件给出了一系列管理或政策方面的策略，比如优化防灾及恢复资源配置，制定灾害保险政策激励及灾后用地规划方案，促进不同系统之间的合作与信息共享，增强韧性意识与文化，提升领导力，丰富管理者应对大型灾害的经验、重视关联性等。对于工程技术类韧性提升策略，比如加固系统组件、调整系统结构、配置冗余系统等，在预算有限的情况下，韧性提升问题可以建模为一个多阶段动态优化问题。基础设施系统韧性提升的研究热点主要包括：基础设施系统的组织韧性提升，基于全生命周期的基础设施系统韧性提升，多阶段韧性提升优化模型的高效求解算法，韧性驱动的基础设施系统灾后恢复决策优化，考虑建筑群落功能相关性的耦合基础设施系统韧性提升。

### (3) 发展现状与未来发展趋势

美国国家科学基金资助了一系列基础设施系统韧性研究的项目，比如韧性且可持续的基础设施、韧性的关联基础设施系统与过程等；美国国家标准与技术研究院（NIST）于 2016 年发布了城市韧性规划导则，并资助 Colorado State University 成立了“基于风险的城市韧性规划”研究中心（美国 10 所高校参与），其中基础设施系统韧性是研究与规划的重点；美国应急管理司（FEMA）开发了 HAZUS 与 FEMA P58 软件，以分析美国不同城市基础设施系统应对洪水、飓风与地震灾害的风险，经济损失以及恢复时间。牛津大学负责的英国基础设施转型研究联盟研究了关联的基础设施系统应对洪水灾害的韧性提升措施；欧盟 FP7 资助的 SYNER-G 项目研究了基础设施系统应对地震灾害的脆弱性与韧性；欧盟联合研究中心开发了基础设施系统灾后恢复过程与韧性提升决策的软件。中国国家自然科学基金委员会于 2015 年发布英中联合基金：提升中国地震易发区域应对自然灾害的韧性；2017 年发布了应急项目：安全韧性雄安新区构建的理论方法与策略研究；2018 年在哈尔滨召开了第 204 期双清论坛，讨论了抗震韧性城市建设的关键前沿基础科学问题，其中基础设施系统韧性是讨论的重点。综合当前研究现状，未来的发展趋势主要包括：多灾害（尤其是涉及气候变化的多灾害）耦合作用下的韧性评估与提升、系统之间以及系统与环境之间的关联性建模与验证、大规模系统韧性提升优化的高效求解算法等。

“基础设施系统韧性”工程研究前沿中的核心论文数量排名前 3 的国家/地区分别为美国、中国、英国（见表 1.2.9），篇均被引频次排名前 3 的国家/地区分别为丹麦、以色列、英国（见表 1.2.9）。从核心论文产出国家/地区合作网络图（见图 1.2.5）来看，在排名前 10 的国家/地区中，美国、中国、英国、澳大利亚和希腊之间的合作较多。

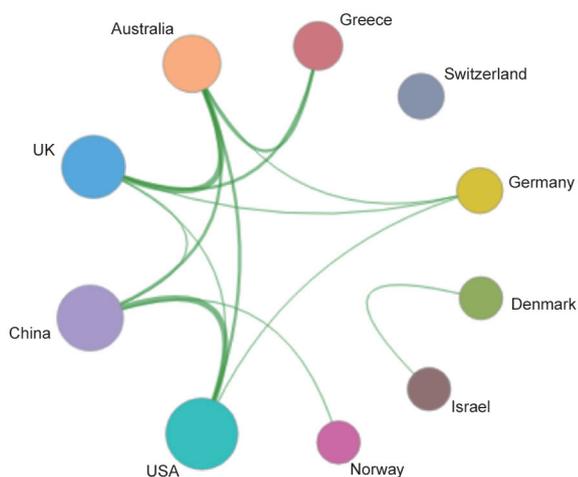


图 1.2.5 “基础设施系统韧性”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

核心论文数量排名前3的机构分别为曼彻斯特大学 (Univ Manchester)、墨尔本大学 (Univ Melbourne)、香港城市大学 (City Univ Hong Kong) (见表 1.2.10), 从核心论文产出机构合作网络图 (见图 1.2.6) 来看, 在核心论文发表数量排名前10的机构中, 曼彻斯特大学、墨尔本大学、雅典国立理工大学和纽卡斯尔大学之间的合作较多。

根据表 1.2.11 可以看出, 中国的施引核心论文数量排名第1, 处于领跑地位。同时根据表 1.2.12 可以看出, 处于领跑前沿的机构是上海交通大学和清华大学。

表 1.2.9 “基础设施系统韧性”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	USA	11	39.29%	282	40.81%	25.64
2	China	9	32.14%	230	33.29%	25.56
3	UK	8	28.57%	229	33.14%	28.63
4	Australia	6	21.43%	167	24.17%	27.83
5	Greece	3	10.71%	68	9.84%	22.67
6	Switzerland	2	7.14%	52	7.53%	26.00
7	Germany	2	7.14%	42	6.08%	21.00
8	Denmark	1	3.57%	38	5.50%	38.00
9	Israel	1	3.57%	38	5.50%	38.00
10	Norway	1	3.57%	28	4.05%	28.00

表 1.2.10 “基础设施系统韧性”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	Univ Manchester	4	14.29%	121	17.51%	30.25
2	Univ Melbourne	3	10.71%	86	12.45%	28.67
3	City Univ Hong Kong	3	10.71%	59	8.54%	19.67
4	Lehigh Univ	2	7.14%	64	9.26%	32.00
5	Newcastle Univ	2	7.14%	57	8.25%	28.50
6	Natl Tech Univ Athens	2	7.14%	53	7.67%	26.50
7	Huazhong Univ Sci & Technol	2	7.14%	27	3.91%	13.50
8	Univ Michigan	1	3.57%	69	9.99%	69.00
9	Univ Bath	1	3.57%	44	6.37%	44.00
10	Xi'an Jiaotong Univ	1	3.57%	44	6.37%	44.00

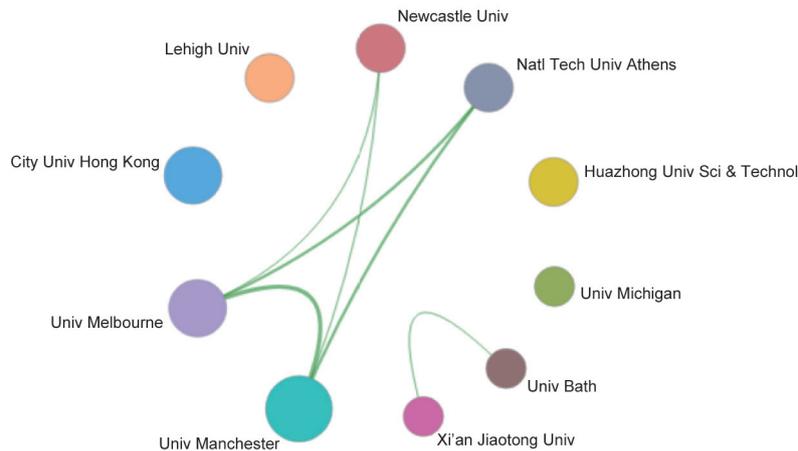


图 1.2.6 “基础设施系统韧性”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “基础设施系统韧性”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	191	31.41%	2018.4
2	USA	166	27.30%	2018.3
3	UK	49	8.06%	2018.5
4	Australia	43	7.07%	2018.3
5	Italy	41	6.74%	2018.3
6	Germany	26	4.28%	2018.2
7	Iran	23	3.78%	2018.3
8	France	20	3.29%	2018.2
9	Spain	18	2.96%	2018.5
10	South Korea	16	2.63%	2018.3

表 1.2.12 “基础设施系统韧性”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	Shanghai Jiao Tong Univ	22	17.60%	2018.2
2	Tsinghua Univ	14	11.20%	2018.4
3	RMIT Univ	12	9.60%	2018.3
4	Swinburne Univ Technol	12	9.60%	2018.0
5	Hong Kong Polytech Univ	10	8.00%	2018.2
6	Univ Hong Kong	10	8.00%	2018.6
7	Huazhong Univ Sci & Technol	10	8.00%	2018.0
8	City Univ Hong Kong	9	7.20%	2018.1
9	Univ Calif Berkeley	9	7.20%	2018.6
10	Lehigh Univ	9	7.20%	2018.0

## 2 工程开发前沿

### 2.1 Top 10 工程开发前沿及发展态势

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，分别是面向工程管理的可视化技术、面向工程安全的预警技术与方法、面向工程管理的物联网技术开发、智慧物流、风险评估与管理信息系统、车辆信息与资源共享系统、智能医疗健康管理、基于云计算的集成管理方法与技术、基于可穿戴设备的管理方法和技术、面向智能制造的质量工程技术。其核心专利情况如表 2.1.1 和表 2.1.2 所示。

这 10 个工程开发前沿集中包含了机械、运输、医学、建筑、电子等众多学科。其中面向工程管理的可视化技术、面向工程安全的预警技术与方法、面向工程管理的物联网技术开发为重点解读的前沿，后文将详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

#### (1) 面向工程管理的可视化技术

可视化技术是指以计算机图像技术为基础，通过计算机生成对人体视觉刺激的图形，以便人们接受、理解原始数据、信息的技术方法。目前，可视化技术展示出了广阔的应用前景，可以将其用于工程安全、进度管理、人机交互等方面。随着深度学

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	面向工程管理的可视化技术	14	80	5.71	2014.9
2	面向工程安全的预警技术与方法	16	59	3.69	2015.3
3	面向工程管理的物联网技术开发	17	55	3.24	2015.5
4	智慧物流	26	118	4.54	2014.9
5	风险评估与管理信息系统	22	164	7.45	2014.2
6	车辆信息与资源共享系统	11	36	3.27	2015.6
7	智能医疗健康管理	23	174	7.57	2014.7
8	基于云计算的集成管理方法与技术	31	189	6.10	2014.8
9	基于可穿戴设备的管理方法和技术	6	46	7.67	2015.2
10	面向智能制造的质量工程技术	26	98	3.77	2014.9

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	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	面向工程管理的可视化技术	0	6	4	4	0	0
2	面向工程安全的预警技术与方法	5	0	0	8	3	0
3	面向工程管理的物联网技术开发	0	3	5	6	3	0
4	智慧物流	2	8	8	8	0	0
5	风险评估与管理信息系统	6	10	1	5	0	0
6	车辆信息与资源共享系统	1	1	3	3	2	1
7	智能医疗健康管理	2	7	11	1	2	0
8	基于云计算的集成管理方法与技术	5	8	9	7	2	0
9	基于可穿戴设备的管理方法和技术	0	1	3	2	0	0
10	面向智能制造的质量工程技术	2	8	8	8	0	0

习等人工智能技术的兴起，使得可视化技术的研究与应用成为新兴学术研究热点，并被认为是又一个革命性的信息技术。但是，在实际工程管理应用中，工程数据类型多源异构、数据量大且信息碎片化等，因此无法充分发挥可视化技术服务于工程管理的优点。制约可视化技术在工程管理应用的一个关键瓶颈是可拓展性问题。并行计算和深度学习、5G、物联网等人工智能技术能够更准确、更高效、更智能地感知、计算和分析海量工程大数据，以支持实时的可视化与交互操作。因此，未来如何将大规模并行计算方法、超级计算机和人工智能技术结合，使得可视化系统更加智能化，以及如何将当前有价值的可视化方法与人机交互技术提升和扩展到工程管理领域，将是未来研究的两大发展趋势。

### （2）面向工程安全的预警技术与方法

工程涉及建设工程、工业工程、矿山工程、交通工程、环境工程等，而工程安全则是各类工程活动的基本前提和保障。目前，工程安全问题依然严峻，也正得到各工程行业专业人士和管理者的高度关注。针对如何提升工程安全水平，传统工程安全管理以安全培训、标准化流程作业、现场巡察与监督等方式进行。尽管这在某种程度上预防了安全事故的发生，提高了安全管理水平，但安全成效并不显著。新兴信息技术和数据分析技术的快速发展为工程安全问题解决提供了新的思考方向，集成物联网、传感器、云计算、可视化、机器视觉、大数据等技术的工程安全管控方法、技术与装置正在不断涌现。然而，为了有效管控工程安全问题，一方面要考虑现场安全监测与预警的实时性，另一方面要考虑支撑安全管理决策的数据获得性。因此，未来工程安全管控既需要开发并融合多种信息技术，提高安全预警的实时性和有效性，又需要开发适用的工程数据获取技术，以支撑管理者对安全管理的长效决策，从而形成系统有效的工程安全管控方案。

### （3）面向工程管理的物联网技术开发

物联网（Internet of Things）技术是通过一系

列的信息传感设备，按照约定的相关数字协议，将一切有关物品与互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现智能识别、定位、跟踪、监控和管理的一种互联网技术。物联网技术在医药物流、智能农业、车辆综合管理、钢铁仓储等领域中得到广泛运用。面向工程管理的物联网技术需适应工地复杂多样环境和工程要素动态变化的要求，能处理数量种类繁多的传感器和巨量的通信数据。从工程物联网技术架构看：基于 EPC global 标准、基于泛在传感网（USN）和基于 M2M 物联网三种主流架构方式已经比较成熟。其关键技术构成包括：智能感知技术、高可靠安全传输技术、综合应用技术和公共技术。系统开发的核心模块包括：射频通信模块、网络传输模块、存储模块、数据分析模块等。

面向工程管理的物联网技术开发主要解决了工程信息的采集方式和信息传输方式。通过 RFID 标签、传感设备、二维码、视频监控等感知技术，将工程施工现场的材料、设备和人员信息采集并传输到信息系统后台，实现对监控对象的基本信息、位置信息、运输状态信息跟踪。国内外工程物联网在桥梁、超高层结构健康监测、地铁工程施工人员定位、工程环境监控、物料计划及跟踪、施工机械设备运行动态监控等方面均有成功案例。物联网技术开发前沿方面涉及：巨量感知数据压缩技术、三维视频智能分析技术、物联网与 BIM 集成技术、基于物联网的大数据分析技术、物联网与 5G 移动通信技术等。

### （4）智慧物流

在智慧物流领域，管理者面对着庞大的物流运输网络和复杂的业务流程，各个物流活动都通过互联网或物联网紧密相连，部分物流操作已实现高度的自动化，管理者做决策必须依靠海量的数据和智能的优化算法。物流企业集中度越来越高，头部物流企业的规模越来越大，并且业务的种类、运输的模式越来越多样化，这必然导致企业的物流运输网络变得越来越庞大，业务流程和信息系统变得越来

越复杂。物流活动已无法离开互联网，并且开始逐渐向物联网发展，即将到来的5G也势必会融入到物流企业的经营活动中去。随着智能电话的普及，图像、视频采集设备及各种类型传感器的大规模应用，与物流相关的数据在近年内呈爆炸式地增长，如何挖掘这些数据潜在的价值是当前的研究热点。许多物流企业已经开始使用工业机器人（包括无人机、无人车）取代工人来执行分拣、包装、搬运及派送等操作，如何设计、部署及科学地使用这些自动化设备也是目前研究前沿。依靠工人的经验来做决策早已不适用于现代物流企业了，传统的物流优化技术也不适应智慧物流的新环境，因此我们必须研究数据驱动的智能优化技术来武装企业的决策大脑，在需求预测、网络设计、运输规划、库存管理、仓库运作、人员排班等方面研究出一系列的新理论和新方法。

### （5）风险评估与管理信息系统

风险评估与管理信息系统是指利用各类风险评估方法，对采集的基础数据进行存储、分析、识别和评估风险，进而实现风险控制的管理信息系统。其主要功能模块包括：数据采集模块、储存模块、风险分析处理模块和 risk 预警 - 控制模块。从系统设计层次结构上看一般分为：基础设施服务层、数据服务层、支持服务层、应用程序服务层和用户层。系统运作过程一般包括：采用传统的数据录入或硬件传感器采样形式进行数据收集工作，并进行结构化/半结构化储存，再调用风险评估算法对数据进行分析处理，评估风险发生概率并划分风险等级，最后提出针对性的解决措施并将相关信息推送给管理者。目前在化工生产、供水、发电、机器设备管理、医疗资源分配、商业交易等方面有着广泛的应用。

在工程管理领域，面向工程全寿命周期的风险评估与管理一直是研究的重点。特别对于建筑施工现场的安全风险评估与管理，研究热点转向现场监测数据的实时自动采集、监控视频图像的智能解析，借助后台的风险评估规则（包含发生概率阈值、风

险分级规则等），对安全风险进行实时感知和评价，及时的进行风险预警和控制。目前主流的定量分析方法包括：失效模式与后果分析（FMEA）、危险与可操作性分析（HAZOP）、事故树风险分析法（FTA）、改进区间 AHP 和多因素权重矩阵分析法等。未来的风险评估与管理系统将整合工程物联网、云服务平台、工程大数据、数据融合、数据挖掘方法、群体智能算法等，向集成化、数字化和智能化发展。

### （6）车辆信息与资源共享系统

车辆信息与资源共享系统是指参与车辆共享的主体通过各种协调机制，实现信息与资源的有效流动，以满足需求方对车辆的稀缺性，实现车辆共享的一种资源利用方式。车辆信息与资源共享系统提供了一种新的出行方式，在交通拥堵问题严重影响人们生活质量的现阶段，展示出了广阔的应用场景，可缓解交通拥堵给城市出行带来的不便，降低用户出行成本。作为一种新的资源共享理念，车辆信息与资源共享系统的研究与开发已经进入快速发展阶段，世界各国纷纷进行相关装置研发和技术更新。该项技术至少包括一个共享单元和一个送达单元，它们之间被相互可通信地连接。共享单元包括一个共享策略生成模块和一个选择模块，送达单元包括一个送达模块，它们之间依据一定的规则进行通信。制约车辆信息与资源共享系统发展和广泛应用的关键技术是接受预约请求过程中的车辆分配优化算法，该优化算法常依托于一个预定处理器执行，其目的是快速向用户呈现预约结果，降低车辆共享服务的操作成本。高效率的车辆信息与资源分配优化算法是未来实现车辆共享的基础，不仅可以降低系统运行成本，更可以提高用户满意度，所以是促进该方向发展最为方便和可行的途径。

### （7）智能医疗健康管理

随着第三次卫生革命到来，医疗健康管理服务已经成为卫生系统的以健康为中心的主导策略。所谓医疗健康管理是指对个体及人群的影响健康因

素及作用过程和健康结果进行全生命周期、全流程和全方位的干预管理过程，旨在提升个体和群体的健康水平和生命质量。随着互联网技术的发展，医疗健康管理服务不再局限于医患面对面的交流，也不再受时间、地域、方式的限制，服务对象完全可以通过信息化和智能化技术及时了解健康状况并获得相应的健康指导及干预。目前，区域健康大数据平台正在逐步建立，在循证医学指导下，通过深度学习和机器学习，人工智能在医学影像、临床决策支持、语音识别、病理学等众多领域取得了初步成功，也使得从线上到线下（Online-to-Offline, O2O）的智能医疗健康管理成为医疗卫生服务发展的新趋势。但目前智能医疗健康管理还处于初级阶段，线上与线下缺乏有机结合，也缺乏根据服务对象的实际情况及时调整健康管理方案的能力，导致健康管理效果不理想。随着 5G 技术加持，可穿戴健康设备、远程诊疗、远程影像等智能医疗元素加入，将进一步催生智能医疗健康管理走向成熟。

#### （8）基于云计算的集成管理方法与技术

云计算是一种通过网络统一组织和灵活调用各种信息和通信技术（ICT）信息资源，实现大规模计算的信息处理方式，通过这种方式共享的软硬件资源和信息可以按需提供给用户的计算机和其他设备。目前已形成存储云、医疗云、金融云、教育云等，在金融、政务、工业、医疗等领域展示出了极其广阔的应用前景。云计算具有虚拟性、可扩展性、高灵活性、高可靠性和高性价比等特点，在不久的将来，云计算将与人工智能融合，形成“ABC”的“人工智能+大数据+云计算”模式，布局到多个行业的多个应用场景之中。

对各种数据、资源实施有效整合是云计算动态资源管理的基本功能，而云数据管理技术则是实现云计算的关键。基于云计算的数据管理技术，主要包括 GFS 技术（文件数据管理）、MapReduce 技术（集群并行运算）、BigTable 技术（数据管理系统）、

Dynamo 技术（数据存储平台），通过云端共享数据资源，提供不同资源不同层次的服务，涉及基础设施即服务（IaaS）、软件即服务（SaaS）、平台即服务（PaaS），其中 PaaS 将是云计算的终极目标。在云数据集成管理方面，云计算具有强大的分布式存储与运算能力，可对海量数据进行特定的检索和分析，通过大规模数据集成管理，实现各类异构数据、服务资源的有效整合，为虚拟化计算资源、互联网构建应用程序、商托管和管理软件应用程序提供服务。

#### （9）基于可穿戴设备的管理方法和技术

可穿戴设备主要是指具有局部计算功能和可穿戴特性的便携式设备，能够对人体的生理状况、运动模式及所处环境进行感知，通过与各类终端（手机、云端等）的数据交互，可以实现持续性的个人健康监测与管理、区域性的居民健康与生活资讯管理等。目前，可穿戴设备的发展迅速，产品形态多样（手表、眼镜、衣服、配饰等），交互方式丰富（触摸、手势、语音等），已被市场广泛认同。可穿戴设备在给我们的生活带来极大转变的同时，新的问题和挑战也逐步显现。可穿戴设备搜集并记录了大量的个人生理、日常活动和周边环境的数据，针对这些数据的智能化处理、整合与管理方法，一方面要能够及时地、动态地向佩戴者提供准确的健康信息，包括有效的运动锻炼方法、预先的紧急状态警报等，另一方面要避免对佩戴者生活偏好、行为习惯等个人隐私信息的泄露和侵犯。伴随可穿戴设备种类和数量的井喷，增强可穿戴设备与智能终端、中央服务器之间的安全通信，提高可穿戴设备与佩戴者的自然交互，发展基于可穿戴设备人性化、智能化的管理方法和技术，提供多场景、多层次服务体验，对实现提升全民健康状况、提高人民生活水平都具有重大意义。

#### （10）面向智能制造的质量工程技术

随着各种机器人、智能传感器、嵌入式芯片、边缘计算设备等的广泛应用，以及互联网/物联网、

大数据、人工智能、云计算、3D 打印等技术的飞速发展，制造系统正逐步向智能化演变。智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术的深度融合，能够实现对人、机、物的实时状态的全面感知，对海量异构的工业现场数据进行智能分析并处理，推动制造业向基于工业大数据分析与应用智能化的产品需求、设计、制造、销售及服务的转型。许多建立在传统数理统计基础上的质量管控方法不适用于数据实时采集（高维度、高频率）和高度定制（小批量甚至单件）的智能制造系统。面向智能制造的质量工程研究旨在解决智能制造环境下产品设计、过程监控和制造服务中的质量管控问题。重点技术方向包括基于智能传感技术的产品使用和消费者偏好大数据的采集、用户画像；面向个性化需求的产品和工艺集成设计质量保证模式与方法；基于实时、高维、异构大数据融合的工艺参数优化技术；面向高频、高维和小批量的过程质量监控技术；基于生产过程参数大数据、产品质量大数据和设备状态大数据的质量诊断技术；基于新一代信息技术（特别是区块链）的供应链质量溯源技术；装备产品服役过程中基于大数据的运行状态监控、远程故障诊断和设备预防管理技术等。展望未来，面向智能制造的质量工程技术要与现代信息技术和大数据技术相融合，统计学习方法将成为智能制造质量工程技术的主要工具。

## 2.2 Top3 工程开发前沿重点解读

### 2.2.1 面向工程管理的可视化技术

“可视化”源于英文“Visualization”，其词义是：“将不可见的、不能表达的或抽象的一些东西、转变为可以看到的或者大脑可以想象的图形图像”。1986年，自科学计算可视化（Visualization in Scientific Computing）的概念被提出，可视化技术被列为一项独立的重大计算机技术。可视化技术是一门交叉学科，涵盖了众多研究领域，如计算机

图形学、计算机视觉、人机交互等技术。可视化技术使隐含于数据中不可见的现象成为可见，更好的分析、理解、挖掘数据中的规律。深度学习等人工智能技术的兴起，促进了可视化技术的发展，使得可视化技术在工程管理中的研究与应用成为新兴学术研究热点，并被认为是用于工程管理的又一个革命性信息技术。

在实际工程管理应用中，工程数据类型多源异构、数据量大且信息碎片化等，因此无法充分发挥可视化技术的优点服务于工程管理。制约可视化技术在工程管理应用的一个关键瓶颈是可拓展性问题。从专利分析来看，面向工程管理可视化技术主要包括：计算机视觉、增强现实与虚拟现实、建筑信息模型（Building Information Model, BIM）、地理信息系统（Geographic Information System, GIS）、图可视化技术。

#### （1）计算机视觉

计算机视觉是一个跨学科的科学领域，主要解决如何利用计算模型从图像或多维数据中获得高层次信息建立人工智能系统。从工程角度来看，计算机视觉主要为了自动完成人类视觉系统可以完成的任务。虽然机器视觉能够自动地检测和理解图片中信息用于工程管理，例如，施工现场工人不安全行为识别等，但存在实时性低、准确率低等问题，不能满足复杂、大场景下的工程需求。并行计算、深度学习等人工智能技术能够更准确、更高效、更智能地分析和处理图形中数据，使得机器视觉更好的服务于工程管理。

#### （2）增强现实（AR）与虚拟现实（VR）

AR指通过电脑技术，将虚拟的信息应用到真实世界，真实的环境和虚拟的物体实时地叠加到了同一个画面或空间。VR是一种计算机生成的人工模拟过程或一些现实生活情境或环境的再现，旨在通过赋予用户体验模拟现实的感觉来沉浸用户。目前，关于AR和VR在实际工程管理中的应用还处于初期阶段，这主要是由于在实际应用中存在众多

挑战，例如，VR 与 AR 使用不方便，无法实时处理大量数据，容易受到外界环境干扰等。深度学习、5G 等人工智能技术与 VR 和 AR 结合，有望实现数据的实时采集与分析。

### （3）建筑信息模型（BIM）

建筑信息模型是一种数字化三维建筑物信息模型，包含了建筑物从设计、施工、运维各个阶段的信息，且 BIM 具有计算、协同、共享和可视化等功能，可以通过数字化技术来实现建筑信息的集成。虽然 BIM 能推动建筑业从粗放式管理到精细化管理模式转变，但是，当前的 BIM 软件适用性不强，计算能力不足，且没有实现全寿命周期的无缝管理，这是未来需要重点关注和解决的问题。

### （4）地理信息系统（GIS）

GIS 是计算机科学、地理学、测量学、地图学等多学科交叉的技术，目前还没有统一的定义。但是，实际工程管理中涉及的信息具有海量异构等大数据特点，为现在的地理信息系统带来了新的挑战。

### （5）图可视化技术

图可视化技术是指应用图形理论存储实体之间的关系信息，经典的是基于节点和边的可视化。对于海量工程大数据，如何在有限的空间中对节点和边进行可视化，将是需要解决的难点和重点。除了对静态的网络拓扑关系进行可视化，工程大数据往往具有时间动态演化，因此，如何对动态网络的特征进行可视化，也是未来需要重点研究和关注的内容。

从发表专利的数量来看，专利数量排名前二

的国家/地区分别为：中国和美国（见表 2.2.1）。平均被引数排名前三的国家/地区分别是：美国、韩国、中国（见表 2.2.1）。从专利产出国家/地区的合作网络图（见图 2.2.1）来看，还没有构成较为紧密的合作网络。专利数量排名前二的机构分别为：国家电网有限公司（SGCC）、国际商用机器公司（IBMC）（见表 2.2.2），从专利产出机构的合作网络图（见图 2.2.2）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，江西九江电网（Jiangxi Jiujiang Power Supply Co）与国家电网有限公司（State Grid Corporation of China）出现了合作，中国设计集团有限公司（China Design Group Co., Ltd.）与江苏交通规划设计院（Jiangsu Transportation Planning & Design）有合作等。

## 2.2.2 面向工程安全的预警技术与方法

工程作为人类认识世界、改造世界的基础活动，从古至今一直不断衍化和深化。在此过程中，安全问题一直伴随着工程而存在。安全监测与预警是预防工程安全事故的有效手段，即通过安全隐患或事故成因的识别、状态的分析和安全程度的判别，及时为工程管理者提供安全预警信息，以有效降低安全事故发生的可能性或避免事故发生。然而，近年来随着工程规模的增大和复杂程度的提高，工程安全问题尤其突出。以建设工程为例，近 5 年仅房屋市政工程生产安全事故数就达 3000 起，事故死亡人数达 3600 人，且整体呈上升趋势。这不仅带来了巨大的经济损失，也导致了巨大的社会损失。在

表 2.2.1 “面向工程管理的可视化技术”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	6	42.86%	34	42.50%	5.67
2	USA	5	35.71%	34	42.50%	6.80
3	South Korea	1	7.14%	6	7.50%	6.00
4	Denmark	1	7.14%	4	5.00%	4.00
5	Japan	1	7.14%	2	2.50%	2.00

表 2.2.2 “面向工程管理可视化技术”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	State Grid Corporation of China	3	21.43%	18	22.50%	6.0
2	International Business Machines Machines Corporation	2	14.29%	11	13.75%	5.5
3	Boeing Co. (THE)	1	7.14%	13	16.25%	13.0
4	Jiangxi Jiujiang Power Supply Co.	1	7.14%	9	11.25%	9.0
5	China Design Group Co., Ltd.	1	7.14%	8	10.00%	8.0
6	Jiangsu Transportation Planning & Design	1	7.14%	8	10.00%	8.0
7	Purepredictive Inc.	1	7.14%	8	10.00%	8.0
8	Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology	1	7.14%	6	7.50%	6.0
9	Changzhou Agriculture and Aquatic Products Quality Supervision and Inspection Testing Center	1	7.14%	4	5.00%	4.0
10	Changzhou Rongrui Information Automation Co., Ltd.	1	7.14%	4	5.00%	4.0

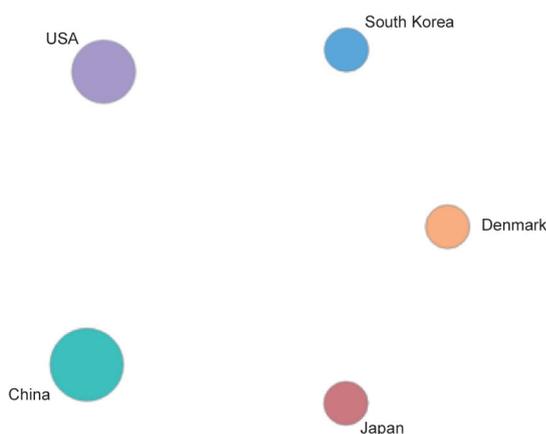


图 2.2.1 “面向工程管理的可视化技术”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

国家安全发展战略的大背景下，需要结合各类工程的特点进一步研发适用的工程安全预警方法与技术，提高工程安全的整体水平。

当前，面向工程安全的预警方法与技术主要以新兴信息技术为支撑，结合具体工程活动的独特性形成相应的安全预警方法、技术或装置。主要包括：基于物联网或传感器的安全预警技术、基于机器视觉的安全预警技术和基于移动终端的安全预警技术等。基于物联网或传感器的安全预警技术是通过集成应用各类传感器和网络设施（有线或无线）实时

自动收集、传输工程安全相关数据，并结合数据分析方法和预警机制进行安全风险实时分析、判别与预警的技术。基于机器视觉的安全预警技术是采用图像或视频分析方法或技术对工程安全相关图像或视频进行快速自动处理与安全要素提取，进而对安全风险进行判别与预警的技术。而基于移动终端的安全预警技术是通过人工的方式获取工程安全相关数据，识别并上报工程存在的安全隐患，进而进行安全风险综合判别与预警的技术。考虑到工程环境的差异性和各技术的优劣势，在工程实践中通常集成应用这些安全预警技术。

#### （1）基于物联网或传感器的安全预警技术

基于物联网或传感器的安全预警技术涉及多类传感器，如温度、湿度、压力、气体、光、声、应力、应变、位移、位置、身份标识等的传感器，其中常用的位置传感器包括 UWB、RFID、Beacon、GPS 等，身份标识传感器包括 RFID、UWB、Beacon、NFC 二维码等。常用于环境工程安全监测与预警（如空气质量、地质环境等）、建设工程安全监测与预警（如深基坑、主体结构、临边洞口等）、交通工程安全监测与预警（如危险物品运输车辆管理等）、矿山工程安全监测与预警（如

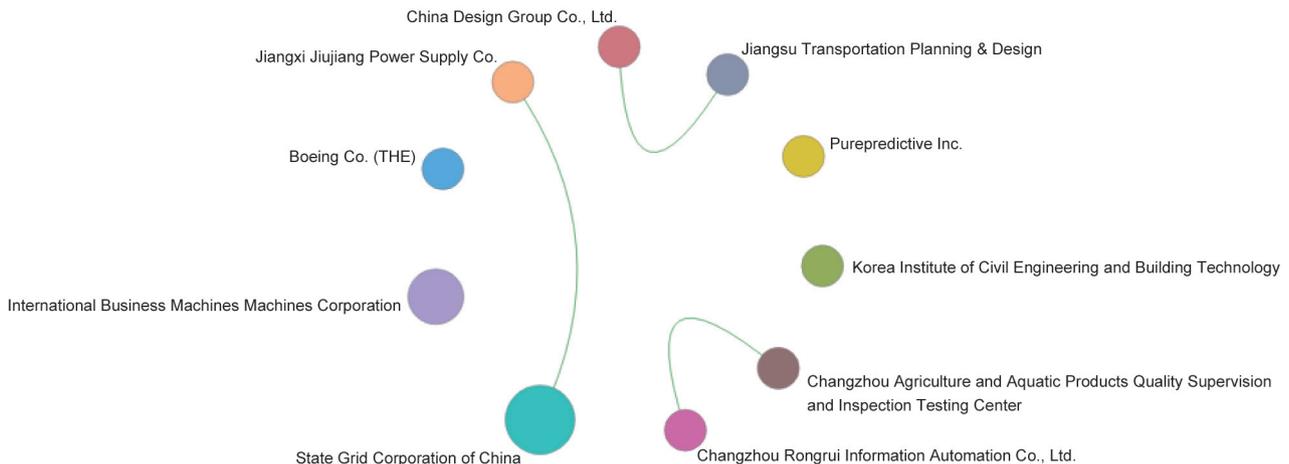


图 2.2.2 “面向工程管理的可视化技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

危险地质、危险气体等)等。然而,由于工程环境的复杂性,传感器信号传输易受现场环境影响,致使其精度波动较大。

### (2) 基于机器视觉的安全预警技术

基于机器视觉的安全预警技术依赖于工程现场的视像采集设备,如相机、3D扫描仪、雷达、无人机、卫星、航拍设备等,以及图像处理技术,如背景减除法、滑动检测窗口、梯度直方图、支持向量机、K最近邻法、CNN、LSTM等。常用于建设工程安全监测与预警(如工人行为、危险区域等)、环境工程安全监测与预警(如山体滑坡、洪水等)、交通工程安全监测与预警(如货物安全检测等)等。然而,该类技术受现场光线、视线、动态性等影响较大,同时还受限于算法和计算设备的性能。

### (3) 基于移动终端的安全预警技术

基于移动终端的安全预警技术得益于移动终端设备(如智能手机、智能平板、智能手环等)以及微信、APP等小程序开发技术的快速发展。常用于建设工程安全监测与预警(如现场安全隐患或风险因素等)、环境工程安全监测与预警(如自然灾害、人为灾害等)、矿山工程安全监测与预警(如现场安全隐患或风险因素等)等。该类技术适用面较广,但受限于人工检测与上报相关数据,致使数据覆盖面较窄或不全面。

国内外在工程安全预警方法与技术研发方面呈现以下几个趋势。支撑技术多元化。随着传感器技术、图像处理技术、通信技术等的不断完善与性能提升,安全预警支撑技术正趋于多元化,而由于各技术适用环境的差异性,预警技术正趋于集成化。

预警方式自动化。随着数据自动获取、传输与处理技术能力的提升,安全判别与预警正趋于自动化。

应用领域普及化。随着安全预警技术能力(包括精度)的提升,工程应用领域正得到不断深化。此外,随着安全数据的不断积累和大数据分析技术的持续发展,工程安全管理决策正由主观决策趋于数据支持决策。

“面向工程安全的预警技术与方法”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、美国、韩国,其中中国产出的核心专利数量为10篇,处于绝对领跑地位(见表2.2.3)。我国在该领域产出的核心专利最多的机构为中国扬子电力有限公司(China Yangtze Power Co., Ltd.),公开的专利有2篇,平均被引数为8(见表2.2.4)。

其中,中国扬子电力有限公司和清华大学之间出现了合作。从专利产出的合作网络图(见图2.2.3)和专利产出机构的合作网络图(见图2.2.4)来看,目前还没有构成较为紧密的合作网络。

表 2.2.3 “面向工程安全的预警技术与方法” 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	10	16.95%	33	55.93%	3.3
2	USA	2	3.39%	13	22.03%	6.5
3	South Korea	2	3.39%	10	16.95%	5.0
4	France	1	1.69%	1	1.69%	1.0
5	Japan	1	1.69%	2	3.39%	2.0

表 2.2.4 “面向工程安全的预警技术与方法” 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	China Yangtze Power Co., Ltd.	2	12.50%	16	27.12%	8
2	Jubix	1	6.25%	9	15.25%	9
3	Fluor Corp.	1	6.25%	9	15.25%	9
4	Tsinghua University	1	6.25%	6	10.17%	6
5	Wuhan Shuzhen Information Integration	1	6.25%	5	8.47%	5
6	Verizon Communications Inc.	1	6.25%	4	6.78%	4
7	Chongqing Hehang Internet Things Technol	1	6.25%	3	5.08%	3
8	Nanjing Xuean Network Technology Co., Ltd.	1	6.25%	3	5.08%	3
9	NTT Docomo Inc.	1	6.25%	2	3.39%	2
10	Hangzhou Hikvision Digital Technology Co., Ltd.	1	6.25%	2	3.39%	2

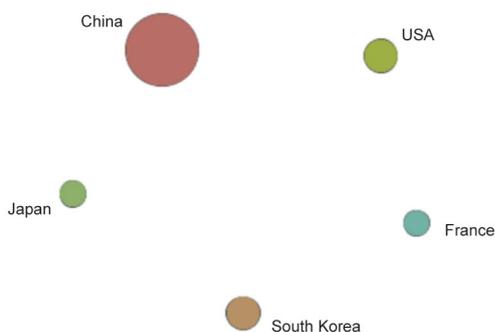


图 2.2.3 “面向工程安全的预警技术与方法” 工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

### 2.2.3 面向工程管理的物联网技术开发

物联网 (Internet of Things) 技术是通过一系列的信息传感设备, 按照约定的相关数字协议, 将一切有关物品与互联网连接起来, 进行信息交换和通信, 以实现智能识别、定位、跟踪、监控和管理的一种互联网技术。将面向工程管理的物联网定义

为工程物联网, 以区别于应用于制造业的工业物联网。工程物联网技术需适应工地复杂多样环境和工程要素的动态变化的要求, 能处理数量种类繁多的传感器和巨量的通信数据。工程物联网技术体系架构较成熟, 关键解决数据感知、传输及管理应用问题。国内外面向工程管理的物联网技术开发均有成功的案例, 未来的技术向着集成化、标准化、智能化发展。

工程物联网技术开发涉及现代传感器技术、嵌入式计算机技术、分布式信息处理技术、现代网络及无线通信技术等多个领域。关键技术体系可分为四个层次: 感知技术层、网络技术层、应用技术层和公共技术层。

#### (1) 智能感知技术

工程物联网主要是利用射频识别 (RFID 标签)、二维码、各类传感器、视频监控等感知、捕获、测

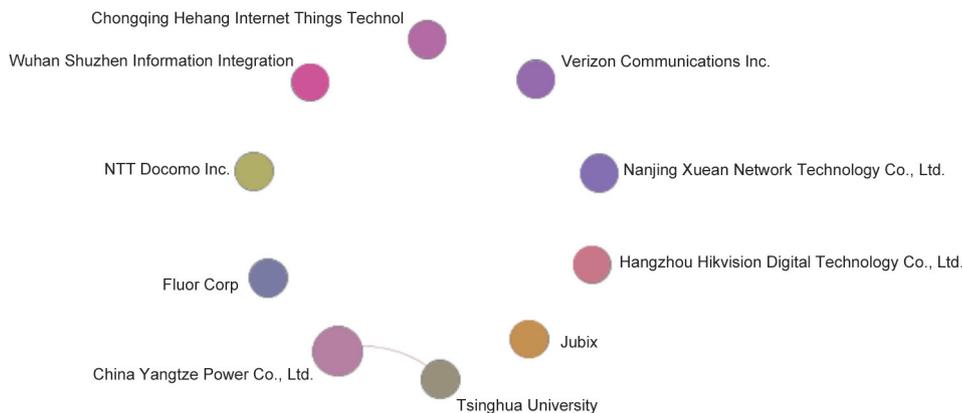


图 2.2.4 “面向工程安全的预警技术与方法”工程开发前沿的主要机构间合作网络

量技术实时地对监控对象进行信息采集和获取。RFID 标签与 RFID 读写器间的通信一般封装为中间件供系统开发调用。复杂工程环境下传感器种类众多（包含应力、应变、温度、水位等），人员、材料、设备标识的 RFID 标签数量大，智能感知技术需解决传感器的供电、电磁屏蔽、巨量通信数据等问题。

### （2）高可靠的安全传输技术

该技术实现把感知信息无障碍、高可靠性、高安全性地进行短距离传输、自组织 LAN 网和广域网传输。工程物联网把传感器网络与移动通信技术和互联网技术相融合。复杂工程环境下为提高数据传输效率，需根据传感器的类型和管理要求，设置不同的采样频率和传输时间间隔，对于人员、设备的移动轨迹监控，同样需要满足数据采集、传输和监控指令反馈的技术要求。

### （3）综合应用技术

工程物联网应用可分为监控型（桥梁健康状况监控）、查询型（人员身份识别）、控制型（设备移动轨迹控制）等。综合应用技术包含用于支撑跨行业、跨应用、跨系统之间的信息协同、共享、互通的通用技术，通过部署 ONS 服务器、PML 服务器和 EPS/IS 服务器建立一个应用支持平台子层，实现技术层隔离；在之上构筑应用服务子层面向智能交通、智能建造、智能物流，提供行业应用。

### （4）公共技术

公共技术包括数据解析、数据安全、网络管理和服务质量（QoS）等具有普遍意义的技术，这些技术应用于工程物联网各个技术层次。

物联网技术的概念起源于 1999 年美国麻省理工学院（MIT）的 Auto-ID 研究中心提出的将网络无线射频识别（RFID）技术应用到日常物品，从而实现智能化识别和管理。2005 年，国际电信联盟（ITU）正式提出了“物联网”的概念，并在《ITU Internet reports 2005——the Internet of things》报告中介绍了物联网的特征以及未来的机遇与挑战，表达了在未来物联网能够将任何时间和地点的任何物体联系起来，传感器技术、智能终端技术将会有深入的研究和发展空间。2008 年，IBM 提出“智慧地球”的概念，将传感器设备安装到物体上，从而普遍连接形成网络。2009 年欧盟委员会发布了物联网战略，介绍了 20 年物联网的发展趋势，同年，温家宝同志在视察微纳传感器工程技术研发中心并发表重要讲话，自此物联网技术在我国正式拉开了帷幕。物联网技术在医药物流、智能农业、车辆综合管理、钢铁仓储等领域中得到广泛运用。

工程物联网是数据感知、传输、分析和决策控制的关键性技术。工程物联网对工程建造过程中的各种工程要素（包括“人、机、料、法、

环、品” ) 实现泛在感知、互联及监控。国外工程物联网在建造领域应用方面具有较成熟的经验。例如：日本明石海峡大桥、法国米约大桥、挪威阿斯克桥等都建立了桥梁结构健康监测物联网系统；瑞士圣格达基线隧道构建了由 2600 km 电缆、20 万个传感器以及 7 万数据节点组成的自动监控物联网平台。

我国工程物联网在桥梁、超高层结构健康监测以及地铁工程施工中人员定位、工程环境监控等方面均有应用案例。特别是在建筑工程施工领域应用比较广泛。例如：对塔吊、电梯、脚手架等机械设备内部应力、振动频率、温度、变形等参量变化进行测量和传输，实现对施工机械设备的运行情况动态监控；通过构件上 RFID 标签信息读取，获得构件的位移、变形、裂缝等数值，利用 RFID 定位技术快速找到危险构件，及时进行加固、修复；利用 BIM 技术和工程物联网技术的结合，根据时间、部位、工序等维度进行统计，制定详细的物料采购计

划，并对物料批次标注 RFID 标签来控制物料的进出场时间和质量状况。

从工程物联网技术架构看：基于 EPC global 标准、基于泛在传感网 (USN) 和基于 M2M 物联网三种主流架构方式已经比较成熟。未来的物联网将会向几个重点方向发展：巨量感知数据压缩技术、三维视频智能分析技术、物联网与 BIM 集成技术、基于物联网的大数据分析技术、物联网与 5G 移动通信技术等。从我国工程物联网技术发展看：面向全寿命周期工程物联网集成技术；支持边缘计算和云计算协同的工程物联网体系架构设计理论；宽覆盖、超链接、低功耗、低成本组网技术等将成为今后的研究方向。

从发表专利的数量来看，中国处于领跑地位(见表 2.2.5)，主要产出机构的核心专利公开量均为 1 篇(见表 2.2.6)。此外，从图 2.2.5 和图 2.2.6 中可以看出，各国及各机构之间还未形成较为紧密的合作网络。

表 2.2.5 “面向工程管理的物联网技术开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

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	China	17	100%	55	100%	3.24

表 2.2.6 “面向工程管理的物联网技术开发”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	Beijing Qingda Tianyan View Control	1	5.88%	9	16.36%	9
2	Chongqing Shengxin Technology Co., Ltd.	1	5.88%	6	10.91%	6
3	Hefei Caixiang Information Technology Co.	1	5.88%	6	10.91%	6
4	Shanghai Renywell Technology Co., Ltd.	1	5.88%	5	9.09%	5
5	Guangzhou Baosteel Southern Trade Co., Ltd.	1	5.88%	4	7.27%	4
6	Qingdao Lianggu Wireless Technology Co.	1	5.88%	4	7.27%	4
7	Guizhou Normal University	1	5.88%	4	7.27%	4
8	Chengdu Gips Energy Technology Co., Ltd.	1	5.88%	3	5.45%	3
9	Chengdu Chuangshi Technology Co., Ltd.	1	5.88%	2	3.64%	2
10	Zhejiang China Tobacco Industrial Co., Ltd.	1	5.88%	2	3.64%	2

China

图 2.2.5 “面向工程管理的物联网技术开发”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络



图 2.2.6 “面向工程管理的物联网技术开发”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：

丁烈云 何继善 胡文瑞 向 巧

专家组成员：

丁烈云 何继善 胡文瑞 向 巧 陈晓红

曹耀峰 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 安 王基铭 王礼恒 王陇德 汪应洛

王玉普 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

丁进良 杜文莉 方东平 高自友 胡祥培

华中生 黄季焜 黄 伟 江志斌 李 恒

李永奎 李 政 刘晓君 骆汉宾 任 宏

唐加福 唐立新 王红卫 王慧敏 王孟钧

王先甲 王要武 魏一鸣 吴德胜 吴建军

吴启迪 杨 海 叶 强 曾赛星 周建平

工作组成员：

王红卫 骆汉宾 钟波涛 李 勇 贺 领

裘露婷 王晓波

办公组成员：

聂淑琴 常军乾 郑文江 穆智蕊 乔晓燕

执笔组成员：

丁烈云 王红卫 骆汉宾 钟波涛 李 恒

何 桢 郭红领 王 科 镇 璐 欧阳敏

叶堃晖 刘军安 林 瀚 李红波 余宏亮

秦 虎 郭 健 张永成 董 超 方伟立

吴海涛 贺 领 裘露婷 王晓波