

文章编号:1001-7372(2020)11-0101-24

道路基础设施数字化研究进展与展望

王建伟^{*1,2,3,4}, 高超^{1,2,3,4}, 董 是^{1,2,3,4}, 徐 晟^{1,2,3,5}, 袁长伟^{1,2,3,4},
张 驰^{1,2,3,6}, 黄泽滨^{1,2,3,4}, 卜杉杉^{1,2,3,4}, 常 青^{1,2,3,6}, 王 越^{1,2,3,6}

(1. 道路基础设施数字化教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通基础设施建设与管理数字化工程研究中心, 陕西 西安 710064; 3. “一带一路”沿线交通基础设施建设与管理数字化国际联合研究中心, 陕西 西安 710064; 4. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064; 5. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064; 6. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为进一步促进交通基础设施向数字化、网络化、智能化发展,采用文献研究法对道路基础设施数字化领域的研究进展和发展趋势进行分析。首先通过检索中国知网(CNKI)中文核心合集数据库和 Web of ScienceTM、IEEE 等英文数据库中与主题相关的文献(中文 229 篇,英文 2 395 篇),基于科学知识图谱对文献进行梳理与分析,并结合现有研究中的技术领域与工程应用场景,对道路基础设施数字化做出了定义。在此基础上进一步构建了道路基础设施数字化的技术架构,包括:感知获取层、集成处理层、业务应用层、标准与规范体系以及安全与管控体系;此外重点介绍了数字道路信息感知技术、数据管理与分析技术、全生命周期工程应用等关键技术的发展现状,进一步展望了未来技术发展的前景。最终通过梳理道路基础设施数字化现有研究存在的问题和不足,对其今后的发展做出展望。结果表明:道路基础设施数字化是由特定的检测与感知技术、数据传输与通讯网络、信息平台与安全系统构成,具有多元智能性。在路面信息的采集过程中,传感器在耐久性和实用性等方面存在的技术难题仍需进一步解决;物联网、地理信息系统、建筑信息模型、信息物理系统、数字孪生、大数据驱动在内的多种技术手段在道路基础设施性能监测和管理过程中具有广阔的应用前景。

关键词:交通工程;道路基础设施数字化;综述;技术体系;发展前景

中图分类号:U495 **文献标志码:**A

Current Status and Future Prospects of Existing Research on Digitalization of Highway Infrastructure

WANG Jian-wei^{*1,2,3,4}, GAO Chao^{1,2,3,4}, DONG Shi^{1,2,3,4}, XU Sheng^{1,2,3,5},
YUAN Chang-wei^{1,2,3,4}, ZHANG Chi^{1,2,3,6}, HUANG Ze-bin^{1,2,3,4},
BU Shan-shan^{1,2,3,4}, CHANG Qing^{1,2,3,6}, WANG Yue^{1,2,3,6}

(1. Engineering Research Center of Highway Infrastructure Digitalization, Ministry of Education, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Research Center of Digital Construction and Management for Transportation Infrastructure of Shaanxi Province, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. International Research Center of Digital Construction and Management for Transport Infrastructure Along the Belt and Road Initiative, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 4. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 5. School of Economic and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 6. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

收稿日期:2020-09-16

基金项目:国家重点研发项目(2017YFC0803906);国家自然科学基金青年项目(51708039);

陕西省自然科学研究计划项目(2020JM-248,2020JQ-360);中国博士后基金项目(2020M673526)

* 作者简介:王建伟(1965-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wjianwei@chd.edu.cn.

Abstract: For further promoting the highway transportation infrastructure to be digitalized, networked, and intelligent, the literature was searched in order to analyze the research progress and development trends in the field of highway infrastructure digitization. The literature related to the subject was firstly searched in the Chinese core collection database of CNKI, Web of ScienceTM, IEEE, and other English databases (229 articles in Chinese and 2 395 articles in English are found), then was sorted out and analyzed based on the Mapping Knowledge Domains, and highway infrastructure digitization was defined combined with the technical fields and engineering application scenarios in existing research. The technical frame of highway infrastructure digitalization was built on this basis, including the perception acquisition layer, integrated processing layer, business application layer, standard and regulatory system, and security and control system. The development status of key technologies such as digital road information perception technology, data management, and analysis technology, and full life cycle engineering applications was primarily discussed, along with the prospects for future technology development. Finally, the existing problems and shortcomings of the previous research on highway infrastructure digitalization were summarized and a prospect for its future development was proposed in the discussion. The results showed that the digitalization of highway infrastructure is composed of specific detection and perception technologies, data transmission and communication networks, information platforms and security systems, and has multiple intelligences. In the process of collecting road information, the technical problems of sensors in terms of durability and practicability still need to be further resolved. It is shown that technical methods including the Internet of Things (IOT), Geographic Information System (GIS), Building Information Models (BIM), Cyber-physical Systems (CPS), Digital Twin, and big Data-driven techniques, have broad application prospects in the process of highway infrastructure performance monitoring and management.

Keywords: traffic engineering; highway infrastructure digitalization; review; technical system; development prospect

Received 16 Sept. 2020

Funding: National Key Research and Development Project (2017YFC0803906); Youth Program of National Natural Science Foundation of China (51708039); The Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2020JM-248, 2020JQ-360); China Postdoctoral Foundation (51708039)

*Corresponding author. *E-mail address*: wjianwei@chd.edu.cn.

<https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.11.010>

0 引言

截至 2020 年,中国综合交通网络总里程已达到 501.25 万 km,高速铁路里程超过 3.5 万 km,高速公路里程达 14.96 万 km^[1],中国已成为名副其实的交通大国。当前,中国正处于由“交通大国”迈向“交通强国”的重要节点,交通运输业高质量发展刻不容缓。在十九大“网络强国、交通强国、数字中国”的战略部署下,中国数字经济也同步进入发展快车道,市场潜力巨大。2019 年,交通运输部《数字交通发展

规划纲要》指出:加快交通运输信息化向数字化、网络化、智能化发展,为交通强国建设提供支撑。该纲要进一步规划到 2025 年,交通运输基础设施和运载装备全要素、全周期的数字化升级迈出新步伐,数字化采集体系和网络化传输体系基本建成^[2]。2020 年,交通运输部印发的《推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》进一步明确,到 2035 年交通运输领域新型基础设施建设须取得显著成效。先进信息技术将深度赋能交通基础设施,精准感知、精确分析、精细管理和精心服务能力全面提升,“新基建”

将成为加快建设交通强国的有力支撑^[3]。由此可见,道路基础设施数字化是智能公路建设、无人驾驶、智能交通等多领域发展的重要条件。

本文从技术研发与工程应用视角对道路基础设施数字化进行定义:道路基础设施数字化(Highway Infrastructure Digitalization)通过汇集包括物联网技术(IoT)、地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)、信息物理系统(CPS)、数字孪生(Digital Twin)、大数据驱动(Big Data-driven)等在内的多种技术手段,对道路基础设施进行全生命周期、全要素的信息感知,在此基础上,通过数据存储、传输、可视化等多种方式对道路数字化新建或改造过程进行集成处理。从而对道路基础设施中的物理信息、性能信息、状态信息、行为信息进行全方位监控,以期更好地依托工程规划设计建模平台、项目建设协同管理平台、运维管养综合分析平台,为进一步实现道路基础设施的优化设计、智能建造、性能仿真与预测、科学管理与决策提供技术支持。在全球数字化经济迅猛发展的背景下,道路基础设施数字化技术研发和工程应用正处于快速发展时期,机遇与挑战并存。道路基础设施行业须紧紧抓住数字化技术,充分发挥数字技术对传统行业的引领、带动与改造作用,促进行业转型升级,这是推动经济高质量发展的现实路径。

当前,道路基础设施数字化发展有 2 种主要的实现途径:其一是推进开展既有公路交通基础设施数字化、智能化升级改造;其二是新建智慧化公路。无论哪一种都会对基础设施技术体系和开发应用提出新的要求与挑战^[4-5]。然而,数字化道路基础设施的发展建设当下仍停留在功能性、保障性、服务性的初级阶段,关键技术与相关应用有待于进一步研发与拓展。这其中:在数据感知方面,更强调数据的采集;在大数据处理方面,数据种类多、体量大、来源复杂,数据结构、格式也不统一,数据库管理应用有限,解决数据融合的技术手段相对落后,缺乏统一数据框架;在技术应用方面,包括数字道路信息感知技术、数据管理与分析技术、全生命周期工程应用等关键技术尚处于起步阶段,业务应用场景单一,此外相关技术标准与协同设计仍有待进一步研究,目前缺少系统性地集成应用。

基于以上现实状况,现阶段开展道路基础设施数字化研究具有重要的现实意义。为深入探究道路基础设施数字化的发展脉络,本文梳理了道路基础

设施数字化涉及的各项关键技术,并对现有研究进展和发展趋势进行总结:①按照道路采集感知层、集成处理层、业务应用层构建道路基础设施数字化的技术架构;②对涉及的关键技术进行重点介绍,包括道路大数据存储和管理技术、多源模型的融合与互操作、快速自动化三维重建、路面大数据挖掘与分析技术、多网融合传输与通信技术,并基于道路基础设施全生命周期(勘察设计、施工建设、运维养护、出行服务)的不同流程阶段,进行重构;③指出现阶段道路基础设施数字化研究仍存在的问题与不足,对其未来的发展进行展望。

1 文献统计与分析

1.1 数据来源、研究方法 with 工具

本文分别选取 2000~2020 年间(截止到 2020 年 8 月)CNKI 数据库核心合集数据库和 Web of ScienceTM、IEEE、Science Direct 外文数据库中道路基础设施技术研究相关的文献作为数据来源,以中文关键词(数字化和道路基础设施、交通基础设施、公路基础设施),英文检索式为 TS=(“highway infrastructure” OR “transportation infrastructure” OR “infrastructure digitalization”) AND (“BIM” OR “IoT” OR “GIS” OR “CPS” OR “data-driven”) AND Document Type=(ARTICLE) not la=CHINESE)为检索条件。为进一步提高检索结果与主题契合度,对文献进行筛选整理,删除研究主题不符、无关键词、作者不全的文献,得到有效中文文献 229 篇,英文文献 2 395 篇。使用 VOSviewer 软件进行共被引分析,分别从主要文献统计、期刊分布、高频关键词共现、主要研究国家等方面的共引知识图谱进行分析与可视化。

1.2 文献年度分布分析

通过对近年来国内外各年发文量进行整理,绘制图 1。由图 1 可以看出:自 2000 年以来,国内外道路基础设施领域的中英文发文量总体上呈递增态势;2008 年,政府推出“四万亿计划”来刺激经济,重点集中在铁路、公路、桥梁等交通领域;2018 年,中央经济工作会议首次提出“新型基础设施建设”这一概念,10 年间基础设施建设领域得到蓬勃发展,学界的研究也进一步深入,2018 年中英文发文量是 2008 年发文量的近 5 倍,英文文献的发文量更是在 2018 年达到峰值。从增幅来看,2010 年、2012 年和 2018 年前后发文量增幅较大。总体来看,道路基础设施研究逐渐受到学界的关注。

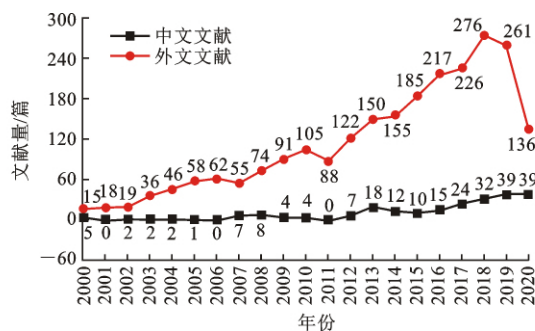


图1 2000~2020年国内外各年发文量统计
(2020年数据截止至8月)

Fig. 1 Statistics of the Number of Published Articles in China and Other Countries from 2000 to 2020 (End in August 2020)

1.3 期刊分布分析

为进一步明确道路基础设施研究相关文献的整体情况,识别主要来源期刊,本文将论文数据进行统计分析,对2000~2020年间国内外道路基础设施领域发文量排名前10的期刊进行梳理(表1)。期刊研究领域涵盖交通工程、计算机科学、环境科学、地理学、公共管理、城市研究在内的多个学科。这不仅反映了道路基础设施领域研究内涵的丰富性,同时也映射出道路基础设施与其他学科之间存在着交叉研究现象,为后续开展相关研究提供了更多新视角。

表1 2000~2020年中英文道路基础设施领域
期刊载文量排名

Table 1 Ranking of Published Articles in Chinese and English Journals on Highway Infrastructure from 2000 to 2020

排名	外文期刊	中文期刊
1	Automation in Construction	《北京交通大学学报》
2	Sustainability	《建筑技术》
3	IEEE Access	《交通运输系统工程与信息》
4	Bautechnik	《公路》
5	Transportation Research Record	《土木工程与管理学报》
6	Journal of Computing in Civil Engineering	《工程管理学报》
7	Sensors	《施工技术》
8	Engineering Construction and Architectural Management	《建筑经济》
9	ISPRS International Journal of Geo-information	《中国公路学报》
10	Journal of Cleaner Production	《科技管理研究》

1.4 高频关键词共现分析

关键词是文献内容的高度凝练,直观上表明了文章的研究领域。道路基础设施领域高频关键词的出现,体现了道路基建相关细分领域持续受到关注,

可以基于此进一步分析该研究领域国内外的热点趋势。本文使用 VOSviewer 软件对 2000~2020 年间道路基础设施研究中 229 篇中文文献进行高频关键词共现分析,依据阈值参数经验将关键词设置为 5,共梳理 371 个关键词,关键词共现知识图谱如图 2 所示。图 2 显示了频次大于 5 的关键词:2014 年左右的 research 出现智能交通、建筑信息模型、智慧城市、云计算等关键词,相较而言更偏重于概念化;2018 年前后逐渐向物联网、特高压、大数据中心等技术平台的研究领域拓展。此外被引频次前 10 位关键词的被引频次与中心性(用于表征重要性的指标)如表 2 所示:交通基础设施、交通强国、工业互联网、人工智能是近年来国内研究学界的热点。

表2 被引频次前 10 位关键词的频次与中心性

Table 2 The Frequency and Centrality of the Top 10 Keywords Cited

序号	关键词	频次	中心性
1	交通基础设施	69	80
2	智能交通	16	29
3	工业互联网	14	78
4	物联网	14	53
5	人工智能	11	59
6	交通强国	11	21
7	BIM	10	13
8	大数据中心	10	63
9	特高压	7	41
10	智慧城市	7	21

进一步进行外文文献的高频关键词共现分析。由于外文文献较中文文献体量大,依据经验将外文关键词阈值参数设置为 10,进一步梳理了国外文献关键词共 176 组。此外由于 VOSviewer 软件一次最多导入 500 篇文献,故将 2000~2020 年间道路基础设施研究中的 2 395 篇外文文献文本信息分 5 次导入分析中,分析结果如图 3 所示,其中 Model(模型)、Framework(框架)、GIS(地理信息系统)、Performance(性能)、Simulation(模拟)、Cloud Computing(云计算)、Ontology(本体论)、Interoperability(互操作性)、Optimization(优化)是国际道路基础设施数字化研究的热词;相较而言,国外研究更强调科技与关键技术对道路基础设施领域研究的引领。总体来看,在交通基础设施规模和复杂性不断扩大的今天,道路基础设施数字化突出了研究的目标(网联、智能、智慧),强化了研究的手段(计量经济学、物联网、BIM、GIS、云计算),深入了研究的问题(本体论、互操作性、优化),是当今重要的研究课题。

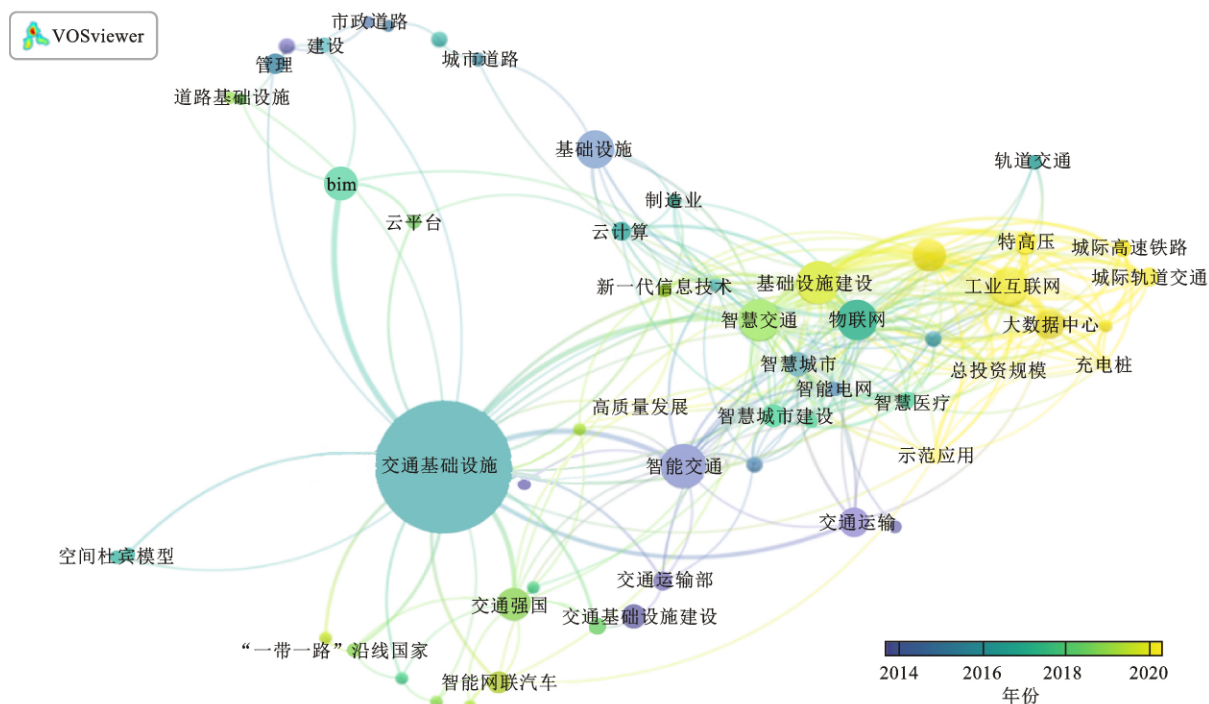


图2 知网关键词共现知识图谱

Fig. 2 CNKI Keywords Co-occurrence Mapping Knowledge Domain

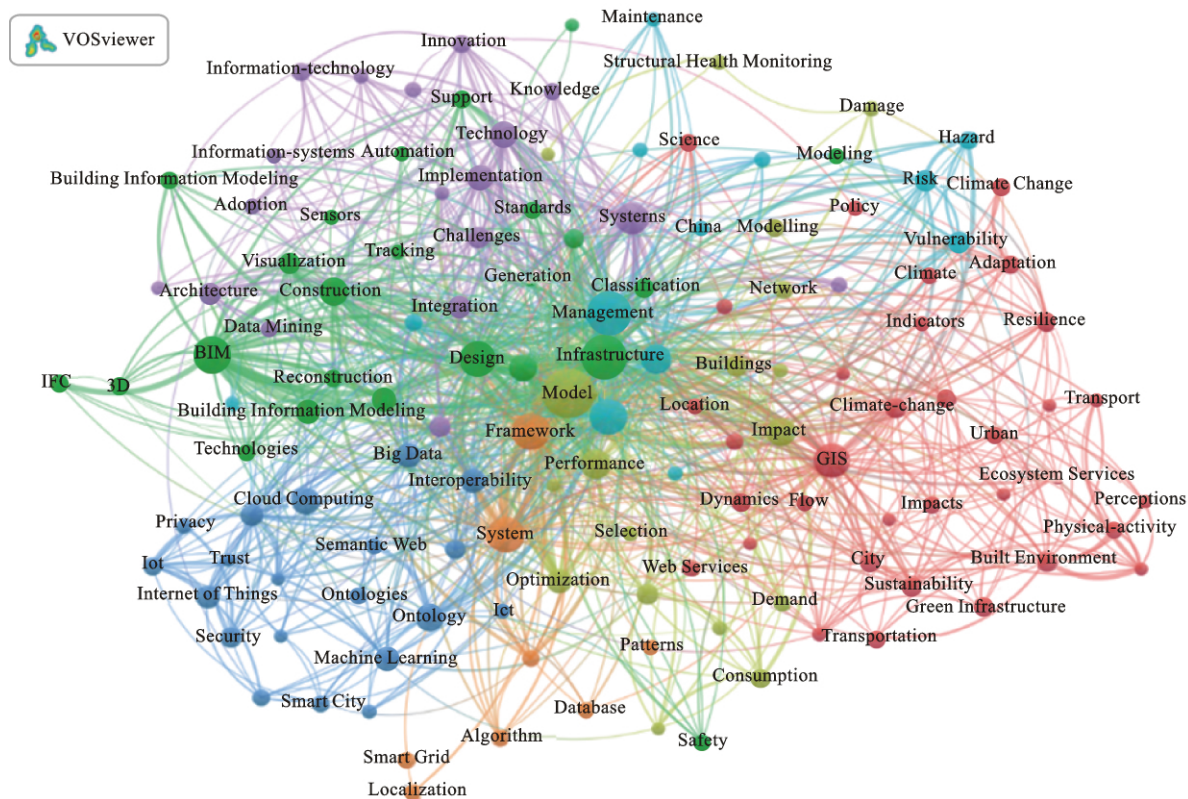


图 3 Web of Science 关键词共现知识图谱

Fig. 3 Web of Science Keywords Co-occurrence Mapping Knowledge Domain

1.5 研究实力分析

相同学科的发展往往具有一定的地域性,同一个国家或地区的学者间的频繁交流,信息流动可以

进一步带动这个国家或地区间这一学科的发展。通常而言,某个国家或地区该领域学者数量多、发文量大,则该国家或者地区在该领域研究实力越强^[6]。

因此,可以通过梳理统计每个国家的总发文量来了解该国家在该领域的科研实力。如图 4 所示:美国、中国、德国、英国、意大利分别占据道路基础设施数字化领域研究的前五名。从所发表论文的被引次数分析,中国下降至第 3 名,意大利下降至第 7 名,反观美国、德国稳居前 2 位。这表明当前中国关于道路基础设施数字化的研究虽然发文量居世界前列,

但被引总量相对较低,论文的学术影响力上,尚与世界科技发达国家有一定差距。未来,中国交通领域科研人员应进一步对标高质量期刊,积极寻求与基础设施研究、应用领域高水平的研究机构进行科研合作交流,注重论文质量和水平,进一步在总结本领域科学认识的过程中努力做到成果转化,切实助力交通行业转型发展。

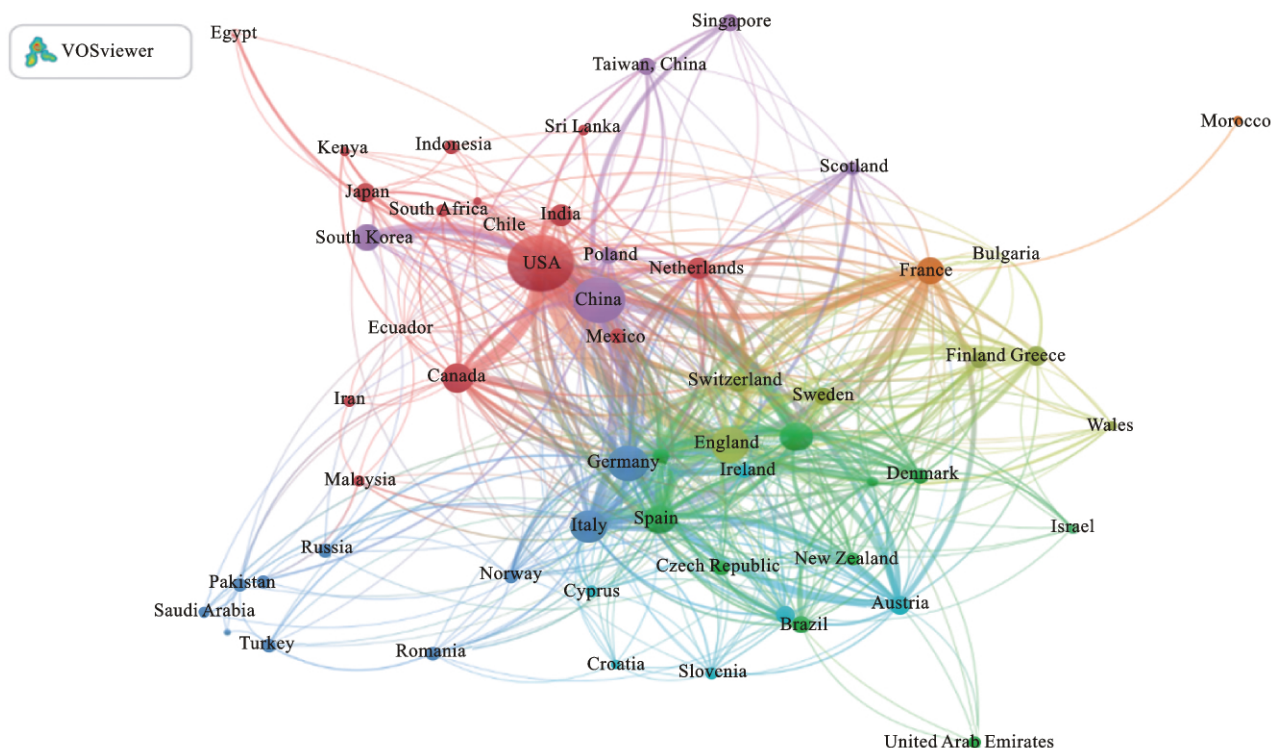


图 4 本领域各国家(含地区)总发文量知识图谱

Fig. 4 Mapping Knowledge Domain of Published Articles in Various Countries (Regions) in This Field

进一步分析了引文的来源期刊,如图 5 所示,其中《Automation in Construction》《Energy and Buildings》《International Journal of Geo-information》《Advanced Engineering Informatics》《Journal of Cleaner Production》《Transportation Research Part C: Emerging Technologies》等国际顶尖期刊是这一研究领域重要的引文来源,体现了道路基础设施数字化研究的前沿性和重要性。

2 现有研究领域特征及技术应用

2.1 道路基础设施基本特征

道路基础设施作为连接城市的复杂系统,承载着城市发展演化形成的交通网络^[7]。随着迅速发展的数字化技术手段,使得道路的自我感知、自我愈合、自我适应以及自我供能成为可能^[4,8]。随着技术的演进发展,基础设施经历了从低等级公路到高

速公路,再到数字化、智能化公路的演化历程,未来更将向着超性能与绿色公路的目标而奋进,如图 6 所示。基础设施的进一步完善也催发着车辆向高性能、新能源、无人驾驶等更高领域发展^[8],绿色可持续、数字化、智能化已经成为人、车、路协同发展的共同目标^[9]。

国际经济合作与发展组织在 2013 年召开的 OECD 国际峰会上指出,道路基础设施是各收入阶层群体发展进步的物质基础,助力人民的福祉和社会的发展。作为构成节点、区域、通道的大型网络化公共工程,道路基础设施对国家政治经济、社会科技、环境保护、国家安全都具有重要意义。从功能上看,道路基础设施作为城市发展建设的重要一环,在城市集聚、扩散过程中起到了物质输送和人口流动的重要作用^[10-11]。Gomes 等^[12]指出道路基础设施具有投资规模大、建设周期长、风险复杂、利益相关

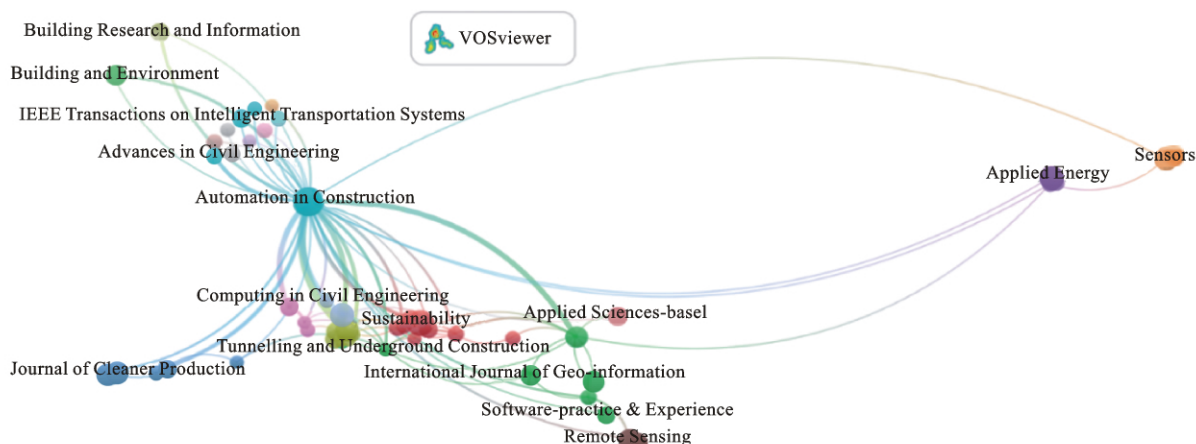


图 5 该领域重要引文期刊知识图谱

Fig. 5 Mapping Knowledge Domain of Significant Citation Journals in This Field

图 6 道路基础设施和车辆发展演化历程^[7-9]

Fig. 6 Evolution Development of Highway Infrastructure and Vehicles

者多、组织结构复杂的特点。此外由于道路基础设施的复杂特征和其对行业发展的重要意义,学者们开始关注于道路基础设施的配置与经济发展的关系,以期通过优化基础设施系统,促使道路基础设施对经济、环境和社会发展产生积极影响^[13-19]。

道路交通基础设施建设一直以来都被认为是促进经济增长的重要因素。Nuno 等^[20]认为建设交通基础设施是影响运输成本的关键,其基于实证研究分析了双边贸易流量与运输成本之间的关系,印证了影响非洲经贸水平的一个重要因素是当地交通基础设施水平低下。Salling 等^[21]结合成本效益理论,提出了用以评估交通基础设施项目的决策支持模型,重点分析了基础设施建设的经济必要性。Lakshmanan 等^[22]进一步指出,道路基础设施除了作为

公共投资产生正外部性外,还能够通过知识溢出、技术溢出效应间接地拉动经济增长。然而,由于道路基础设施建设过程中,不可避免地产生环境污染和城市噪声,由此产生负外部性^[16,18,23]。随着城市中基础设施规模的持续扩大,不合理的交通基础设施规划也带来诸多不良影响, Flyvbjerg^[24]和 Ritveld^[25]先后分析得到对于经济欠发达地区,通过新建或改造交通基础设施不但无法对经济发展起到正面影响,甚至可能导致区域内劳动力、资本和其他生产要素向外流出,给经济发展带来掣肘;Puga^[26]进一步指出过剩的基础设施不仅无法保证缩小地区间的经济差距,反而可能会进一步加剧区域间的社会经济的不协调、不平衡状态,造成恶性循环。

随着人口的不断增长和城市交通系统的演化发

展,城市开始对道路基础设施的建造、监测、维护逐渐有了更高的要求。交通运输的各个部门,都在着力开发和使用创新技术。在此背景下,Kupriyanovsky 等^[27]指出交通行业需要通过将物理基础设施和数字基础设施相结合来开发智能基础设施,从而提供更多信息来改进管理决策。在物联网和大数据时代,建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、物联网(Internet of Things, IoT)等为代表的关键技术也逐渐成为智慧城市规划和管理的必需品,开始融入建筑、工程和施工行业,进行基础设施全生命周期管理^[28]。

2.2 BIM 相关技术的技术特点

长期以来,工程建设领域都受到设计错误频发、信息割裂、项目管理效率低下等诸多问题的困扰,根据国际相关实践经验,BIM 技术的推广被认为是能够解决工程生产根源问题的重要手段,行业从业者借助 BIM 技术开展工程领域的数字化转型^[29],在明确用户需求的第一时间同步构建信息模型,降低成本的同时缩短交付时间、提高生产质量和服务水平。英国在 2020 年度的国家 BIM 发展报告中指出,在英国本土 BIM 技术应用范围广泛,约有 73% 的被调查者使用 BIM,他们普遍认为 BIM 技术具备改变行业的突出特点;报告进一步指出:信息协作效率的增强、生产力的提高、对风险的实时预警、盈利能力的提升是 BIM 用户一致认可的好处^[30]。

BIM 技术作为工程数字化建设的重要技术手段,通过精细、海量的模型数据完成了对工程项目全过程的信息化、智能化管理。BIM 技术具有优化性强、模拟性好、协调性高、三维可视化效果好的特点,能够贯穿工程数字化全生命周期中^[31-32];GIS 技术长期以来被用于收集、存储、管理、查询、综合分析、处理和显示宏观的地理环境,它能够基于三维可视化技术展现工程项目的地理环境和地理信息,GIS 技术是集成处理空间数据的重要介质,能够和 BIM 技术形成互补;IoT 技术是基础设施项目中智能管理、能效管理与运维管理的重要支撑,通过物联网技术将项目中的人员、机器、原料、方法、环境有机聚合起来,进行信息交换和通信,从而实现实时管理控制和传导执行^[33]。在人工智能技术的触发下,物联网技术能够具有多元智能特征,从而实现工程项目各环节的智能决策。

2.3 BIM 相关技术助推道路基础设施数字化建设

近年来,随着国内大交通建设、数字交通建设的

全面推进,BIM 技术在道路基础设施领域的应用也迎来了发展的机遇期。大数据、物联网、云计算、人工智能的发展迭代,将催生 BIM 技术在道路基础领域具有更大的应用价值^[34-35]。这其中 BIM 技术主要用以对基础设施内部信息的分析与管理,GIS 技术主要针对区域外部空间,通过分析空间地理信息辅助设计模型实体周围的地理环境场景,进一步提高 BIM 模型信息的完备性,再通过 IoT 技术将 BIM 模型和 GIS 地理信息数据汇集,完成信息交换和通信。

BIM 技术能够对不同项目利益相关者进行多目标协作与信息交互^[36-37],具体包括:

(1)概念与设计阶段:允许对项目进行合同审查,对审查过程中的结构敏感部分进行正向设计,以 3D 形式可视化未来的工作流程,为后续调整设计预留空间;

(2)施工阶段:对项目进度进行实时监控,对不合规的操作行为进行实时处理,能够对提出的修改请求进行反馈与调整,能够允许用户在建设的全生命周期中实时设计、修改、调用建筑信息模型和相关数据资料^[38-39];

(3)运营与维护阶段:帮助运维团队建立检查历史记录,并进行相关联的施工文件(如图纸、采购细节、提交流程规范等)的协助归档,能够针对繁杂的运维干预措施进行建模模拟作业,进一步提高全过程的效率与安全性。

总体而言,BIM 力求在单一模型中涵盖基础设施的几乎所有方面、学科和系统,这将使得包括业主、建筑师、工程师、承(分)包商成员有机会更加频繁、精准、有效、实时地参与协作^[40]。

在美国,近 50% 的道路基础设施项目深度使用 BIM 技术,极大地解决了传统基础设施建设的不足^[41]。澳大利亚将 BIM 技术应用于道路工程项目的成本、时间和质量控制方面,取得了不俗的成绩^[42]。近年来中国也将 BIM 技术深度应用于基础设施领域,通过将传统的 CAD 2D 图纸与 BIM 模型相结合,实现传统工程设计到现代数字化设计的升级,并在其中引入协同作业^[43]。高速公路建设方面,为保证项目的安全可靠运营,使用 Revit 软件在设计环节预先建立高速公路的 BIM 模型,通过编码建立模型数据库以满足项目数字化的要求,以可视化的形式呈现给设计施工人员包括勘察设计、预制、施工建设、运维管理各个阶段的关键数据,在减少建设成本的同时,显著提高工程效率与质量^[44]。

基于工程领域的应用经验总结,BIM 等技术也

被运用到道路基础设施的全生命周期数字化建设中^[38-40]。基于BIM+GIS技术,能够基于顶层设计,实现对整个道路工程项目的系统设计与协同施工^[38],将BIM+GIS应用到工程项目的全过程管理中,是实现对项目全过程精细化、精益化管理的重点内容^[39-40]。当前BIM在道路基础设施研究中的工程应用^[45-49]、管理平台构建^[50-54]、相关技术^[55-56]、行业标准^[57-58]等方面均发挥着至关重要的作用。

由于工程项目通常建模复杂,包含更多的未知因素^[59],所以需要多方的工程意见和高效的信息共享^[60-61]。实际上,基础设施组件库的可用性有限以及难以将几何形状参数随机分配给项目对象的特点,被认为是将BIM用于道路基础设施全生命周期中的主要障碍^[62],这也是BIM技术在港口、机场、高架桥等场景应用相对有限的原因。当前基于BIM技术推进交通基础设施数字化,在主要道路项目的设计和建设领域应用广泛,包括项目规划阶段的空间分析^[63]。De Laat等^[64]研究了通过BIM与地理信息系统的集成来选择合适的地点。Azhar^[65]在研究中指出3D激光扫描设备的先进性和经济性使从业人员能够准确扫描现有交通设施并将其整合到BIM模型中,在道路设计阶段,业主使用BIM技术遴选了最经济的设计方案,节省了大约200万美元的设计成本^[63]。在道路施工阶段,项目组成员使用BIM来监控项目进度,使用4D(施工3D模型与时间)分阶段计划,用于贸易协调会议。此外Rubenstone^[66]将BIM、云计算技术用于项目建设阶段,还介绍了BIM在移动端设备中的各种应用。Ku等^[67]从BIM模型中提取的数据信息能够付诸于道路基础设施的施工建设和运维管理。Philips等^[68]从项目利益相关者的角度出发,分析了设计人员、业主、施工人员和设施管理人员如何借助BIM技术从各自的项目核心业务中获益。

当下的研究表明:①尚缺乏一种能在各种软件之间共享信息的BIM标准交换格式;②基于BIM技术的项目风险评估仍有较大不足,需要进一步研究提高施工建设、运维管理的效率和安全性;③进一步解决BIM与其他先进技术的融合适配问题仍是较大的挑战;④采用BIM技术,用以对评估道路基础设施开发的环境影响是一个较少受到关注的研究领域,未来可以通过深化开发BIM功能,以提供有关项目可持续性的全面知识,真正将装配建筑、智能建筑与绿色建筑应用于道路基础设施数字化建设中。

3 关键技术及发展现状

3.1 道路基础设施数字化技术架构

本文采用BIM、3DGIS、企业架构与面向服务的架构相融合的技术思路^[69-70],综合应用客户机(浏览器)与服务器混合模式,以BIM模型的信息流为中枢,构建了道路基础设施数字化系统技术架构。主要技术框架自下而上划分为采集感知层、集成处理层和业务应用层三部分,此外包括两大支撑体系:标准与规范体系和安全与管控体系,如图7所示。

3.2 采集感知层

采集感知层为道路基础设施数字化管理系统提供数据支撑,重点解决道路基础设施领域的数据采集和事件记录问题,其作用与人体中的皮肤和五官类似。按照采集感知设备自身属性可分为固定式数据采集终端、移动式数据采集设备和基于智能终端众筹式的综合传感设备。这其中固定式数据采集终端包括射频识别(RFID)读写器、二维码识读器、电子标签等,移动式数据采集设备包括具有WIFI/4G的RFID手持终端、光栅位移移动传感器等;而基于智能终端众筹式的综合传感设备与资金筹集无关,其借助移动互联网用户的移动终端和业务行为来收集数据,助力数据采集感知。部分采集感知设备见图8。

采集感知层主要通过数字化的感知设备,采集结构化、半结构化、非结构化数据,通过定位追踪、传输接入、信号转换、监控处理,实现实时动态地感知识别管理项目现场情况,为管理系统提供准确高效的决策支撑^[71-72]。现阶段路面信息数字化采集在传感器耐久性、数据采集类型、协同方式、数据内在关联关系挖掘等方面还有一定差距。采集感知层涉及到的关键技术包括传感数据智能识别感知技术、视频图像采集分析技术、实时定位技术、短距离无线通信传输技术等,当前的研究热点集中在传感器感知应用、多传感器数据融合、智能交通系统建构3个方面。

传感器感知应用方面,多集中于BIM技术与传感器集成使用上。Riaz等^[73]通过设计BIM与无线传感器集成的解决方案,对建筑项目密闭空间中的操作人员进行监测。Cheung等^[71]采用集成技术,通过传感器实时监测施工环境,对潜在的安全隐患实施报警响应,对产生的有害气体进行自动清除。董可新等^[74]认为构建BIM与传感器集成的设施管理系统将有助于推进设施管理自动化的发展。陈悦华等^[75]从危险源管控的角度出发,识别了人员、材

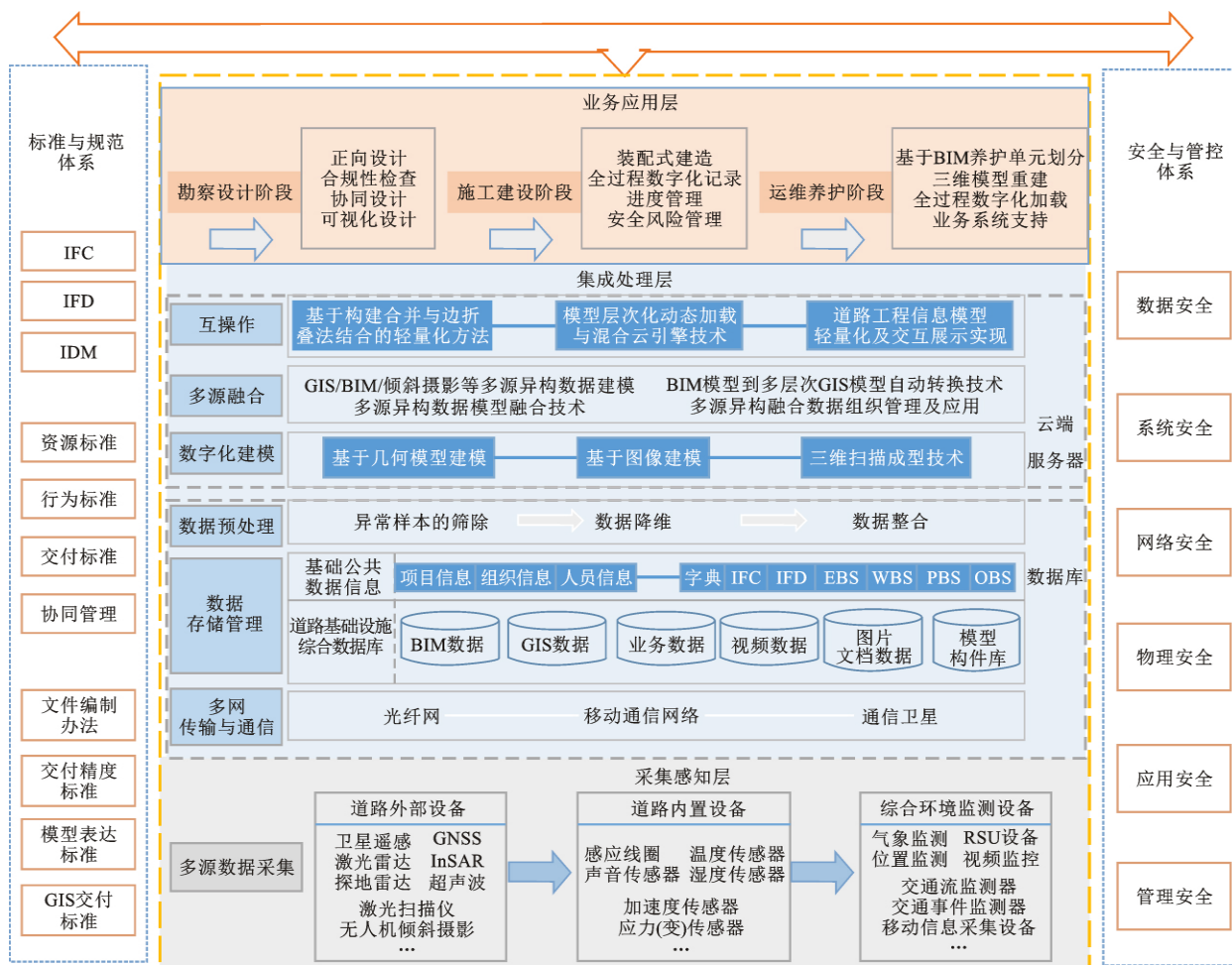


图 7 道路基础设施数字化系统技术架构

Fig. 7 Technical Framework of Highway Infrastructure Digitalization System

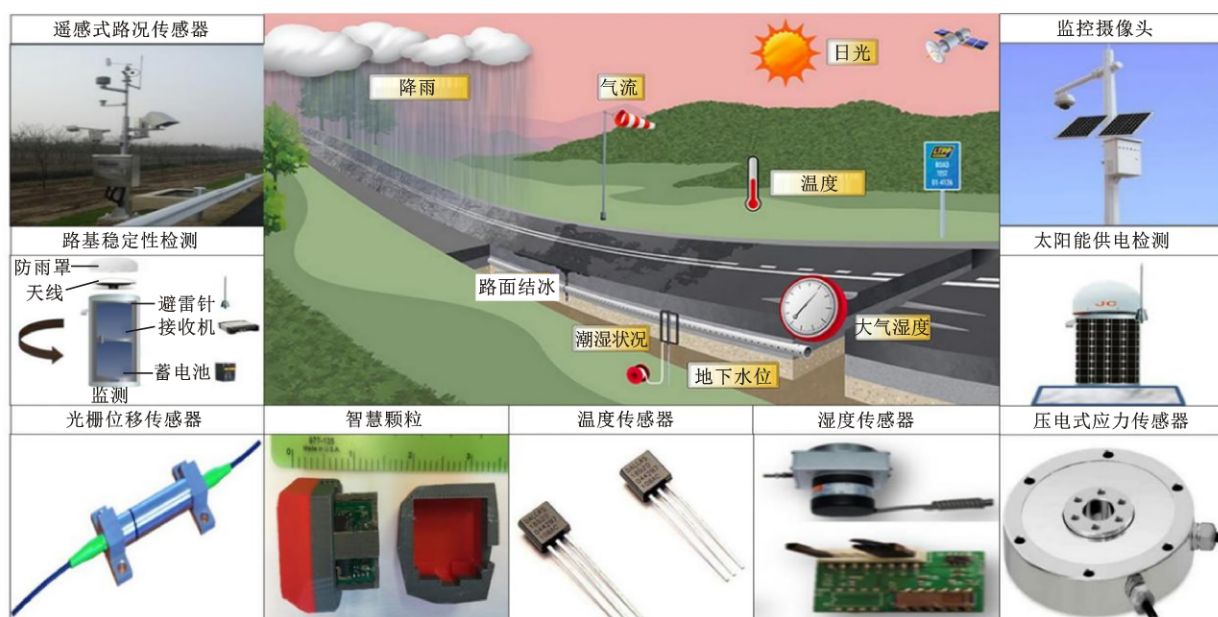


图 8 采集感知设备体系

Fig. 8 The Equipment System of Data Acquisition and Data Sensing

料、设备中潜在的危险源,构建 BIM 技术与传感器的施工现场安全预警系统。迟安琦^[76]从运维管理角度出发,在整体建设环节提出新的要求,进一步提高数字化系统的集成化、可视化和定位自动化程度。当前面向 BIM 技术存储下的工业基础类传感器国际标准尚不完善,基于此,胡振中等^[77]提出了 IFC 传感器信息存储方案和应用流程,详细分析了 IFC 中与传感器相关的信息描述与关联机制,对传感器应用标准及流程做出了进一步补充完善。

多传感器数据融合方面,Davila 等^[78]将 BIM 技术用于监测管理桥梁结构多源传感器设备,通过案例研究构建了基于预应力混凝土桥梁的内置结构性能监控系统。Liu 等^[79]基于 BIM 和私有云技术设计了地铁建设管理应用平台,基于多传感器数据实现电子集成,辅助于动态监控地下铁路相关设施的运行和维护。吴昕慧等^[80]采用仿真试验对融合多传感器信息的轨道交通列车轮径进行校正,提高了交通系统的运行效率。徐华中等^[81]将遗传算法与改进的神经网络算法相结合,用以分析包括视频图像在内的多传感器数据融合下短时交通流监测问题,研究通过数据质量控制有效地提高系统预测的效率。郑江华等^[82]提出了基于混合传感器网络的城市智能交通系统建设架构,打通了多类传感器系统间的数据壁垒,在一定程度上优化了实时效率和结果的可靠性,王卫东等^[83]在高速列车检测中,综合利用视频图像实时分辨技术,最大限度地提高了高铁线路基础设施装备的检测效率。

智能交通系统方面,Aziz 等^[84]利用 BIM 技术和交通类多源大数据,进一步分析智能交通系统全生命周期数据管理中潜在的价值。Delgado 等^[85]使用动态数据驱动的 BIM 系统进行结构性能监控,在交互式三维场景中实现了智能交通项目的数据动态可视化。刘文军等^[86]将 ZigBee 紫蜂通信技术引入到智能交通系统中,使用协同优化控制策略进行数据优化处理,进一步优化了智能交通系统的运行效率。徐立锋^[87]介绍了智能交通系统中无线传感网络的构成,实例分析了无线传感器如何应用于交通信息采集领域,以及研发过程中开发原型样机的软硬件指标与相关的通信协议等。

3.3 集成处理层

集成处理层是道路基础设施数字化的核心,功能模块包括数据预处理、数据存储管理、数据多网传输通信等。这其中数据预处理模块综合运用大数据汇集、清洗技术,按照异常样本数据筛选、数据降维、

数据整合的工作流程完成对数据的处理;数据存储管理模块是集成处理层的业务数据中心,业务数据具体包括基础公共数据信息、道路基础设施综合数据库,依托道路全生命周期过程中采集、存储和处理的各类数据资源以及公用基础编码体系。数据存储管理综合运用大数据转换、存储技术,将需要实时调用的数据存储于集成数据库中,实现对道路工程业务数据、模型数据、空间数据和公用基础数据的综合管理,并提供项目类、组织机构类、人员类、文档类以及模型构件类基本信息。过程中将需要实时调用的数据存储于实体数据存储管理模块中,把部分暂不需要的数据通过云服务器的形式储存,以降低渲染压力。如图 9 所示,集成处理层综合运用大数据汇集、清洗、转换、存储、网络传输通讯等技术,实现道路基础设施数字化阶段多源模型的集成和共享。

多网传输与通信模块借助光纤网络、移动通信网络、卫星通讯等多网融合技术,将采集到的数据安全高效地传输到集成数据库。为快速自动化三维重建技术、模型互操作与多源数据融合、道路数据存储和管理技术、路面大数据挖掘与分析技术提供重要的通信传输;为平台数据的上传和相关指令的下发提供传输通信媒介;通过快速自动化三维重建技术,为道路数字化建设提供符合业务需要的数据管理资产。最终实现了智能感知与数据集成处理。

道路基础设施数字化管理系统中采集感知层和集成处理层衔接紧密。如图 10 所示,布设在道路内部的采集感知设备基于固、液态相变材料(PCM)的转换特性(升温吸热,降温放热),对低品位能源进行储能、发电,从而为自身和集成处理层中的数据传输介质提供不间断地供电。通过对外部环境温度变化的实时感知,为采集感知层实时获取现有道路基础设施性能信息、智能感知相关状态信息提供保障。获取的数据及信息再实时上传至信息控制中心进行后续集成处理,在此过程中产生的能量将进行二次热能转换,形成闭环继续为感知设备、集成处理数据传输介质实施能量供给。

3.3.1 道路数据存储和管理技术

道路数据存储和管理技术主要为基于 BIM 技术的集成处理层提供所需数据支撑。由于面向全生命周期的道路工程数据具有类型复杂、体量大的特点,构建基于多元异构数据的 BIM 道路基础设施长期服役数据库是极为必要的。道路基础设施长期服役数据库具体如图 10 所示。从研究对象的角度,分别建立路面服役性能、桥梁结构性能、隧道结构性

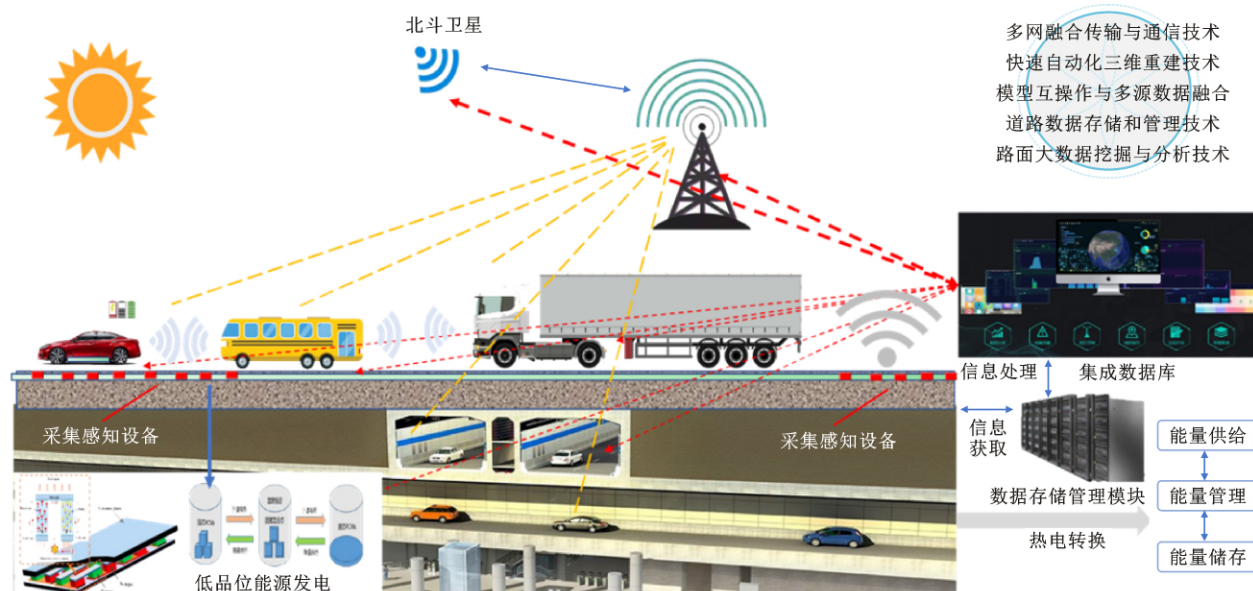


图9 道路基础设施状态信息智能感知与数据集成处理

Fig. 9 State Information Intelligent Perception and Data Integration Processing of Highway Infrastructure

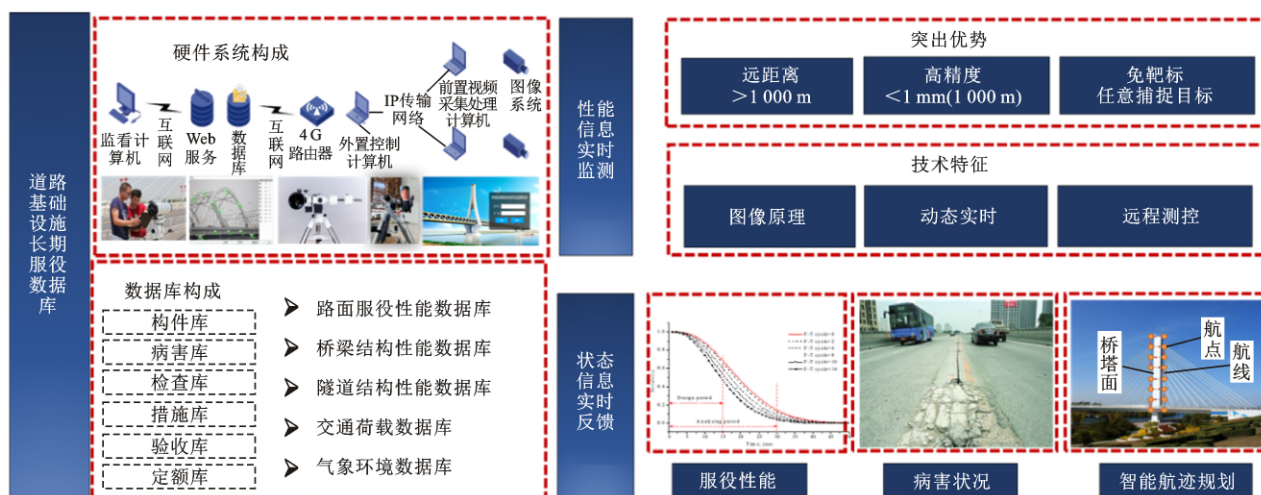


图10 道路基础设施长期服役数据库

Fig. 10 Long-term Service Database of Highway Infrastructure

能、交通荷载和气象环境的多元数据库,基于完备的硬件系统,实现对构件库、病害库、检查库、措施库、验收库、定额库的实时监控预警,结合性能信息远距离、高精度、免靶标的技术特征,最终达到对道路基础设施的服役性能、病害状况等状态信息的实时反馈的目标,并为智能航迹规划打下坚实的基础。

Wu^[88] 基于 GIS 技术对道路及桥梁基础设施信息数据进行了可视化与相关分析,构建了道路桥梁基础设施管理信息系统,实现了数据存储与管理、查询与统计、专题图表绘制、空间分析等多种功能,能够对道路和其他基础设施进行实时监控,有助于有效管理。毛华坚^[89] 从异构云存储服务、地图匹配算法、并行计算等多项算法出发,为云计算环境下交通

海量数据存储、管理与分析提供了有力的技术支撑。张绍阳等^[90] 梳理了交通运输数据标准中数据存储、数据交换和决策支持应用的研究现状和不足。宋炜炜^[91] 研究了智慧城市时空信息云平台建设,具体围绕空间大数据的存储管理、高性能空间计算和时空信息云平台构建关键技术展开了相关研究。Peng 等^[92] 基于分布式存储和并行计算技术设计了道路交通管理系统日志数据分析平台。李庆君^[93] 采用 HDFS 和 MapReduce 技术为地理空间数据的分布式存储及并行计算处理提供重要支撑,进一步优化了数据检索效率。Lu 等^[94] 开发了一种涵盖 No-SQL 和关系数据的统一数据管理平台,以减少集成、迁移存在的问题,进一步简化数据管理的操作。

苏鹤俊等^[95]通过设计道路养护大数据体系框架,进一步完善了养护数据标准化核心体系框架。基于多元异构数据的 BIM 道路基础设施长期服役数据库的建立,是实现项目全生命期复杂作业流程的重要基础,通过科学的数据集成模型,使数据能进行有序的组织 and 有效的追踪,使各利益相关者实现管理同步,减少错误的发生,进而提高整个行业的生产力。

3.3.2 模型互操作与多源数据融合

集成处理层的体系支撑是信息交换标准。而模型的互操作性是实现交互信息与交互方法的标准化表达,具体包括:基于合并与边折叠法相结合的轻量化方法、模型层次化动态加载与混合云引擎技术、道路工程信息模型轻量化及交互展示方法,使得模型的设计方与使用方实现对模型信息交换的语义理解,并对要使用的交互方法进行提前获准。

IFC (Industry Foundation Classes) 和 CityGML(City Geography Markup Language)分别是 BIM 和 3D GIS 领域通用的数据模型标准^[96-97],汤圣君等^[98]基于 2 类标准,提出 IFC 几何要素过滤方法和 IFC 到 CityGML 的语义映射规则,为 IFC 与 CityGML 建筑模型的几何、语义信息互操作提供重要手段。刘夏彬^[99]具体分析在互操作性理论

下 BIM 技术的应用方式,指出 BIM 实施标准是实现互操作性的高级阶段,实证研究了以标准流程实现 BIM 技术互操作性的工程。Shirowzhan 等^[100]认为在特定情况下兼容性需要在 BIM 组织级别中进行度量,需要定期检查 BIM 与当前系统的互操作性,以促进 BIM 项目的实施。因此,对 BIM, GIS 和 VR/AR 标准兼容性的研究是下一阶段创新的重要基础。

研究多源数据融合问题,分析数据源的结构特点是基础,如图 11 所示,将数据分为时不变信息、时变信息和环境信息数值及时间,结合多源异构数据的技术特征,进行数据清洗、图像拼接、损伤识别和数据融合,达到对道路工程建设全过程信息的集成共享,解决基于 BIM 的道路工程建设管理应用中的智能化识别、定位、跟踪、监控和管理,最终实现道路工程建设管理全过程信息流闭环管控,实现虚拟建造信息化管理与实体环境硬件资源之间的有机融合。基于 BIM 与物联网融合应用^[101]、BIM 与数字监控^[102]、现代测量及三维激光扫描等信息融合^[103],通过动态监测与预警分析,解决道路工程建设中质量与安全问题,复杂结构施工的自动定位与精度分析问题^[104],最终达到综合分析和安全预控目标。

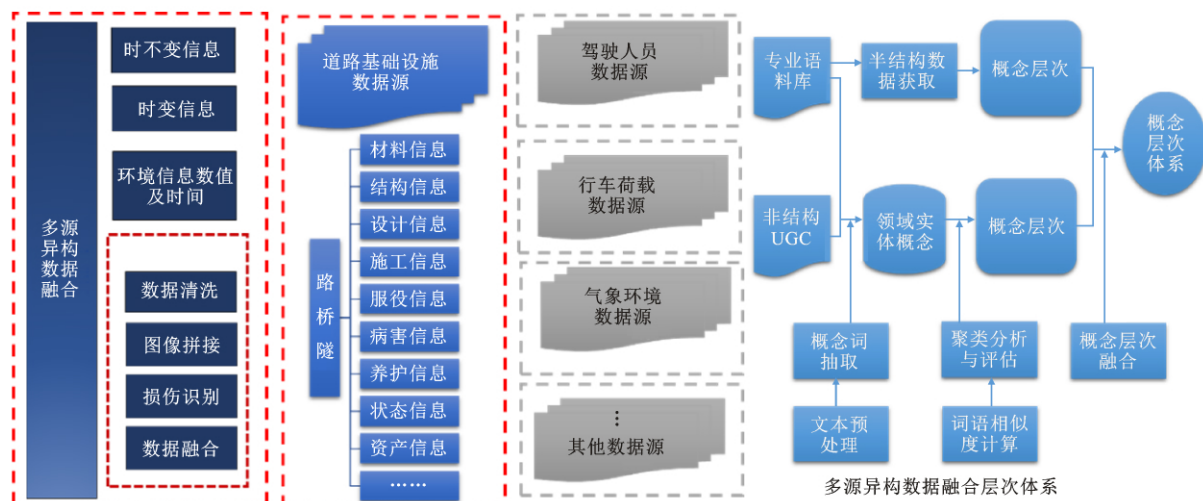


图 11 多源异构数据融合技术体系

Fig. 11 Multi-source Heterogeneous Data Integration Technology System

3.3.3 快速自动化三维重建技术

基于 BIM 技术的集成处理层的技术支撑是三维数字重建技术,在建筑生命期的不同阶段,产品数据是贯穿于项目各个阶段的核心数据,而产品模型的创建只有通过三维模型设计才能够更好地发挥 BIM 带来的信息集成优势^[105-106],其中快速自动化三维重建技术主要分为基于图像的建模技术^[107]和

三维扫描技术^[108]。

基于图像的建模技术通过摄像机对景物拍摄不同角度的图像,前后采用拼接、切割、压缩存储手段将平面图在融合如三维激光、实景照片、视频图像等多源影像数据的基础上,转换成三维动态立体影像,再加以实施渲染和交互,可以使得道路基础设施建设项目各方能随时从全方位、多角度沉浸式浏览整

个工程,这其中基建领域应用中无人机倾斜摄影就是基于图像建模技术而来的^[107]。三维扫描技术则是综合利用光、机、电和计算机技术实现对物体空间外形和结构及色彩的扫描,通过空间三维坐标值自动生成来扫描物体的表面点云信息,通过对点云数据的清洗、过滤、抽息转化为计算机可以直接处理的三维模型,这是道路基础设施领域能够快速获取被测体数据更为有效的途径^[109]。其中田思敏^[110]通过批量重建算法实现了建筑平面图的三维重建,并提取出 BIM 模型数据信息,这将进一步缩短工期,提高工作效率。

3.3.4 路面大数据挖掘与分析技术

路面数据挖掘分析过程相对复杂,与此相关的研究中 Tao 等^[111]介绍了大数据在智能路面制造中的作用,概述了工程领域数据全生命周期的特点。Ren 等^[112]综合应用数据分布式存储、资源动态分配、新型数据分析处理、深度学习的方法,建立了数据驱动的决策、管理和创新的道路工程信息模型可视化管理模式,进一步提高了道路基础设施数字化建设管理的决策力、洞察力与流程优化能力。张绍阳等^[113]通过构建 PDGAA 的数学模型明确了关联分析影响下路面病害成因机理,并对关联分析的流程、数据准备和数据预处理等方法进行了研究。段虎明等^[114]针对海量路测数据进行了误差数据甄别剔除,同时对信号进行趋势项提取,针对分段试验数据做平滑过渡处理,此外还对路面数据做随机性检验。肖顺舟^[115]基于数据挖掘法研究了路面预防性养护决策的相关方法。

在路面大数据挖掘与分析过程中,涉及海量数据的云、边、端的协同融合尚不完善,挖掘分析深度相对有限,存在重采集、轻分析的现象;此外涉及道路数字化基础设施应用的基础数据相对有限,辅助的数据源有待进一步挖掘与共享。未来通过不断开放多源数据,建立相关数据跨行业、跨部门的共享共用机制,才能切实保障道路基建领域数据养料的充足供给,通过多领域数据融合使用,打通壁垒,进一步提高数据使用效率,更大程度释放数字化领域的应用价值。

3.3.5 多网融合传输与通信技术

道路基础设施建设过程中往往跨地域,环境比较复杂恶劣,网络资源相对有限,因此,网络资源成为 BIM 技术应用到道路基建领域的性能瓶颈。随着有线通信网络、新一代宽带无线通信网络、卫星通信信息网络、网络通信(4G/5G)、公路通信系统、

NB-IoT、北斗定位地基增强基站等技术的升级,超快的数据传输速度和多网融合的深化,可以让各终端用户始终处于联网状态。

将传统道路、桥隧、附属机电设施、车路协同设备、精密传感器、智能观测站等多维度交通运行智能感知基础设施^[116],以及 5G 基站、光纤、自组网络设备、高精度导航定位等多网融合的通信网络传输体系融合统一建设^[117],把传统土建、机电系统建设与“新基建”整合为有机统一体,通过采集感知设备和多网融合通信设备^[118],实现道路基础设施海量数据超低时延、超高可靠、超大带宽的实时采集和传输,全面、准确、高效地掌握有机统一体中每段路、每个构筑物的状况,实现实时反馈、预警,对于建构数字化道路基础设施运营管理与服务系统不可或缺^[119]。

3.4 业务应用层

业务应用层是道路基础设施数字化的核心,基于道路信息模型建构的道路应用架构,实现对基于 BIM 的道路建设管理平台中各个业务功能模块及集成信息的统一展示,如图 12 所示。具体包括道路工程的勘察设计、施工建设管理、运维护管理模块^[120],此外同步建构驾驶人信息模型、车辆信息模型、环境信息模型,实现人、车、环境的高度统一,为出行服务研判提供交通供需的动态均衡和精准匹配。

3.4.1 勘察设计阶段

(1)基于实体模型的正向设计。实体模型正向设计需要对 BIM 数据流与工作流进行有序高效地组织协调。这其中 BIM 数据流代表了 BIM 设计成果的传递方向,工作流则明确工作环节的前后次序^[121-122]。从正向设计的初始阶段开始,道路桥涵、隧道相关构筑物就会以三维实体形式呈现在地形中,交付的最终产品也将是整套三维模型。这一阶段的核心在于实体模型的快速化建构^[123],它能够最大限度地提高建模效率,降低各环节成本,从而将更多资源配置于道路基础设施领域勘察设计阶段。这其中薛彩丽^[124]将正向设计的理念应用于铁路项目全生命周期管理中。刘鹏^[125]构建了针对铁路工程勘察设计的 BIM 技术差异化解决方案。航运方面,望毅等^[126]提出了一套适用于水运工程的 BIM 正向设计标准。李锐等^[127]将 BIM 正向设计应用于航道疏浚工程中。

(2)基于 BIM 标准的协同设计。协同设计的目标是尽可能集中管理设计资源,定制各设计参数的交互流程,构建彼此关联的数据逻辑层,形成具有统一数据框架的协同设计体系。包括协同工作平台的

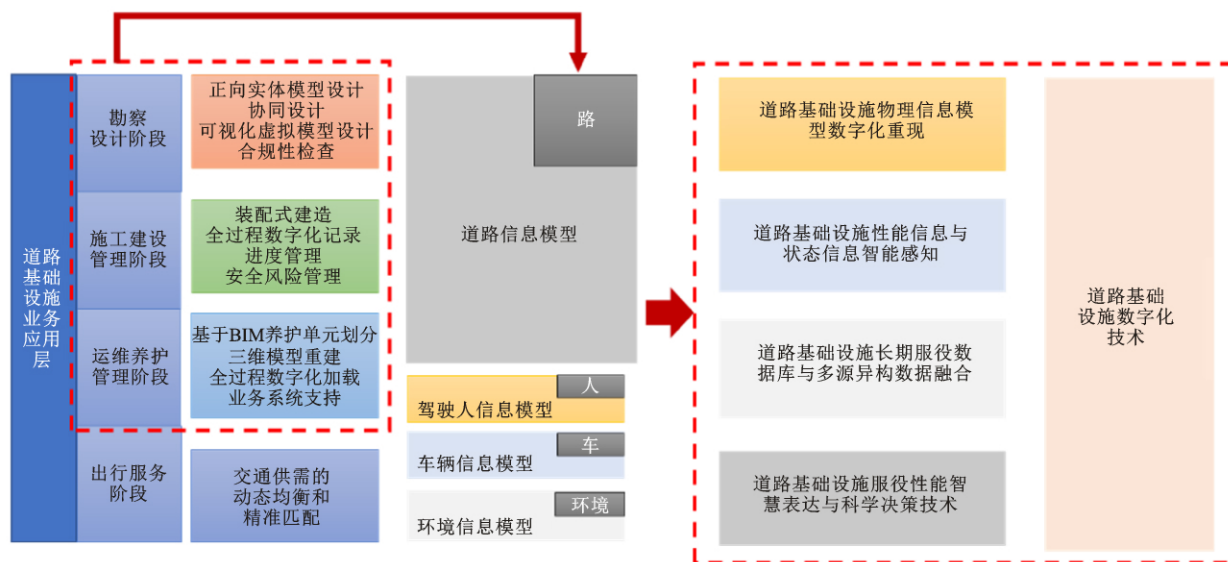


图 12 道路基础设施业务应用层技术体系

Fig. 12 Highway Infrastructure Business Application Technology System

建立,包括建立项目所需的模板库、族库、资源、配置标准、建立项目结构树、设定项目组成员及权限、设定平台工作流程、做好各专业模型的关联引用变更和组装、建立和管理族库、定义建模精度等。其中还包括基于 BIM 的三维地形自动修正和拟合方法、地质 BIM 建模技术、基于 BIM 的路基三维建模方法等与道路设计和建模有关的具体设计建模技术研究。

(3)可视化虚拟模型设计。通过可视化手段为道路设计工作提供便利,具体来看,基于道路工程特征和交通参与者出行体验的现实需求,研究虚拟驾驶、虚拟飞行等道路 BIM 感知与工程评价方法,结合不同交通参与者对工程评价的具体需求,开展以人为道路 BIM 感知、工程评价、协同工作和设计优化。使用虚拟现实技术(VR)、增强现实技术(AR)与混合现实技术(MR)进一步提高 BIM 的表现能力,拓宽 BIM 应用范围。新兴技术手段能够全面提升用户沉浸式、融合式体验,适合道路基础设施数字化建设中的各种复杂的虚实应用场景,如虚拟场景构建、复杂方案模拟、多维模型信息联动、交互式场景建造^[128]。

(4)合规性检查。包括多专业协同一致性检查、针对交付 BIM 模型相关标准的检查和碰撞性检查。合规性检查目的在于检查模型是否符合各单位相互之间所约定的数据要求,它确保了 BIM 模型在不同单位间有效传递的可能性,是支撑建筑全生命周期理念的基石。碰撞检查主要发生在设计的中后期,在各个专业设计基本成形的基础上,对相互之间的空间位置碰撞与施工安装干扰进行检查,此步骤能

够有效地减少以往二维设计直到施工阶段才发现的许多问题^[129],为复杂项目带来了明显的质量和效率的提升。

3.4.2 施工建设管理阶段

(1)装配式建造。在施工建设管理阶段,BIM 技术能够在构件生产制作和预入场、构件的存储管理中发挥较大作用。将 BIM 技术与 RFID 将结合,能够保障数据读取准确性,传输效果好,在构件中置入 RFID 标签,通过标签的唯一标识性,对构件在生产、存储、运输、吊装过程中进行全程数字化的管理^[130]。根据项目实施进度,实时将生产信息反馈到平台上,通过及时调整构件生产计划,减少待工、待料情况的发生。这将有助于在施工建设环节降低库存成本、最大限度地减少损耗,而在建设管理环节,通过对构件的实时追踪,能够避免在施工现场出现找错或找不到所需构件的现象,提高生产效率。

(2)全过程数字化记录。对建设管理环节进行全面集成,将产生的信息即时反馈到数字化模型中,对实施进度中的不当举措进行及时调整以优化设计。此外,工程实施阶段是具体的执行阶段,支持设计信息在施工图设计和实体模型构建间转换,为原有设计信息增添更为详尽的数据资料,这些信息的集成,需要进行全过程的数字化集成化管理。相关的数据信息包括材料供应信息、进度信息、质量检验信息等。

(3)进度管理。在基建工程开展前期,项目单位能够通过 BIM 技术对预设的施工方案进行模拟,进一步通过建立 4D 施工模型,能够对施工进度进行

实时跟踪,同时对施工质量进行把控。这样有利于资源与空间的优化配置,进而得到最优的施工方案与施工组织设计^[131]。施工模拟技术可以在项目建造过程中合理制定施工计划,精确掌握施工进度,优化管理施工资源,进行合理的场地布设,对整个工程的施工进度、资源和质量进行统一管理和控制,从而做到缩短工程期限,降低生产成本,进一步提高进度管理的效率。此外通过 BIM 可以对项目的重难点部分进行可建性模拟,按时间节点分段完成。

(4)安全风险。利用现代化信息技术构建适合于道路施工建设的风险管理体系,具体包括安全风险、隐患排查治理、应急事件管理、人员管理。其中安全风险根据信息平台实时更新的数据信息,对施工过程中存在的风险进行分析管理;隐患排查治理对项目的全生命周期进行安全隐患排查,降低安全事故发生的概率;应急事件管理是设计紧急处理方案,在应急事件发生时,有效做好人员和财产的保护,以降低紧急事故引发的经济损失。人员管理是对施工过程中,施工人员出现的违规、不安全行为进行提醒处理^[132]。

3.4.3 运维管理阶段

运维管理阶段的 BIM 使用与设计施工阶段的 BIM 有所区别。设计、施工阶段的 BIM 采用正向实施,而运维管理阶段的 BIM 往往采用逆向实施,除了少量已具备完善的信息化模型的基础设施外,大部分 BIM 模型需要根据既有的基础设施完成数字化建造,从而实现现状(As-is)模型的快速建构。

要建立适用于维修、养护阶段的 BIM 系统,要完成以下 5 个关键过程:①基于 BIM 养护单元划分。开发针对维修养护的基础设施信息模型单元,以满足更复杂的模型使用需求,承载多维动态的数据信息。②三维模型重建。采用基础设施实体工程扫描技术,实现逆向 3D 数字化模型建造。③全过程数字化加载。基于已建成的道路基础设施 BIM 模型,加载基础设施建、管、养全过程工程数据,实现全过程数据加载。④开发系统集成算法,基于现状模型分析决策,实现全业务系统支持,主要用于维养业务系统,开发维养监测、决策、设计、施工、后评价全过程业务系统,预留二次开发接口。

3.4.4 出行即服务阶段

当前道路数字化发展在业务应用上仍存在信息孤岛严重、基础设施分散、运维体系失衡的现象,亟待以需求为导向的出行即服务(MaaS)体系,将各种交通方式的出行服务进行整合,实现用户出行的需

求和供给的平衡。出行即服务是一种灵活、个性化、随机性强的移动服务。它的本质是以用户为中心,凭借数字信息为核心生产要素,对各类交通方式提供一体化供需优化服务,从而实现交通供需的动态均衡和精准匹配^[133]。

数据资源是道路基础设施领域的刚需,也是数字交通总体蓝图的重要一环,出行即服务体系能够整合线上、线下数据资源,让技术颠覆传统的出行模式,使道路交通系统的运行效率和承载能力进一步提升,通过多要素间信息的交互为用户消除了不同交通方式间的阻碍,通过传输道路与车辆间的数据信息,为建立无缝连接的道路车辆信息化网络系统奠定了基础。

道路基础设施作为为车辆提供场景自适应的交通媒介,车辆反过来又为道路提供全息位置与状态信息,使得整个道路网络系统向数字集成方向发展,辅助以道路基础设施领域的感知和集成处理分析算法,为用户提供最优的交通出行规划方案,实现车与路的实时信息互动。出行即服务体系为出行用户提供灵活、高效、人本的出行服务。这是为构建基于数字交通体系的四大核心要素——人、车、路、环境的交通出行实时信息数据平台,更是为实现由私人交通向共享交通转变、由离散交通系统向一体化综合交通系统转变迈出的坚实一步^[134]。

4 存在的问题与展望

4.1 存在的问题

当下中国经济下行压力持续增大,传统基建领域日益饱和,随着国家提出加快 5G 网络、数据中心等新型基础设施建设的方针,中国数字经济释放了前所未有的活力,作为经济风向标的交通运输行业“新基建”无疑也已站在发展风口,“新基建”所建立的人工智能、物联网等新一代数字化基础设施,无疑将会提速交通的数字化进程。

作为“新基建”重要实践应用领域的道路基础设施,“新基建”已经开始融合发展并在无人驾驶汽车、北斗卫星应用、智慧高速公路建设、城市大脑等领域取得了一定突破。然而总的来说,道路基础设施数字化发展仍处在探索阶段,所依赖的技术还不成熟,实施手段、建设运营模式、服务提供方式仍需要进一步完善。在实际运行过程中产生了诸多问题:

(1)对新型道路基础设施数字化发展规律缺乏系统认知,顶层指导和统筹规划不足。不同于传统意义上的基础设施建设,数字化道路基础设施技术

迭代升级迅速。因此不能套用传统基础设施的发展策略和建设模式。对于道路基础设施全生命周期(勘察设计、施工建设、运维养护、出行服务)的不同流程阶段,缺少高效有力的顶层设计,需要进一步加强顶层指导,统一顶层设计和标准化。此外不同管理部门间仍存在各自为政、独立制定实施规划管理模式的现象,而这既造成了传感器、云数据中心、5G网络等资源的重复建设,又无法最大限度地发挥基础设施作用。

(2)业务协作困难,时效性差,硬件配置仍不健全。从业务角度看,数字化实施方案应用价值和可操作性不高,数据间存在彼此割裂的现象,这也使得数据资源的应用深度有限。信息分享不及时,由此导致了时效性低、协作困难、行业竞争力弱等问题。而这与数字化配置不合理密不可分,应该以新发展理念为指引,以技术创新为首要驱动力,以信息网络为基础,面向高质量发展需要,提供数字转型、智能升级、融合创新等服务的数字化基础设施体系。

(3)新兴技术手段尚未集成,数据应用分析深度相对有限。现阶段道路基础设施数字化发展仍关注于单一的技术功能模块,统一的技术集成体系尚未成熟,无法形成合力,对新兴技术认知也不够深入,这也导致采集海量的数据,进行实时存储检索、深层次数据挖掘工作仍有不小挑战。应用分析层面,重视采集存储,挖掘深度相对有限,对于功能业务的支撑力度明显不足。

(4)防范风险能力有待进一步提高。我们的生产生活越来越离不开数字化基础设施,恶意攻击或者网络故障将给社会带来不可估量的损失;高危漏洞、网络隐患、数字鸿沟都使得供应链中断,甚至传统基础设施运行都会受到严重影响。这对道路基础设施数字化领域的安全可靠提出了更高的要求。数字基础设施的安全可靠运行,需要加强工程推进与资金使用协同管理,通过建立全产业链监测平台,将风险防控思想渗透到基础设施各模块创新的各个环节中。

4.2 展 望

道路基础设施数字化发展需要充分发挥交通运输行业在新型基础设施建设方面的主动作用,面对信息技术的快速发展,为实现交通运输行业提出要求,信息产业提供装备和服务的愿景,未来可以从以下几个方面入手开展研究工作:

(1)数据是道路基础设施数字化实现高质量发展的核心生产要素。以数据为发展核心,以建设数

据中心为基础,构建全生命周期静、动态数据中心架构,通过多领域数据融合使用,打通壁垒,加速数据间的流动,进一步提高数据使用效率,推动不同所有者设施之间的互联互通,实现城市间、行业间、企业间的数据流通共享。更大程度释放数字化应用价值,从而进一步加深在道路基础设施监测和运维管理过程中的应用前景。

(2)突破核心技术,探索技术创新新方向。目前中国的经济已经由高速增长阶段转向高质量发展阶段,各行各业正处在转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期,这为数字经济与实体经济的融合发展带来了重大机遇。数字孪生作为一项关键技术和提高效能的重要工具,可以有效发挥其在模型设计、数据采集、分析预测、模拟仿真等方面的作用,助力推进数字化产业、产业数字化。要综合利用数字孪生、人工智能、工业互联网、特高压、物联网等新技术手段,在基础设施建设全生命周期中,突破关键核心技术瓶颈,以算法为驱动,以数据和硬件为基础,通过大规模知识库、模型库、算法库的集成应用,重点聚焦于提高信息建模、同步、强化、分析、智能决策能力,为构建开放兼容、稳定成熟的技术体系提供支撑;网络方面,构建坚实的网络基础,提高服务供给能力。通过工业互联网设施搭建可靠性高、延时低、连接大的新型高速通信网络,推动开放式网络架构和智能化网络运维发展,实现计算服务的灵活部署分配,为构建泛在智能感知设备网络体系奠定基础。

(3)统一相关标准及技术规范。在市场主导的建设背景下,标准规范制定工作是数字化治理与产业发展的基础和前提。现有的道路基础设施数字化标准工作尚处在起步阶段,由于其涉及领域广泛,工作协调难度大,需要加强顶层设计和规范相关标准。基于国内外道路交通领域在数字化转型升级中出现的相关新型技术手段,进一步梳理数字化发展生态体系,把握技术演进趋势和产业未来重点发展方向,扎实构建满足产业发展需求、先进适用的数字孪生标准体系。此外通过开展试点工作,进一步完善道路基础设施数字化建设的标准和数字化平台建设标准及规范。建设城市数字化平台,并以此为切入点,探索建设未来智慧城市的数字化基础设施,打造未来城市的智慧化解决方案。

5 结 语

(1)实践经验表明,要大力发展数字经济,促进

交通产业现代化转型发展,就必须进一步完善新型道路基础设施建设。尽管数字化基础设施有着较高的建设成本,但产业的发展具有极强的带动作用,会对中国经济发展产生强有力的助推作用。中国具有门类齐全、产业链完整的现代化工业生产体系,“新基建”有着巨大的市场规模和应用前景,加快道路基础设施数字化建设,是中国由交通大国向交通强国迈进的必经之路。

(2)数字化道路基础设施建设尚处于不断完善过程中,它是基于数字经济的发展需要和新一代技术演化而形成的,对它的技术经济特征和演进发展规律,要在发展过程中不断摸索与总结。要以整体优化、协同融合为指导思想,以新基建带动传统基建,构筑集约高效、经济适用、智能绿色、安全可靠的现代化数字基础设施体系,助力国家经济社会创新发展。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2019 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2020-05-12) [2020-09-16]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202005/t20200512_3374322.html. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical Bulletin of Transportation Industry Development in 2019 [EB/OL]. (2020-05-12) [2020-09-16]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202005/t20200512_3374322.html.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 关于印发《数字交通发展规划纲要》的通知(交规划发〔2019〕89 号) [EB/OL]. (2019-07-28) [2020-09-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/28/content_5415971.htm. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Ministry of Transport Releases Outline of Digital Transport Development Plan (JGJF [2019] No. 89) [EB/OL]. (2019-07-28) [2020-09-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-07/28/content_5415971.htm.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见(交规划发〔2020〕75 号) [EB/OL]. (2019-08-06) [2020-09-16]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/06/content_5532842.htm. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Ministry of Transport: Facilitate the Construction of New Infrastructure in the Field of Transportation (JGJF [2020] No. 75) [EB/OL]. (2019-08-06) [2020-09-16]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/06/content_5532842.htm.
- [4] WANG Lin-bing, 王含笑, 赵 千, 等. 智能路面发展与展望 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 50-72.
- WANG Lin-bing, WANG Han-xiao, ZHAO Qian, et al. Development and Prospect of Intelligent Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4): 50-72.
- [5] 周 游, 陈建丰. 基于 BIM 技术的道路工程模型建立及应用 [J]. 公路交通技术, 2018, 34(3): 29-32, 38. ZHOU You, CHEN Jian-feng. Construction and Application of Road Engineering Model Based on BIM Technology [J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34 (3): 29-32, 38.
- [6] 巩海霞, 王明芝, 谷丽娜. 基于文献计量的个性化信息服务研究现状分析 [J]. 情报科学, 2011(3): 391-395. GONG Hai-xia, WANG Ming-zhi, GU Li-na. Analysis on the Status of Personalized Information Service Based on the Bibliometrics [J]. Information Science, 2011 (3): 391-395.
- [7] LIU J, MOONEY H, HULL V, et al. Systems Integration for Global Sustainability [J]. Science, 2015, 347 (6225): 1-29.
- [8] RODRIGUE J P, COMTOIS C, SLACK B. Book Reviews the Geography of Transport Systems [J]. Journal of Urban Technology, 2011, 18 (2): 99-101.
- [9] KAMMEN D M, SUNTER D A. City-integrated Renewable Energy for Urban Sustainability [J]. Science, 2016, 352 (6288): 922-928.
- [10] JIANG X, ZHANG L, XIONG C, et al. Transportation and Regional Economic Development: Analysis of Spatial Spillovers in China Provincial Regions [J]. Networks and Spatial Economics, 2016, 16 (3): 769-790.
- [11] TASIC I, PORTER R. Modeling Spatial Relationships Between Multimodal Transportation Infrastructure and Traffic Safety Outcomes in Urban Environments [J]. Safety Science, 2016, 82: 325-337.
- [12] GOMES CORREIA A, WINTER M G, PUPPALA A J. A Review of Sustainable Approaches in Transport Infrastructure Geotechnics [J]. Transportation Geotechnics, 2016, 7: 21-28.
- [13] NG S T, XU F J, YANG Y, et al. A Master Data Management Solution to Unlock the Value of Big Infrastructure Data for Smart, Sustainable and Resilient City Planning [J]. Procedia Engineering, 2017, 196: 939-947.
- [14] JIANG X, ZHANG L, XIONG C. Transportation and Regional Economic Development: Analysis of Spatial Spillovers in China Provincial Regions [J]. Networks and Spatial Economics, 2016, 16 (3): 769-790.
- [15] SHIBUSAWA H, SAKURAI K, MIZUNOYA T, et al. Socioeconomic Environmental Policies and Evaluations in Regional Science: Essays in Honor of Yoshiro Higano [J]. New Frontiers in Regional Science: Asian Perspectives, 2017, 1007: 978-981.
- [16] MÜLLER D B, LIU G, LØVIK A N, et al. Carbon Emissions of Infrastructure Development [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47 (20): 11739-11746.

- [17] TASIC I, PORTER R J. Modeling Spatial Relationships Between Access to Multimodal Transportation and Traffic Safety Outcomes [J]. Transportation Research Board Annual Meeting, 2015, 82 (2): 325-337.
- [18] CAMP J, ABKOWITZ M, HORNBERGER G, et al. Climate Change and Freight-transportation Infrastructure: Current Challenges for Adaptation [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2013, 19 (4): 363-370.
- [19] DURANGO COHEN P L, SARUTIPAND P. Capturing Inter-dependencies and Heterogeneity in the Management of Multi-facility Transportation Infrastructure Systems [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2007, 13 (2): 115-123.
- [20] NUNO L, ANTHONY J V. Infrastructure, Geographical Disadvantage, Transport Costs, and Trade [J]. World Bank Economic Review, 2001 (3): 451-479.
- [21] SALLING K B, BANISTER D. Assessment of Large Transport Infrastructure Projects: The CBA-DK Model [J]. Transportation Research Part A, 2009, 43 (9): 800-813.
- [22] LAKSHMANAN T R. The Broader Economic Consequences of Transport Infrastructure Investments [J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19 (1): 1-12.
- [23] LAKSHMANAN T R, HAN X L. Factors Underlying Transportation CO₂ Emissions in the U. S. A. : A Decomposition Analysis [J]. Transportation Research Part D, 1997, 2 (1): 1-15.
- [24] FLYVBJERG B. What You Should Know About Mega-projects and Why: An Overview [J]. Project Management Journal, 2014, 45 (2): 6-19.
- [25] RIETVELD P. Infrastructure and Spatial Economic Development [J]. The Annals of Regional Science, 1995, 29 (2): 117-119.
- [26] PUGA D. Agglomeration and Cross-border Infrastructure [J]. Eib Papers, 2008, 13 (2): 102-124.
- [27] KUPRIYANOVSKY V, ALENKOV V, SOKOLOV I, et al. Smart Infrastructure, Physical and Information Assets, Smart Cities, BIM, GIS, and IoT [J]. International Journal of Open Information Technologies, 2017, 5 (10): 55-86.
- [28] NG S T, XU F J, YANG Y, et al. A Master Data Management Solution to Unlock the Value of Big Infrastructure Data for Smart, Sustainable and Resilient City Planning [J]. Procedia Engineering, 2017, 19 (6): 939-947.
- [29] JUAN Y K, LAI W Y, SHIH S G. Building Information Modeling Acceptance and Readiness Assessment in Taiwanese Architectural Firms [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 23 (3): 356-367.
- [30] RICHARD W. NBS National BIM Report 2020 [R]. London: National Building Specification, 2020.
- [31] JUPP J R. Incomplete BIM Implementation: Exploring Challenges and the Role of Product Life-cycle Management Functions [C] // IFIP. International Conference on Product Life-cycle Management. Berlin: Heidelberg, 2013: 630-640.
- [32] LEE G, SACKS R, EASTMAN C M. Specifying Parametric Building Object Behavior (BOB) for a Building Information Modeling System [J]. Automation in Construction, 2006, 15 (6): 758-776.
- [33] 王卫伟. 智慧园区的 BIM、GIS 和 IoT 技术应用融合探讨[J]. 智能建筑, 2015(7): 46-48.
WANG Wei-wei. Discussion on the Application Integration of BIM, GIS and IoT Technology in Smart Park [J]. Intelligent Building, 2015 (7): 46-48.
- [34] RAZA H, TANOLI W A, LEE S S, et al. Flexible Earthwork BIM Module Framework for Road Project [C] // ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Taipei: IAARC Publications, 2017: 52-70.
- [35] BRADLEY A, LI H, LARK R, et al. BIM for Infrastructure: An Overall Review and Constructor Perspective [J]. Automation in Construction, 2016, 71: 139-152.
- [36] 刘 睿, 许 燕. BIM 在工程造价中的应用文献综述[J]. 项目管理技术, 2014, 12(7): 34-37.
LIU Rui, XU Yan. Literature Review of BIM Application in Engineering Cost [J]. Project Management Technology, 2014, 12 (7): 34-37.
- [37] VANLANDEA R, NICOLLE C, CRUZ C. IFC and Building Life-cycle Management [J]. Automation in Construction, 2008, 18 (1): 70-78.
- [38] EASTMAN C M, EASTMAN C, TEICHOLZ P, et al. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors [M]. Atlanta: John Wiley & Sons, 2011.
- [39] SHAABAN K, NADEEM A. Professionals' Perception Towards Using Building Information Modelling (BIM) in the Highway and Infrastructure Projects [J]. International Journal of Engineering Management and Economics, 2015, 5 (3/4): 273-289.
- [40] THIERRY DORÉ, CLERMONT-DAUPHIN C, CROZAT Y, et al. Methodological Progress in On-farm Regional Agro-nomic Diagnosis: A Review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, 28 (1): 151-161.
- [41] SATTINENI A, BRADFORD R H. Estimating with BIM: A Survey of US Construction Companies [C] // ISARC. 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Alaska: ISARC, 2011: 1-11.
- [42] CHONG H Y, LOPEZ R, WANG J, et al. Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects [J]. Journal of Management in Engineering, 2016, 32 (6): 05016021.
- [43] LIU B, CAI T, XIAO S, et al. Research on Application of BIM Technology in Municipal Road Construction [C] // IOP. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci-

- ence. Wuhan: IOP Publishing, 2019: 220-278.
- [44] CHEN L, SHI P, TANG Q, et al. Development and Application of a Specification-compliant Highway Tunnel Facility Management System Based on BIM [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103262.
- [45] 薛晓娟, 赵 昕, 丁洁民. 建筑信息模型在建筑结构一体化协同设计中的应用[J]. 结构工程师, 2011, 27(1): 14-18.
XUE Xiao-juan, ZHAO Xin, DING Jie-min. Application of Building Information Model in Collaborative Design of Building Structure Integration [J]. Structural Engineer, 2011, 27(1): 14-18.
- [46] 董 君, 王志赫. 高速公路工程建设中对 BIM 技术的应用实践[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 1-3.
DONG Jun, WANG Zhi-he. Application of BIM Technology in Expressway Engineering Construction [J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 1-3.
- [47] 吴遵奇, 段 昶, 黄睿奕, 等. BIM 技术在复杂码头结构施工可视化进度管理中的应用[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(7): 22-26.
WU Zun-qi, DUAN Chang, HUANG Rui-yi, et al. Application of BIM Technology in Visual Schedule Management of Complex Wharf Structure Construction [J]. China Harbor Construction, 2017, 37(7): 22-26.
- [48] 张建平, 余芳强, 赵文忠, 等. BIM 技术在邢汾高速公路工程建设中的研究和应用[J]. 施工技术, 2014(18): 92-96.
ZHANG Jian-ping, YU Fang-qiang, ZHAO Wen-zhong, et al. Research and Application of BIM Technology in Xingfen Expressway Engineering Construction [J]. Construction Technology, 2014(18): 92-96.
- [49] 冀 程. BIM 技术在轨道交通工程设计中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增 1): 1663-1668.
JI Cheng. Application of BIM Technology in Rail Transit Engineering Design [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S1): 1663-1668.
- [50] 徐萍飞, 熊 峰, 夏伟杰, 等. 基于 BIM 的桥梁信息集成管理系统研究[J]. 公路, 2016, 45(12): 119-123.
XU Ping-fei, XIONG Feng, XIA Wei-jie, et al. Research on Bridge Information Integration Management System Based on BIM [J]. Highway, 2016, 45(12): 119-123.
- [51] 刘向阳, 吴 健, 刘国图, 等. 基于 BIM 的公路全寿命周期管理平台构建与应用[J]. 公路, 2016, 45(8): 131-137.
LIU Xiang-yang, WU Jian, LIU Guo-tu, et al. Construction and Application of Highway Life Cycle Management Platform Based on BIM [J]. Highway, 2016, 45(8): 131-137.
- [52] 刘显智. 工程建设项目信息化集成研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
LIU Xian-zhi. Research on Informatization Integration of Engineering Construction Projects [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [53] 张贵忠. 沪通长江大桥 BIM 建设管理平台研发及应用[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 6-10.
ZHANG Gui-zhong. Development and Application of BIM Construction Management Platform for Hutong Yangtze River Bridge [J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 6-10.
- [54] 胡振中, 路新瀛, 张建平. 基于建筑信息模型的桥梁工程全寿命管理应用框架[J]. 公路交通科技, 2010(增 1): 20-24.
HU Zhen-zhong, LU Xin-ying, ZHANG Jian-ping. Life Cycle Management Application Framework of Bridge Engineering Based on Building Information Model [J]. Highway Transportation Science and Technology, 2010(S1): 20-24.
- [55] 武 斌, 谭卓英, 张颂娟, 等. 基于 BIM 的在役大跨度桥梁智能化养护管理技术[J]. 沈阳大学学报: 自然科学版, 2016, 28(6): 497-502.
WU Bin, TAN Zhuo-ying, ZHANG Song-juan, et al. Intelligent Maintenance and Management Technology of Existing Long-span Bridges Based on BIM [J]. Journal of Shenyang University: Natural Science Edition, 2016, 28(6): 497-502.
- [56] 祝 嘉. 在城市轨道交通建设项目中应用 BIM 技术的设想[J]. 建筑经济, 2008(增 2): 375-378.
ZHU Jia. Assumption of Applying BIM Technology in Urban Rail Transit Construction Projects [J]. Construction Economics, 2008(S2): 375-378.
- [57] 卞若宁. 施工阶段 BIM 应用“标准”探索[J]. 土木建筑工程信息技术, 2014, 6(3): 9-12.
BIAN Ruo-ning. Exploration of BIM Application “Standard” In Construction Stage [J]. Civil Engineering Information Technology, 2014, 6(3): 9-12.
- [58] 高殿民. BIM 技术在建筑工程施工阶段中的应用标准[J]. 中国标准化, 2017(18): 145-146.
GAO Dian-min. Application Standard of BIM Technology in Construction Stage [J]. China Standardization, 2017(18): 145-146.
- [59] COSTIN A, ADIBFAR A, HU H, et al. Building Information Modeling (BIM) for Transportation Infrastructure-literature Review, Applications, Challenges, and Recommendations [J]. Automation in Construction, 2018, 94: 257-281.
- [60] SHAABAN K, NADEEM A. Professionals' Perception Towards Using Building Information Modelling (BIM) in the Highway and Infrastructure Projects [J]. International Journal of Engineering Management and Economics, 2015, 5(3/4): 273-289.
- [61] FLOROS G S, BOYES G, OWENS D, et al. Developing IFC for Infrastructure: A Case Study of Three Highway Entities [C] // ISPRS. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Chicago: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2019: 59-66.
- [62] PASETTO M, GIORDANO A, BORIN P, et al. Integrated Railway Design Using Infrastructure-building Information Modeling: The Case Study of the Port of Venice [J]. Trans-

- portation Research Procedia, 2020, 45: 850-857.
- [63] MESSNER J, ANUMBA C, DUBLER C, et al. BIM Project Execution Planning Guide-version 2.1 [J]. Build Alliance, 2011 (1): 1-135.
- [64] DE LAAT R, VAN BERLO L. Integration of BIM and GIS: The Development of the CityGML GeoBIM Extension [C] // Springer. Advances in 3D Geo-information Sciences. Berlin: Heidelberg, 2011: 211-225.
- [65] AZHAR S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry [J]. Leadership and Management in Engineering, 2011, 11 (3): 241-252.
- [66] RUBENSTONE J. Autodesk Steers Users Toward the Cloud with Expanded Subscription-based Services [J]. Engineering News Record, 2012, 268 (11): 30-41.
- [67] KU K, TAIEBAT M. BIM Experiences and Expectations: The Constructors' Perspective [J]. International Journal of Construction Education and Research, 2011, 7 (3): 175-197.
- [68] PHILIPS S, AZHAR S. Role of BIM for Facility Management in Academic Institutions [C] // CITC. Proceedings of the 6th International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-VI). Kuala Lumpur: CITC Publishing, 2011: 950-957.
- [69] 智 鹏. 基于 BIM 的铁路建设管理平台及关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
- ZHI Peng. Research on BIM-based Railway Construction Management Platform and Its Key Technologies [D]. Beijing: China Railway Science Research Institute, 2018.
- [70] MINOLI D. Enterprise Architecture A to Z: Frameworks, Business Process Modeling, SOA, and Infrastructure Technology [M]. Boston: CRC Press, 2008.
- [71] CHEUNG W F, LIN T H, LIN Y C. A Real-time Construction Safety Monitoring System for Hazardous Gas Integrating Wireless Sensor Network and Building Information Modeling Technologies [J]. Sensors, 2018, 18 (2): 436.
- [72] 沙 超, 王汝传, 张 悦. 一种基于无线传感器网络的智能交通系统[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(10): 81-83, 87.
- SHA Chao, WANG Ru-chuan, ZHANG Yue. An Intelligent Transportation System Based on Wireless Sensor Networks [J]. Sensors and Microsystems, 2012, 31 (10): 81-83, 87.
- [73] RIAZ Z, ARSLAN M, KIANI A K, et al. CoSMoS: A BIM and Wireless Sensor Based Integrated Solution for Worker Safety in Confined Spaces [J]. Automation in Construction, 2014, 45: 96-106.
- [74] 董可新, 迟安琦, 高 平. 传感器与 BIM 结合的设施管理研究[J]. 工程管理学报, 2018(5): 13.
- DONG Ke-xin, CHI An-qi, GAO Ping. Research on Facility Management Based on Sensor and BIM [J]. Journal of Engineering Management, 2018 (5): 13.
- [75] 陈悦华, 申钱依. 基于 BIM 和 RFID 传感器集成技术的施工安全预警研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(8): 145.
- CHEN Yue-hua, SHEN Qian-yi. Research on Construction Safety Early Warning Based on BIM and RFID Sensor Integration Technology [J]. Hubei Agricultural Science, 2020, 59 (8): 145.
- [76] 迟安琦. 基于 BIM 和传感器的复杂 HVAC 系统智能故障管理决策辅助模型[D]. 大连: 东北财经大学, 2018.
- CHI An-qi. Intelligent Fault Management Decision Support Model for Complex HVAC System Based on BIM and Sensor [D]. Dalian: Northeast University of Finance and Economics, 2018.
- [77] 胡振中, 田佩龙, 李久林. 基于 IFC 的传感器信息存储与应用研究[J]. 图学报, 2018, 39(3): 522-529.
- HU Zhen-zhong, TIAN Pei-long, LI Jiu-lin. Research on Storage and Application of Sensor Information Based on IFC [J]. Journal of Graphics, 2018, 39 (3): 522-529.
- [78] DAVILA DELGADO J M, BUTLER L J, GIBBONS N, et al. Management of Structural Monitoring Data of Bridges Using BIM [C] // ICEE. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-bridge Engineering. Kansas City: Thomas Telford Ltd, 2017: 204-218.
- [79] LIU B, SUN X. Application Analysis of BIM Technology in Metro Rail Transit [C] // IOP. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. London: Springer, 2018: 120-128.
- [80] 吴昕慧, 陶汉卿, 蔡 煊. 基于多传感器信息融合的轨道交通列车轮径校正方法[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(6): 21-27.
- WU Xin-hui, TAO Han-qing, CAI Xuan. Wheel Diameter Correction Method for Rail Transit Train Based on Multi-sensor Information Fusion [J]. Urban Rail Transit Research, 2015, 18 (6): 21-27.
- [81] 徐华中, 吴 苏, 刘 念. 基于多传感器数据融合技术的短时交通流检测[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(2): 104-106, 109.
- XU Hua-zhong, WU Su, LIU Nian. Short Term Traffic Flow Detection Based on Multi-sensor Data Fusion Technology [J]. Sensors and Microsystems, 2009, 28 (2): 104-106, 109.
- [82] 郑江华, 晏 磊, 刘岳峰, 等. 基于混合传感器网络的城市智能交通系统构建[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(3): 362-367.
- ZHENG Jiang-hua, YAN Lei, LIU Yue-feng, et al. Construction of Urban Intelligent Transportation System Based on Hybrid Sensor Networks [J]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2009, 42 (3): 362-367.
- [83] 王卫东, 顾世平, 高利民, 等. 高速铁路基础设施综合检测技术[J]. 铁路技术创新, 2015(2): 11-16.
- WANG Wei-dong, GU Shi-ping, GAO Li-min, et al. Comprehensive Detection Technology of High-speed Railway Infrastructure [J]. Railway Technology Innovation, 2015 (2): 11-16.

- [84] AZIZ Z, RIAZ Z, ARSLAN M. Leveraging BIM and Big Data to Deliver Well Maintained Highways [J]. Facilities, 2017 (3): 27-41.
- [85] DELGADO J M D, BUTLER L, BRILAKIS I, et al. Structural Performance Monitoring Using a Dynamic Data-driven BIM Environment [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32 (3): 131-149.
- [86] 刘文军,樊建席,李春胜,等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的智能交通系统设计[J]. 传感技术学报, 2013, 26 (12): 1747-1751.
- LIU Wen-jun, FAN Jian-xi, LI Chun-sheng, et al. Design of Intelligent Transportation System Based on ZigBee Wireless Sensor Network [J]. Journal of Sensing Technology, 2013, 26 (12): 1747-1751.
- [87] 徐立锋. 基于无线传感器网络技术在交通信息采集系统的应用[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29 (4): 236-241, 262.
- XU Li-feng. Application of Wireless Sensor Network Technology in Traffic Information Collection System [J]. Computer Applications and Software, 2012, 29 (4): 236-241, 262.
- [88] WU X, YAO H, XIE D, et al. Developing of Management Information System of Road and Bridge Infrastructure Based on ArcGIS Engine [C] // IEEE. 2012 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Los Angeles: IEEE, 2012: 1-3.
- [89] 毛华坚. 云环境中的移动文件存储和时空数据分析关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- MAO Hua-jian. Research on Key Technologies of Mobile File Storage and Spatiotemporal Data Analysis in Cloud Environment [D]. Changsha: University of Defense Science and Technology, 2013.
- [90] 张绍阳,葛丽娟,安毅生,等. 交通运输数据标准研究现状与发展[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14 (2): 112-126.
- ZHANG Shao-yang, GE Li-juan, AN Yi-sheng, et al. Research Status and Development of Transportation Data Standards [J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 14 (2): 112-126.
- [91] 宋炜炜. 基于时空信息云平台的空间大数据管理和高性能计算研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2015.
- SONG Wei-wei. Research on Spatial Big Data Management and High-performance Computing Based on Spatiotemporal Information Cloud Platform [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [92] PENG W, LI Y, LI B, et al. An Analysis Platform of Road Traffic Management System Log Data Based on Distributed Storage and Parallel Computing Techniques [C] // IEEE. 2016 IEEE International Conferences on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom) (BDCloud-socialCom-sustainCom). New York: IEEE, 2016: 585-589.
- [93] 李庆君. Hadoop 架构下海量空间数据存储与管理[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- LI Qing-jun. Storage and Management of Massive Spatial Data Under Hadoop Architecture [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [94] LU J. UDBMS: Road to Unification for Multi-model Data Management [C] // Springer. International Conference on Conceptual Modeling. Seattle: Cham, 2018: 161-182.
- [95] 苏鹤俊,邓瑞祥,韩东君,等. 道路养护大数据收集,分类与存储研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2019 (8): 83.
- SU He-jun, DENG Rui-xiang, HAN Dong-jun, et al. Research on Collection, Classification and Storage of Big Data of Road Maintenance [J]. Highway Transportation Technology: Application Technology Edition, 2019 (8): 83.
- [96] PAUWELS P, DE MEYER R, VAN CAMPENHOUT J. Interoperability for the Design and Construction Industry Through Semantic Web Technology [C] // Springer. International Conference on Semantic and Digital Media Technologies. Berlin: Heidelberg, 2010: 143-158.
- [97] GRÖGER G, KOLBE T H, NAGEL C, et al. OGC City Geography Markup Language [J]. (CityGML) Encoding Standard, 2012, 16: 17-41.
- [98] 汤圣君,朱庆,赵君桥. BIM 与 GIS 数据集成: IFC 与 CityGML 建筑几何语义信息互操作技术[J]. 土木建筑工程信息技术, 2014, 6 (4): 11-17.
- TANG Sheng-jun, ZHU Qing, ZHAO Jun-qiao. BIM and GIS Data Integration: Interoperability Technology of IFC and CityGML Architectural Geometric Semantic Information [J]. Civil Engineering Information Technology, 2014, 6 (4): 11-17.
- [99] 刘夏彬. 基于互操作性理论的 BIM 技术应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- LIU Xia-bin. Research on Application of BIM Technology Based on Interoperability Theory [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [100] SHIROWZHAN S, SEPASGOZAR S M E, EDWARDS D J, et al. BIM Compatibility and Its Differentiation with Interoperability Challenges as an Innovation Factor [J]. Automation in Construction, 2020, 112: 103086.
- [101] 闫鹏. BIM 与物联网技术融合应用探讨[J]. 铁路技术创新, 2015 (6): 45-47.
- YAN Peng. Discussion on the Integration and Application of BIM and Internet of Things Technology [J]. Railway Technology Innovation, 2015 (6): 45-47.
- [102] 林晓,高军,王伟,等. 高铁隧道智能三维数字施工控制技术与应用探究[J]. 智慧城市与可持续发展研究, 2019, 1 (1): 1-17.
- LIN Xiao, GAO Jun, WANG Wei, et al. Intelligent 3D Digital Construction Control Technology and Application of High-speed Railway Tunnel [J]. Smart City and Sustainable Development Research, 2019, 1 (1): 1-17.

- [103] 李琳,张旭,屠大维. 二维和三维视觉传感集成系统联合标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2473-2479.
LI Lin, ZHANG Xu, TU Da-wei. Joint Calibration Method of Two-dimensional and Three-dimensional Visual Sensor Integrated System [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33 (11): 2473-2479.
- [104] 许强强,韩春华,卢玉韬. BIM技术在桥梁监测中的应用与探索[J]. 公路, 2018, 63(1): 232-236.
XU Qiang-qiang, HAN Chun-hua, LU YU-tao. Application and Exploration of BIM Technology in Bridge Monitoring [J]. Highway, 2018, 63 (1): 232-236.
- [105] 徐迪,潘东婴,谢步瀛. 基于BIM的结构平面简图三维重建[J]. 结构工程师, 2011, 27(5): 17-21.
XU Di, PAN Dong-ying, XIE Bu-ying. 3D Reconstruction of Structural Plane Diagram Based on BIM [J]. Structural Engineer, 2011, 27 (5): 17-21.
- [106] 王令文. 结合点云数据与BIM技术的古建筑三维重建与信息化管理[J]. 测绘通报, 2018(6): 114-117, 129.
WANG Ling-wen. 3D Reconstruction and Information Management of Ancient Buildings Based on Point Cloud Data and BIM Technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018 (6): 114-117, 129.
- [107] 刘钢,彭群生,鲍虎军. 基于图像建模技术研究综述与展望[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005(1): 18-27.
LIU Gang, PENG Qun-sheng, BAO Hu-jun. Research Review and Prospects Based on Image Modeling Technology [J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2005 (1): 18-27.
- [108] 栾悉道,应龙,谢毓湘,等. 三维建模技术研究进展[J]. 计算机科学, 2008(2): 208-210, 229.
LUAN Xi-dao, YING Long, XIE Yu-xiang, et al. Research Progress of 3D Modeling Technology [J]. Computer Science, 2008 (2): 208-210, 229.
- [109] 徐照,李苏豪,陈楠,等. 基于点云的建筑物表面损伤三维重建与属性提取方法[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(3): 28-33, 51.
XU Zhao, LI Su-hao, CHEN Nan, et al. Point Cloud-based 3D Reconstruction of Building Surface Damage and Attribute Extraction Method [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35 (3): 28-33, 51.
- [110] 田思敏. 基于BIM的三维重建技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
TIAN Si-min. Research on 3D Reconstruction Technology Based on BIM [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [111] TAO F, QI Q, LIU A, et al. Data-driven Smart Manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 157-169.
- [112] REN S, ZHANG Y, LIU Y, et al. A Comprehensive Review of Big Data Analytics Throughout Product Lifecycle to Support Sustainable Smart Manufacturing: A Framework, Challenges and Future Research Directions [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 1343-1365.
- [113] 张绍阳,马玉兰,王选仓. 基于关联分析的路面病害成因确定方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 98-103.
ZHANG Shao-yang, MA Yu-lan, WANG Xuan-cang. Determination Method of Pavement Disease Causes Based on Correlation Analysis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21 (2): 98-103.
- [114] 段虎明,谢飞,张开斌,等. 海量道路路面测量数据的若干预处理方法研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 101-106.
DUAN Hu-ming, XIE Fei, ZHANG Kai-bin, et al. Study on Some Pretreatment Methods of Massive Road Surface Measurement Data [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (8): 101-106.
- [115] 肖顺舟. 基于数据挖掘的路面预防性养护决策的研究与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
XIAO shun-zhou. Research and Implementation of Pavement Preventive Maintenance Decision Based on Data Mining [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [116] JOHANSSON M. From BIM to VR -The Design and Development of BIMXplorer [M]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2016.
- [117] 张纪升,李斌,王笑京,等. 智慧高速公路架构与发展路径设计[J]. 公路交通科技, 2018, 35(1): 88-94.
ZHANG Ji-sheng, LI Bin, WANG Xiao-jing, et al. Smart Expressway Architecture and Development Path Design [J]. Highway and Transportation Technology, 2018, 35 (1): 88-94.
- [118] CEROVSEK T. A Review and Outlook for a "Building Information Model" (BIM): A Multi-standpoint Framework for Technological Development [J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25 (2): 224-244.
- [119] AFSARI K, EASTMAN C M, SHELDEN D R. Cloud-based BIM Data Transmission: Current Status and Challenges [C] // ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Munich: IAARC Publications, 2016: 1-33.
- [120] JESTICE C V, MAHER J W, CHRISTENSEN L. Communication System Network that Includes a BIM Status Update Method: U. S. Patent 5, 228, 038 [P]. 1993-7-13.
- [121] 徐博. 基于BIM技术的铁路工程正向设计方法研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 35-40.
XU Bo. Research on Forwarding Design Method of Railway Engineering Based on BIM Technology [J]. Railway Standard Design, 2018, 62 (4): 35-40.
- [122] 李俊松,董凤翔,张毅,等. 基于达索平台的铁路隧道工程全生命周期BIM技术应用探讨[J]. 铁路技术创新, 2014(2): 53-56.
LI Jun-song, DONG Feng-xiang, ZHANG Yi, et al. Appli-

- cation of BIM Technology in the Whole Life Cycle of Railway Tunnel Engineering Based on Dassault Platform [J]. Railway Technology Innovation, 2014 (2): 53-56.
- [123] ROBINSON R, DANIELSON U, SNAITH M S. Road Maintenance Management: Concepts and Systems [M]. Macmillan: International Higher Education, 1998.
- [124] 薛彩丽. 基于 BIM 的铁路建设全寿命周期投资管理研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(11): 103-107.
- XUE Cai-li. Research on Life Cycle Investment Management of Railway Construction Based on BIM [J]. Journal of Railway Engineering, 2019, 36 (11): 103-107.
- [125] 刘 鹏. 铁路工程设计 BIM 技术的差异化与解决方案[J]. 铁道工程学报, 2014(2): 23-26, 102.
- LIU Peng. Differences and Solutions of BIM Technology in Railway Engineering Design [J]. Journal of Railway Engineering, 2014 (2): 23-26, 102.
- [126] 望 毅, 陈青红, 刘 松. 水运工程勘察设计企业 BIM 技术体系探索[J]. 水运工程, 2018(8): 109-112.
- WANG Yi, CHEN Qing-hong, LIU Song. Exploration on BIM Technology System of water Transportation Engineering Survey and Design Enterprises [J]. Port and Waterway Engineering, 2018 (8): 109-112.
- [127] 李 锐, 李 正, 王 飞. BIM 正向设计在内河航道疏浚工程中的应用[J]. 水运工程, 2019(12): 123-126.
- LI Rui, LI Zheng, WANG Fei. Application of BIM Forward Design in Inland Waterway Dredging Engineering [J]. Port and Waterway Engineering, 2019 (12): 123-126.
- [128] 郭文强. 基于“BIM+VR”的建筑可视化设计方法及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- GUO Wen-qiang. Research on the Method and Application of Architectural Visualization Design Based on BIM & VR [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [129] 孙澄宇, 柯 勋. 建筑设计中 BIM 模型的自动规范检查方法研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 140-145.
- SUN Cheng-yu, KE Xun. Research on Automatic Specification Checking Method of BIM Model in Architectural Design [J]. Architectural Science, 2016, 32 (4): 140-145.
- [130] 熊 诚. BIM 技术在 PC 住宅产业化中的应用[J]. 住宅产业, 2012(6): 17, 19-20.
- XIONG Cheng. Application of BIM Technology in PC Housing Industrialization [J]. Housing Industry, 2012 (6): 17, 19-20.
- [131] 陈 沉, 张业星, 陈 健, 等. 基于建筑信息模型的全过程设计和数字化交付[J]. 水力发电, 2014, 40(8): 42-46.
- CHEN Chen, ZHANG Ye-xing, CHEN Jian, et al. Whole Process Design and Digital Delivery Based on Building Information Model [J]. Water Power, 2014, 40 (8): 42-46.
- [132] 银 超. 安全风险管理的在轨道交通建设工程中的研究与应用[J]. 技术与市场, 2020, 27(9): 168-169.
- YIN Chao. Research and Application of Safety Risk Management in Rail Transit Construction Projects [J]. Technology and Market, 2020, 27 (9): 168-169.
- [133] JITTAPIROM P, CAIATI V, FENERI A M, et al. Mobility As a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges [J]. Urban Planning, 2017, 2 (2): 61-74.
- [134] 徐志刚, 张 骞, 李金龙, 等. 智能公路发展现状与关键技术[J]. 中国公路学报, 2019, 32(8): 1-24.
- XU Zhi-gang, ZHANG Qian, LI Jin-long, et al. Development Status and Key Technologies of Intelligent Highway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (8): 1-24.