

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202109033



# 采用文献计量的建筑业物联网 研究热点与趋势分析

秦旋, 陈康

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为掌握建筑业物联网的发展现状和挖掘未来研究机会,采用定量研究与定性分析相结合的方法,以 Scopus 数据库为数据来源,收集 12 个建筑业高影响力期刊的建筑业物联网相关文献 1 128 篇。从出版年及发文量、期刊影响力、学科领域、高频学科术语共现、作者合作及国家合作等方面展开分析,基于 VOSviewer 软件构建可视化知识图谱,探讨建筑业物联网的现状,提出未来的研究方向。结果表明:建筑业物联网研究的发文量呈现上升趋势,文献来源相对集中,呈多学科性发展;建筑业物联网领域的作者研究合作已初具规模,国家间的合作紧密围绕着美国、中国、英国展开;该领域的研究热点呈现 4 个关键主题,即建筑环境、施工现场监控与安全、建筑能耗和故障检测。

**关键词:** 建筑业; 物联网; 文献计量; 知识图谱; 智能建造; 数字化; 信息化

中图分类号: TU 18

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)02-0211-11

## Research Hotspots and Trend Analysis of Internet of Things in Construction Industry Using Bibliometrics

QIN Xuan, CHEN Kang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to grasp the development status of internet of things (IoT) in construction industry and explore future research opportunities, the method of combining quantitative research and qualitative analysis is adopted. Using Scopus database as data source, 1 128 articles related to IoT in construction industry from 12 high-impact journals in construction industry are collected. Various aspects are analyzed, including the publication year and number of articles, journal influence, subject field, co-occurrence of high-frequency subject terms, author cooperation and national cooperation, etc. Based on VOSviewer software, the visual knowledge map is constructed to discuss the current situation of IoT in construction industry and to propose future research direction. The result shows that the number of publications of IoT in construction industry research is at a rising trend, the literature sources are relatively concentrated, presenting a multidisciplinary development; the author research cooperation in the field of IoT in construction industry has begun to take shape, with the cooperation between countries closely centered on the United States, China and Britain; the research focus in this field presents four key topics, namely, building environment, construction site monitoring and safety, building energy consumption and fault detection.

收稿日期: 2021-09-23

通信作者: 秦旋(1969-),女,教授,博士,博士生导师,主要从事智能建造及建筑业物联网的研究。E-mail: hdwq@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2019J01050)

**Keywords:** construction industry; internet of things (IoT); bibliometrics; knowledge mapping; intelligent construction; digitization; informatization

建筑业产业规模巨大,截至 2017 年全球建筑业贡献的国内生产总值(GDP)约为 17.140 万亿美元,预计到 2021 年将增长至 24.334 万亿美元<sup>[1]</sup>,据预测,到 2030 年建筑业将占世界总 GDP 的 15%左右<sup>[2]</sup>.然而,全球建筑业正面临低效、高危、劳动力短缺三大关键问题,相比制造业,建筑业的生产力水平低下、工作环境恶劣、建筑工人的职业健康安全问题十分严峻.当前世界正处于信息化的新时代,发展新兴信息技术是改变建筑业这一状况的有效途径.物联网(IoT)被称为继计算机、互联网之后,世界信息产业的第三次浪潮,世界各国对物联网展开了大量研究<sup>[3]</sup>.物联网是指通过射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统(GPS)、激光扫描器等信息传感设备,按照约定的协议,把任何物品与互联网连接起来,进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络<sup>[4]</sup>.

物联网正日益渗透到建筑业中,研究人员不断探索物联网技术在建筑业的创新应用,以带动建筑业向信息化、数字化和智能化方向发展,实现转型升级.近几年,与建筑业物联网相关的文章数量迅猛增长.为掌握建筑业物联网的发展现状,科学、量化地总结和分析建筑业物联网领域的概貌,本文选用 VOSviewer 软件对从 Scopus 数据库中筛选出的建筑业物联网相关文献进行科学计量,进而从各个角度全面审视该领域的热点研究、关键信息,实现作者合作、国家合作、关键词共现等方面的可视化分析,梳理每个主题下的主要研究内容,并在此基础上讨论建筑业物联网的发展演化及未来的研究机会.

1 实验方法

1.1 数据来源

Scopus 数据库是目前世界上最大的文献摘要和引文数据库<sup>[5]</sup>,其覆盖范围广,索引过程快,涵盖了较新的出版物.与 Web of Science,Google Scholar,PubMed 等数据库相比,Scopus 数据库在建筑领域的覆盖面更广,更适合跨学科的研究主题<sup>[6]</sup>.为获得准确、质量高、容量合适的文献样本,应尽量涵盖该领域已知关键词,因此,选择的检索关键词为 Internet of Things, IoT, industrial internet, physical internet, cyber physical systems, sensors, wireless sensor network, WSN.

通过搜索 Scopus 数据库、Journal Citation Report(JCR)期刊引用报告和审查以往相关研究综述<sup>[7-8]</sup>的方法,识别建筑行业具有高影响力的期刊,最终选择影响因子在 1.5 以上或得到专业人士认可的 12 个期刊,期刊名称及发文量,如表 1 所示.搜索文献的起始时间不设限制,以确保全面覆盖现有文献<sup>[9]</sup>;期刊文章代表最有影响力的研究,文献类型限定为已公开发表的期刊论文,不考虑综述(review)、会议论文(conference paper)、编者评论(editor's comment)等.截止 2020 年 11 月 1 日,搜索获得 1 128 篇与建筑业物联网相关的期刊文章.对这 1 128 篇英文期刊文章进行科学计量和定性分析.

表 1 12 个期刊的名称及发文量  
Tab. 1 Titles and publication quantities of 12 journals

期刊名称	年发文量/篇	总发文量占比/%
<i>Energy and Buildings</i>	331	29.34
<i>Building and Environment</i>	267	23.67
<i>Automation in Construction</i>	254	22.52
<i>Advanced Engineering Informatics</i>	89	7.89
<i>Journal of Computing in Civil Engineering</i>	89	7.89
<i>Journal of Construction Engineering and Management</i>	39	3.46
<i>Journal of Information Technology in Construction</i>	22	1.95
<i>Journal of Civil Engineering and Management</i>	12	1.06
<i>Journal of Management in Engineering</i>	7	0.62
<i>Building Research and Information</i>	7	0.62
<i>Engineering Construction and Architectural Management</i>	6	0.53
<i>Construction Management and Economics</i>	5	0.44

1.2 研究方法

采用定量研究与定性分析相结合的方法,该方法的特点是整合定量和定性数据,以克服人工评价容易存在的潜在偏差,从而得到单一方法无法产生的分析结论. 定量研究采用文献计量学方法,借助 VOSviewer 软件. VOSviewer 软件提供了可视化科学知识图谱所需的所有基本功能,且其在共现分析方面图形化展示方式较为丰富,显示清晰,使得文献计量学的分析结果易于解释,深受建筑业领域研究者的喜爱<sup>[10]</sup>. 定性分析是对建筑行业中物联网技术研究相关文献的主要内容进行全面、深入的梳理,剖析该领域的研究现状、研究热点、研究局限性及对未来研究的展望.

2 文献数据分析

相关文献的数据分析包括文献的出版年及发文量统计、期刊影响力、学科领域、高频学科术语共现、作者合作、国家合作分析. 文献年发文量和期刊影响力分析能够反映研究主题的发展趋势及重点研究平台;学科领域分析有助于观察该领域学科发展状况;借助知识图谱工具 VOSviewer 软件进行文献计量和可视化分析,可深入挖掘建筑业物联网研究领域的研究热点分布、团队规模、国家合作关系等.

2.1 出版年及发文量

检索获得的 1 128 篇建筑业物联网研究相关文献的年分布,如图 1 所示. 该领域的第一项研究于 1983 年在 *Building and Environment* 期刊上发表<sup>[11]</sup>. 由图 1 可知:这一领域早期的年发文量为个位数,这一情况一直持续到 2003 年;随着物联网的发展,2012 年建筑业物联网领域出现新兴的研究热点,文章数量呈指数性陡增趋势;最近 5 年,建筑业物联网领域的研究年发文量都保持在 100 篇以上,且随着建筑机器人、智慧工地等新兴产业的不断兴起,该领域未来研究势头将继续升温、持续增长.

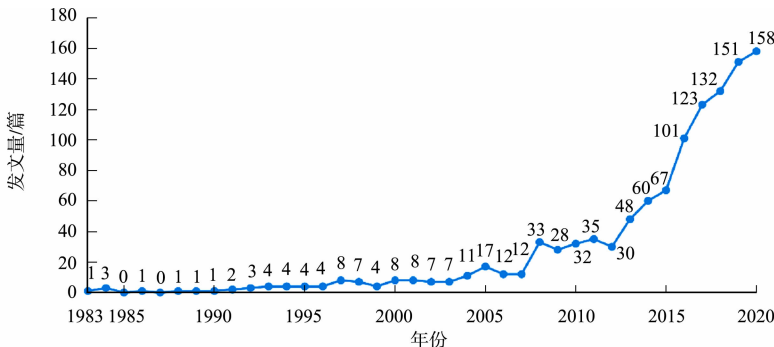


图 1 1 128 篇建筑业物联网研究相关文献的年分布

Fig. 1 Annual distribution of 1 128 articles related to IoT research in construction industry

2.2 期刊影响力

由表 1 可知:年发文量排在前三的期刊分别是 *Energy and Buildings* (331 篇), *Building and Environment* (267 篇) 和 *Automation in Construction* (254 篇). 3 种期刊合计发文量占被统计文献数量的 75.53%, 是促进该领域发展的主要力量; *Advanced Engineering Informatics* 和 *Journal of Computing in Civil Engineering* 的发文量合计占比超过 15%, 具有一定的影响力; 余下 7 种期刊发文量合计占比小于 10%, 体现出文献来源相对集中的特点, 表明建筑业物联网研究已经形成比较集中的重点期刊平台支撑.

2.3 学科领域

对建筑业物联网领域相关研究的学科领域进行分析, 结果如图 2 所示. 由图 2 可知: 大多数文章发表在工程类期刊 (1 039 篇), 有些则发表在社会科学 (267 篇)、环境科学 (267 篇)、计算机科学 (200 篇) 和商业、管理和会计 (69 篇) 及决策科学 (7 篇) 类期刊. 这显示了该领域不断发展的多学科性质, 以及越来越多的建筑业学者开始在自己传统学科之外的期刊上发表文章.

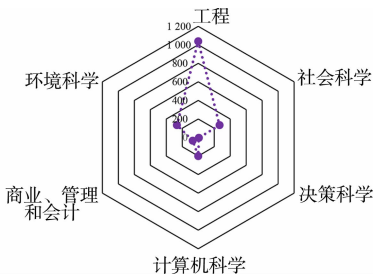


图 2 建筑业物联网相关研究的学科领域

Fig. 2 Subject fields of researches related to IoT in construction industry

## 2.4 高频学科术语共现

文章标题、摘要和关键字中出现的学科术语反映了论文的核心内容,并一定程度展示了其研究范围.通过 VOSviewer 软件进行高频学科术语共现分析,将术语的最小出现次数设置为 20 次,并选择按相关性评分排序前 60 的关键学科术语.高频学科术语共现网络视图,如图 3 所示.图 3 中:每个节点代表一个主题词(主题词标签已显示);主题词节点中心度大小表示该词出现的频次;节点间的连线表示两个词之间存在共现关系;连线粗细代表两个词之间共现的强度(次数).

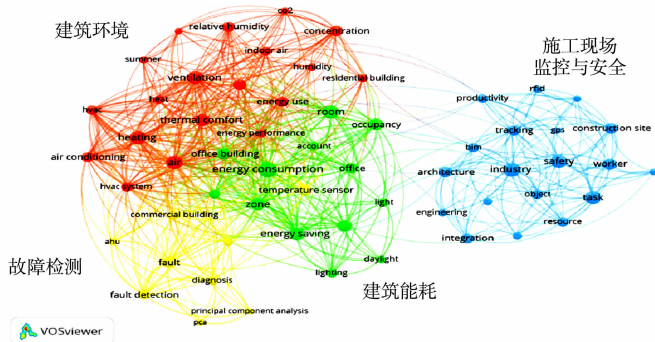


图 3 高频学科术语共现网络视图

Fig. 3 Co-occurrence network view of high-frequency subject terms

由图 3 可知: VOSviewer 软件将所提取的关键术语按照研究主题和相互间密切程度大致分为 4 类, 依据各类关键术语所围绕的研究主题将其分别命名为集群 1 (红色)、集群 2 (蓝色)、集群 3 (绿色)、集群 4 (黄色), 分别表示建筑环境、施工现场监控与安全、建筑能耗、故障检测。

图4是高频学科术语共现的时间视图,体现各学科术语的新颖程度,右下角2013—2016年的比例尺代表平均出版年份,颜色从深蓝色变为浅黄色,表示较老的研究到最新的主题。

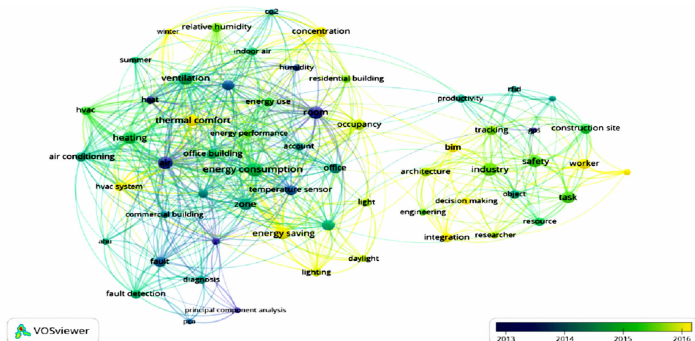


图 4 高频学科术语共现时间视图

Fig. 4 Co-occurrence time view of high-frequency subject terms

1) 集群 1: 建筑环境. 建筑环境是物联网技术在建筑业中应用的主要研究主题之一, 目前大多数现成的物联网技术都被用于建筑环境, 例如, 人员热舒适性、采光计划、空气质量检测、智能家居等. 该主题的研究重点是通过分布式传感器采集各种环境参数, 如二氧化碳、一氧化碳、PM2.5、声音、光照、运动、温度和湿度等, 对建筑环境进行模拟仿真预测评估, 以保证建筑内人员的舒适性, 同时减少不必要的住宅能源消耗. 该集群组由 19 个学科术语组成, 这一集群关键词的平均出版年份涵盖了 2013—2016 年, 表明此集群在文献中已稳定确立, 且一直受到研究人员的重点关注.

2) 集群 2: 施工现场监控与安全. 随着物联网技术的发展, 实现资源的实时位置跟踪和可视化成为可能, 受益的主要应用领域是施工现场监控与安全. 施工资源产生的数据非常庞大, 实时收集和处理施工资源数据, 并将相关的安全、活动、性能等信息实时可视化给管理者, 以实现高效决策, 提高项目管理水平. 这一组关键词平均出版年份分布在 2015—2016 年, 相对来说比较新颖, 且它与其他 3 个集群相比更为独立, 表明该主题受到一部分研究人员的极大关注, 并对其持续跟进.

3) 集群3:建筑能耗.入住率检测是建筑能耗主题的关注重点.入住率信息是指建筑物居住者的存在、移动及对建筑能耗有重大影响的行为.获得准确的人员入住率信息,制定有效的策略降低能耗,对于



建筑能耗的节约和优化有着非常重要的价值。例如,楼宇管理系统可以自动关闭空置房间的空调,并根据每个区域的人员数量调整通风量,以达到节能目的。研究表明,暖通空调系统如果基于居住人员的信息运行,可节约 30% 的能源消耗<sup>[12]</sup>。该集群关键词的平均出版年份为 2014—2016 年,表明这一集群相对较新颖,且持续受到学术关注。

4) 集群 4:故障检测。故障检测代表了观察到的主要集群之一,主要包括暖通空调系统的故障检测和诊断(FDD)及结构健康监测。建筑物和暖通空调系统发生各种故障会导致能耗增加,舒适性变差,甚至发生安全事故。开发故障检测和诊断方法,并将其应用于涉及结构、暖通空调系统、设备和传感器出现的各种故障是该主题的研究重点。由图 4 可知:故障检测技术的平均引用年份较老,其平均出版年份为 2013—2014 年,表明这一集群在文献中拥有坚固的地位。

### 2.5 作者合作及影响力

根据普莱斯定律,在建筑业物联网研究领域中发文量不少于 3 篇的作者,被确立为核心作者<sup>[13]</sup>。通过分析该领域核心作者之间的合作紧密程度、研究团队规模和成熟度,发现该领域研究已经形成联系紧密、相互连通的合作网络,该合作网络包含了主要的高影响力、高被引次数的核心作者,说明建筑业物联网领域研究者们已具有初步合作规模。同时,还存在一群独立研究团队也为该领域的发展做出了重要贡献,表明目前建筑业物联网的研究已经具备了一定的热度和参与度。在建筑业物联网领域发表文章总数排在第一位的是 SMITH I F C,总共发表文章 14 篇,主要研究结构健康监测方面,深入结构识别、故障检测、数据解释等方向,2005—2019 年期间持续有科研成果产出,具有重大影响力。发文量排在第二位的是 KAMAT V R,其团队共发表 13 篇文章,都集中在 2015—2020 年,研究成果较新,主要关注建筑机器人方面。WANG S 以总发文量 12 篇位居第三位,该团队的文章拥有最高的被引次数。WANG S 的第一篇文章发表在 1998 年<sup>[14]</sup>,直到 2013 年一直都有科研产出,为空调系统故障检测、建筑环境通风控制等方面的研究做出了巨大贡献。高产的核心作者还有 JANG W S(11 篇),BECERIK-GERBER B(10 篇),LI H(9 篇),TEIZER J(9 篇),HONG T(9 篇)等,主要从事无线传感网络与建筑资源跟踪、个性化热舒适性、建筑能耗、建筑工人健康与安全监测、施工活动识别等方面的研究。总体来说,这些核心作者的研究代表着建筑业物联网领域的研究热点,具有引领作用,值得关注和追踪。

### 2.6 国家合作网络

建筑业物联网研究领域的国家合作网络图,如图 5 所示。图 5 反映了该领域主要领先国家的研究水平及合作关系,要求所选国家的发文量达到 5 篇及以上,68 个国家中有 32 个入选;节点由深色到浅色表示时间从早到近的变化。由图 5 可知:国家合作网络图里节点中心度最强的为美国,其次为中国,第 3 名为英国,它们是目前建筑业物联网领域研究规模最大、合作最密切、成果贡献最多的国家。美国的发文量为 375 篇,它与 20 个国家间存在着合作关系;第 2 名的中国是该领域中后起之秀的代表,所发表的文章具有较新的平均出版年份;以英国为首的欧洲国家为促进物联网在建筑业的发展也做出了巨大贡献,且相互之间合作极为密切,是合作关系网络的重要组成部分。其中,一些欧洲国家的合作关系呈现出较强的地域接近性,如西班牙的 8 个合作国家(英国、德国、法国、葡萄牙、比利时、意大利、瑞典、印度)中除了印度外,均为欧洲国家。

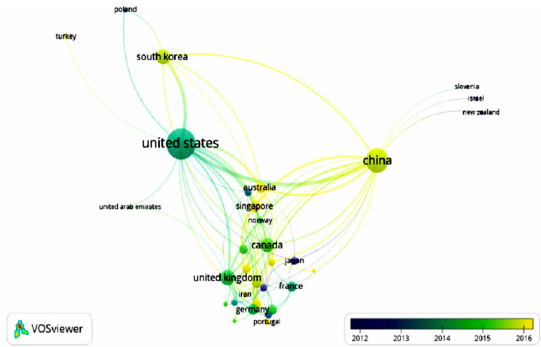


图 5 国家合作网络图

Fig. 5 National cooperation network map

## 3 建筑业物联网四大主题研究热点综述

### 3.1 建筑环境

建筑环境的好坏与人体的健康、舒适性及生产力密切相关。热舒适性是建筑环境的一个重要目标,了解居民的热感觉和舒适性对于建筑物中暖通空调系统的运行意义重大。目前用于建筑业热舒适性管理实践的模式主要有预测平均投票(PMV)模型和自适应模型。热舒适性的客观数据通常由环境传感器

测得,采用问卷调查获得主观反馈<sup>[15]</sup>.借助可穿戴设备或红外摄像头可收集生理方面的数据,如采用红外热像仪测量面部皮肤温度来估计人的热舒适水平<sup>[16]</sup>.随着研究的深入,个人舒适性模型被提出,以解决不同人员的使用偏好. BECELIK-GERBER B 团队将建筑物里的人员整合到暖通空调系统控制流程中,提出一种办公楼个性化热舒适驱动系统的人机交互框架<sup>[17]</sup>.文献<sup>[18-19]</sup>研究发现,使用环境传感器的效果优于生理传感器,若将两种数据结合起来,可以获得更高的个体热舒适性预测准确率.

另外,光也是建筑空间最重要的元素之一,采光的研究主要集中在建筑的设计和运营阶段,研究表明,使用日光调光系统不仅能提高人的视觉舒适性,还可以降低建筑物的能耗<sup>[20-21]</sup>.此外,物联网技术能自动控制居住环境中的 PM2.5 和二氧化碳的浓度,有效提升室内空气质量<sup>[22-23]</sup>.智能家居相关研究的持续涌现更是将建筑环境中人员舒适度、能效、个性化等方面的发展推向了更高水平<sup>[24-25]</sup>.

3.2 施工现场监控与安全

在施工现场监控方面,衡量项目状态或进度大多基于人工评估,最近的研究集中在发展自动化或半自动的方法上.物联网设备的使用促进了施工现场监控的实现,将全球定位系统、射频识别、无线传感器网络等现有技术结合是当前广受欢迎的研究方法.例如,结合射频识别和全球定位系统进行数据收集,无需增设额外的设施便能自动识别和定位建筑构件<sup>[26]</sup>.该领域中具有高影响力的 JANG W S 团队热衷于无线传感器网络在建筑资源跟踪中的应用研究,他们探索了使用 ZigBee、无线和超声信号相结合、增强现实(AR)技术建立无线传感器网络系统,实现建筑材料自动跟踪的可行性<sup>[27-29]</sup>;并在材料跟踪的成本效益<sup>[30]</sup>、建筑资源跟踪技术的选择<sup>[31]</sup>、无线传感器网络的性能<sup>[32-33]</sup>等方面展开了深入研究.值得注意的是,建筑信息模型(BIM)和物联网的集成很大程度上促进了装配式建筑的自动化,在实现预制构件生产制造、物流管理、跟踪定位、BIM 可视化及自动装配的过程中做了巨大贡献<sup>[34-36]</sup>.

安全方面,建筑工人的健康和安全管理一直以来都备受重视.在以人为中心的建筑安全与健康管理方面,研究者对可穿戴式传感器和基于计算机视觉的技术产生了极大的兴趣. LI H 团队和 AHN C R 团队在该方面的研究处于领先地位,其研究涵盖的关键应用包括预防肌肉骨骼疾病、工人疲劳监测、预防跌倒及坠落. LI H 团队的研究主要有基于计算机视觉进行人体工学姿势识别以预防建筑活动中的危险<sup>[37]</sup>,使用可穿戴鞋垫压力传感器对建筑工人跌倒事件进行自动检测和分类<sup>[38]</sup>,借助计算机视觉、生理传感器实现对工人的身体疲劳和精神疲劳监测<sup>[39-40]</sup>等. AHN C R 团队专注于惯性测量单元(IMU)的应用,包括对建筑工人进行跌倒风险评估<sup>[41]</sup>,基于行人的运动反馈来检测人行道的缺陷<sup>[42]</sup>,结合深度学习评价工人的负荷水平、预测姿态,以预防肌肉骨骼疾病<sup>[43-44]</sup>等.将物联网技术融入建筑工地的安全系统是另一重要研究方向,实现对险情事故的跟踪记录,可以显著提高安全性<sup>[45]</sup>.例如,基于物联网开发智能安全帽系统,使安全帽具备实时报警、监控和定位功能<sup>[46]</sup>;建立塔吊操作员能见度模型,有效改善塔吊的不安全状态<sup>[47]</sup>.另外,一些研究者将物联网和 BIM 技术集成并应用于火灾应急场景,建立火灾救援可视化系统,以实时监控现场状态、定位被困人员<sup>[48-49]</sup>.

3.3 建筑能耗

提高生活质量和节约能源往往存在冲突,物联网技术的引入为降低建筑能耗提供了新思路,获取准确详细的入住率信息是平衡这一矛盾的关键.目前,入住率检测已广泛应用于减少建筑能耗中,照明控制、暖通空调系统、杂项电气负荷、热水系统是四大主要的应用终端.选择合适的数据源对于入住率检测尤为重要,早期入住率检测研究中最常用的传感器是被动红外(PIR)传感器<sup>[50]</sup>.近年来,WiFi 基础设施得到普及,基于 WiFi 的入住率检测方法因其无需部署额外设施、无需人员携带专用设备等优点而广受研究人员的青睐. HONG T 团队提出了一种通过机器学习从建筑物的 WiFi 数据来推断人员数量的新方法<sup>[51]</sup>,利用环境传感器和无线网络信号的融合,成功提高了人员入住率检测模型的效率<sup>[52]</sup>,并结合环境数据、WiFi 数据和融合数据 3 种数据源,对不同场景下的模型性能进行了优化<sup>[53]</sup>.

除了人员的存在和数量信息可用于优化控制策略,人类活动识别对于各种智能家居的应用也至关重要.使用深度学习的方法,利用现有 WiFi 设备即可实现对居民日常活动(如个人卫生、饮食、行动等)的无创识别和分类,从而提高能效,增强用户体验<sup>[54-55]</sup>.

3.4 故障检测

暖通空调系统中的空气处理机组(AHU)和冷水机组出现故障时往往需要付出昂贵的代价,因此,

故障检测必不可少. 现有研究常用的故障检测方法包括基于模型的方法、基于规则的方法、基于数据驱动的方法. 基于模型的故障检测方法在暖通空调系统中发展较早,使用最为广泛<sup>[56]</sup>;基于规则的方法需要专家知识和丰富的经验,构建详细的规则,从而对空调系统发生的故障进行诊断<sup>[57]</sup>;基于数据驱动的方法作为一种新的 FDD 方法,近年来被广泛关注,其涵盖了主成分分析、Fisher 判别分析、小波分析、神经网络等<sup>[58]</sup>.

目前,建筑物故障检测的应用大部分集中在桥梁工程上. 物联网技术的发展促进了结构健康监测研究. 基于传感器的技术提供建筑物及其构件结构健康的实时信息,然后对采集的数据进行解释和分析,完成结构识别和故障检测. 文献[59-61]为提升数据解释能力,提取有意义的信息进行损伤检测,探索的方法包括移动主成分分析、移动相关分析、稳健回归分析、聚类分析和基于模型的方法. 文献[62-63]指出测量系统设计和传感器放置策略对结构识别的影响,并进行了相关的决策优化研究.

## 4 未来研究展望

### 4.1 建筑环境

物联网设备可以为舒适性模型提供必要的的数据,从而提高居住者的舒适度水平,优化建筑的能源使用,使建筑行业受益. 随着舒适性提升技术的进步,居住者对建筑环境的质量要求将随之增高,使自动化、个性化、高水平的智能舒适性管理成为未来的主要研究方向.

1) 单一指标不足以反映人员的热状态,在实现以人为中心、动态控制环境的暖通空调控制系统时,考虑人的生理和行为因素尤为重要,未来的研究需要在数据融合的方法上做更多努力.

2) 以前的研究通常未对所提出的模型如何集成到现实系统中进行详细描述,需要更多的研究将个人舒适性模型产生的分析结果转化为可操作的控制策略.

3) 研究者模型的开发和评估过程中经常应用自己的解释或假设,缺乏行业标准的指导,未来在加强理论基础和标准化方面还有许多工作要做.

### 4.2 施工现场监控与安全

当前的物联网研究主要是技术性的,研究者开发了各种施工现场监控和安全管理方法,在已开发的应用方向上加强可操作性、改进性能是未来研究的一个重要领域. 此外,需要让现有技术更加充分地结合实际,有效地应用于工程实践. 未来工作还需考虑以下 4 点内容.

1) 为实现长期且稳定的资源监测和跟踪,需在未来研究中推导出稳健且快速的算法,但由于人员位置定位和工作行为监测等方面数据多涉及到个人隐私,故在解决方案的推广实施方面可能存在困难.

2) 基于视觉的技术和传感器所采集数据的可靠性有待求证. 例如,无线信号易受环境因素影响,有时因障碍物阻挡产生信号衰减的问题,使无线传感器网络性能降低,从而影响采集数据的真实性<sup>[64]</sup>.

3) 基于原型试验的建筑资源跟踪方法严重依赖实验室设备,未考虑在实际施工现场的适用性;或所述流程框架只应用于特定的环境和标准,这些解决方案能否推广还有待研究<sup>[45,65]</sup>.

4) 可视化、位置跟踪和风险预警等技术在特定项目的研究已经成功应用,但这些方案都是零散的“点解决方案”,缺乏凝聚力强大的框架来整合各种传感器收集的数据,以监控未来智能建造现场.

### 4.3 建筑能耗

建筑能耗与居住者的需求和行为密切相关,准确检测建筑设施的占用情况可以显著提高其运行效率. 当前研究主要集中在入住率检测的准确率上,为提高准确率,开发数据融合的方法将是未来研究的主要方向,应用这些数据融合研究来提高建筑能效也是重大挑战. 未来研究还应注意以下 4 点.

1) 对于楼宇控制系统来说,环境参数不仅是估算住户的指标,也是决定设施运行的控制门槛. 人员的数量或行为对室内空气的影响包含在这些参数值的变化中,但参数值也会从它们引起的变化中恢复. 因此,考虑所选参数变化的影响是未来一项启发性的研究.

2) 现有研究的验证实验时间通常不够长,不足以包含所有可能的场景来说明所提方法的性能,为了得出更可靠的结论,未来的研究中需要进行更长时间和更复杂场景布局的实验.

3) 未来研究需要能够实现跨学科反馈和协作的模型,人的行为受到多种因素的影响,包括生理、生物、心理和社会(人员之间的互动),但尚未出现一个考虑到上述所有因素的模型.

4) 隐私安全是所有入住率检测方法都要考虑的重要因素,必须确保生成和收集的数据的安全性和保密性,因此,需要定期审查物联网安全.

4.4 故障检测

建筑物和暖通空调系统的故障检测是十分重要的环节,现有的故障检测方法只能发现系统中的单个主要故障,无法发现同时发生的多个故障,也不能确定这些故障之间的协同效应和故障来源. 开发基于数据驱动的混合方法是可能的解决方案,此外,未来研究在开发检测方法上还有许多工作要做.

1) 需创立可靠、快速、经济、全面的解决方案,以实时检测和诊断大规模暖通空调系统中发生的新故障,并以最小的误报和漏报检测多个故障之间的协同效应.

2) 未来可探索更为灵活的方法,如直接对暖通空调系统部件进行翻新或更换,无需重新训练故障检测模型,从而精简工序以加速进程.

3) 大多数的结构健康监测研究建议的解决方案仅在特定的情况下完成,缺乏通用有效的损伤量化指标,未来需要进一步探究量化方法的可扩展性和可靠性.

5 结束语

为掌握建筑业物联网的发展现状和挖掘未来研究机会,以 Scopus 数据库为数据来源,收集 12 个建筑业高影响力期刊的建筑业物联网研究相关文献 1 128 篇,基于 VOSviewer 软件从出版年及发文量、学科领域、关键术语共现、作者合作及国家合作等方面展开分析,得到近几年研究呈现出 4 个主要研究领域,即建筑环境、施工现场监控与安全、建筑能耗和故障检测. 进一步深度梳理文献,讨论建筑业物联网的研究热点和趋势,提出未来的研究方向是实现智能舒适性管理、优化和加强现有的物联网技术、开发准确率高的数据融合检测方法和高效的故障检测方法. 文中研究对推动建筑业信息化和未来朝着智能建造发展具有一定的指导意义.

参考文献:

[1] Reportlinker. The global construction market was estimated to be around \$17 140 billion as of 2017[EB/OL]. (2018-09-17)[2021-10-19]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/the-global-construction-market-was-estimated-to-be-around-17140-billion-as-of-2017-300713756>. html.

[2] CRAVEIRO F,DUARTE J P,BARTOLO H,*et al.* Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4. 0[J]. Automation in Construction,2019,103:251-267. DOI:10. 1016/j. autcon. 2019. 03. 011.

[3] 刘强,崔莉,陈海明. 物联网关键技术与应用[J]. 计算机科学,2010,37(6):1-4,10. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-137X. 2010. 06. 001.

[4] 孙其博,刘杰,黎彝,等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报,2010,33(3):1-9. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-5321. 2010. 03. 001.

[5] 刘静,刘晶晶,王希挺,等. Scopus 数据库收录我国中文科技期刊影响力分析[J]. 中国科技期刊研究,2020,31(4): 462-467. DOI:10. 11946/cjstp. 201912300912.

[6] MARTINEZ P,AL-HUSSEIN M,AHMAD R. A scientometric analysis and critical review of computer vision applications for construction[J]. Automation in Construction,2019,107:102947. DOI:10. 1016/j. autcon. 2019. 102947.

[7] TANG Shu,SHELDEN D R,EASTMAN C M,*et al.* A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends[J]. Automation in Construction,2019, 101:127-139. DOI:10. 1016/j. autcon. 2019. 01. 020.

[8] GHOSH A,EDWARDS D J,HOSSEINI M R. Patterns and trends in internet of things (IoT) research: Future applications in the construction industry[J]. Engineering Construction and Architectural Management,2021,28:457-481. DOI:10. 1108/ECAM-04-2020-0271.

[9] HOSSEINI M R,MARTEK I,ZAVADSKAS E K,*et al.* Critical evaluation of off-site construction research: A scientometric analysis[J]. Automation in Construction,2018,87:235-247. DOI:10. 1016/j. autcon. 2017. 12. 002.

[10] 肖明,邱小花,黄界,等. 知识图谱工具比较研究[J]. 图书馆杂志,2013,32(3):61-69.

[11] DAVIES M G. Optimal designs for star circuits for radiant exchange in a room[J]. Building and Environment,



- 1983,18(3):135-150. DOI:10.1016/0360-1323(83)90006-9.
- [12] YANG Junjing, SANTAMOURIS M, LEE S E. Review of occupancy sensing systems and occupancy modeling methodologies for the application in institutional buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 121: 344-349. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.12.019.
- [13] 丁学东. 文献计量学基础[M]. 北京:北京大学出版社,1992.
- [14] WANG Shengwei. Dynamic simulation of a building central chilling system and evaluation of EMCS on-line control strategies[J]. *Building and Environment*, 1998, 33(1): 1-20. DOI:10.1016/S0360-1323(97)00019-X.
- [15] KLEMM W, HEUSINKVELD B G, LENZHOLZER S, *et al.* Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in The Netherlands[J]. *Building and Environment*, 2015, 83: 120-128. DOI:10.1016/j.buildenv.2014.05.013.
- [16] LI Da, MENASSA C C, KAMAT V R. Non-intrusive interpretation of human thermal comfort through analysis of facial infrared thermography[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 176: 246-261. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.07.025.
- [17] JAZIZADEH F, GHAHRAMANI A, BECERIK-GERBER B, *et al.* Human-building interaction framework for personalized thermal comfort-driven systems in office buildings[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2014, 28(1): 2-16. DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000300.
- [18] ARYAL A, BECERIK-GERBER B. Thermal comfort modeling when personalized comfort systems are in use: Comparison of sensing and learning methods[J]. *Building and Environment*, 2020, 185: 107316. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.107316.
- [19] ARYAL A, BECERIK-GERBER B. A comparative study of predicting individual thermal sensation and satisfaction using wrist-worn temperature sensor, thermal camera and ambient temperature sensor[J]. *Building and Environment*, 2019, 160: 106223. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106223.
- [20] JAZIZADEH F, AHMADI-KARVIGH S, BECERIK-GERBER B, *et al.* Spatiotemporal lighting load disaggregation using light intensity signal[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 69: 572-583. DOI:10.1016/j.enbuild.2013.11.040.
- [21] ROISIN B, BODART M, DENEYER A, *et al.* Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40: 514-523. DOI:10.1016/j.enbuild.2007.04.006.
- [22] SUN Zhongwei, WANG Shengwei, MA Zhenjun. *In-situ* implementation and validation of a CO<sub>2</sub>-based adaptive demand-controlled ventilation strategy in a multi-zone office building[J]. *Building and Environment*, 2011, 46: 124-133. DOI:10.1016/j.buildenv.2010.07.008.
- [23] XIA Tongling, CHEN Chun. Differentiating between indoor exposure to PM<sub>2.5</sub> of indoor and outdoor origin using time-resolved monitoring data[J]. *Building and Environment*, 2019, 147: 528-539. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.10.046.
- [24] WANG Chenli, PATTAWI K, LEE H. Energy saving impact of occupancy-driven thermostat for residential buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 211: 109791. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.109791.
- [25] AHELEOFF S, XU Xun, LU Yuqian, *et al.* IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 43: 101043. DOI:10.1016/j.aei.2020.101043.
- [26] TORRENT D G, CALDAS C H. Methodology for automating the identification and localization of construction components on industrial projects[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009, 23(1): 3-13. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:1(3).
- [27] SHIN D H, JANG W S. Utilization of ubiquitous computing for construction AR technology[J]. *Automation in Construction*, 2009, 18: 1063-1069. DOI:10.1016/j.autcon.2009.06.001.
- [28] JANG W S, SKIBNIEWSKI M J. Embedded system for construction asset tracking combining radio and ultrasound signals[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2009, 23(4): 221-229. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:4(221).
- [29] JANG W S, SKIBNIEWSKI M J. A wireless network system for automated tracking of construction materials on project sites[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2008, 14(1): 11-19. DOI:10.3846/1392-3730.2008.14.11-19.
- [30] JANG W S, SKIBNIEWSKI M J. Cost-benefit analysis of embedded sensor system for construction materials tracking[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 135(5): 378-386. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:5(378).

- [31] JIANG Shaohua, JANG W S, SKIBNIEWSKI M J. Selection of wireless technology for tracking construction materials using a fuzzy decision model[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2012, 18(1): 43-59. DOI: 10.3846/13923730. 2011. 652157.
- [32] BAE S C, JANG W S, SKIBNIEWSKI M J. Reliability performance of wireless sensor networks for civil infrastructure-Part II: Prediction and verification[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, 22(2): 243-253. DOI: 10.3846/13923730. 2014. 948909.
- [33] JANG W S, HEALY W M. Wireless sensor network performance metrics for building applications[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42: 862-868. DOI: 10.1016/j.enbuild. 2009. 12. 008.
- [34] LI C Z, XUE Fan, LI Xiao, *et al.* An internet of things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction[J]. *Automation in Construction*, 2018, 89: 146-161. DOI: 10.1016/j.autcon. 2018. 01. 001.
- [35] ZHONG R Y, PENG Yi, XUE Fan, *et al.* Prefabricated construction enabled by the internet-of-things[J]. *Automation in Construction*, 2017, 76: 59-70. DOI: 10.1016/j.autcon. 2017. 01. 006.
- [36] VÄHÄ P, HEIKKILÄ T, KILPELÄINEN P, *et al.* Extending automation of building construction: Survey on potential sensor technologies and robotic applications[J]. *Automation in Construction*, 2013, 36: 168-178. DOI: 10.1016/j.autcon. 2013. 08. 002.
- [37] YAN Xuzhong, LI Heng, WANG Chen, *et al.* Development of ergonomic posture recognition technique based on 2D ordinary camera for construction hazard prevention through view-invariant features in 2D skeleton motion[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2017, 34: 152-163. DOI: 10.1016/j.aei. 2017. 11. 001.
- [38] ANTWI-AFARI M F, LI Heng, SEO J, *et al.* Automated detection and classification of construction workers' loss of balance events using wearable insole pressure sensors[J]. *Automation in Construction*, 2018, 96: 189-199. DOI: 10.1016/j.autcon. 2018. 09. 010.
- [39] UMER W, LI Heng, YU Yantao, *et al.* Physical exertion modeling for construction tasks using combined cardiorespiratory and thermoregulatory measures[J]. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103079. DOI: 10.1016/j.autcon. 2020. 103079.
- [40] YU Yantao, LI Heng, YANG Xincong, *et al.* An automatic and non-invasive physical fatigue assessment method for construction workers[J]. *Automation in Construction*, 2019, 103: 1-12. DOI: 10.1016/j.autcon. 2019. 02. 020.
- [41] YANG K, AHN C R, VURAN M C, *et al.* Semi-supervised near-miss fall detection for ironworkers with a wearable inertial measurement unit[J]. *Automation in Construction*, 2016, 68: 194-202. DOI: 10.1016/j.autcon. 2016. 04. 007.
- [42] KIM H, AHN C R, YANG K. A people-centric sensing approach to detecting sidewalk defects[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2016, 30(4): 660-671. DOI: 10.1016/j.aei. 2016. 09. 001.
- [43] LEE H, YANG K, KIM N, *et al.* Detecting excessive load-carrying tasks using a deep learning network with a Gramian Angular Field[J]. *Automation in Construction*, 2020, 120: 103390. DOI: 10.1016/j.autcon. 2020. 103390.
- [44] YANG K, AHN C R, KIM H. Deep learning-based classification of work-related physical load levels in construction[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 45: 101104. DOI: 10.1016/j.aei. 2020. 101104.
- [45] WU Weiwei, YANG Huanjia, CHEW D A S, *et al.* Towards an autonomous real-time tracking system of near-miss accidents on construction sites[J]. *Automation in Construction*, 2010, 19: 134-141. DOI: 10.1016/j.autcon. 2009. 11. 017.
- [46] ZHANG Hong, YAN Xuzhong, LI Heng, *et al.* Real-time alarming, monitoring, and locating for non-hard-hat use in construction[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2019, 145(3): 04019006. DOI: 10.1061/(ASCE)CO. 1943-7862. 0001629.
- [47] ZHOU Cheng, LUO Hanbin, FANG Weili, *et al.* Cyber-physical-system-based safety monitoring for blind hoisting with the internet of things: A case study[J]. *Automation in Construction*, 2019, 97: 138-150. DOI: 10.1016/j.autcon. 2018. 10. 017.
- [48] CHEN X S, LIU C C, WU I C. A BIM-based visualization and warning system for fire rescue[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 37: 42-53. DOI: 10.1016/j.aei. 2018. 04. 015.
- [49] LI Nan, BECERIK-GERBER B, KRISHNAMACHARI B, *et al.* A BIM centered indoor localization algorithm to support building fire emergency response operations[J]. *Automation in Construction*, 2014, 42: 78-89. DOI: 10.1016/j.autcon. 2014. 02. 019.

- [50] DODIER R H, HENZE G P, TILLER D K, *et al.* Building occupancy detection through sensor belief networks[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38: 1033-1043. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2005. 12. 001.
- [51] WANG Zhe, HONG Tianzhen, PIETTE M A, *et al.* Inferring occupant counts from Wi-Fi data in buildings through machine learning[J]. *Building and Environment*, 2019, 158: 281-294. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2019. 05. 015.
- [52] WANG Wei, HONG Tianzhen, XU Ning, *et al.* Cross-source sensing data fusion for building occupancy prediction with adaptive lasso feature filtering[J]. *Building and Environment*, 2019, 162: 106280. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2019. 106280.
- [53] WANG Wei, CHEN Jiayu, HONG Tianzhen. Occupancy prediction through machine learning and data fusion of environmental sensing and Wi-Fi sensing in buildings[J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 233-243. DOI: 10. 1016/j. autcon. 2018. 07. 007.
- [54] ZOU Han, ZHOU Yuxun, YANG Jianfei, *et al.* Towards occupant activity driven smart buildings via WiFi-enabled IoT devices and deep learning[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 177: 12-22. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2018. 08. 010.
- [55] LEE H Y, AHN C R, CHOI N. Fine-grained occupant activity monitoring with Wi-Fi channel state information: Practical implementation of multiple receiver settings[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 46: 101147. DOI: 10. 1016/j. aei. 2020. 101147.
- [56] YU Daihong, LI Haorong, YANG Mo. A virtual supply airflow rate meter for rooftop air-conditioning units[J]. *Building and Environment*, 2011, 46: 1292-1302. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2010. 12. 017.
- [57] SCHEIN J, BUSHBY S T, CASTRO N S, *et al.* A rule-based fault detection method for air handling units[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38: 1485-1492. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2006. 04. 014.
- [58] DU Zhimin, FAN Bo, JIN Xinqiao, *et al.* Fault detection and diagnosis for buildings and HVAC systems using combined neural networks and subtractive clustering analysis[J]. *Building and Environment*, 2014, 73: 1-11. DOI: 10. 1016/j. buildenv. 2013. 11. 021.
- [59] LAORY I, TRINH T N, SMITH I F C. Evaluating two model-free data interpretation methods for measurements that are influenced by temperature[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2011, 25(3): 495-506. DOI: 10. 1016/j. aei. 2011. 01. 001.
- [60] SAITTA S, KRIPAKARAN P, RAPHAEL B, *et al.* Improving system identification using clustering[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2008, 22(5): 292-302. DOI: 10. 1061/(ASCE)0887-3801(2008)22:5(292).
- [61] ROBERT-NICOUD Y, RAPHAEL B, SMITH I F C. System identification through model composition and stochastic search[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2005, 19(3): 239-247. DOI: 10. 1061/(ASCE)0887-3801(2005)19:3(239).
- [62] BERTOLA N J, CINELLI M, CASSET S, *et al.* A multi-criteria decision framework to support measurement-system design for bridge load testing[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 39: 186-202. DOI: 10. 1016/j. aei. 2019. 01. 004.
- [63] GOULET J A, SMITH I F C. Performance-driven measurement system design for structural identification[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013, 27(4): 427-436. DOI: 10. 1061/(ASCE)CP. 1943-5487. 0000250.
- [64] AHN C R, LEE S, SUN Cenfei, *et al.* Wearable sensing technology applications in construction safety and health[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2019, 145(11): 03119007. DOI: 10. 1061/(ASCE)CO. 1943-7862. 0001708.
- [65] ZHAI Yue, CHEN Ke, ZHOU J X, *et al.* An internet of things-enabled BIM platform for modular integrated construction: A case study in Hong Kong[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 42: 100997. DOI: 10. 1016/j. aei. 2019. 100997.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)