

DOI: 10.7672/sgjs2024200028

基于 BIM 运维管理的现状与展望*

包胜^{1,2}, 卜航栋¹, 楼笑笑², 方玄略¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;

2. 浙江大学“一带一路”国际医学院(筹), 浙江 义乌 322000)

[摘要] 在建筑运维阶段引入 BIM 技术可提高运维管理效率和水平,但目前国内外运维阶段 BIM 的应用与研究还处于初级阶段。因此,基于广泛的文献调研,从关键技术和应用功能层面对当前国内基于 BIM 的运维管理研究与应用进行研究,介绍涉及的关键技术及其研究现状,归纳目前已实现的应用功能。分析国内 BIM 在运维阶段应用不佳的原因,展望未来 BIM 运维研究方向。

[关键词] 建筑信息模型;运维管理;文献调研;应用

[中图分类号] TU17

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)20-0028-08

Current Status and Prospects of Operation and Maintenance Management Based on BIM

BAO Sheng^{1,2}, BU Hangdong¹, LOU Xiaoxiao², FANG Xuanlue¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. International School of Medicine, Zhejiang University, Yiwu, Zhejiang 322000, China)

Abstract: The introduction of BIM technology in construction operation and maintenance stage can improve the efficiency and level of operation and maintenance management, but the application and research of BIM in operation and maintenance stage at home and abroad are still in its infancy. Therefore, on the basis of extensive literature research, the current research and application of BIM-based operation and maintenance management in China from the aspects of key technologies and application functions are studied, the key technologies involved and their research status are introduced, and the application functions that have been realized at present are summarized. Finally, the reasons for the poor application of BIM in operation and maintenance stage in China are analyzed, and the future research direction of BIM operation and maintenance is prospected.

Keywords: building information modeling (BIM); operation and maintenance management; literature research; application

0 引言

近年来,数字化改革浪潮的兴起,对建筑行业提出了全面转型的要求。建筑运维阶段一般占据建筑物全生命周期 90% 以上的时间^[1],建筑运维成本高,因此开展建筑运维管理研究具有重要意义。然而,传统运维管理方式落后,数据记录采用人工方式,数据存储借助电子表格,缺乏运维信息管理标准和运维管理平台,运维信息的获取、整合、处

理、共享效率低下^[2-3]。

1975 年,由 Chuck Eastman 首次提出建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 的概念。BIM 因可视化、协调性、优化性等特点,在建筑领域得到广泛应用。与时间较短的设计和施工阶段相比,运维阶段通常需要数十年时间,因此 BIM 在运维阶段可带来更大收益^[4]。除此之外,BIM 为业主和运维团队提供了一种从模型中检索信息的手段,极大地提高了运维管理效率^[5]。虽然早在 2010 年 BIM 在运维阶段的价值已被认可^[6],但 BIM 在运维阶段的研究与应用还停留在初期,主要原因是未能有效利用 BIM 及其包含的信息提高运维管理效率

* 浙江省建设科研项目(2022K210)

[作者简介] 包胜,副教授,博士生导师,E-mail: longtubao@zju.edu.cn

[收稿日期] 2024-03-20

和水平^[7-9]。因此,现阶段亟待对 BIM 在运维管理中的研究与应用进行系统总结,为研究人员和行业专业人士提供参考。

本研究通过整理 BIM 运维的相关文献,从关键技术和应用功能层面确定研究子领域,按子领域对文献进行分类。在此基础上,总结各子领域研究和应用现状,讨论国内 BIM 运维现存问题,提出未来研究方向。

1 文献分析

1.1 文献筛选方法

确定关键字为建筑信息模型(BIM)、运维管理(O&M)、设施管理(FM),在中国知网(CNKI)和 Web of Science(WoS)数据库中检索关键字,时间为2012年1月至2022年12月。其中,在CNKI数据库中检索时,限定期刊来源为核心期刊及收录BIM运维管理文章较多的期刊;在WoS数据库中检索时,限定第一作者单位地区为中国。经过分析筛选后,共得到文献188篇,其中中文文献145篇,外文文献43篇。

1.2 分析结果

对筛选后的188篇文献发表年份进行统计,结果如图1所示。进一步在CNKI数据库中检索全部BIM相关文献,统计BIM在建筑全生命周期不同阶段的应用,结果如图2所示。结果表明,目前BIM技术主要应用于非运维阶段,运维阶段的比例仅占5.2%,可见BIM运维在国内仍处于起步阶段,但BIM运维相关研究呈持续增长态势,尤其是在2015年后显著增长,说明BIM运维逐渐受到学术界和工程界的关注,研究成果显著增多。

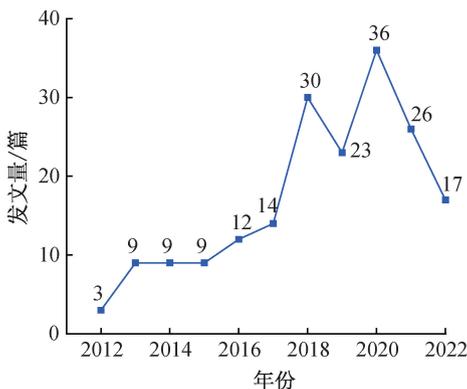


图1 BIM 运维相关文献发表年份统计

Fig. 1 Statistics of publication year for BIM operation and maintenance related literature

本文从关键技术和应用功能层面对文献进行分类,确定BIM运维研究子领域,对各子领域研究内容进行分析。

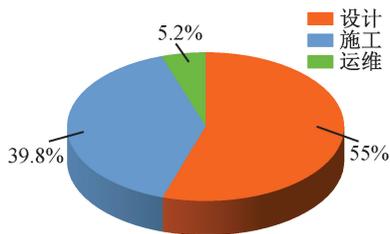


图2 BIM 在各阶段应用占比

Fig. 2 Proportion of BIM application at each stage

2 关键技术分析

BIM模型可集成各类信息,并以构件形式进行分类,从而提高运维管理效率^[10],但该集成过程涉及的关键技术较多。将BIM集成关键技术归纳为3个方面,即面向运维管理的BIM模型构建、技术集成与数据融合、可视化运维平台开发。

2.1 面向运维管理的BIM模型构建

在基于BIM的运维管理模式中,BIM模型是静态数据的来源和动态数据的载体。然而由于建筑业的多参与方与多阶段性,BIM模型中的数据存在格式不统一、模型过大等问题,在跨阶段传递时也会出现数据丢失现象,从而影响BIM在后期运维管理中的使用^[11-12]。针对上述问题,国内学者进行了大量研究,从数据交换标准、BIM建模方法、运维模型轻量化方法3个方面进行归纳总结。

2.1.1 数据交换标准

虽然BIM模型可作为数据载体,通过集成数据方式为运维管理决策提供数据支持,但其中的数据必须符合特定标准,以便根据需求定义统一数据结构,将模型和运维系统整合。工业基础类(industry foundation classes, IFC)标准是BIM信息交换的国际通用标准^[13],具有丰富的语义信息,包括建筑、结构、电气、暖通、给排水等专业,已被不同BIM软件广泛采用。有研究案例表明,使用IFC格式的文件可解决模型显示问题^[14],实现BIM数据共享与交换^[15]。还有学者提出优化IFC文件中冗余信息的算法^[16],并在此基础上实现了IFC文件的自动化对比^[17]。

施工运营建筑信息交换(construction operations building information exchange, COBie)标准旨在明确设计和施工阶段如何采集并交付运维所需的非几何信息,对设施、楼层、空间等提出具体要求,如今已成为传输和管理建筑设施信息的国际标准。翟韦等^[18]提出了COBie标准在数字化交付中的应用,余雯婷等^[19]提出了基于BIM-COBie技术的建筑设施信息化管理框架。

尽管IFC标准和COBie标准已被视为国际通用数据交换标准,但在实际项目中,数据冗余、遗漏、

丢失问题仍存在^[20],这是因为 IFC,COBie 标准均不完善,基于 IFC 标准的 BIM 数据共享与交换会出现数据丢失、失真问题,COBie 标准在运维阶段进行数据交换存在约束条件^[21]。因此未来需建立通用的 BIM 运维数据标准,对模型和数据进行统一规定。

2.1.2 BIM 建模方法

针对跨阶段传递时模型数据丢失问题,国内学者提出不同 BIM 建模方法,确保数据完整性。Gui 等^[22]提出一种基于 IFC 属性的模型生成方法,实现模型实例的快速提取。余芳强等^[23]提出了一种分阶段递进式 BIM 构建方法,支持跨阶段的无损信息传递;施平望等^[24-25]总结了基于 IFC 标准的建筑构件管理方法与流程,并建立了基于 IFC 标准的 BIM 构件库。

2.1.3 运维模型轻量化方法

贯穿建筑全生命周期的 BIM 模型拥有大量数据,会给计算机带来较大负担。对 BIM 模型进行轻量化处理可降低对硬件的要求,使 BIM 在运维管理中的应用具有普遍性。目前,BIM 模型轻量化研究主要集中在外部几何模型简化和内部冗余信息轻量化^[26-29]。

2.2 技术集成与数据融合

BIM 模型必须与物理世界进行数据交互才能对运维阶段数据进行集成和管理。早期研究通过集成 BIM, GIS^[30], IoT^[31-32], RFID^[33-34]等技术的方式开展 BIM 模型与物理世界的交互工作,并有学者在此基础上研究了城市层面的 CIM 模型在城市运维中的应用^[35-37]。除此之外,还有学者研究 BIM 与 AR, VR 技术的集成,在 BIM 模型上叠加显示设施实时信息^[38]。

随着云计算、大数据、人工智能技术的发展,如何挖掘、融合、分析多源异构数据成为运维领域的研究重点。Wen 等^[39]提出基于数据立方体的数据挖掘方法,并以昆明长水国际机场航站楼为例验证了该方法的可行性;杨昊等^[40]基于数字孪生体设计了数据融合系统,完成对 30 亿条数据融合;Zhang 等^[41]对 BIM-AI 集成研究进行了分析,并指出未来应更多地考虑运维场景需求。

2.3 可视化运维平台开发

可视化运维平台可对 BIM 模型和建筑信息进行直观展示,并给运维人员提供一个操作界面。在可视化平台中,业主和运维人员可更快速地掌握运维阶段设备、人员、物业等数据,同时提供设备的三维视图和操作手册指导运维人员工作,解决传统运维过程中存在的纸质文档丢失、人力消耗大、出错

率高、工作效率低等问题。目前,可视化运维平台主要分为商业软件、基于商业软件的二次开发、自主研发平台。文献[42]已对各类运维平台的应用和优缺点进行了介绍,在此不再赘述。值得一提的是,常用的运维商业软件均为国外开发,如 Archibus, BentleyFM, Mixamo 等,由于使用习惯、文化差异等,该类运维平台在国内实际应用情况并不理想^[10]。基于上述问题,国内学者开展了大量自主平台研发工作,针对可视化运维平台的架构,文献[43-44]提出了用于建筑运维管理的可视化平台架构,而文献[45]提出了城市层面的运维平台架构;针对 BIM 模型导入运维平台过程中的数据提取和模型显示问题,Xu 等^[46]和司典浩等^[47]结合 WebGL 技术实现 BIM 模型在 Web 端的数据处理和显示,保证数据的完整性和可扩展性,满延磊等^[48]利用 Orge 引擎读取 BIM 模型,实现图形与非图形信息的交互查询;针对运维期间产生的大量动态数据,王亭等^[49]提出一个 IoT 数据存储框架,以实际案例验证如何利用 BIM 数据和运维动态数据进行业务交互。

3 应用功能分析

在过去 10 年,随着 BIM、物联网、云计算、大数据等技术的不断发展,运维管理已经从简单的设备维修演化为一门包括设备管理、空间管理、安全管理、资产管理、能耗管理和信息管理的新兴交叉学科。各应用功能所占比例如图 3 所示。

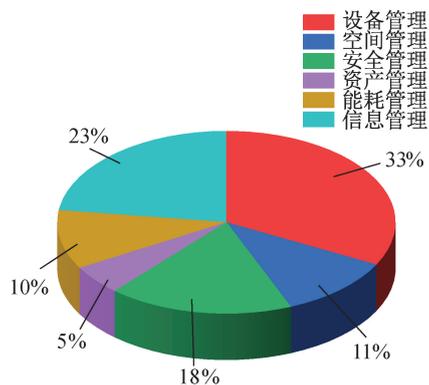


图 3 应用比例

Fig. 3 Application proportion

3.1 设备管理

传统的设备管理建立在物业管理基础上,存在信息传递不畅、数据信息不准确、效率低等问题,已经无法满足新时代“以人为本”的运维管理需求^[50],而徐瑞楠^[51]指出将 BIM 技术应用于设备管理可解决传统设备管理中存在的问题。目前,基于 BIM 的设备管理主要包括设备监测和控制及日常维修保养。

设备监测和控制通过集成 BIM、BAS、CMMS 系统等实现对各子系统设备运行数据的监测,可提前发现设备故障、运行参数异常等情况^[52]。基于 BIM 可视化和信息集成化的特点,还可在三维视图中查找、定位设备,查看设备是否正常运行,并可通过运维平台对设备进行实时控制^[53]。随着人工智能技术的发展,Xu 等^[54]指出各类先进技术已将设备从简单的实体提升为具备人类认知能力的智慧设施,并提出集感知、学习和行动于一体的设备管理系统架构,为现有设施注入类似人类的认知,满足用户对温度、安全、能源等方面的需求。

日常维修保养是设备管理的主要工作,基于 BIM 的运维管理模式使维修保养工作由事后维护向预防维护和预知维护发展。基于 BIM 的运维管理系统可对设备运行数据进行实时监测,设备发生故障时可在第一时间发现并派遣工单给维修人员。例如,Pan 等^[55]提出了一种建筑设备的可追溯编码结构,帮助运维人员快速识别和定位异常设备;Chen 等^[56]提出了基于 BIM 的设备维修工单自动派遣框架,该框架可在 BIM 模型中提取故障部件信息,计算最优维修路径,生成工单并派遣给对应维修人员。通过在运维系统中为设备添加维修保养计划,系统可定期提醒运维人员对设备进行维修保养。维修保养完成后,录入维修保养日志,方便日后查看^[57]。

3.2 空间管理

空间管理是基于 BIM 的可视化特点对空间数据进行快速获取和直观展示,从而实现空间的合理规划和分配。例如,根据用户需求,在前期对房间尺寸、室内空间布局等进行规划^[58];分析当前可用建筑空间,为用户分配满足其需求和空间目标的房间^[3];管理不同楼层及不同房间使用状态、使用人、租赁情况等,实时查看空间使用情况^[59];对空间占用情况和空置率进行分析,直观查看部门、科室等空间分布情况^[60]。除此之外,Xu 等^[61]指出传感技术中只有 RFID 技术在空间管理中得到了应用,借助 RFID 标签实现人员跟踪,采集房间占用数据和人员移动数据,以更有效的方式管理空间。

3.3 安全管理

安全管理是对建筑内人、物及环境状态的管理与控制。目前,安全管理主要包括安防和消防领域。在安防方面,通过集成 BIM 和智能楼宇安全防范系统,可实现对非法入侵、盗窃、破坏等行为的报警^[62];传统巡更主要依靠巡更人员自觉性,导致巡更易流于形式,因此结合视频监控和 RFID 技术,可

以建立电子巡更系统,加强对巡更人员的监督;张舒等^[63]面向社区停车管理智能化需求,提出了智慧停车多模态数据动态融合框架,利用物联网、云计算和视频分析等技术建立了集识别、定位、跟踪、监控和管理于一体的智慧停车系统,提升了社区停车的管理和服务水平。在消防方面,管理者可在 BIM 模型中查看烟感、温感等探头状态,发生火灾时第一时间报警定位并通知管理者,提高火灾救援的速度和质量^[64];发生火灾时,根据走道、楼梯、应急通道监控情况,在 BIM 模型中规划逃生路线,为逃生人员和救援人员提供指导^[65];Zhou 等^[66]提出了基于 BIM 和云的火灾报警系统,研发了一种捕捉火灾传感器信号的云网关,并基于自然语言处理将真实世界的火灾传感器映射至 BIM 模型,解决火灾数据共享和火灾传感器在 BIM 模型中自动映射问题。

3.4 资产管理

资产管理是运用信息化技术增强资产监管力度,对资产的出入库、盘点、折旧进行记录,更科学规范地对资产进行管理。在运维初期建立资产数据库,资产新增、转移、折旧时及时更新数据库,对资产进行批量查询统计,包括资产信息、名称规格、部门资产统计等,了解实际资产情况;将盘点数据与资产数据库中的数据进行对比,可按单位、部门生成盘盈明细表、盘亏明细表、盘点汇总表;通过为资产添加 RFID 标签,结合 BIM 模型可实现资产的快速定位与跟踪;为大型资产添加二维码,可扫码查看出厂日期、使用年限、维修保养记录等信息^[2,67]。

3.5 能耗管理

建筑行业的能耗使用效率不高,但建筑物能耗占全球能耗的 30%~40%。过去 BIM 仅作为能耗模拟分析的模型,为模拟分析提供三维几何结构^[9]。随着 BIM 在运维阶段的应用,BIM 逐渐和能耗数据集成在一起建立建筑能耗信息模型,为能耗管理提供了一种新方法。解晓明^[68]通过在建筑设备上安装能耗计量传感器对能耗数据进行监测,按楼栋、楼宇、部门、功能区设置能耗计划,动态调整设备运行状态,在满足使用需求的前提下实现了建筑设备能耗最小化;胡振中等^[69]利用神经网络建立能耗预测模型,将预测值与实际值进行对比得到能耗异常数据,并以此为基础排查建筑内部设备故障;Yuan 等^[70]针对多源异构能耗数据交换不便的问题,提出一个自动提取和集成动态异构能耗数据与静态 BIM 模型数据的框架,并以 234 栋建筑验证了上述框架的可行性。

3.6 信息管理

信息管理是指利用信息化手段对建筑全生命周期内的竣工图纸、合同、维保记录等进行存档和管理,使相互独立的各系统达到数据共享。Zhu等^[71]对建筑交付过程中的问题进行文献综述,并指出交付的文件(如竣工图、规范、操作手册等)多采用纸质和电子格式,特别是对未来运维很重要的竣工图大多数为二维图纸,这会导致运维阶段信息交互的低效性。将竣工资料导入 BIM 运维平台,同时使文档和设备关联,维修时可快速查看上下游设备信息和操作手册,帮助确定维修方案^[72]。Wang等^[73]指出 BIM 用于比信息管理更高一级的知识管理,并提出了一个基于 BIM 的知识管理概念模型,该模型呈现了 BIM 的三维可视化、生命周期管理、协作环境和主动机制等特点,为建筑项目管理提供了新方式。

4 讨论与展望

随着 BIM 技术在运维管理中的价值日益显现,业主和从业者不断探索 BIM 在运维阶段的应用模式,研究人员也对关键技术进行了研发。但通过实地调研发现,将 BIM 应用于运维阶段的成熟案例较少。本文通过实地调研、文献调研和国内外研究对比,分析了 BIM 在运维阶段应用不佳的原因,也是未来的研究方向。结论如下。

1) 数据交换及相关标准不完善。在过去 10 年,随着信息化技术的发展,建筑从设计、施工到运维阶段产生的大量数据可被采集,但由于数据来源于不同阶段,这些数据难以集成在一起并服务于运维管理。虽然不同项目有不同需求,但建立通用 BIM 运维标准,对数据格式、协议和数据接口等进行统一规定,可大力推动 BIM 在运维阶段的应用。

2) BIM 应用于运维阶段的效益难以量化。尽管目前国内外有少部分研究指出 BIM 能在时间、成本方面带来效益,但均无法明确量化 BIM 带来的投资回报率。鉴于建立 BIM 模型、开发和配置运维系统、布置条形码等需投入大量人力和物力,业主需明确 BIM 在运维阶段能带来多少价值,才会决定是否投入使用 BIM。除此之外,建筑运维时间一般为数十年,这也增加了效益量化的难度。因此,未来可研究与运维阶段相关的成本和潜在收益,明确 BIM 在运维阶段带来的价值。

3) BIM 运维管理信息需求不明确。在设计和施工阶段,业主为信息使用者,而在运维阶段,其同时也是信息管理者。然而业主并未明确实现 BIM 在运维阶段的应用所需的信息,包括竣工 BIM 交付

内容、实施指南、设施信息、合同文件等。因此,未来应建立统一流程,明确运维管理所需信息、信息来源、信息收集方法和信息收集阶段,并考虑如何将这些信息融入运维管理。

4) 基于 BIM 的运维平台与原有子系统平台冲突。虽然传统运维管理系统(如 BA 系统、消防系统、工单系统)为二维系统,且系统间相互独立,但其应用已较为成熟。对于运维人员来说,使用基于 BIM 的运维管理平台需重新参加培训、学习相关内容,而对于业主来说,需招聘高文化素养的技术人员、购置相关硬件设施,因此人们对新技术的接受程度并不高。未来应提供一些成熟的 BIM 运维案例进行研究,建立 BIM 在不同工作流程中的应用框架,使业主和运维人员充分了解 BIM 与运维管理结合的优势。

5) 运维数据智能化应用场景不明确。基于 BIM 的运维平台可整合大量运维期间产生的数据,而人工智能技术的发展为运维数据的分析处理提供了方法。未来应考虑如何利用机器学习、深度学习等算法对运维数据进行分析,从历史数据和趋势中挖掘数据间的关系,并预测未来数据,为业主做出更可靠的决策提供理论依据。

5 结语

随着 BIM 技术从设计、施工阶段向运维阶段发展,基于 BIM 的运维管理领域受到的关注度越来越高。本文检索了 188 篇中国地区基于 BIM 的运维管理领域相关文献,从关键技术和应用功能角度对文献进行分析总结,归纳 BIM 技术应用于运维阶段涉及的关键技术,总结目前主要的管理功能。在此基础上,通过实地调研、文献调研和国内外研究对比,分析国内 BIM 在运维阶段应用不佳的原因,提出未来研究方向。尽管 BIM 在运维阶段的应用还处于初级阶段,但随着技术的发展和标准的完善, BIM 将在智慧运维中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 纪博雅,戚振强,孟桂芹. BIM 技术在设施管理中的应用现状调查[J]. 施工技术, 2016, 45(18): 54-57, 69.
JI B Y, QI Z Q, MENG G Q. Investigation on the application status of BIM technology in facility management[J]. Construction technology, 2016, 45(18): 54-57, 69.
- [2] 许娜,宫彦入. 基于 BIM 的建筑运维管理系统框架体系研究——以徐州便民服务中心工程为例[J]. 建筑经济, 2018, 39(2): 45-48.
XU N, GONG Y R. Research on the framework system of building operation and maintenance management system based on BIM: taking Xuzhou Convenience Service Center project as an example [J]. Construction economy, 2018, 39(2): 45-48.

- [3] 楼笑笑,张金. 基于 BIM 的校园数智化运维管理路径思考[J]. 中国建设信息化,2022(17):58-59.
LOU X X, ZHANG J. Thinking on the path of campus digital intelligent operation and maintenance management based on BIM [J]. Informatization of China construction, 2022(17):58-59.
- [4] KENSEK K. BIM guidelines inform facilities management databases: a case study over time [J]. Buildings, 2015, 5(3): 899-916.
- [5] ILTER D, ERGEN E. BIM for building refurbishment and maintenance: current status and research directions [J]. Structural survey, 2015, 33(3): 228-256.
- [6] VOLK R, STENGEL J, SCHULTMANN F. Building information modeling(BIM) for existing buildings — literature review and future needs [J]. Automation in construction, 2014, 38: 109-127.
- [7] ASARE B A K, LIU R, ANUMBA J C. Building information modeling to support facilities management of large capital projects: a critical review [J]. Facilities, 2021, 40(3/4): 176-197.
- [8] ABIDEEN D K, YUNUSA -KALTUNGO A, MANU P, et al. A systematic review of the extent to which BIM is integrated into operation and maintenance[J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8692-8692.
- [9] GAO X, PISHDAD-BOZORGI P. BIM-enabled facilities operation and maintenance: a review[J]. Advanced engineering informatics,2019, 39: 227-247.
- [10] 甘英浩. BIM 模式下的校园设施运维管理对策研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
GAN Y H. Study on the countermeasures of campus facilities operation and maintenance management under BIM mode [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2020.
- [11] SHEN W M, HAO Q, XUE Y J. A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance [J]. Automation in construction, 2012, 25: 41-48.
- [12] WETZEL E M, THABET W Y. A case study towards transferring relevant safety information for facilities maintenance using BIM[J]. Electronic journal of information technology in construction,2018, 23: 53-74.
- [13] 赖华辉,侯铁,钟祖良,等. BIM 数据标准 IFC 发展分析[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 126-133.
LAI H H, HOU T, ZHONG Z L, et al. Analysis of the development of BIM data standard IFC [J]. Journal of civil engineering and management, 2020, 37(1): 126-133.
- [14] 徐照,徐夏炎,李启明,等. 基于 WebGL 与 IFC 的建筑信息模型可视化分析方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 444-449.
XU Z, XU X Y, LI Q M, et al. Visual analysis method of building information model based on WebGL and IFC [J]. Journal of Southeast University(natural science edition), 2016, 46(2): 444-449.
- [15] 赖华辉,邓雪原,刘西拉. 基于 IFC 标准的 BIM 数据共享与交换[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 121-128.
LAI H H, DENG X Y, LIU X L. BIM data sharing and exchange based on IFC standard [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(4): 121-128.
- [16] SUN J,LIU Y S,GAO G,et al. IFCCompressor: a content-based compression algorithm for optimizing industry foundation classes files [J]. Automation in construction, 2015, 50:1-15.
- [17] SHI X, LIU Y S, GAO G, et al. IFCDiff: a content-based automatic comparison approach for IFC files [J]. Automation in construction, 2018, 86:53-68.
- [18] 翟韦,蒋琦. COBie 标准在建筑工程数字化交付中的应用 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(1): 61-68.
ZHAI W, JIANG Q. Application of COBie standard in digital delivery of construction engineering [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2022, 14(1): 61-68.
- [19] 余雯婷,李希胜. 基于 BIM-COBie 技术的建筑设施信息化管理[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(1): 129-135.
YU W T, LI X S. Information management of building facilities based on BIM-COBie technology [J]. Journal of civil engineering and management, 2017, 34(1): 129-135.
- [20] LIU R, ISSA R R A. Survey: common knowledge in BIM for facility maintenance[J]. Journal of performance of constructed facilities,2015, 30(3): 04015033.
- [21] 张春影. BIM 技术在设施信息管理的应用研究[D]. 大连:东北财经大学, 2016.
ZHANG C Y. Research on the application of BIM technology in facility information management [D]. Dalian: Dongbei University of Finance & Economics, 2016.
- [22] GUI N, WANG C H, QIU Z F, et al. IFC-based partial data model retrieval for distributed collaborative design[J]. Journal of computing in civil engineering, 2019, 33(3): 04019016.
- [23] 余芳强,张建平. 一种分阶段递进式 BIM 构建方法[J]. 图学学报, 2017, 38(1): 97-101.
YU F Q, ZHANG J P. A phased and progressive BIM construction method [J]. Journal of graphics, 2017, 38(1): 97-101.
- [24] 施平望,林良帆,邓雪原. 基于 IFC 标准的建筑构件表达与管理方法研究[J]. 图学学报, 2016, 37(2): 249-256.
SHI P W, LIN L F, DENG X Y. Research on the expression and management methods of building components based on IFC standard [J]. Journal of graphics, 2016,37(2): 249-256.
- [25] 周洪波,施平望,邓雪原. 基于 IFC 标准的 BIM 构件库研究 [J]. 图学学报,2017, 38(4): 589-595.
ZHOU H B, SHI P W, DENG X Y. Research on BIM component library based on IFC standard [J]. Journal of graphics, 2017, 38(4):589-595.
- [26] 陈科,张力,管林杰,等. 考虑几何特征的 BIM 模型轻量化方法研究[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 209-213.
CHEN K, ZHANG L, GUAN L J, et al. Study on the lightweight method of BIM model considering geometric features [J]. Yangtze River, 2022,53(2):209-213.
- [27] 郭思怡,陈永锋. 建筑运维阶段信息模型的轻量化方法[J]. 图学学报,2018,39(1): 123-128.

- GUO S Y, CHEN Y F. Lightweight method of information model in building operation and maintenance stage [J]. *Journal of graphics*, 2018, 39(1): 123-128.
- [28] LIU F, ZHANG H J, HU Y H, et al. Cesium based lightweight WebBIM technology for smart city visualization management [C]//International Conference on Inforatmion technology in Geo-Engineering, 2019.
- [29] 孙源,王国光,赵杏英,等. BIM 模型轻量化技术研究与实现 [J]. *人民长江*, 2021, 52(12): 229-235.
SUN Y, WANG G G, ZHAO X Y, et al. Research and implementation of BIM model lightweight technology [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(12): 229-235.
- [30] ZHU J X, WANG X Y, WANG P, et al. Integration of BIM and GIS: geometry from IFC to shapefile using open-source technology [J]. *Automation in construction*, 2019, 102:105-119.
- [31] CHAMIKA K D, NIPUNI S. IoT-BIM-based digital transformation in facilities management: a conceptual model [J]. *Journal of facilities management*, 2022, 20(3): 437-451.
- [32] CHENG C J, CHEN W, CHEN K, et al. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms [J]. *Automation in construction*, 2020, 112:103087.
- [33] 董娜,李鲁洁,杨冬梅,等. 基于 BIM 与 RFID 技术的设备管理系统构架研究[J]. *施工技术*, 2018, 47(21): 107-112.
DONG N, LI L J, YANG D M, et al. Research on the framework of equipment management system based on BIM and RFID technology [J]. *Construction technology*, 2018, 47(21): 107-112.
- [34] 王廷魁,赵一洁,张睿奕,等. 基于 BIM 与 RFID 的建筑设备运行维护管理系统研究 [J]. *建筑经济*, 2013(11): 113-116.
WANG T K, ZHAO Y J, ZHANG R Y, et al. Research on construction equipment operation and maintenance management system based on BIM and RFID [J]. *Construction economy*, 2013(11): 113-116.
- [35] 包胜,杨漠钦,欧阳笛帆. 基于城市信息模型的新型智慧城市管理平台[J]. *城市发展研究*, 2018, 25(11): 50-57, 72.
BAO S, YANG H Q, OUYANG D F. New smart city management platform based on urban information model [J]. *Urban development studies*, 2018, 25(11): 50-57, 72.
- [36] 季珏,汪科,王梓豪,等. 赋能智慧城市建设的城市信息模型(CIM)的内涵及关键技术探究 [J]. *城市发展研究*, 2021, 28(3): 65-69.
JI J, WANG K, WANG Z H, et al. The connotation and key technologies of urban information model(CIM) enabling smart city construction [J]. *Urban development studies*, 2021, 28(3): 65-69.
- [37] XU Z, QI M, WU Y, et al. City information modeling: state of the art [J]. *Applied sciences*, 2021, 11(19): 9333.
- [38] WANG T, PIAO Y M. Development of BIM-AR-based facility risk assessment and maintenance system [J]. *Journal of performance of constructed facilities*, 2019, 33(6): 04019068.
- [39] WEN Q, ZHANG J P, HU Z Z, et al. A data-driven approach to improve the operation and maintenance management of large public buildings [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 176127-176140.
- [40] 杨昊,余芳强,高尚,等. 基于数字孪生的建筑运维系统数据融合研究和应用[J]. *工业建筑*, 2022, 52(10): 204-210, 235.
YANG H, YU F Q, GAO S, et al. Research and application of data fusion of building operation and maintenance system based on digital twin [J]. *Industrial construction*, 2022, 52(10): 204-210, 235.
- [41] ZHANG F, CHAN A P C, DARKO A, et al. Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry [J]. *Automation in construction*, 2022, 139:104289.
- [42] 胡振中,彭阳,田佩龙. 基于 BIM 的运维管理研究与应用综述[J]. *图学学报*. 2015, 36(5): 802-810.
HU Z Z, PENG Y, TIAN P L. Review of research and application of operation and maintenance management based on BIM [J]. *Journal of graphics*, 2015, 36(5): 802-810.
- [43] 武大勇. 基于云计算的 BIM 建筑运营维护系统设计与挑战 [J]. *土木建筑工程信息技术*, 2014, 6(5): 46-52.
WU D Y. Design and challenge of BIM building operation and maintenance system based on cloud computing [J]. *Journal of information technology in civil engineering and architecture*, 2014, 6(5): 46-52.
- [44] 王朔,王弗雄,何富杰. 基于 BIM 的集成建筑设施管理系统架构与实现 [J]. *土木建筑工程信息技术*, 2021, 13(5): 12-19.
WANG S, WANG F X, HE F J. Architecture and implementation of integrated building facilities management system based on BIM [J]. *Journal of information technology in civil engineering and architecture*, 2021, 13(5): 12-19.
- [45] 杜明芳. 基于 BIM+Multi-Agent 增强学习的智慧建筑及城市运维软件设计 [J]. *土木建筑工程信息技术*, 2018, 10(6): 1-9.
DU M F. Design of intelligent building and urban operation and maintenance software based on BIM+Multi-Agent reinforcement learning [J]. *Journal of information technology in civil engineering and architecture*, 2018, 10(6): 1-9.
- [46] XU Z, ZHANG Y, XU X Y. 3D visualization for building information models based upon IFC and WebGL integration [J]. *Multimedia tools and applications*, 2016, 75(24): 17421-17441.
- [47] 司典浩,张丽丽,赵云辉,等. BIM 与 Web 信息服务融合的关键技术研究 [J]. *土木建筑工程信息技术*, 2022, 14(4): 29-33.
SI D H, ZHANG L L, ZHAO Y H, et al. Research on key technologies of BIM and web information service integration [J]. *Journal of information technology in civil engineering and architecture*, 2022, 14(4): 29-33.
- [48] 满廷磊,谢步瀛,张其林,等. 基于 OGRE 和 BIM 的建筑物运行维护可视化系统平台研发 [J]. *土木建筑工程信息技术*, 2013, 5(1): 1-5.
MAN Y L, XIE B Y, ZHANG Q L, et al. Research and development of visualization system platform for building operation and maintenance based on OGRE and BIM [J]. *Journal of*

- information technology in civil engineering and architecture, 2013, 5(1): 1-5.
- [49] 王亭,王佳. 基于 BIM 与 IoT 数据的交互方法[J]. 计算机工程与设计,2020, 41(1): 283-289.
WANG T, WANG J. Interaction method based on BIM and IoT data [J]. Computer engineering and design, 2020, 41(1): 283-289.
- [50] 金伟强,李明照. 基于 BIM 技术的设施管理 SWOT 分析[J]. 土木建筑工程信息技术,2015, 7(1): 25-29.
JIN W Q, LI M Z. SWOT analysis of facility management based on BIM technology [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture,2015,7(1): 25-29.
- [51] 徐瑞楠. 基于 BIM 的校园基础设施运维管理的关键因素研究[D]. 天津:天津大学, 2019.
XU R N. Research on the key factors of BIM-based campus infrastructure operation and maintenance management [D]. Tianjin:Tianjin University, 2019.
- [52] 田佩龙,李哲,胡振中,等. BIM 与建筑机电设备监测信息集成的研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2015, 7(1): 8-13.
TIAN P L, LI Z, HU Z Z, et al. Research on the integration of BIM and construction electromechanical equipment monitoring information [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2015, 7(1): 8-13.
- [53] 张建忠,徐诚,蒋凤昌,等. 基于 BIM 的医院建筑设施设备管理平台设计与实现 [J]. 建筑经济, 2018, 39(5): 117-120.
ZHANG J Z, XU C, JIANG F C, et al. Design and implementation of BIM-based hospital building facilities and equipment management platform [J]. Construction economy, 2018,39(5): 117-120.
- [54] XU J Y, LU W S, XUE F, et al. ‘Cognitive facility management’: definition, system architecture, and example scenario [J]. Automation in construction, 2019, 107:102922.
- [55] PAN N H, CHEN K Y. Facility maintenance traceability information coding in BIM-based facility repair platform [J]. Advances in civil engineering,2020,2020: 1-12.
- [56] CHEN W W, CHEN K Y, CHENG C J, et al. BIM-based framework for automatic scheduling of facility maintenance work orders[J]. Automation in construction, 2018, 91:15-30.
- [57] 胡振中,陈祥祥,王亮,等. 基于 BIM 的机电设备智能管理系统[J]. 土木建筑工程信息技术,2013, 5(1): 17-21.
HU Z Z, CHEN X X, WANG L, et al. Intelligent management system of mechanical and electrical equipment based on BIM [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2013, 5(1): 17-21.
- [58] 苗智慧. 基于 BIM 的建筑设备可视化运维管理系统研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2022, 14(1): 119-125.
MIAO Z H. Research on BIM-based visual operation and maintenance management system for construction equipment [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2022, 14(1): 119-125.
- [59] 施晨欢,王凯,李嘉军,等. 基于 BIM 的 FM 运维管理平台研究——申都大厦运维管理平台应用实践 [J]. 土木建筑工程信息技术,2014, 6(6): 50-57.
SHI C H, WANG K, LI J J, et al. Research on BIM-based FM operation and maintenance management platform-application practice of operation and maintenance management platform of Shendu Building [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2014,6(6): 50-57.
- [60] 李正坤,张德海,刘本宁. BIM 技术在高校资产运维管理中的应用 [C]//第六届 BIM 技术国际交流会——数字建造在地产、设计、施工领域应用与发展论文集, 2019.
LI Z K, ZHANG D H, LIU B N. Application of BIM technology in the operation and maintenance management of university assets [C] //Proceedings of the 6th International Symposium on BIM Technology -Application and Development of Digital Construction in Real Estate, Design, and Construction Fields, Design and Construction, 2019.
- [61] XU J, CHEN K, ZETKULIC A E, et al. Pervasive sensing technologies for facility management: a critical review [J]. Facilities, 2020, 38(1-2): 161-180.
- [62] 谭香. BIM 技术下的智能楼宇集成管理系统建构[J]. 现代电子技术,2021, 44(4): 146-150.
TAN X. Construction of intelligent building integrated management system under BIM technology [J]. Modern electronics technique, 2021,44(4): 146-150.
- [63] 张舒,石丽红,赵习枝. 场景视角下社区智慧停车的数据融合[J]. 测绘通报,2023(3): 61-66.
ZHANG S, SHI L H, ZHAO X Z. Data fusion of smart parking in community from the perspective of scene [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2023(3):61-66.
- [64] 蒋雪雁. 智慧建筑运维管理平台的应用研究——以某大型商业综合体项目为例[J]. 建筑经济,2021, 42(9): 78-82.
JIANG X Y. Research on the application of intelligent building operation and maintenance management platform - taking a large commercial complex project as an example [J]. Construction economy, 2021, 42(9): 78-82.
- [65] 周兆银,谢春宁,廖小烽,等. 基于 BIM 技术的智慧小区运维平台构建[J]. 建筑经济,2018, 39(6): 88-91.
ZHOU Z Y, XIE C N, LIAO X F, et al. Construction of intelligent community operation and maintenance platform based on BIM technology [J]. Construction economy, 2018, 39(6): 88-91.
- [66] ZHOU X P, LI H, WANG J, et al. CloudFAS: cloud-based building fire alarm system using building information modelling [J]. Journal of building engineering, 2022, 53:104571.
- [67] 汪再军. BIM 技术在建筑运维管理中的应用[J]. 建筑经济, 2013(9): 94-97.
WANG Z J. Application of BIM technology in building operation and maintenance management [J]. Construction economy, 2013(9): 94-97.
- [68] 解晓明. BIM 技术在建筑设备运维管理中的应用研究[J]. 建筑经济,2020, 41(12): 74-78.
XIE X M. Research on the application of BIM technology in construction equipment operation and maintenance management [J]. Construction economy, 2020,41(12):74-78.

- 1999, 36(20): 3073-3084.
- [22] KWAŚNY W. A modification of the method for determination of surface fractal dimension and multifractal analysis [J]. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 2009, 33(2): 115-125.
- [23] CAI M, KAISER P K, UNO H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system [J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2004, 41(1): 3-19.
- [24] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. *Soil mechanics in engineering practice* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1996.
- [25] FERREDOONI D, KHANLARI G R, HEIDARI M. Assessment of a modified rock mass classification system for rock slope stability analysis in the Q-system [J]. *Earth sciences research journal*, 2015, 19(2): 147-152.
- [26] WU A Q, ZHAO W, ZHANG Y H, et al. A detailed study of the CHN-BQ rock mass classification method and its correlations with RMR and Q system and Hoek-Brown criterion [J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2023, 162: 105290.
- [27] BIENIAWSKI Z T. *22-classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1993.
- [28] MONTE J M. Rock mass characterization using laser scanning and digital imaging data collection techniques [D]. Tucson: The University of Arizona, 2004.
- [29] NASRALLAH J G, MONTE J, KEMENY J. Rock mass characterization for slope/catch bench design using 3D laser and digital imaging [C]//Proceedings of the Gulf Rocks 2004, the 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS), 2004.
- [30] 况杰, 章杨松. 基于图像处理的岩体结构面迹线自动检测[J]. *岩土工程技术*, 2017, 31(1): 5-8, 13.
- KUANG J, ZHANG Y S. Automatic detection of rock mass structural plane trace based on image processing [J]. *Geotechnical engineering technique*, 2017, 31(1): 5-8, 13.
- [31] 况杰, 章杨松, 赵佳斌. 基于相位一致性图像处理的岩体裂隙自动检测 [J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(24): 193-197.
- KUANG J, ZHANG Y S, ZHAO J B. Automatic detection of rock mass fissure based on image processing of phase congruency [J]. *Computer engineering and applications*, 2018, 54(24): 193-197.
- [32] 况杰. 基于图像处理的岩体结构面迹线自动检测及岩体质量评价方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- KUANG J. Study on automatic detection of structural plane trace and evaluation of rock mass quality based on image processing [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.

(上接第35页)

- [69] 胡振中, 冷焯, 袁爽. 基于BIM和数据驱动的智能运维管理方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(2): 199-207.
- HU Z Z, LENG S, YUAN S. Intelligent operation and maintenance management method based on BIM and data-driven [J]. *Journal of Tsinghua University (science and technology)*, 2022, 62(2): 199-207.
- [70] YUAN S, HU Z Z, LIN J R, et al. A framework for the automatic integration and diagnosis of building energy consumption data [J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1395-1395.
- [71] ZHU L, SHAN M, XU Z. Critical review of building handover-related research in construction and facility management journals [J]. *Engineering, construction and architectural management*, 2019, 28(1): 154-173.
- [72] 李铁纯, 王佳, 周小平. 基于BIM的建筑设备运维管理平台研究[J]. *暖通空调*, 2017, 47(6): 29-32, 127.
- LI T C, WANG J, ZHOU X P. Research on BIM-based construction equipment operation and maintenance management platform [J]. *Heating ventilating & air conditioning*, 2017, 47(6): 29-32, 127.
- [73] WANG H, MENG X H. BIM-supported knowledge management: potentials and expectations [J]. *Journal of management in engineering*, 2021, 37(4): 04021032.