

浅析BIM技术在抽蓄电站地下厂房安全疏散中的应用

边瑾博, 鲁鑫乐, 康鲜维, 孙佳伟, 高山

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年11月25日

摘要

在“双碳”战略目标推动下,我国抽水蓄能电站建设进入高速发展期。作为电站“心脏”的地下厂房,其结构复杂、环境封闭,导致应急安全疏散面临严峻挑战。本文系统分析了大型抽水蓄能电站地下厂房安全疏散的核心难点,包括复杂空间环境制约、人员行为不确定性以及传统疏散模拟方法的局限性。针对这些难点,论文深入探讨了BIM技术的应用优势:其三维可视化能力可直观呈现空间布局与疏散要素;信息集成与数据驱动特性为高精度疏散仿真提供了坚实基础;多专业协同平台则能有效优化疏散方案设计流程。文章进一步阐述了BIM技术在具体应用中的三大方向:基于高精度模型与专业仿真软件的耦合分析,实现疏散过程的精准模拟与优化;构建可视化和可动态更新的应急预案与管理系统,提升培训与应急响应效能;结合物联网技术,实现疏散设施的智能化运维管理。尽管BIM技术在应用初期面临成本、人才和数据集成等方面的挑战,但通过构建协同机制、加强人才培养和推进数据标准化等对策,其在提升地下厂房安全疏散能力方面具有巨大潜力与广阔应用前景。

关键词

BIM技术, 抽水蓄能电站, 安全疏散, 地下厂房, 疏散仿真, 应急预案, 智能化运维

A Brief Analysis of the Application of BIM Technology in the Safety Evacuation of Underground Powerhouses in Pumped Storage Power Stations

Jinbo Bian, Xinle Lu, Xianwei Kang, Jiawei Sun, Shan Gao

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: October 20, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 25, 2025

文章引用: 边瑾博, 鲁鑫乐, 康鲜维, 孙佳伟, 高山. 浅析BIM技术在抽蓄电站地下厂房安全疏散中的应用[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2737-2743. DOI: 10.12677/hjce.2025.1411293

Abstract

Under the impetus of the “dual carbon” strategic goals, the construction of pumped storage power stations in China has entered a period of rapid development. As the “heart” of the power station, the underground powerhouse has a complex structure and a closed environment, which poses severe challenges to emergency safety evacuation. This paper systematically analyzes the core difficulties in the safety evacuation of large-scale pumped storage power station underground powerhouses, including the constraints of complex spatial environments, the uncertainty of personnel behavior, and the limitations of traditional evacuation simulation methods. In response to these difficulties, the paper deeply explores the application advantages of BIM technology: its three-dimensional visualization capability can intuitively present spatial layout and evacuation elements; its information integration and data-driven characteristics provide a solid foundation for high-precision evacuation simulation; and its multi-disciplinary collaboration platform can effectively optimize the design process of evacuation plans. The article further elaborates on the three major directions of BIM technology in specific applications: coupling analysis based on high-precision models and professional simulation software to achieve precise simulation and optimization of the evacuation process; constructing a visual and dynamically updatable emergency plan and management system to enhance training and emergency response efficiency; and integrating Internet of Things technology to achieve intelligent operation and maintenance management of evacuation facilities. Although BIM technology faces challenges such as cost, talent, and data integration in the initial application stage, through the construction of collaborative mechanisms, strengthening talent cultivation, and promoting data standardization, it has great potential and broad application prospects in enhancing the safety evacuation capabilities of underground powerhouses.

Keywords

BIM Technology, Pumped Storage Power Station, Safety Evacuation, Underground Powerhouse, Evacuation Simulation, Emergency Plan, Intelligent Operation and Maintenance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“双碳”战略目标的引领下，我国能源体系正朝着清洁化、低碳化方向加快重构。作为技术成熟度最高、单机容量最大、全生命周期效益显著的大规模储能方式，抽水蓄能电站在全球范围内被公认为保障电网安全稳定运行、实现新能源高效消纳的关键基础设施。其在平抑风电、光伏等可再生能源发电的间歇性与波动性，维持电网频率与电压稳定方面发挥着不可或缺的重要作用[1]。“十四五”期间，我国抽水蓄能产业呈现跨越式发展态势。行业数据显示，截至目前，全国已投产抽水蓄能机组总装机容量已达 6000 万千瓦，已获核准在建项目规模突破 1 亿千瓦。这种爆发式增长极大增强了电力系统的调节灵活性及运行可靠性，在确保能源供应安全、促进清洁能源消费、推进能源结构低碳转型等方面提供了关键支撑[2]。随着建设规模的持续扩大，作为电站“心脏”部位的大型抽水蓄能电站地下厂房，其安全运行管理日益受到高度重视。现有研究多集中于普通民用建筑或地铁站等公共空间，对于功能复杂、工艺设备密集、空间结构特异的大型地下工业厂房，特别是抽水蓄能电站地下厂房的安全疏散研究尚显不足。这类空间具有埋深大、通道网络复杂、灾害荷载多元(如火灾、渗水、电气事故耦合)等独特挑战，通用模

型与方法在此类场景下的适用性存在局限。现有研究的空白主要体现在：缺乏针对地下厂房复杂工艺布局的高精度 BIM 建模标准，传统疏散仿真与地下厂房实际工况(如设备运行对通道的临时占用)的结合不够紧密；基于 BIM 的疏散管理方案如何与电站现有的运维体系有效融合仍有待探索。BIM 技术凭借其全流程信息集成与可视化优势，为地下厂房安全疏散设计的优化、仿真分析与智能管理开辟了创新途径[3]。本文系统分析 BIM 技术应用于抽水蓄能电站地下厂房安全疏散的特殊路径与核心价值。通过深入剖析该应用场景下的核心难点，并构建集仿真、管理与运维于一体的应用框架，以期提升此类特殊地下工程的应急疏散能力提供具有针对性的理论参考与实践指南。

2. 抽蓄电站地下厂房安全疏散核心难点

2.1. 地下复杂空间环境对疏散的制约

抽水蓄能电站地下厂房深埋于地下岩体中，其建筑结构涵盖主厂房、副厂房、主变洞、尾水道等多个功能单元，各单元通过廊道与竖井相互串联，构成错综复杂的地下空间系统。该结构布局易导致疏散路径迂回冗长，人员在应急状态下难以迅速辨识疏散方向，增加了撤离难度[4]。此外，地下厂房属于密闭空间，自然通风受限。在发生火灾、渗水等事故时，有毒烟雾或可燃气体难以向外扩散，将迅速充斥整个作业区域，造成能见度急剧下降和空气污染，不仅威胁人员呼吸安全，也严重阻碍疏散行动。封闭环境还易引发焦虑与恐慌情绪，导致决策能力下降、秩序混乱，进一步影响整体疏散效率。

2.2. 疏散过程中人员行为的不确定性

应急疏散过程中的人员行为是安全工程研究中的复杂问题。由于个体在生理机能、心理素质与社会属性等方面存在差异，其在紧急情况下的反应与行动具有显著的不确定性[5]。例如，年长者或行动不便者移动能力较弱，而青壮年人员则具备较快疏散速度；不同心理素质的人员可能表现出冷静判断或盲目从众等不同行为模式。个体之间还存在相互影响机制，如模仿、协作、竞争等群体行为效应，进一步增加了疏散过程的复杂性。特别是在灾害压力下，恐慌情绪容易蔓延，引发非理性聚集或拥堵，尤其在通道狭窄区域易形成人流瓶颈，甚至诱发踩踏事故，严重影响疏散过程的安全性。

2.3. 传统疏散模拟方法的适用性局限

目前主流的人员疏散模拟方法可分为宏观模型与微观模型两大类。宏观模型将疏散人群视为连续介质，侧重于分析整体人流与建筑环境之间的相互作用，通过流量、密度等统计参数模拟疏散过程[6]。然而，该类方法忽略了个体决策差异及人际交互的影响，难以准确反映真实场景中人员行为的多样性与动态性。在地下厂房这类空间结构复杂、疏散条件严苛的场景中，宏观模型在疏散时间预测、瓶颈识别及路径选择等方面存在较大偏差，限制了其在实际工程中的指导价值。

微观模型以个体为基本模拟单元，能够精细刻画人员在应激状态下的心理与行为决策，如从众、群聚及社会关系影响等，从而更真实地还原疏散过程中的人因动态[7]。正因这一优势，微观模型已成为复杂地下空间应急疏散研究的主流方法。然而，传统微观模拟多基于简化几何模型或二维平面，难以承载地下厂房中完整的建筑结构、设备布局及环境属性等高维度信息，导致模拟所需的数据基础薄弱，制约了其分析结果的准确性与可靠性。

3. BIM 技术在大型抽水蓄能电站地下厂房安全疏散中的应用优势

3.1. 三维建模与可视化，实现空间布局与疏散要素的直观呈现

BIM 技术能够集成设计图纸、施工资料及设备信息，构建包含几何结构与属性数据的地下厂房三维

数字模型。该模型不仅精准表达建筑空间关系、通道系统、工艺布置，还可嵌入疏散设施位置、安全出口状态、应急照明范围等关键安全信息。借助三维可视化能力，管理人员可全方位把握厂房空间结构，清晰辨识疏散路径走向与潜在瓶颈区域[8]。在日常培训中，该模型可用于开展沉浸式动线演练，增强人员对疏散环境的熟悉度；在应急响应时，指挥人员可依托模型快速定位事发现场、评估疏散条件，提升决策效率与科学性。

3.2. 信息集成与数据驱动，支撑高精度疏散仿真分析

BIM 作为一个集成化信息平台，能够汇聚地下厂房从规划设计、施工建造到运营维护的全生命周期数据。这些结构化信息为人员疏散模拟提供了真实、完整的数据基础[9]。在仿真分析中，可直接从 BIM 模型中提取疏散通道宽度、楼梯尺寸、出口分布等空间参数，以及不同时段的人员分布、岗位类型等动态数据，构建高度还原实际的疏散场景。此外，BIM 模型支持动态更新，当厂房布局或功能调整时，可同步更新疏散仿真参数，确保模拟结果始终符合现场实际情况。

3.3. 多专业协同与流程优化，提升疏散方案设计效能

地下厂房疏散方案设计涉及建筑、结构、暖通、消防、安全等多个专业，传统串行工作模式易导致信息脱节、设计冲突等问题。BIM 技术通过统一的数据环境，构建了协同工作平台，支持各专业并行设计与实时交互[10]。在布局疏散通道时，可实时获取消防专业对防火分区、防烟设置的要求；安全专业可基于同一模型进行疏散模拟，验证方案有效性并提出优化建议。这种协同机制有效避免了设计重复，缩短了方案生成周期，并显著提升了疏散方案的整体合理性与可行性。

4. BIM 技术在大型抽水蓄能电站地下厂房安全疏散中的具体应用

4.1. 高精度人员疏散仿真分析

基于 BIM 技术构建的地下厂房三维信息模型，为人员疏散仿真提供了真实可靠的数字环境。通过 IFC 等标准数据接口，可将 BIM 模型无缝导入专业疏散仿真平台(Pathfinder、FDS + Evac)，并自动获取空间尺寸、通道布局、设施位置等几何与属性参数。在此基础上，通过设置人员密度、行走速度、预反应时间等行为参数，即可建立高度还原实际工况的疏散仿真模型。通过设置火灾、涌水等典型灾害场景，可进行多工况耦合仿真。在火灾场景中，通过将火灾动力学模拟(FDS)获得的烟气蔓延、温度分布等数据与疏散仿真进行动态耦合，能够量化分析灾害演化对疏散过程的影响[11]。仿真结果可输出关键评价指标，必需安全疏散时间(RSET)、人员流动密度分布、瓶颈区域识别等，为优化疏散通道宽度、调整出口布局、改进防排烟设计提供科学依据。通过“仿真-评估-优化-再仿真”的迭代过程，可逐步完善疏散设计方案。

4.2. 可视化应急预案与动态管理系统

BIM 技术赋予应急预案以三维可视化与动态交互能力。基于仿真分析结果，可在 BIM 模型中标注不同灾情下的最佳疏散路径、备用路线、集合区域及关键应急设施，并生成直观的疏散动画指导文件。这种可视化预案显著提升了培训效果，使人员能够快速理解复杂的疏散逻辑与空间关系[12]。更重要的是，BIM 平台支持预案的动态更新。当厂房布局、设备安装或功能区划发生变更时，只需在 BIM 模型中进行相应调整，关联的应急预案即可同步更新，确保预案与实际状态始终保持一致。结合虚拟现实(VR)技术，可构建沉浸式演练环境，使人员在高度仿真的虚拟场景中进行应急响应训练。系统可自动记录演练过程中的关键行为数据，如疏散路径选择合理性、反应时间等，为评估演练效果、发现薄弱环节提供量化依据，从而实现预案的持续改进。

4.3. 疏散设施的智能化运维管理

基于BIM的设施管理系统可实现对所有疏散设施的全生命周期管理。在模型中,每个疏散指示标志、应急照明、消防设备等都被定义为包含型号、规格、安装日期、维护记录等属性的数字化对象[13]。管理人员可通过模型直观掌握设施分布状态,并制定基于时间的预防性维护计划,由系统自动发起维护提醒。通过将BIM与物联网(IoT)技术结合,在关键疏散设施上部署传感器,可实时监测其工作状态(应急照明电源状况、消防管道压力、门禁系统状态等)。监测数据与BIM模型动态关联,实现设施状态的可视化监控[14]。当数据异常时,系统可自动预警,并定位故障设备,指导维护人员快速响应。这种“BIM+IoT”的智能运维模式,确保了疏散设施在应急情况下的可靠性,为安全疏散提供了坚实的物质保障。

对于BIM的设施管理系统是实现疏散设施“可知、可管、可控”的关键。我们提出一个基于“BIM+IoT”的智能化运维系统框架,其核心构成与数据流如图1所示。

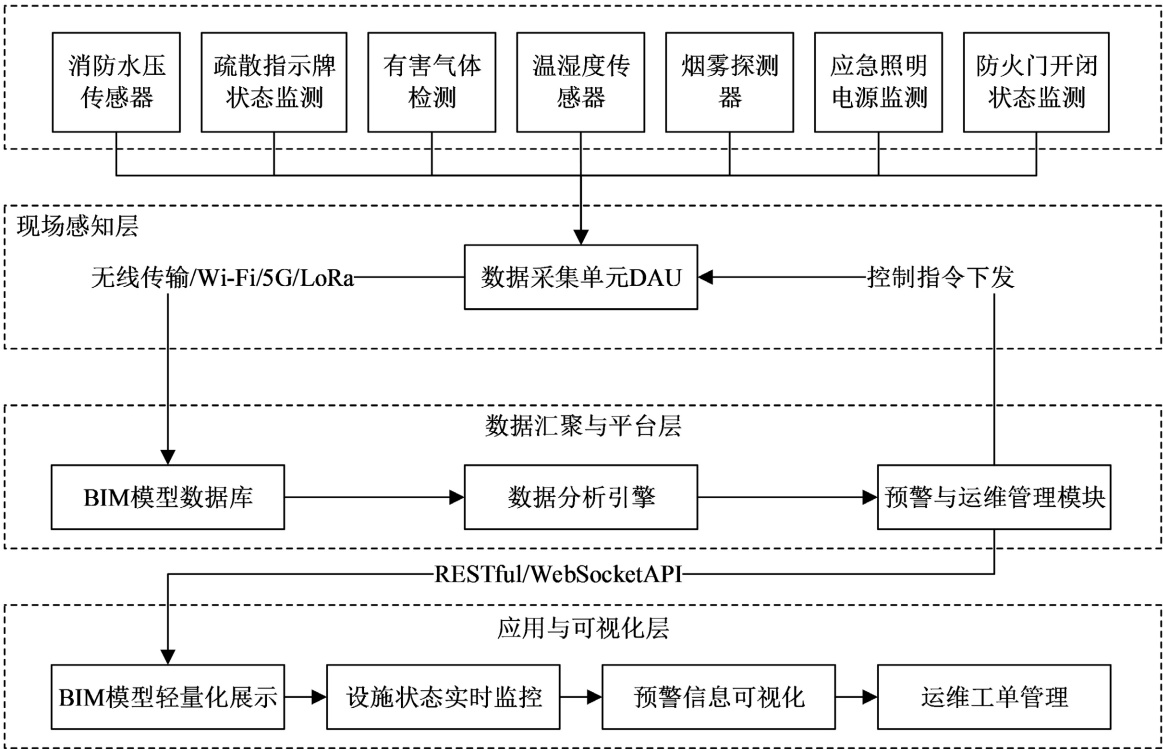


Figure 1. Intelligent operation and maintenance system framework
图 1. 智能化运维系统框架

- 1. 现场感知层:** 在关键疏散路径、出口、设备机房等位置部署各类物联网传感器。
环境传感器: 实时监测温度、烟雾浓度、CO 等气体浓度, 为灾害预警提供数据支撑。
设备状态传感器: 监测应急照明蓄电池电压、指示牌工作状态、防火门是否处于正常关闭状态、消防管网压力等, 实现设施故障的早期发现。
智能执行器: 如可根据火情信息动态调整指示方向的智能疏散指示牌, 以及可远程点亮的应急照明。
- 2. 数据汇聚与平台层:** 数据采集单元(DAU)对传感器数据进行初步处理和协议转换, 通过网络传输至云平台或本地服务器。平台层的核心是集成 BIM 模型数据库, 所有传感器数据、设备状态均与 BIM 模型中的构件对象关联。数据分析引擎负责处理数据, 运行预警算法。

3. 应用与可视化层：授权用户通过 BIM 可视化终端(Web 浏览器、移动 App)访问系统。BIM 模型以轻量化形式呈现，设施状态以颜色编码(绿色正常、黄色预警、红色故障)实时显示在模型上。一旦系统监测到数据异常(应急照明断电)，将自动触发预警，在 BIM 模型中高亮定位故障设备，并生成运维工单，指导人员快速处置，形成闭环管理。这种模式确保了疏散设施在应急情况下的极高可靠性。

5. BIM 技术在大型抽水蓄能电站地下厂房安全疏散应用中的挑战与对策

5.1. 面临的主要挑战

1. 初始投入与全生命周期成本较高

BIM 技术应用涉及软件采购(Revit、Pathfinder 等建模与仿真工具)、硬件升级(高性能图形工作站及计算服务器)及系统维护等多方面投入，项目实施过程中还需承担专业人才培养与技术融合带来的间接成本。对于部分以成本控制为核心的中小型项目而言，较高的前期投资可能制约 BIM 技术的全面推广与深入应用。

2. 跨领域复合型人才储备不足

BIM 技术在安全疏散领域的有效应用，需兼顾建筑信息建模、疏散行为仿真、应急管理及水电工程等多学科知识。目前，行业内同时掌握 BIM 技术专业操作与安全疏散理论背景的复合型人才较为稀缺，现有人员多限于单一专业背景，难以支撑从模型构建、模拟分析到疏散管理的全流程应用，影响技术落地的深度与成效。

3. 数据交互与系统集成存在壁垒

在构建集成化的疏散管理平台时，BIM 模型需与疏散模拟软件、火灾动力学分析工具、物联网设备管理系统等进行数据交换[15]。然而，由于不同系统之间数据格式与接口标准不统一，常在数据传递过程中出现信息损耗或语义不一致问题，影响模拟结果的准确性、预警功能的实时性，以及多系统协同效率。

5.2. 发展对策与建议

1. 构建多方协同的成本共担与效益提升机制

建议行业主管部门结合绿色能源与智慧工程政策，对积极应用 BIM 技术的抽水蓄能项目给予财政补贴或评奖优先等激励。软件企业可推出针对水电行业的模块化、租赁式 BIM 服务，降低初期采购压力。业主单位应立足全生命周期成本视角，通过统一平台减少设计变更、提升管理效率，从而摊薄远期总体成本。

2. 深化产教融合，构建多层次人才培养体系

鼓励高校在水利类、安全工程类专业中强化 BIM 与应急仿真相关课程建设，推动校企共建实训基地。企业应建立健全在职人员 BIM 技能培训与认证制度，重点培训设计、施工与运维阶段的技术融合能力。同时，可引入具备 BIM 与安全仿真背景的高层次人才，形成“引进 + 培养”双轮驱动机制。

3. 推进数据标准化与开放性平台建设

行业组织应牵头制定适用于抽水蓄能工程的 BIM 数据交换标准与接口规范，推动设计、仿真与运维阶段的数据无缝传递。软件企业需加强兼容性研发，支持 IFC、BCF 等开放格式，开发轻量化集成工具。项目层面应优先选择支持互操作的平台，推动建立以 BIM 为统一数据底座的疏散安全管理生态系统。

6. 结论

研究表明，通过构建一个以 BIM 模型为信息集成核心，贯穿设计、仿真、管理、运维全生命周期的一体化框架，能有效应对该特殊场景下的安全挑战。该框架的核心工作流程包括以下三个阶段：

(1) 设计仿真阶段：基于高精度 BIM 模型进行多工况耦合疏散仿真，通过“仿真-评估-优化”迭代，形成科学合理的疏散设计方案，为物理空间构建奠定安全基础。

(2) 预案与培训阶段：基于仿真结果，在 BIM 平台上开发可视化、可动态更新的应急预案，并利用 VR 技术进行沉浸式演练，提升人员的应急响应能力。

(3) 智能运维阶段：通过“BIM+IoT”技术融合，构建实时感知、智能预警、高效处置的设施运维闭环，确保疏散系统的持续可靠运行。

尽管 BIM 技术在应用初期面临成本、人才和数据集成等方面的挑战，但通过构建成本共担机制、加强产教融合人才培养、推进数据标准化等对策，其在全生命周期内的巨大价值必将得到更广泛的认可。

未来，随着 BIM 与数字孪生、人工智能等技术的深度融合，抽水蓄能电站地下厂房的安全疏散管理将朝着实时感知、智能分析、自主决策的智慧化方向演进，最终为保障人员生命安全构筑起一道更加坚实可靠的智能防线。

基金项目

省级大学生创新创业训练计划资助项目(S202512715046)。

参考文献

- [1] 郭炬. 科学研判发展形势推进抽水蓄能行业高质量发展[J]. 水电与抽水蓄能, 2025, 11(1): 1-3+32.
- [2] 张博庭. 大力发展抽水蓄能是实现我国“双碳”目标的当务之急[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7(6): 1-3+10.
- [3] 冯灿, 宋宜全, 杨以琳. 基于 BIM 的室内消防救援多层路径网络模型[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2025, 45(4): 30-35.
- [4] 师瑞谦, 梁山. 抽水蓄能电站地下厂房防火分区与疏散出口设计探讨[J]. 水电站设计, 2025, 41(1): 84-87.
- [5] Han, M., Kuang, Y., Zhao, Y., Zhang, Y., Xiong, J. and Zhang, Y. (2025) Psychological Stress on Human Mobility and Emergency Evacuation in Disaster Response. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **148**, Article: 105022. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105022>
- [6] 李晓东. 消防应急疏散路径智能优化方法[J]. 今日消防, 2025, 10(8): 46-48.
- [7] 杨达志. 基于多智能体强化学习的人群疏散建模与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 岳阳: 湖南理工学院, 2025.
- [8] 蒋艺. 基于 BIM 的地下厂房三维数字化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [9] 王清洛. BIM 与 GIS 集成下的工程测量数据融合研究[J]. 粘接, 2025, 52(10): 215-217+221.
- [10] 张国峰. BIM 技术在住宅建筑结构设计施工图深化设计中的应用研究[J]. 居舍, 2025(28): 111-114.
- [11] 常晨. 基于 Pathfinder 的高校建筑群人员安全疏散研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2021.
- [12] 刘畅, 王张舒君, 张恩茂, 等. 基于 BIM 建模和人工神经网络的快/慢速火灾识别方法[J]. 智能建筑电气技术, 2024, 18(3): 47-51.
- [13] 王明瑞. BIM 与测绘技术集成在建筑工程全生命周期管理中的实践[C]//广西生产力学会. 新质生产力与科技发展学术研讨会论文集. 聊城: 山东衡坤信息科技有限公司, 2025: 362-365.
- [14] 张青, 何剑侠. 基于 BIM 与 IoT 技术的智慧建筑能效监控系统设计与优化[J]. 绿色建造与智能建筑, 2025(9): 126-128+156.
- [15] 陈炽. 基于 BIM 的结构数据中心搭建与施工监测可视化研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2023.