

基于数字孪生与人工智能的公共空间建筑能源智慧化管理技术集成研究

张桂平¹, 秦俊非¹, 连进¹, 梁军平², 梁冉²

¹ 中铁建电气化局集团第一工程有限公司 河南洛阳

² 清华大学 北京

【摘要】大型公共空间建筑既要满足特异化功能要求, 又承担公共服务职能, 其能源管理面临客流波动明显、功能分区用能差异较大以及运行安全约束复杂等问题。研究通过文献梳理与问题归纳, 分析传统能源管理及数字孪生、人工智能的应用基础, 并围绕功能需求、数据感知、智能研判和执行权限进行技术要素集成。在“特异化功能优先、服务体验适配、能耗精准调控”的目标下, 构建由功能导向数字化建模与编码、运行与能耗全域实时感知、运行约束下分层智能研判、分级柔性协同调控组成的闭环能源智慧化管理技术路线, 并通过分级权限机制协调功能运行安全、公众舒适度与节能需求。该技术路线为大型公共空间建筑由“供给侧保障”向“需求侧驱动”的能源管理转变提供了系统化思路, 也为后续开展案例验证与参数优化提供了技术基础。

【关键词】大型公共空间建筑; 数字孪生; 人工智能; 能源智慧化管理; 需求侧驱动

【收稿日期】2026 年 6 月 12 日

【出刊日期】2026 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260052

Integrated research on smart energy management technology for public space buildings based on digital twin and artificial intelligence

Guiping Zhang¹, Junfei Qin¹, Jin Lian¹, Junping Liang², Ran Liang²

¹China Railway Construction Electrification Bureau Group 1st Engineering Co., Ltd. (First Engineering Co., Ltd.),
Luoyang, Henan

²Tsinghua University, Beijing

【Abstract】 Large-scale public space buildings must meet specialized functional requirements while fulfilling public service roles; consequently, their energy management faces challenges such as significant fluctuations in foot traffic, varying energy consumption across functional zones, and complex operational safety constraints. Through a review of existing literature and a summary of key issues, this study analyzes traditional energy management alongside the foundational applications of digital twins and artificial intelligence. It integrates technical elements—specifically functional requirements, data sensing, intelligent analysis, and execution authority. Guided by the objectives of prioritizing specialized functions, adapting to public service experience requirements, and achieving precise energy consumption control, the study establishes a closed-loop smart energy management technical framework. This framework comprises function-oriented digital modeling and coding, comprehensive real-time sensing of operations and energy consumption, hierarchical intelligent analysis under operational constraints, and tiered, flexible, collaborative control. A hierarchical authority mechanism is employed to balance functional operational safety, public comfort, and energy-saving requirements. This technical framework offers a systematic approach for transitioning large-scale public space buildings from “supply-side assurance” to “demand-side driven” energy management, while also providing a technical foundation for subsequent case studies and parameter optimization.

【Keywords】 Large-scale public space buildings; Digital twin; Artificial intelligence; Smart energy management; Demand-side driven

1 引言

依据《民用建筑节能条例》, 大型公共建筑是指单体建筑面积 2 万平方米以上的公共建筑^[1]。研究范围聚

焦于其中具有较大公共空间、多功能分区和公共服务属性的建筑, 以下统称为大型公共空间建筑。为满足公众舒适度及不同场馆的特异化功能要求, 这类建筑通

常配置新风、电气、空调和照明等系统,运行能耗相对较高。实际管理中,如果缺少统一调度和实时计量,设备运行容易产生不必要的能源消耗。与此同时,气候变化带来的极端天气和环境风险持续受到关注。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估综合报告指出,人类活动已明确导致全球变暖,减缓气候变化需要技术创新与系统转型共同推进^[2]。因此,大型公共空间建筑的能源管理需要进一步提高精细化和智能化水平。

在国际减碳行动持续推进的背景下,我国将“双碳”目标纳入国家发展战略,并持续加强节能降碳工作。2025年11月,国务院新闻办公室发布《碳达峰碳中和的中国行动》白皮书,重申中国将在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和,并系统总结能源、产业、城乡建设等领域的低碳转型实践^[3]。随着城市化进程推进,大型公共建筑已成为城市能源消耗的重要载体,其能耗与碳排放管理也是落实“双碳”战略的重要环节^[4]。相关实践已在公共文化建筑中展开。例如,广东省博物馆通过建筑环境与能源管理系统、中央空调运行调控等措施推进低碳运营,体现了大型公共空间建筑在精细化节能管理方面的应用潜力^[5]。加强此类建筑的能源管理与碳排放控制,对于降低运行能耗、推动“双碳”目标落实具有现实意义。

研究以数字孪生和人工智能技术为基础,讨论其与大型公共空间建筑能源管理体系的集成方式,并在保障特异化功能需求的前提下兼顾公众舒适度、节能需求和智慧化运营。研究首先通过文献梳理分析传统能源管理、数字孪生与人工智能的发展及应用现状,在此基础上归纳大型公共空间建筑在功能差异、数据融合和调控权限等方面的现实问题;随后结合建筑功能需求,对数字建模、实时感知、智能研判和设备调控等技术要素进行集成,形成面向运行全过程的能源智慧化管理技术路线。研究重点不在于单项算法或设备性能,而在于建立“建模—感知—研判—分级调控”的闭环逻辑,并通过分级权限机制协调特异化功能约束、公众舒适度与节能目标,为后续案例验证和工程化实施提供框架基础。

2 大型公共空间建筑能源管理研究基础与技术现状

为明确能源智慧化管理技术路线的构建基础,需要从传统能源管理方式、数字孪生与人工智能的发展以及两类技术在大型公共空间中的应用三个层面进行梳理。大型公共空间建筑的能源管理长期以合规、计量

和运行保障为基础,随着物联网、人工智能和数字孪生逐步进入建筑能源管理,相关研究开始由单一计量监测向实时感知、预测分析和闭环调控延伸^[6]。

2.1 传统大型公共空间建筑能源管理技术

传统大型公共空间建筑能源管理以合规性管控为基础,主要包括落实节能政策、制定节能规划、开展能源计量统计和加强节能管理等工作。公共建筑需要遵守国家及地方有关能源节约的政策法规,其中公共机构还应落实《公共机构节能条例》等要求。相关规定明确提出年度节能目标与实施方案、能源消费分类分项计量、能源消费统计以及节能宣传培训等管理内容^[7]。在实际运行中,管理部门通常结合建筑用电、用热等数据定期汇总能耗变化,并据此制定后续节能计划。如图1。

总体来看,传统能源管理能够满足合规管理和基础统计需求,但较多环节依赖人工记录、定期汇总和规则化控制,在实时性、数据融合和动态调控方面仍有局限。近年来,人工智能监测与预测方法逐步用于建筑能源管理,以提高能耗分析和运行调节的及时性^[8]。对于客流波动明显、功能分区复杂的大型公共空间建筑,仅依靠年度统计和固定策略难以及时反映日常运行状态,还需要实时感知、预测分析和分级调控手段予以补充。

2.2 数字孪生与人工智能技术发展与应用基础

数字孪生与人工智能(Artificial Intelligence, AI)正在成为公共空间数字化管理的重要技术组合。在文化遗产保护等场景中,数字孪生已被用于构建数字化保护与管理路径^[9]。从技术机制看,数字孪生通过物理实体与数字模型之间的映射和交互实现状态表征^[10],人工智能则用于数据识别、预测和辅助决策^[11]。两类技术结合后,可对环境变化规律和系统演化过程进行分析,为建筑状态映射、趋势判断和调控决策提供支持。

数字孪生与人工智能技术的发展受到产业需求和底层技术进步的共同推动^[12]。相关综述从使能技术、应用场景和发展趋势等维度对数字孪生进行了系统梳理^[13],也有研究将其概念演进概括为静态单向映射、高保真建模、双向交互与信息物理系统融合、动态双向智能等阶段^[14]。尽管分期标准并不完全一致,其总体趋势均由静态建模逐步转向实时交互、智能分析与辅助决策。

数字孪生的思想可追溯至20世纪后半叶航空航天等领域的实体与数字模型协同实践,作为较为明确的技术概念则在21世纪初逐步形成。早期应用主要集中于三维数字建模、虚拟装配和性能仿真,实时双向交互能力较为有限^[15,16]。对应到大型公共空间建筑,早期数

字化技术更多服务于建筑设计、空间表达和资源管理, 为后续运行状态映射奠定了模型基础。

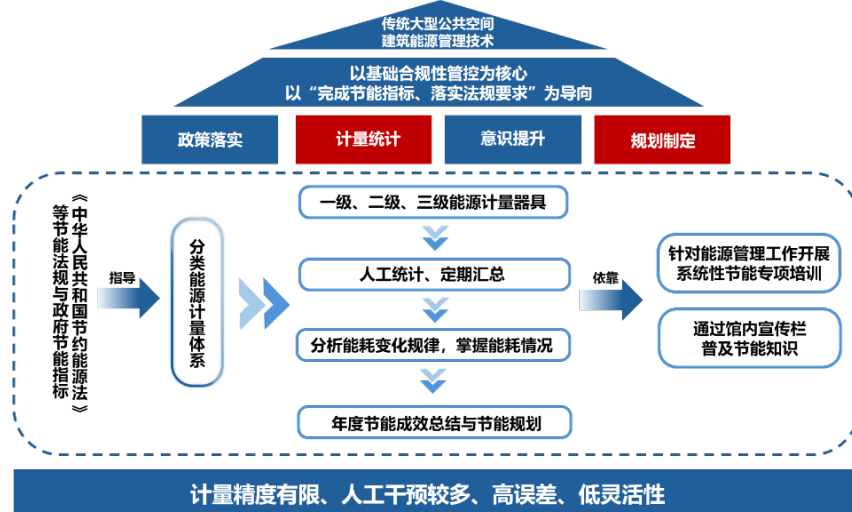


图1 传统大型公共空间能源管理技术流程图

进入 2010 年代后, 工业 4.0、智能制造与物联网 (Internet of Things, IoT) 技术发展, 使运行数据能够持续采集, 数字孪生研究也由静态模型逐步转向虚实交互和状态同步, 并形成感知、建模、仿真和反馈相衔接的技术路径^[17]。在大型公共空间建筑中, IoT 传感器和楼宇自控系统 (Building Automation System, BAS) 可持续提供能耗、室内环境、设备状态和空间使用等数据, 使数字模型随实体运行状态更新。

2018 年前后至 2020 年代初, 5G、云计算和物联网基础设施进一步成熟, 数字孪生的应用由制造业持续扩展至城市治理、公共建筑运维和能源管理, 研究重点转向多尺度建模、异构数据融合以及系统能力和成熟度评价^[18]。在大型公共空间建筑中, 暖通、电气、给排水、安防、消防、客流等系统的数据由此具备统一接入和协同分析的基础。2023 年以来, 生成式人工智能和大模型的发展进一步推动数字孪生向预测、优化和决策支持拓展^[19], 制造系统中的相关研究也开始探索两者在方案生成和多目标优化中的融合^[20]。这一发展为大型公共空间建筑协调特异化功能、公众舒适度与能源管理需求提供了新的技术条件, 但其实际应用仍受数据质量、模型可靠性和运行边界约束。

2.3 数字孪生与人工智能在大型公共空间建筑中的应用现状与问题

数字孪生模型通常通过遥感影像、激光扫描、摄影测量和人工测量等方式获取多源数据, 再对点云等数据进行处理和建模优化, 以形成较为准确的建筑数字模型^[21]。人工智能可用于信息档案管理、数据分析预

测和辅助决策。应用过程中, 可对工程图、技术文档、研究报告和知识库资料进行编码与组织, 并利用智能知识库建立关联关系, 以支持信息检索、跨部门共享和辅助分析^[22]。在 IoT 接入和实时数据上传的基础上, 系统还可通过建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 记录建筑及设备信息, 利用 IoT 汇集运行数据, 再由人工智能模型完成状态分析和决策支持。相关综述表明, BIM、IoT 与人工智能已成为建筑数字孪生的重要使能技术^[23]。

目前, 数字孪生与人工智能相结合的智能管控技术已在机场、轨道交通和大型公共空间建筑等场景开展应用探索, 为能源管理提供了可借鉴的技术思路。Li 等围绕枢纽机场智能运营中心建设, 讨论了利用数字化和智能化技术实现数据融合、运行态势展示与辅助决策的方法^[24]; Williady 等基于机场在线评论开展文本分析, 用于识别旅客关注的服务要素和运营评价特征^[25]; 宋华霖等将数字孪生用于空间结构全生命周期管理, 以支持结构设计、建造和运行维护^[26]; 卢哲颖等则结合 BIM、GIS 与数字孪生等技术构建城轨全自动运行线路应急调度管理系统, 用于应急资源配置、预案管理和即时指挥调度^[27]。这些研究表明, 数字孪生与人工智能已进入公共空间运行管理的多个环节, 但与建筑能源管理的系统融合仍不充分。综合现有应用, 一方面, 不同功能分区的环境与运行要求差异明显, 统一控制策略难以兼顾特异化功能和节能需求; 另一方面, 环境、客流、设备和能耗数据往往分散在不同系统中, 跨系统关联与连续反馈能力仍需加强; 此外, 现有

应用较多集中于监测展示、状态分析或单项辅助决策,从实时感知、智能研判到设备执行的闭环机制及其权限边界尚不清晰。大型公共空间建筑因此需要在明确功能约束的基础上重新组织感知对象、分析目标与调控权限,为后续能源智慧化管理技术路线的构建提供依据。

3 数字孪生与人工智能赋能的大型公共空间能源智慧化管理技术路线

针对功能分区需求差异、跨系统数据关联不足以及调控闭环和权限边界不清等问题,大型公共空间建筑的能源智慧化管理不能简单沿用工业厂房、数据中心等围绕单一工艺需求展开的控制方式。此类建筑首先要满足不同功能区的特异化使用要求,数据采集、模型建立、智能分析和设备调控均需服从建筑功能定位与运行安全,并在此基础上兼顾公众舒适度和能源消耗。与此同时,客流与空间使用方式具有明显的时变特征,不同区域的能源需求需要随运行状态动态调整。基于这些特征,研究以“特异化功能优先、服务体验适配、能耗精准调控”为目标,将数字建模、实时感知、分层研判与分级调控组织为连续闭环,形成面向大型公共空间建筑的能源智慧化管理技术路线。如图2。

该技术路线以政策合规指标、年度节能管控计划和建筑特异化功能需求为输入,包括数字化建模编码、实时感知上传、运行约束下分层智能研判和闭环调控四个相互衔接的环节。激光扫描、BIM建模、摄影测量和工程图录入共同构成建筑数字孪生模型的基础,人工智能用于整合政策指标与功能需求,形成能源管理知识图谱并明确模型运行的规则边界。IoT感知网络布设温湿度、照度等环境终端,以及设备能耗、运行状态和公共服务区人流监测装置,实现数据实时上传与终端互联。数据经预处理后,低风险、非关键决策场景可在预设权限内由系统向物理设备下达微调指令,并将执行效果同步反馈至数字孪生模型;复杂或高风险场景则由系统识别异常、分析可能原因、生成备选方案并预测影响,再提交智能运营中心,由工作人员作出最终判断。物理设备的执行结果继续反馈至数字模型,用于修正模型参数和调控策略。由此,模型提供空间和规则基础,感知网络补充实时数据,分层处理形成调控依据,反馈结果再用于模型更新,使能源管理在满足政策要求的基础上兼顾特异化功能、公众舒适度和节能降碳需求。

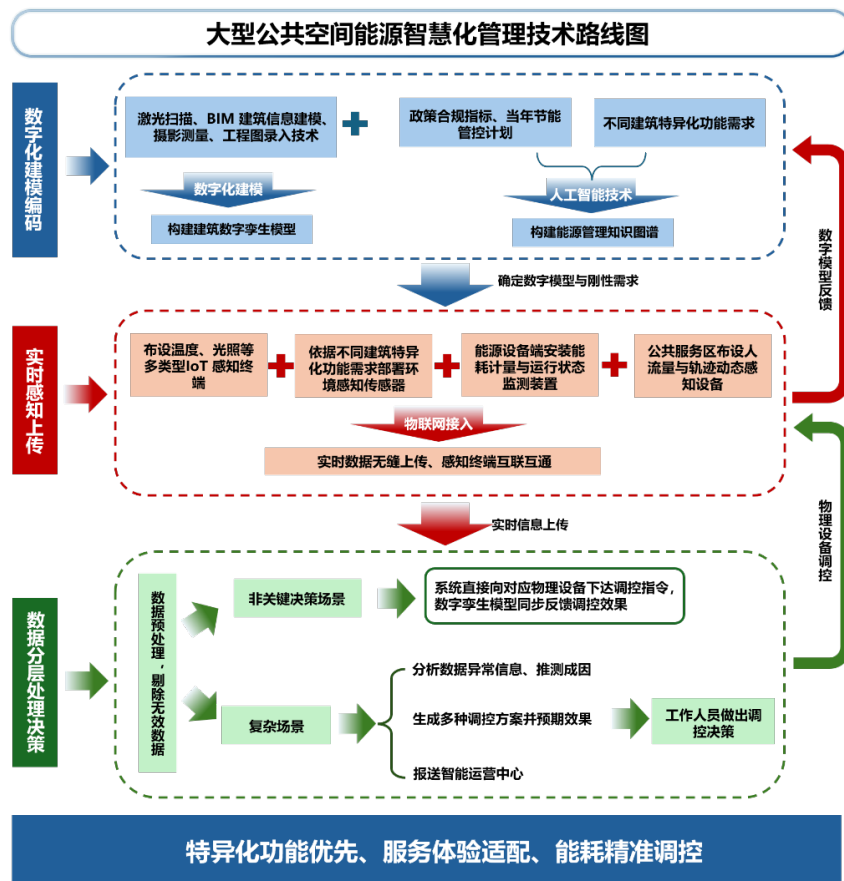


图2 大型公共空间能源智慧化管理技术路线图

3.1 功能导向数字化建模与编码

功能导向的数字化建模与编码并非单纯复刻建筑几何形态,而是把建筑功能和能源管理要求一并纳入模型。本环节将BIM与能源管理信息库结合,针对大堂、展厅、办公区、设备层、地下车库和机房等不同功能分区开展分层建模,并把各区域的运行参数写入模型,建立建筑空间、能源设施和使用场景之间的关联。

建模整合激光扫描、BIM、摄影测量和工程图录入等技术。对于大空间中庭、高大展厅和地下车库等具有典型用能特征的区域,可利用激光扫描获取空间点云,分层标注结构构件、管线走向和设备安装位置;对于办公区、会议区等人员长期停留的空间,则录入区域面积、工位布局以及照明和空调末端分布。同时,对全楼空调、冷水机组、锅炉、新风换气、分层照明和电梯等能耗设备进行三维建模,并预留标准化数据接口,以便后续接入政策法规、功能区运行要求以及能源与环境监测数据。通过这些工作,可形成能源管理所需的数字载体,并为物理空间与数字空间的联动奠定基础。

在此基础上,利用人工智能建立节能管理与运行优化知识图谱,对政策、标准和能耗指标进行数字化编码。对《节约能源法》《公共机构节能条例》、相关节能标准和“双碳”战略要求进行梳理后,可将政策合规指标及年度节能管控计划转化为可量化、可对接的数字规则。不同功能区的使用属性则进一步对应到人员密度、温湿度区间、照度等级和新风标准等环境参数阈值,并按功能区类型和使用时段分级标注,从而避免采用统一参数处理不同空间。政策规则、节能计划和功能区参数经关联编码后形成规则库,与后续数据处理和设备调控环节衔接,为智能分析划定约束边界。

3.2 运行与能耗全域实时感知

完成数字化建模与编码后,需要建立分层物联网感知网络,使监测点位与建筑关键区域和高能耗设备相对应,并同步获取全楼用能数据。采集设备可分为建筑本体与关键区域监测终端、功能区微环境终端、公共区域客流与能耗终端三类,分别采集运行状态、人员活动和能源消耗数据,并将其映射到数字模型。

建筑本体与关键节点专项感知主要在大空间结构梁柱、地下车库顶板和设备机房等位置布置结构振动传感器、温湿度探头和漏水监测传感器,按固定周期采集结构振动、环境温度变化及渗漏风险数据,识别振动超标、渗漏突变等可能导致结构老化或设备损坏的信号。建筑周边气象站同步记录室外降雨、温湿度和风速等信息,用于分析气象变化对空调负荷及围护结构能

耗的影响,为冷热源预调节和通风方式切换提供数据。

功能区微环境感知主要在展厅、办公区和会议室等人员长期活动空间布设温湿度、CO₂浓度等环境传感器,并根据功能需求补充光照度监测,按固定频次记录环境参数,以掌握人员密集区域的热舒适度和室内空气质量^[28]。各功能区同时配置独立能耗计量模块,分别统计空调末端、照明和新风设备的分项耗电量,以区分专用区域能耗和公共区域基础能耗。

场馆能源与人流动态感知主要在走廊、大堂和出入口等人员活动区域布设人员轨迹与客流量感知设备,记录瞬时客流和不同时段的客流峰值;在空调、新风、分区照明和冷热源末端安装分项智能电表与热量计,采集各功能区设备的运行功率和启停时长,为分析人流、室外气象与区域能耗之间的关系提供数据。

各类感知终端通过工业物联网网关接入数字孪生平台。平台根据数据用途区分高优先级运行监测信息和常规能耗信息,优先传输结构异常、设备故障与环境参数超限等数据,并对环境状态、设备能耗和人流变化进行分类汇集。终端采集的数据经物联网传至数字孪生模型和后续处理平台,使物理空间的实时状态能够在数字空间中同步更新。数据分类传输还可使运行风险信息先于一般统计数据进入处理环节,为后续响应争取时间。这一过程可减少人工计量造成的滞后,为智能分析提供较为完整的数据基础。

3.3 运行约束下分层智能研判

为适应大型公共空间建筑对调控响应速度的要求,研究采用云端、边缘端和终端协同计算架构。关键区域的风险处置任务部署在边缘层,以缩短响应时间;跨区域能耗统筹、设备健康状态分析和负荷预测由云端模型处理。整个分析过程以能源管理知识库中的规则和参数作为约束。这种分工并非简单地把计算任务分散到不同层级,而是根据数据时效和风险程度确定处理位置。需要快速处置的异常尽量在边缘侧完成,涉及全楼能耗比较和长期趋势的任务交由云端处理,终端则负责数据采集和指令执行,从而减少数据传输与集中处理可能造成的等待。

边缘端实时处理主要面向高时效性的运行数据。边缘节点设置在各功能区和设备机房,对原始传感数据进行预处理,剔除异常值和无效波动,并优先处理高频风险工况。当设备运行参数瞬时超出阈值,或人员密集区温湿度偏离设定区间时,边缘端可在预设权限内下达局部微调指令,例如调整新风机组风量、照明输出或空调末端出力,以减小短时环境波动对公众舒适度

和设备运行的影响。涉及高等级区域或超出授权范围的异常,则提交工作人员研判。局部风险信息 and 临时调控动作同步回传数字孪生模型,边缘端记录的分区设备瞬时能耗同时上传至云端,用于后续跨区域分析。

云端多目标智能研判与长期预测主要处理跨区域、长时序的数据关系。云计算层汇集全楼各功能区的监测、客流、气象和能耗时序数据,可根据任务需求选用长短期记忆网络(LSTM)、卷积神经网络(CNN)、深度神经网络(DNN)等深度学习模型开展分析。分析过程以运行安全为前提,并兼顾公众舒适度和综合能耗控制。

在设备与能耗异常趋势分析方面,可利用CNN提取设备运行状态特征,利用LSTM分析负荷、温湿度和人流等时序变化,据此识别设备故障风险和能耗异常趋势,为预防性维护与环境调控提供参考,降低非计划停机风险。

在分区能源需求动态预测方面,可结合当日客流、短期气象预报和各功能区运行基线,分时段预测各区域空调、新风与照明设备的适宜运行区间,在不突破运行参数阈值的前提下减少无效能耗。

在多方案仿真推演方面,针对客流高峰、极端高温或严寒、夜间闭馆等特殊场景,可由人工智能模型生成或筛选多套设备调控方案,并在数字孪生模型中比较各方案可能引起的环境参数变化、能耗水平和公众舒适度。系统再将风险较低、能耗表现较优的方案推送至智能运营中心,作为后续调控决策的参考。

3.4 分级柔性协同调控

根据智能分析结果,可建立由系统自主调控、智能辅助决策和人工终审组成的三级调控机制,并按运行风险等级划分自动化权限。核心机房和重要功能区等高风险节点不允许系统自行大幅调整,相关指令须经运维人员确认后执行。各级调控共同形成闭环,依次完成数字孪生仿真预判、人工智能方案输出、物理设备调节和运行效果反馈,以兼顾调控效率和运行安全。

对于公共廊道、非核心展示区和地下车库等低风险通用区域,系统可在授权范围内微调照明亮度、新风量和基础空调温度。对于邻近核心功能区的过渡空间,系统可采取缓冲调控,减少公共区域温度或照度骤变对重要空间的影响。调控结果在数字孪生模型中同步显示,并记录相应能耗变化。

在异常场景下,当某一区域的环境参数接近阈值,或出现局部能耗、客流在短时间内明显增加等情况时,系统把异常信息、可能原因、备选调控方案及预期效果

发送至智能运营中心,并通过数字孪生模型进行方案推演。工作人员结合系统分析、仿真结果和建筑实际运行需求,确定最终调控措施并下达指令。

核心机房、重要设备层和大型展厅等一级管控区域属于高等级管控范围,相关调控需由人工终审。当监测数据接近运行临界值,或需要较大幅度调整冷热源、通风和照明设备功率时,系统只提供风险提示和备选仿真方案,由运营与运维人员结合设备历史状态及功能区使用情况进行判断。方案经人工确认后,设备才能执行调整。完成调控后,数字孪生模型继续跟踪相关区域的环境与设备状态,检查调控后参数是否恢复到合理区间,并把调控过程和效果记录到知识库中,供后续分析和类似场景处置使用。

上述技术路线由功能导向数字化建模与编码、运行与能耗全域实时感知、运行约束下分层智能研判、分级柔性协同调控四个环节组成。四个环节依次衔接,并通过数据反馈形成闭环,为能源管理由“供给侧保障”向“需求侧驱动”转变提供完整的技术框架。建模与编码决定系统能够识别的对象和规则,感知网络决定可获得的数据范围,智能研判负责解释数据并比较方案,分级调控则明确分析结果如何作用于设备。四个环节只有保持信息一致并形成持续反馈,才能在不削弱运行安全的前提下实现大型公共空间建筑的精细化节能管理。

4 结论与展望

大型公共空间建筑兼具复杂的运行约束、差异化功能需求和公共服务职能,其能源管理不能仅以降低能耗为目标,还需要在运行安全、公众舒适度与节能降碳之间建立动态协调关系。现有数字化技术已被用于运营管理、环境监测和设备控制,但在功能分区适配、跨系统数据关联以及从分析到执行的闭环调控方面仍存在不足,固定运行策略也难以及时响应客流与空间使用状态的变化。

基于文献梳理和问题归纳,研究构建了数字孪生与人工智能共同支持的需求侧驱动型能源智慧化管理技术路线。该路线以数字孪生模型承载建筑空间、设备和运行规则,以多源物联网感知提供实时数据,并通过云端、边缘端和终端协同架构组织人工智能分析与设备执行,形成“建模—感知—研判—分级调控”的闭环。与单纯的能耗监测或统一自动控制不同,技术路线将功能区差异和运行风险纳入调控权限划分,通过系统自主调控、智能辅助决策和人工终审相结合的方式,使特异化功能约束、公众使用需求和节能目标能够在同

一框架内统筹考虑。

从技术逻辑看, 该路线能够补充现有能耗监测体系在精细化管理和分级响应方面的不足, 并可根据建筑规模、功能类型、既有硬件和资金条件确定实施范围, 对不同基础条件的大型公共空间建筑具有一定适应性。研究现阶段主要完成技术路线构建, 尚未以具体建筑的长期运行数据验证节能效果、系统稳定性和不同场景下的适用边界。后续研究需要结合典型大型公共空间建筑开展案例验证, 进一步量化功能区参数阈值、模型精度、调控响应时间和人工审批边界, 并比较不同运行情景下的能耗与环境表现, 以检验和修正所提出的技术路线。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 民用建筑节能条例(国务院令 第 530 号) [S]. 2008-08-01.
- [2] IPCC. Summary for Policymakers[M]//LEE H, ROMERO J, eds. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023: 1-34.
- [3] 国务院新闻办公室. 碳达峰碳中和的中国行动[EB/OL]. (2025-11-08)[2026-07-02]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/qhbhl/202511/t20251108_1132414.shtml.
- [4] 周咏, 王彬彬, 李清, 等. 智慧能源管理平台在大型公共建筑中的应用研究——以苏州现代传媒广场为例[J]. 建筑节能(中英文), 2021, 49(3): 113-118.
- [5] 广东省文化和旅游厅. 广东省 2024 年度博物馆高质量发展报告[R]. 广州: 广东省文化和旅游厅, 2025.
- [6] VALIZADEH M, SHAFIE-KHAH M, PISHKAR I, et al. Digital twins for energy management: bridging virtual intelligence and physical systems[J]. Applied Energy, 2026, 417: 128050.
- [7] 中华人民共和国国务院. 公共机构节能条例[Z]. 2008-08-01, 2017-03-01 修订.
- [8] SELVARAJ R, KUTHADI V M, BASKAR S. Smart building energy management and monitoring system based on artificial intelligence in smart city[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 56: 103090.
- [9] 张蓓蓓, 林鹏飞, 束霞平. 基于数字孪生技术的文化遗产保护价值阐释与实施路径研究[J]. 首都师范大学学报(社会科学版), 2025(1): 92-101.
- [10] RASHEED A, SAN O, KVAMSDAL T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21980-22012.
- [11] TOOSI A, BOTTINO A, SABOURY B, et al. A Brief History of AI: How to Prevent Another Winter (a Critical Review)[J]. PET Clinics, 2021, 16(4): 449-469.
- [12] 陶飞, 张贺, 张辰源, 等. 从数字孪生到数智孪生: 回顾与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2026, 32(1): 1-17.
- [13] MIHAI S, YAQOOB M, HUNG D V, et al. Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2255-2291.
- [14] YU W, LIU G, ZHU L, et al. Digital Twin: A Literature Review of Concepts, Technologies, and Applications[J]. IEEE Access, 2025, 13: 183075-183095.
- [15] QIU C, ZHOU S, LIU Z, et al. Digital Assembly Technology Based on Augmented Reality and Digital Twins: A Review[J]. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2019, 1(6): 597-610.
- [16] TAO F, ZHANG M, NEE A Y C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing[M]. London: Academic Press, 2019.
- [17] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.
- [18] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1267-1281.
- [19] ZHOU R, CHEN D, JIA Z, et al. Digital Twin AI: Opportunities and Challenges from Large Language Models to World Models[EB/OL]. (2026-01-04)[2026-06-29]. <https://arxiv.org/abs/2601.01321>.
- [20] MATA O, PONCE P, PEREZ C, et al. Digital twin designs with generative AI crafting a comprehensive framework for manufacturing systems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2026, 37: 1049-1072.
- [21] 丁翔. 建筑遗产数字化保护技术与虚拟现实体验[J]. 智能建筑与智慧城市, 2026(3): 146-148.
- [22] 郭晓瑛, 祁天娇, 李慧. 人工智能在国际大型能源企业档案数智化管理中的应用[J]. 北京档案, 2026(3): 59-65.
- [23] SEMERARO C, BIYROUTI S J A, ABDELKAREEM M A, et al. Digital twin-driven innovation in smart and green building: a structured review and research agenda[J]. International Journal of Thermofluids, 2025, 29: 101393.

- [24] LI Y, LIU Y, XIE Y. Research on the Intelligent Operations Center of Hub Airports[C]//Proceedings of the 2024 7th International Conference on Computer Information Science and Artificial Intelligence. New York: ACM, 2024: 93-98.
- [25] WILLIADY A, HANDANI N D, KIM H S. Investigating Efficiency and Innovation: An Exploratory and Predictive Analysis of Smart Airport Systems[J]. Digital, 2024, 4(3): 599-612.
- [26] 宋华霖, 姜绍飞. 数字孪生在空间结构生命周期管理中的应用与挑战[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 369-378.
- [27] 卢哲颖, 高修强, 陈诗, 等. 城轨全自动运行线路应急调度管理系统研究[J]. 人民公交, 2024(14): 92-94.
- [28] ZHANG J, CHAN C C, KWOK H H, CHENG J C P. Multi-indicator Adaptive HVAC Control System for Low-energy Indoor Air Quality Management of Heritage Building Preservation[J]. Building and Environment, 2023, 246: 110910.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS