

数字孪生在超低能耗建筑中的探索与应用

梁兵格

郑州西亚斯学院 河南 郑州 451150

摘要：数字孪生技术为超低能耗建筑发展注入新活力。在探索阶段，其凭借虚拟建模能力，助力精准模拟建筑能耗、优化设计方案，为超低能耗目标提供理论支撑。应用时，贯穿建筑全生命周期，从设计阶段模拟优化布局与选材，到运营中实时监测能耗、平衡舒适度与能效，再到维护时制定科学计划、预测设备寿命。数字孪生提升了超低能耗建筑的设计、运行与维护水平，推动建筑行业向绿色、高效、智能方向迈进。

关键词：数字孪生；超低能耗建筑；应用

1 数字孪生技术基础

数字孪生技术是一种集多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，它通过在虚拟空间中构建物理实体的数字化镜像，实现对实体对象的精准映射与动态模拟。其核心技术基础涵盖多个方面，数据采集与传输是基石，借助各类传感器、物联网设备，实时获取物理实体的运行数据，如温度、压力、振动等，并通过高速稳定的网络传输至处理中心。建模技术是核心，利用物理模型、数据驱动模型或混合模型，构建与实体高度契合的数字孪生体，精确反映实体的结构、行为和性能。仿真分析技术则赋予数字孪生体“思考”能力，通过模拟不同工况和场景，预测实体可能出现的状况，提前发现潜在问题。另外，交互与可视化技术让用户能直观地与数字孪生体互动，以三维图形、动态报表等形式呈现信息，便于理解与分析。数字孪生技术并非孤立存在，而是与大数据、云计算、人工智能等前沿技术深度融合，借助这些技术的强大能力，实现更高效的数据处理、更智能的决策支持，为工业制造、城市管理、医疗健康等众多领域带来创新变革。

2 超低能耗建筑实现途径

2.1 高效节能技术与材料的应用

在超低能耗建筑实现过程中，高效节能技术与材料的应用是关键一环。在围护结构方面，高性能保温材料的应用可大幅降低热量传递。节能门窗技术同样重要，采用断桥铝合金型材搭配中空Low-E玻璃，既能阻挡紫外线、红外线等辐射热，又能减少热量传导和对流，提升门窗的气密性与保温隔热性能^[1]。在能源利用端，高效热泵技术发挥着重要作用，空气源热泵可高效地从室外空气中提取热能，用于室内供暖或制备生活热水，其能效

比远高于传统电加热设备。高效太阳能光伏与光热一体化技术，将太阳能转化为电能和热能，为建筑提供清洁能源。在照明领域，LED灯具以其高光效、长寿命的特点，替代传统白炽灯和荧光灯，大幅降低照明能耗。通过广泛应用这些高效节能技术与材料，超低能耗建筑能够在满足使用需求的同时，显著减少能源消耗。

2.2 能源管理系统与智能化控制

能源管理系统与智能化控制是超低能耗建筑实现高效运行的核心保障。能源管理系统如同建筑的“智慧大脑”，它能实时采集建筑内各类能源设备的运行数据，如电力、燃气、热力等消耗情况，并进行深度分析。通过建立能耗模型，精准识别能源浪费环节，为优化能源使用提供科学依据。智能化控制系统则负责具体执行能源管理策略。它根据室内外环境参数（如温度、湿度、光照强度）以及用户使用需求，自动调节建筑设备的运行状态。同时该系统还能实现设备间的协同控制，如根据光伏发电量合理分配电力使用，优先使用自产清洁能源。借助能源管理系统与智能化控制，超低能耗建筑可实现能源的按需供应与精准调控，提高能源利用效率，降低运行成本。

2.3 被动式建筑设计的优化

被动式建筑设计优化是超低能耗建筑实现的基础策略，旨在充分利用自然条件，减少对人工能源的依赖。在建筑布局上，充分考虑当地气候特点，合理规划建筑朝向，使主要功能房间获得良好的日照与通风。建筑体型设计也至关重要，简洁规整的体型能减少建筑外表面积，降低热量交换。同时，优化建筑围护结构的热工性能，如增加墙体、屋面的保温层厚度，采用浅色外饰面材料反射太阳辐射热。巧妙利用自然通风，通过设置通风井、导风板等设施，引导室外新鲜空气进入室内，改善室内空气质量，降低空调使用频率。在遮阳设计方

基金项目：2024年河南省民办普通高等学校专业建设资助项目（教政法〔2023〕369号）

面,根据不同季节的太阳高度角,设置可调节的外遮阳装置,在夏季阻挡阳光直射,冬季则允许阳光进入室内。通过这些被动式建筑设计优化措施,超低能耗建筑能够在不消耗或极少消耗人工能源的情况下,营造舒适的室内环境。

3 数字孪生在超低能耗建筑设计中的应用

3.1 设计阶段的模拟与优化

在超低能耗建筑设计阶段,数字孪生技术发挥着强大的模拟与优化作用。传统设计往往依赖经验与二维图纸,难以全面预估建筑实际能耗与性能。而数字孪生通过构建建筑的虚拟镜像,能精确模拟不同设计参数下的建筑表现。例如,在模拟建筑采光时,数字孪生模型可结合当地地理信息、气候数据,精确计算不同季节、不同时段各房间的自然采光量。设计师能据此调整窗户尺寸、位置及遮阳设施设计,确保在满足室内采光需求的同时,避免夏季过度日晒导致的室内温度过高,降低空调能耗^[2]。在热工性能模拟方面,数字孪生可分析建筑围护结构(墙体、屋顶、门窗等)在不同材料组合、厚度下的保温隔热效果。通过模拟不同季节的室内外热交换过程,优化围护结构设计,减少热量传递,降低供暖与制冷能耗。还能模拟建筑通风效果,根据室内外气流分布情况,优化建筑布局与通风口设计,实现自然通风最大化,减少机械通风设备的使用。借助数字孪生在设计阶段的模拟与优化,超低能耗建筑能在设计初期就精准把控能耗与性能,避免后期大规模修改,提高设计效率与质量。

3.2 材料与设备选型

数字孪生技术为超低能耗建筑的材料与设备选型提供了科学依据。在材料选择上,传统方式难以直观对比不同材料对建筑整体能耗的影响。而数字孪生模型可集成各种材料的热工参数、物理特性等信息,模拟不同材料组合下建筑的能耗情况。以保温材料为例,通过数字孪生模型,设计师能对比不同保温材料(如聚苯板、岩棉板、真空绝热板等)在不同厚度、不同应用部位时,对建筑围护结构热阻的影响,进而分析其对建筑供暖与制冷能耗的贡献。还能考虑材料的耐久性、环保性等综合因素,选出既满足节能要求又经济合理的保温材料。在设备选型方面,数字孪生可模拟不同型号、不同性能的空调、热泵、照明等设备在建筑中的运行效果。根据建筑实际负荷需求,精确计算各设备的能耗与运行成本,帮助设计师选择能效比高、与建筑匹配度好的设备。

3.3 协同设计与信息共享

数字孪生技术为超低能耗建筑的协同设计与信息共

享搭建了高效平台。超低能耗建筑设计涉及建筑、结构、暖通、电气、给排水等多个专业领域,传统设计模式下各专业之间信息沟通不畅、协同困难,易导致设计冲突与重复工作。数字孪生模型作为统一的数据载体,将各专业设计信息整合其中,各专业设计师可基于同一数字孪生模型开展工作,实时查看其他专业设计内容,及时发现并解决专业间的冲突。同时数字孪生模型支持多方实时信息共享,建设单位、设计单位、施工单位、运维单位等各参与方都能通过该模型获取所需信息,实现设计意图的准确传达与反馈。在设计阶段,各方可共同参与数字孪生模型的评审与优化,提出改进建议;在施工阶段,施工单位可依据数字孪生模型进行精准施工,减少施工误差;在运维阶段,运维人员能借助数字孪生模型快速定位设备故障,制定科学维护计划。通过协同设计与信息共享,数字孪生技术有效提升了超低能耗建筑的设计质量与建设效率。

4 数字孪生在超低能耗建筑运营中的应用

4.1 能耗监测与管理

在超低能耗建筑运营中,数字孪生技术为能耗监测与管理提供了高效精准的解决方案。传统能耗监测手段往往局限于数据简单采集与粗略分析,难以深入洞察能耗细节与潜在问题。数字孪生通过构建建筑的虚拟镜像,将建筑内各类能源设备(如空调、照明、电梯等)与能耗系统进行数字化映射。借助高精度传感器,实时采集水、电、气等能源消耗数据,并传输至数字孪生平台。平台不仅能直观展示不同区域、不同设备的实时能耗状况,还能通过大数据分析机器学习算法,挖掘能耗规律与异常波动。另外,数字孪生可根据建筑实际运行情况与能耗目标,制定动态能耗管理策略。自动调整设备运行参数,如优化空调系统的启停时间与温度设定,实现按需供能,避免能源浪费。生成详细的能耗报告与可视化图表,为建筑运营管理者提供决策依据,助力超低能耗建筑持续优化能源利用效率,降低运营成本。

4.2 建筑舒适度与能效平衡

数字孪生技术在超低能耗建筑运营中,巧妙地平衡了建筑舒适度与能效之间的关系。传统建筑运营往往面临舒适度提升与能耗增加的两难困境,难以找到最佳平衡点。数字孪生通过实时模拟建筑内部环境与能源系统运行状态,为解决这一问题提供了新思路。一方面,数字孪生模型能综合室内外环境参数(如温度、湿度、光照、空气质量等)以及人员活动情况,精准预测室内舒适度变化趋势。当检测到某区域舒适度指标偏离设定范围时,及时发出预警,并模拟不同调节措施对舒适度与

能耗的影响^[3]。另一方面,基于模拟结果,数字孪生可自动生成最优调节方案。例如,在保证室内温度舒适的前提下,通过优化新风系统运行模式,合理引入室外新风,减少机械制冷与制热负荷;或根据室内人员分布情况,智能调节照明亮度与空调送风量,在满足人员需求的同时,降低能源消耗。通过动态调整与精准控制,数字孪生助力超低能耗建筑在保障使用者舒适度的同时,实现能效最大化。

4.3 预防性维护与故障预测

数字孪生技术为超低能耗建筑的预防性维护与故障预测提供了强大支持,有效提升了建筑设备的可靠性与使用寿命。传统设备维护多采用定期检修或故障后维修模式,存在维护成本高、效率低且易造成设备二次损坏等问题。数字孪生通过实时监测建筑内各类设备的运行数据(如振动、温度、压力、电流等),构建设备健康状态模型。利用机器学习算法对海量数据进行分析,挖掘设备运行规律与潜在故障特征。当设备运行数据出现异常波动时,数字孪生平台能及时发出预警,精准定位故障部位与可能原因。基于故障预测结果,数字孪生可制定个性化的预防性维护计划。提前安排维护人员与所需备件,在设备故障发生前进行针对性维护,避免设备停机对建筑正常运行造成影响。通过预防性维护与故障预测,数字孪生技术降低超低能耗建筑的设备维护成本与故障发生率,保障建筑的长期稳定运行。

5 数字孪生在超低能耗建筑维护中的应用

5.1 维护计划制定与优化

在超低能耗建筑维护中,数字孪生技术为维护计划的制定与优化提供了科学且高效的途径。传统维护计划制定多依赖经验或固定周期,缺乏对设备实际运行状态的精准考量,易造成维护过度或不足。数字孪生通过构建建筑设备与系统的虚拟镜像,实时采集并整合各类运行数据,如设备温度、压力、能耗、振动频率等。基于这些数据,它能精准模拟设备在不同工况下的性能变化与损耗趋势。维护人员可借助数字孪生模型,直观了解设备健康状况,依据设备实际运行数据而非固定时间表来制定维护计划。数字孪生平台能结合建筑使用需求、季节变化等因素,对维护计划进行动态优化。例如,在冬季供暖高峰期,提前对供暖设备进行重点检查与维护,确保其稳定运行;在夏季来临前,对空调系统进行

全面调试与保养。通过模拟不同维护方案对设备寿命与建筑能耗的影响,选择最优维护策略,在保障设备正常运行的同时,降低维护成本与建筑能耗,实现维护计划的高效制定与精准优化。

5.2 设备健康管理与寿命预测

数字孪生技术在超低能耗建筑设备健康管理与寿命预测方面发挥着关键作用,为设备的长期稳定运行提供了有力保障。在设备健康管理方面,数字孪生实时监测设备运行参数,并与预设的正常阈值进行比对。一旦发现参数异常,立即发出预警,详细指出故障部位与可能原因。例如,当监测到电梯曳引机振动频率超出正常范围时,数字孪生模型可迅速分析是轴承磨损、齿轮故障还是其他问题,并给出针对性的维护建议^[4]。在寿命预测上,数字孪生综合设备运行数据、历史维护记录以及环境因素等多维度信息,运用机器学习算法建立设备寿命预测模型。该模型能精准预测设备剩余使用寿命,提前规划设备更换或升级时间,避免设备突发故障对建筑正常运行造成严重影响。依据寿命预测结果,合理安排设备维护周期与维护强度,延长设备使用寿命,降低建筑整体维护成本,提升超低能耗建筑设备管理的科学性与前瞻性。

结束语

数字孪生在超低能耗建筑中的探索与应用,是建筑领域创新发展的生动实践。它打破了传统建筑管理模式的局限,让建筑在全生命周期内都能实现高效、节能、智能运行。随着技术的不断进步,数字孪生将深度融入建筑行业,助力打造更多绿色、低碳的超低能耗建筑典范,为构建可持续发展的美好城市环境贡献力量,开启建筑行业绿色智能新时代。

参考文献

- [1]田立柱.超低能耗装配式钢结构建筑的研究与实践[J].混凝土世界.2020(4):54-60.
- [2]王玮璐.被动式超低能耗建筑优化设计研究[J].建材与装饰,2022,563(02):131-132.
- [3]苏瑶.建筑设计中绿色建筑设计理念的整合探究[J].科技创新与应用,2021(9):119-121
- [4]胡海涛.碳中和背景下的绿色建筑设计理念应用研讨[J].智能建筑与智慧城市,2022(6):127-129.