

# The optimization of energy efficiency in ultra-low energy building construction supervision through digital twin technology

Chunxia Xiong

Shanghai Zhintong Construction Development Co., Ltd., Shanghai, 200126, China

## Abstract

This article focuses on the energy efficiency optimization application of digital twin technology in the construction supervision of ultra-low energy buildings. It elaborates on the innovative perspective that digital twin technology brings to construction supervision and analyzes its mechanisms in energy consumption monitoring and simulation prediction. The article explores how this technology can achieve precise energy efficiency control and optimization during the construction process, proposing relevant strategies to enhance the energy efficiency level of construction supervision for ultra-low energy buildings, thereby providing theoretical support for promoting green and sustainable development in the construction industry. Research shows that digital twin technology, by establishing a bidirectional mapping relationship between physical entities and virtual models, can achieve dynamic simulation and optimization of the entire lifecycle of ultra-low energy buildings. During the construction supervision phase, this technology collects real-time energy consumption data from the construction site, combines it with BIM models for multi-dimensional energy consumption analysis, and accurately identifies weak links in energy efficiency.

## Keywords

Digital twin technology; ultra-low energy buildings; construction supervision

# 数字孪生技术在超低能耗建筑施工监理中的能效优化应用

熊春霞

上海智通建设发展股份有限公司, 中国·上海 200126

## 摘要

本文聚焦数字孪生技术在超低能耗建筑施工监理中的能效优化应用。阐述了数字孪生技术为建筑施工监理带来的创新视角, 分析其在能耗监测、模拟预测等方面的作用机制。探讨如何借助该技术实现建筑施工过程中的能效精准管控与优化, 提出相关对策以提升超低能耗建筑施工监理的能效水平, 为推动建筑行业的绿色可持续发展提供理论支持。研究表明, 数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的双向映射关系, 能够实现对超低能耗建筑全生命周期的动态仿真与优化。在施工监理阶段, 该技术通过实时采集施工现场的能源消耗数据, 结合BIM模型进行多维度能耗分析, 可精准识别能效薄弱环节。

## 关键词

数字孪生技术; 超低能耗建筑; 施工监理

## 1 引言

随着建筑行业对节能减排要求的不断提高, 超低能耗建筑成为发展趋势。数字孪生技术作为新兴技术, 为超低能耗建筑施工监理的能效优化带来新契机, 研究其应用具有重要意义。

## 2 数字孪生技术与超低能耗建筑概述

### 2.1 数字孪生技术原理

数字孪生技术是一种通过数字化手段构建物理实体的虚拟模型的技术。它基于传感器、物联网、大数据、人工智能等多种技术的融合。以一个实际的工业厂房为例, 其数字孪生模型是通过对厂房的建筑结构、设备布局、材料特性等进行精确的数字化建模。在这个模型中, 每一个物理组件都有对应的数字模型元素, 并且这些元素之间存在着精确的映射关系。传感器遍布在厂房的各个关键部位, 如空调系统、照明系统等, 它们不断采集数据, 如温度、湿度、能耗等信息, 然后传输到数字孪生模型中<sup>[1]</sup>。数字孪生模型利用算法对这些数据进行分析处理, 从而实现对物理实体的实时状态

【作者简介】熊春霞(1980-), 女, 中国江苏连云港人, 本科, 工程师, 从事超低能耗、智能建造研究。

监测、模拟预测等功能。其原理的核心在于数据的精准采集、传输以及模型与实体的高度对应，这使得在超低能耗建筑施工监理等领域能够对建筑的能效等多方面进行有效管理。

## 2.2 超低能耗建筑特点

超低能耗建筑具有多方面的显著特点。在建筑围护结构方面，采用高效的保温隔热材料，如外墙保温材料的导热系数极低，像某些新型的聚苯板保温材料，其导热系数可低至  $0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  以下。窗户则多采用多层中空玻璃，不仅具有良好的采光性，而且能够有效阻止热量的传导。在能源利用系统上，超低能耗建筑强调可再生能源的充分利用。例如，太阳能光伏板被广泛安装在建筑的屋顶或外立面，能够将太阳能转化为电能供建筑内部使用。建筑内部的照明系统多采用高效节能的 LED 灯具，其能耗相比传统白炽灯可降低 80% 以上。并且，超低能耗建筑的通风系统采用热回收技术，能够在换气的同时回收热量，提高能源利用效率。

## 2.3 二者结合的意义

数字孪生技术与超低能耗建筑的结合具有重要意义。从能效管理角度看，数字孪生技术能够对超低能耗建筑施工过程中的能耗进行精确监测和优化<sup>[1]</sup>。比如在一个大型超低能耗住宅建筑群的施工中，通过数字孪生技术可以实时监测建筑施工过程中每一个环节的能耗情况，从基础建设到墙体砌筑、设备安装等。由于超低能耗建筑本身的复杂性，涉及众多的节能技术和设备，数字孪生技术能够将这些元素整合到虚拟模型中进行统一管理。这种结合有助于提前发现可能存在的能耗问题，如某个施工区域的照明设备长时间处于高能耗状态或者保温材料安装过程中的能源浪费情况。

## 3 数字孪生技术在施工监理能效监测中的应用

### 3.1 能耗数据实时采集

在超低能耗建筑施工监理中，能耗数据的实时采集是数字孪生技术应用的基础。施工现场的各类设备和区域都安装有专门的传感器来实现这一目的。以建筑施工中的塔式起重机为例，在起重机的电机、传动装置等关键部位安装功率传感器，这些传感器能够精确地采集起重机在不同工作状态下的能耗数据，如起吊重物时的瞬时功率、正常运行时的平均功率等。对于施工现场的临时建筑，如工人宿舍和办公室，在电路系统中安装智能电表，可以采集到不同时段的用电量，包括白天施工期间和夜间休息期间的用电差异。

### 3.2 数据传输与处理

采集到的能耗数据需要进行高效的传输与处理才能发挥作用。在超低能耗建筑施工现场，由于施工区域较大且环境复杂，数据传输面临诸多挑战。采用无线传感器网络和有线网络相结合的方式可以确保数据的稳定传输。例如，对于距离较近且相对集中的传感器节点，如在一个小型的建筑材料堆放区域的传感器，采用 ZigBee 等无线通信技术进行数据传输，其具有低功耗、自组网等优点<sup>[1]</sup>。而对于距离较远、

数据量较大的设备，如大型施工机械和总配电室的传感器，则采用光纤等有线网络进行传输，以保证数据传输的速度和稳定性。传输到数字孪生系统的数据需要进行处理，系统会对采集到的数据进行清洗，去除其中的异常值和错误数据。

## 3.3 能耗状态可视化展示

能耗状态的可视化展示是数字孪生技术在施工监理能效监测中的重要环节。通过可视化界面，施工监理人员能够直观地了解施工现场的能耗情况。在数字孪生系统的可视化平台上，可以以三维模型的形式展示整个施工现场，每个建筑区域、设备都以不同的颜色或图标表示其能耗状态。例如，高能耗的设备或区域可以显示为红色，低能耗的区域显示为绿色。同时，通过图表形式展示不同时间段的能耗曲线，如按日、周、月绘制的用电量曲线，能够清晰地反映出能耗的波动情况。以一个城市的超低能耗商业建筑施工项目为例，在可视化展示平台上，监理人员可以看到在混凝土浇筑期间，由于混凝土搅拌设备和泵送设备的大量使用，能耗会出现一个高峰，而在夜间停工期间能耗则处于极低水平。

## 4 数字孪生技术在施工能效模拟预测中的应用

### 4.1 施工过程能耗模拟

数字孪生技术能够对超低能耗建筑的施工过程进行能耗模拟。在模拟过程中，首先需要建立精确的施工过程模型，包括施工工序、设备使用顺序、人员流动等因素。例如，在一个多层超低能耗住宅的施工中，模型会详细设定从基础施工、主体结构搭建到内部装修的每一个施工工序的时间、设备需求和人员配置。然后，根据不同施工阶段的设备和工艺特点，为模型中的各个元素赋予相应的能耗参数。如混凝土搅拌机的功率、工作时长，以及不同施工阶段的照明需求等。通过运行这个模拟模型，可以得到整个施工过程的能耗预测结果。以某大型超低能耗建筑项目为例，在模拟过程中发现，由于施工进度安排不合理，在主体结构施工期间，塔式起重机的使用频率过高，导致该阶段能耗超出预期。通过调整施工进度计划，合理安排塔式起重机的使用时间，可有效降低该阶段的能耗。

### 4.2 潜在能耗问题预测

数字孪生技术在超低能耗建筑施工中可以预测潜在的能耗问题。基于历史数据和实时采集的数据，系统能够分析出可能出现的能耗异常情况。例如，根据以往类似建筑施工中冬季施工的经验数据，当室外温度低于一定程度时，建筑材料的保温措施如果不到位，会导致在材料存储和加工过程中的热量损失增加，从而增加能耗。在数字孪生模型中，当检测到当前的气象数据接近这一临界值时，就会发出预警，提示施工方加强建筑材料的保温措施<sup>[4]</sup>。再比如，在施工设备方面，如果某一设备的运行效率逐渐降低，通过对设备的能耗数据、运行时长等数据的分析，数字孪生系统可以预测该设备可能存在故障隐患，这不仅会影响施工进度，还会导

致能耗增加。如某施工现场的空气压缩机,通过分析其近期的能耗数据发现其能耗逐渐上升,经过进一步检查发现是压缩机的滤网堵塞,及时清理后恢复了正常运行,避免了因设备故障导致的能耗增加。

#### 4.3 优化方案模拟生成

数字孪生技术能够生成超低能耗建筑施工的优化方案。通过对不同施工方案在数字孪生模型中的模拟运行,对比它们的能耗情况。例如,在一个超低能耗公共建筑的施工中,有两种模板搭建方案可供选择。一种是传统的木模板方案,另一种是新型的塑料模板方案。在数字孪生模型中,分别为这两种方案设定相同的施工条件,如施工面积、施工周期、环境温度等。然后模拟运行这两个方案的施工过程,统计它们在各个施工阶段的能耗数据。模拟结果显示,新型塑料模板方案在模板的制作、运输和安装过程中的能耗明显低于传统木模板方案。同时,塑料模板还可以重复使用,进一步降低了成本和能耗。根据这样的模拟结果,施工方可以选择更节能的塑料模板方案,从而提高施工过程的能效。

### 5 数字孪生技术应用的对策

#### 5.1 技术应用标准制定

在中国,制定数字孪生技术在超低能耗建筑施工监理中的应用标准至关重要。目前,虽然数字孪生技术和超低能耗建筑都在快速发展,但缺乏统一的应用标准。这可能导致不同项目之间的数据格式、模型构建方法、能效评估指标等存在差异,不利于行业的发展。例如,有的项目采用的能耗数据采集频率较低,无法准确反映施工过程中的能耗变化情况,而有的项目在数字孪生模型构建时对建筑结构和设备的简化过度,影响了模拟的准确性。因此,相关部门应该联合行业专家、企业等共同制定标准。标准应涵盖从传感器的选型与安装、数据采集与传输协议、数字孪生模型的构建要求到能效评估的指标体系等各个方面。以传感器选型为例,标准应规定在不同类型的超低能耗建筑施工场景下,如住宅、商业建筑、工业建筑等,应该选用何种精度、何种量程的传感器来采集能耗数据。

#### 5.2 人员能力提升措施

在数字孪生技术应用于超低能耗建筑施工监理的过程中,人员能力的提升是关键。由于数字孪生技术涉及多学科知识,如计算机科学、工程学、能源管理等,施工监理人员需要具备多方面的知识和技能。一方面,可以通过开展专业培训课程来提升人员能力。例如,由高校或专业培训机构开设数字孪生技术与超低能耗建筑相关的课程,课程内容包括数字孪生模型的构建原理、能耗数据的分析方法、超低能耗

建筑的节能技术等。另一方面,鼓励企业内部的经验交流和技术分享。在一个大型建筑企业内部,可以定期组织技术研讨会,让有经验的监理人员分享在数字孪生技术应用中的实际案例和遇到的问题解决方法。例如,某资深监理人员在一个超低能耗住宅项目中,通过对数字孪生模型的深入分析,成功发现了一个隐藏在建筑保温层施工中的能耗问题,他可以在研讨会上分享这个案例的分析过程和解决思路,从而提升其他人员的能力。

#### 5.3 应用推广策略

在中国,数字孪生技术在超低能耗建筑施工监理中的应用推广需要多方面的策略。首先,政府可以出台相关的扶持政策,如给予采用数字孪生技术进行施工监理的超低能耗建筑项目一定的财政补贴或税收优惠。这可以降低企业应用该技术的成本,提高企业的积极性。例如,对于一些中小规模的建筑企业,如果能够在超低能耗建筑施工中应用数字孪生技术,可以给予一定比例的项目补贴。其次,建立示范项目。选择一些具有代表性的超低能耗建筑项目作为数字孪生技术应用的示范工程,通过展示示范项目的成功经验和良好的能效效果,吸引更多的企业关注和采用该技术。例如,可以在不同地区分别建立住宅、商业、工业等不同类型的超低能耗建筑示范项目,向同行业展示数字孪生技术在施工监理能效优化方面的实际应用效果。最后,加强行业间的合作与交流。通过举办行业展会、技术论坛等活动,促进数字孪生技术供应商、超低能耗建筑设计单位、施工企业和监理单位之间的交流与合作,共同推动数字孪生技术在超低能耗建筑施工监理中的应用推广。

### 6 结语

数字孪生技术在超低能耗建筑施工监理的能效优化应用前景广阔。通过合理运用该技术及实施相应对策,可有效提升建筑施工的能效管理水平,推动建筑行业向绿色、低碳方向发展。

#### 参考文献

- [1] 王琼.绿色建筑墙体材料在墙体保温工程中的应用分析[J].石材,2025(05):122-124.
- [2] 马春梅.房屋建筑工程施工绿色建筑材料应用分析[J].居舍,2025(12):58-60.
- [3] 黄新.建筑工程绿色建筑技术与绿色建筑材料的应用研究[J].居舍,2025(12):42-44.
- [4] 费亮蝶.基于超低能耗被动式建筑设计的施工策略分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(08):127-129.