BIM 与数字孪生融合的绿色建筑运维能耗管理研究

卢水菊
广东白云学院，广东 广州 510000

[摘要]绿色建筑运行阶段普遍存在设计预期和实际能耗之间出现的性能差异,它的根源就是缺少了对于能耗状态的及时感知以及闭环控制的能力。BIM 把建筑空间和设备信息当作结构化的载体，数字孪生依靠不断的数据交互来达成物理实体的动态映射以及仿真推演，二者融合给能耗管理由静态台账走向动态智治赋予了技术根基。针对数据采集碎片化、监测调控脱节这两大问题，从运维信息模型创建、物联网实时采集、孪生动态映射、多源数据融合四个方面展开技术分析，提出全生命周期信息管理、设备协同调控、能耗预测优化、评价反馈等策略，形成以运行实效为方向的绿色建筑能耗管理路径。

[关键词]BIM；数字孪生；绿色建筑；运维管理；能耗优化
DOI：10.33142/sca.v9i10.20614 中图分类号：TU201.5 文献标识码：A

Research on Energy Management of Green Building Operation and Maintenance through the Integration of BIM and Digital Twin

LU Shuiju
Guangdong Baiyun University, Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract: There is a common performance difference between design expectations and actual energy consumption during the operation phase of green buildings, which is rooted in the lack of timely perception of energy consumption status and closed-loop control capabilities. BIM regards building space and equipment information as structured carriers, while digital twins rely on continuous data exchange to achieve dynamic mapping and simulation of physical entities. The integration of the two provides a technical foundation for energy management to move from static ledger to dynamic intelligent governance. In response to the two major problems of fragmented data collection and disconnected monitoring and control, technical analysis is carried out from four aspects: the creation of operation and maintenance information models, real-time collection of Internet of Things, twin dynamic mapping, and multi-source data fusion. Strategies such as full lifecycle information management, equipment collaborative control, energy consumption prediction optimization, and evaluation feedback are proposed to form a green building energy consumption management path oriented towards operational effectiveness.

Keywords: BIM; digital twin; green building; operation and maintenance management; energy consumption optimization

引言

绿色建筑以减少资源消耗和保持环境质量为基本承诺，但是它的承诺在运行阶段常常会遇到兑现的难题。设计阶段节能预期和实际运行能耗之间的差异，不是由于技术路线本身造成的，而是由于运维管理缺少把空间信息、设备状态和能耗数据联系起来进行诊断的能力。BIM 对建筑构件和设备属性进行结构化的描述，但是不能反映运行状态的变化；数字孪生依靠物联网数据来实现对物理实体的动态映射和仿真推演，但是如果缺少 BIM 提供的语义框架，那么它的分析结果就很难回到具体的空间和设备上。二者相融合，正好是绿色建筑能耗管理由被动记录变为主动优化的技术条件。本文主要针对光储直柔技术在绿色建筑能源管理方面的系统性应用进行研究，在已有的研究基础上提出利用 BIM 和数字孪生技术深度融合来建立能源监测体系，从而解决传统能源系统由于可再生能源消纳能力低、多能耦合效率低等问题。本文根据融合逻辑，从现状诊断、关键技术、优化策略三个递进层次进行论述。

1 BIM和数字孪生融合的绿色建筑运维能耗管理基础

BIM 和数字孪生在运维能耗管理中融合起来，实际上就是静态语义骨架和动态状态数据互相补充的过程。BIM 提供建筑空间拓扑、设备属性以及它们之间的联系，

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

使每一个能耗数据都可以被锚定在某个房间、系统或者设备上，数字孪生用传感器数据和仿真模型给这个语义框架赋予了实时的状态和变化趋势。数字孪生技术把大数据、物联网、人工智能融合起来，创建起虚拟模型，进而达成对物理世界动态模拟和改进的目的，已经成为建筑节能减碳领域里的研究焦点。绿色建筑融合框架有特别之处在于它能同时反映能效、环境和设备这三个状态，即能效、环境、设备三者之间的联动关系。绿色建筑一般会配置地源热泵、热回收机组、光伏系统等比常规建筑更加复杂的一些设备，能耗表现对气象条件、使用方式、设备耦合状态的敏感度更高，如果缺少统一语义框架下的关联映射，运维人员就很难判断能耗异常是由于设备老化、控制失误还是使用习惯改变。

2 绿色建筑运维能耗管理现状及问题分析

2.1 建筑能耗数据采集与整合不足

目前绿色建筑能耗监测大多停留在总表计量或者粗粒度分项上，不能支撑精细化诊断。在实际工程中，大部分既有建筑缺少足够的分项计量装置，不能获取各种设备的运行能耗数据[1]。该困境在绿色建筑中更加明显，空调末端、照明回路、插座回路等重要用能单元没有独立的计量，能耗拆分只能靠估算。更深一步的问题在于缺少了数据和空间、设备的语义联系。能耗数据被存放在单独的监测系统里，和 BIM 模型里的房间、设备、系统拓扑没有联系，运维人员面对用电数字很难找到异常出现的具体位置和设备。目前很多项目存在着基准能耗不明、分项计量欠缺以及节能量计算标准不同的状况，造成改造之后的效果无法被准确地识别并加以持续的检验，虽然数据有所积累，但是信息并没有形成，后续的分析和优化没有了可靠的出发点。

2.2 能耗监测与动态调控能力不足

监测与调控相脱离，这也是一个深层的障碍。即使项目同时部署了设备监控系统和能耗监测平台，但是两者一般属于不同的厂商，使用不同的协议，造成监而不控、控而不优的局面。监测系统记录的参数和曲线，调控策略仍然以固定的时序或者人工的经验为主。传统建筑能源运维存在系统复杂、设备多样、依靠人工、缺少信息化管理等问题，在绿色建筑中，由于可再生能源的波动性以及蓄能装置的介入，使得上述问题更加复杂，光伏出力的间歇性、蓄冷蓄热装置的充放策略、峰谷电价信号，都需要控制回路具备多目标协调和滚动优化的能力，但是现有的运维体系大多没有这样的条件[2]。建筑能源管理存在宏观感知缺位、微观建模割裂、实时优化闭环断层这三重难题，而绿色建筑的设备繁杂又使得这些断裂的后果更加严重。

3 BIM 与数字孪生融合的能耗管理关键技术

3.1 基于 BIM 的建筑运维信息模型构建

运维 BIM 和设计施工阶段的模型存在功能定位的不同，后者是以几何精度和施工协调为目的，前者是以设备检索、空间定位和数据关联为主要目的。面向能耗管理的运维模型应该以设备和空间作为两条主线来组织信息。设备维度要给每一台用能设备赋予唯一的标识，联系型号参数，额定功率，设计能效以及实时测点的对应关系，空间维度要以房间或者功能分区为单位，创建围护结构属性，设计负荷指标和实际使用人数之间的联系。就传统 BIM 与运营管理需求脱节问题而言，有研究从空间、资产、运维、应急、能耗管理这五个方面创建起前端牵引、中间支撑、后端应用的数据模型架构。几何精细度可以适当降低，但是属性完整性以及关联准确性要得到保证。根据运维系统功能需求将竣工模型转换成运维模型的时候，要考虑到模型的轻量化，对于运维没有指导意义的内容加以简化，防止出现过度建模或者过度集成数据的情况。运维 BIM 的创建应该在设计阶段就确定信息交付的标准，不能等到竣工之后再进行修补。设备 ID 和空间编码必须在设计阶段就形成规范，并且要贯穿到交付流程中，否则运维阶段的关联重建就会造成大量的人工核对工作。

3.2 基于物联网的建筑能耗数据实时采集

数字孪生的保真度是由数据采集的覆盖面、实时性决定的。面向绿色建筑运维的物联网采集体系应该采用分项计量、设备级监测和环境感知三层结构。分项计量层按明插座、空调、动力和特殊用电拆分成回路；设备级监测层对冷机、水泵、空调箱等主要用能设备的运行参数及功率进行采集；环境感知层布置温湿度、CO_2 浓度、照度传感器来获取负荷驱动因素[3]。利用各种传感器对被动房的温湿度、CO_2浓度、门窗开启次数等进行采集，并且可以使用 BIM 平台的数据接口来建立能耗监测分析系统。系统架构上使用前端感知采集、通信传输、平台服务、应用交互四个层次，可以将分散的能耗数据集中到统一的数据通道里，解决数据互通性差的问题。通信协议的选择要兼顾有线、无线场景，在改造项目中采用无线传感网络可以降低布线成本，但是需要保证数据上传间隔满足动态调控的时间分辨率要求。采集体系设计还要考虑测点冗余、故障容错，单个传感器失效不能造成关键映射通道的中断。

3.3 基于数字孪生的建筑能耗动态映射

动态映射是数字孪生和静态 BIM 的不同点。其技术要点就是建立物理测点和孪生模型之间的实时数据通道，

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

使模型中的设备状态、空间环境、能耗数值随着物理实体的运行而同步更新。通过创建和真实世界一样的数字副本，使实体建筑与数字模型相联结，可以对运营管理全过程进行监测、分析和控制，进而通过对比虚拟模型和实际建筑的能源数据找到能源利用效率低下的地方。映射粒度要和运维决策需求相适应，能耗诊断用分钟级或者小时级的设备功率和温度映射就足够了，控制优化需要秒级的关键参数反馈。在映射的过程中还要对数据进行缺失和异常值的处理，用插值或者状态估计的方法来保证孪生模型的连续性。在净零能耗建筑运维数字孪生架构当中，物理层的环境参数和设备状态被传感器及时获取，模型层肩负起物理层状态的高保真数字映射任务，两者借助连接层构建起连续的数据回路。对绿色建筑来说，映射范围还要包括可再生能源系统出力情况和蓄能装置的荷电状况，使孪生体可以完全体现建筑用能和产能的双向动态。

3.4 多源数据融合与能耗运行状态分析

BIM 几何和属性数据、物联网时序数据、气象数据和使用模式数据在结构、频率和语义上存在着明显的异构性，只有将它们融合起来才能发挥孪生体诊断的作用。融合的关键是用 BIM 的空间和设备标识作为锚点，把不同的数据对齐到同一个语义框架里。在此基础上的状态分析要分三层次，能耗水平同设计基准或者同类建筑的对标对比，找出偏离之处，设备能效的即时计算并判定衰减趋向，依靠历史数据和当下的工作状况开展异常察觉。为了解决采集链路不完整、多源数据无法对齐的问题，统一语义建模和高可靠采集链路设计成了提高分析有效性的一种基本方法。分析结果应该用可视化的形式反馈到 BIM 空间视图中，使运维人员可以清楚地找到问题区域和设备。

表 1 BIM 和数字孪生融合的能耗管理技术层次及功能定位

技术层次	核心功能	关键输出
运维 BIM 模型	空间与设备语义锚定	设备台账、空间能耗基准
物联网采集	实时状态与能耗感知	分项能耗、设备运行参数
孪生动态映射	物理—虚拟同步更新	实时状态镜像、趋势曲线
多源数据融合	关联诊断与异常识别	能效对标结果、异常定位

4 BIM与数字孪生融合的绿色建筑运维能耗管理优化策略

4.1 构建建筑全生命周期能耗信息管理体系

能耗管理的有效性要依靠各个阶段的信息在规划、设计、施工、调试和运行过程中不断地传递。目前绿色建筑信息断链主要发生在竣工交付环节，设计阶段的负荷计算和设备选型依据、施工阶段的调试记录和性能实测数据，一般不会结构化地移交到运维系统中。项目信息交付标准中应将能耗相关的属性设为必填项，即设计负荷指标、设备额定能效、调试实测参数和分项计量拓扑关系。运维阶段产生的能耗数据和诊断结论也要回写到 BIM 模型里，形成可以追溯的全过程信息链。该体系的形成使得之后的节能改造和设备更换有历史参照，防止因基准不清而引发的节能量核算纠纷。

4.2 完善建筑设备运行监测与协同调控机制

监与控的贯通要从架构上把监测数据直接输入到控制决策回路中。从技术条件来说，应该用数字孪生平台作为中介，把能耗监测系统实时数据和设备控制系统设定参数放到同一个数据环境中。从策略上来说，应该由原来的以时间表为依据的固定控制转变为以状态反馈为基础的动态控制，空调系统按照室内外焓差和末端负荷来调节冷冻水温度和风机频率，照明系统按照照度传感器和人员存在信号来调节输出。在物联网环境下，用贝叶斯网络加注意力机制创建能耗预估模型，按照预测结果来制订分层递阶智能控制策略，给监测和调控的贯通赋予了可以参照的技术路线。对配置有可再生能源的绿色建筑来说，调控机制还要加入光伏出力预测和储能荷电状态，使用能和产能相协调。

4.3 建立能耗动态预测与节能优化模型

预测是做出决策的前提。面向运维的能耗预测模型不应该追求单一的高精度黑箱，而应该具有可解释性和滚动更新的能力。短期预测（未来数小时到一天），用对时序模式敏感的方法；中期预测（周到月），用气象预报和使用日程来考虑。模型要以数字孪生平台积累的历史数据为基础，随着运行数据的积累不断进行校正。从优化上可以将设备启停顺序、设定点调节以及储能充放电策略归入统一的多目标优化范畴，其目标函数既要达成能耗最低化的目的，也要符合室内舒适度的要求，并且还要考虑设备寿命的损耗情况。数据驱动融合专家知识的方法可以创建动态用能评价体系并且不断更新模型，对于传感器故障等异常工况下用能诊断有参考意义。

4.4 健全能耗管理评价与持续优化机制

能耗管理的闭环最后落脚到评价和反馈上。评价指标不能只是总量的比较，还要包含分项能效、设备运行健康度和调控响应效果等。分项能效用单位面积或者单位服务量的能耗作为基准，消除使用强度不同的影响，设备运行健康度用实际能效和额定能效的偏差来判断衰减状态，调控响应效果衡量策略调整后能耗和舒适度的变化。评价结果要定时通报给运维队伍，同设备保养规划、调控参数调整产生联动。已有建筑绿色改造经验显示，不断检验并及时修正是保证节能效果不随着时间的推移而衰减的重要

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

途径。对于绿色建筑来说，还要对实际运行性能同设计认证预期实施周期性的比较，找出偏差的来源并把它们包含到下一轮的优化循环里。

5 结语

BIM 同数字孪生融合起来之后，给绿色建筑运维能耗管理赋予了一种由信息结构化走向状态动态化，再朝决策闭环迈进的技术途径。它的主要贡献不是某一项技术的突破，而是把空间语义、设备状态和能耗数据一起放到同一个可以计算的框架里，使得能耗异常可以被定位、调控的效果可以被验证、优化策略可以被迭代。目前阻碍该途径实施的因素有分项计量覆盖率低、数据语义断层等技术条件上的问题，也有缺少信息传递标准、运维能力欠缺等管理上的原因。从设计阶段就明确运维信息需求，在竣工交付环节完成 BIM 模型向运维语义的转换，在运行阶段用数字孪生平台贯通监测和调控回路，是绿色建筑从设计达标走向运行实效的可行途径。只有技术条件和管理机制一起推进，融合框架的节能潜力才能得到真正的发挥。

[参考文献]

[1]李晓硕,何思思,王沁,等.基于 BIM 与数字孪生技术的“光储直柔”能源监测系统[J].建筑节能(中英文),2025,53(8):2-6.

[2]彭颖,陈宇鑫,刘丽燕,等.数字孪生技术在建筑节能减碳领域的发展与应用综述[J].浙江理工大学学报(自然科学),2026,55(1):93-104.

[3]樊国辉,王舒平,张伯言,等.基于运行数据的公共建筑中央空调设备能耗分解[J].建筑节能(中英文),2025,53(1):62-69.

作者简介：卢水菊（1990—），女，汉族，江西九江修水县人，中级工程师，硕士研究生，华东交通大学工程管理专业，研究方向为绿色建筑。现从事工作：高校教师。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.