

智能物联感知技术在 BIM 模型驱动的智慧建筑运维故障预警中的应用

张元瑞 马玉英 徐坤

山东工程职业技术大学, 山东济南, 250200;

摘要: 随着智慧城市建设向纵深推进, 智慧建筑运维对安全性、稳定性与高效性的需求显著提升, 传统运维模式因数据静态化、协同性不足难以满足发展要求。建筑信息模型 (BIM) 凭借全生命周期数据整合能力, 成为智慧建筑运维的核心数据载体与协同管理平台, 而智能物联 (IoT) 感知技术通过实时动态数据采集, 有效弥补了 BIM 在运维阶段的动态数据更新短板, 二者融合为智慧建筑运维故障预警提供了关键技术路径。本文以智慧建筑运维故障预警为场景, 综述 BIM 与 IoT 融合应用机制: 界定二者特性及运维功能定位, 剖析 BIM 驱动下 IoT 数据流转流程与传感器部署策略, 从设备系统、结构安全、环境监测维度梳理典型预警场景与案例, 总结数据异构、实时匹配等融合挑战, 展望边缘计算、数字孪生等发展方向, 为智慧建筑运维故障预警提供理论与实践指引。

关键词: 智能物联感知; BIM 模型; 智慧建筑; 运维管理

DOI: 10. 64216/3104-9672. 25. 01. 030

引言

智慧建筑是建筑与信息技术融合产物, 整合多技术实现建筑全生命周期能源高效利用。中国智慧建筑发展报告显示, 我国智慧建筑市场规模破五万亿元, 年复合增长率超百分之十五, 运维成本占全生命周期成本的 60%—70%, 设备故障等制约其高质量发展。BIM 技术二十世纪末引入我国, 从设计延伸至施工与运维, 数字孪生为运维提供数据支撑, 但传统 BIM 模型依赖静态数据, 与实际运行脱节, 难满足故障预警需求。智能物联感知技术通过部署传感器等, 实现建筑运行数据实时采集, 为故障预警提供动态数据。二者融合应用, 即智能物联为 BIM 注入实时数据, 依托 BIM 实现故障预警, 是研究热点。本文梳理相关成果与案例, 分析融合机制、应用场景及挑战, 为技术创新与工程应用提供参考。

1 核心概念与技术基础

1.1 智能物联感知技术

智能物联感知技术是物联网 (IoT) 在建筑领域的应用, 核心是通过“感知层-网络层-平台层”架构, 实现建筑运行状态数据的实时获取与初步处理。

感知层是数据采集核心, 由传感器与数据采集终端组成。根据智慧建筑运维故障预警需求, 常用传感器分三类: 一是设备运行状态传感器, 如电流、振动、温度

传感器; 二是结构安全传感器, 如位移、应变、倾角传感器; 三是环境参数传感器, 如温湿度、CO₂ 浓度、PM2.5 传感器。近年来, 传感器技术发展使无线传感器节点部署成本降低、续航达 3—5 年, 为构建大规模传感器网络提供可能。

网络层负责将感知层数据传至平台层, 通信技术要兼顾传输距离、功耗与数据速率。智慧建筑场景中, 无线通信需抗干扰与穿透性强。主流技术有 LoRa (远距离、低功耗, 适合跨楼层传输, 距离 1—3km)、NB-IoT (窄带物联网, 依托基站, 适合大规模部署, 功耗低)、5G (高带宽、低时延, 适合实时传输高清视频与振动波形数据)。部分项目用“LoRa+蓝牙”混合组网解决室内信号盲区问题。

平台层承担数据预处理、存储与初步分析。因传感器数据有噪声干扰与冗余, 平台层通过边缘计算节点进行数据清洗、压缩与融合, 再传至云端或 BIM 平台, 减少带宽占用与云端计算压力。

1.2 BIM 模型技术特征

BIM 模型是基于数字化技术的建筑全生命周期信息模型, 核心特征为“参数化、可视化、协同化与全生命周期性”, 为智慧建筑运维故障预警提供支撑。

参数化建模: BIM 模型构件携带几何、物理、性能、

运维等丰富参数信息。故障预警时,可实现“数据-构件-模型”关联映射,通过参数匹配快速定位对应构件,调取设计与历史运维数据,为故障分析提供依据。

可视化表达: BIM 模型采用三维可视化建模,能直观呈现建筑空间、设备与管线情况。故障预警时,将异常数据以“颜色标注”等方式叠加在模型对应位置,方便运维人员快速定位故障,避免二维图纸查找效率低的问题。

协同化管理: BIM 模型支持多专业、多参与方协同工作,通过云端平台,各方可实时共享模型与故障信息。如空调系统故障时,运维人员可通过平台获取厂商信息,同步故障数据,实现远程诊断与协同维修,缩短处理时间。

全生命周期性: BIM 模型贯穿建筑全生命周期,运维故障数据可反向更新形成“数据闭环”。如水泵历史故障记录可存于模型构件参数中,通过分析可预测剩余寿命,实现从“被动维修”到“主动预警”的转变。

1.3 二者融合的技术逻辑

智能物联感知技术与 BIM 模型融合是“动态数据”与“静态模型”互补结合,技术逻辑为“数据接入-模型更新-预警分析-决策支持”四个环节,具体流程如下:

数据接入: 通过智能物联感知技术感知层采集建筑运行数据,经网络层传至平台层预处理,再通过标准化接口接入 BIM 平台。IFC 作为通用数据标准,可关联传感器数据与 BIM 构件,如绑定温度传感器 ID 与变压器构件 ID。

模型更新: BIM 平台接收物联网数据后,自动更新对应构件动态参数,实现“模型与实体同步”。如房间实时温度为 26℃ 时,模型中“室内温度”参数更新并与设计阈值比对,超出范围触发预警。

预警分析: 通过 BIM 平台内置预警算法分析更新后的模型数据,判断故障风险。如阈值判断法,水泵振动加速度超 5m/s^2 触发一级预警;趋势分析法,电缆温度呈上升趋势预测超阈值触发二级预警。

决策支持: 预警触发后, BIM 平台生成故障报告,含故障位置、实时与历史数据、可能原因与处理建议,推送给运维人员。平台还支持模拟分析,如模拟更换故障水泵后的系统运行状态,为运维决策提供数据支撑。

2 智能物联感知技术在 BIM 模型驱动故障预警中的应用场景

根据智慧建筑运维核心需求,智能物联感知技术与 BIM 模型融合应用集中在建筑设备系统、结构安全与环境监测三大领域,各领域典型故障预警场景如下:

2.1 建筑设备系统故障预警

建筑设备系统是智慧建筑“心脏”,涵盖暖通、给排水、电气、电梯等子系统,故障会影响建筑使用、造成能源浪费与安全事故。智能物联感知技术与 BIM 模型融合可实现设备故障实时预警与精准定位。

HVAC 系统是建筑能耗主因,部署温度等传感器结合 BIM 模型可实现: 1. 冷水机组故障预警,某商业综合体应用后故障处理时间缩短 30%,能耗降低 15%; 2. 空气过滤器脏堵预警,平台还可预测过滤器寿命。

给排水系统部署流量等传感器结合 BIM 模型可实现: 1. 管道泄漏预警,某住宅小区应用后检测时间从 24 小时缩至 1 小时,水资源浪费减少 25%; 2. 水泵故障预警,某办公大楼应用后故障停机时间减少 40%,维护成本降低 20%。

电气系统是建筑运行“动力源泉”,部署温度等传感器结合 BIM 模型可实现: 1. 电缆过热预警,某数据中心应用后预防 3 起火灾事故; 2. 变压器故障预警,某工业园区应用后故障发生率降低 60%,停电时间缩短 50%。

2.2 建筑结构安全故障预警

建筑结构安全是运维底线,常见隐患隐蔽性强、发展缓慢,传统检测难实时发现。部署位移、应变等传感器结合 BIM 模型可实现长期监测与预警。

在承重墙、梁体部署传感器,当应变或位移值超预设值时预警,某老旧办公楼应用该技术发现梁体开裂隐患。

建筑幕墙脱落是高层隐患,部署传感器结合风速传感器可预警,某超高层酒店排查出有脱落风险的幕墙并更换。

地基不均匀沉降是低层与软土地基建筑问题,部署沉降观测点与传感器,当沉降速率或沉降差超标时预警,某住宅小区及时加固地基避免墙体开裂。

2.3 建筑环境监测故障预警

建筑环境质量影响人员健康,部署环境参数传感器结合 BIM 模型可实时监测并预警。

在人员密集场所部署传感器,当 CO_2 、甲醛、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标时预警,某医院应用后 CO_2 超标时间减少 80%,

投诉率下降 60%。

部署温湿度传感器结合预设阈值预警，某数据中心应用后机房温湿度达标率提升，服务器故障发生率降低。

部署室外传感器结合 BIM 模型联动预警，某高校教学楼应用后避免地下室积水，减少室内 PM2.5 超标时间。

3 当前技术融合面临的挑战

尽管智能物联感知技术与 BIM 模型在智慧建筑运维故障预警中有显著应用价值，但实际推广中面临数据、技术、应用三个层面挑战，制约其规模化落地。

数据层面：存在异构性与安全性问题。数据异构性是融合核心瓶颈，体现在两方面：一是数据格式异构，智能物联感知数据多为时序数据，格式多样，BIM 模型数据为结构化构件参数数据，二者结构差异大，需复杂转换接口融合，增加技术复杂度；二是数据标准异构，不同厂商私有数据标准不统一，导致数据无法直接关联，需额外开发适配插件，增加项目成本。同时，数据安全性面临挑战，智能物联感知网络无线通信易受攻击，可能致 BIM 模型预警失效；BIM 模型含敏感数据，云端防护不足可能导致数据泄露。《2024 年智慧建筑网络安全报告》显示，我国智慧建筑项目中，因数据异构融合失败率占 30%，因网络攻击预警系统故障事件年增长率达 25%。

技术层面：有模型轻量化与预警准确性问题。BIM 模型轻量化是运维高效应用关键，传统 BIM 模型数据量大，若未轻量化，会导致数据传输延迟、终端适配困难等问题。目前主流轻量化技术在保留构件参数完整性与可视化效果间有矛盾，部分模型会丢失关键运维参数。预警准确性不足制约技术应用可信度，原因一是传感器数据受噪声干扰有误差，若未有效滤波处理，可能触发误预警；二是预警算法有局限性，多数 BIM 平台采用简单阈值判断法，缺乏多因素关联分析，易导致漏预警或误预警。统计显示，传统阈值法预警系统误预警率达 20%-30%，影响运维人员信任度。

应用层面：存在成本与人员能力问题。高成本制约技术规模化应用，包括硬件成本、软件成本和集成成本。对于中小规模建筑项目，高成本导致投资回报率低，难以承担应用费用。人员能力不足影响技术应用效果，融合应用需运维人员具备复合型能力，而当前多数运维人员仅掌握传统技能，缺乏相关操作能力，无法充分发挥技术的预测性维护价值。行业调研表明，我国智慧建筑

运维人员中具备复合型能力的比例不足 20%，制约技术应用深度与广度。

4 未来发展方向

针对上述挑战，结合信息技术发展趋势，未来智能物联感知技术与 BIM 模型融合应用将向“更智能、更高效、更安全”发展，重点聚焦以下四个领域创新。

融合人工智能技术提升预警准确性与智能化：人工智能是解决预警准确性不足的关键，未来从两维度深度融合。一是数据预处理智能化，用机器学习算法精准滤波传感器噪声数据、剔除异常值，如用 LSTM 算法处理振动传感器数据可降低误差；二是预警分析智能化，引入深度学习算法实现多因素关联分析，结合强化学习算法实现预警策略自我优化，如构建多维度数据模型判断冷水机组故障原因、降低误预警率，根据设备情况调整预警阈值提升适应性。

引入边缘计算与数字孪生技术优化模型：引入边缘计算与数字孪生技术可解决 BIM 模型轻量化与实时性问题。一方面，边缘计算赋能实时处理，在建筑内部署边缘节点，将部分数据处理任务从云端迁移，减少数据传输量、降低云端压力，缩短预警响应时间；另一方面，数字孪生技术优化模型轻量化，基于“动态简化”技术自动调整模型细节程度，保证流畅运行且不丢失关键数据，如某超高层酒店应用后压缩数据量、缩短加载时间并保留关键参数。

构建统一标准与安全体系解决问题：统一数据标准是融合基础，未来行业将推动跨领域数据标准制定，如住建部联合相关协会制定标准、明确接口规范，实现设备与平台兼容、降低转换成本。同时，构建多层级数据安全体系，从感知层、平台层、应用层保障数据安全，如某工业园区应用后降低数据泄露率、提高网络攻击抵御率。

降低成本与完善人才培养推动应用：降低成本与提升人员能力是推动技术规模化应用关键。一方面，通过技术迭代与产业化降低成本，如降低无线传感器单价、BIM 平台转型“云化订阅”模式；另一方面，完善人才培养体系，高校开设交叉学科专业，企业加强在职人员培训，预计到 2028 年提升复合型人才比例、降低中小项目成本，推动技术规模化落地。

5 结语

智慧建筑运维故障预警是保障建筑安全、提升运维

效率、降低成本的核心手段，智能物联感知技术与 BIM 模型融合提供“动态数据+静态模型”创新方案。系统综述显示，二者融合机制通过“数据接入-模型更新-预警分析-决策支持”实现闭环，在建筑设备系统、结构安全、环境监测领域有丰富应用场景，如冷水机组故障预警、幕墙脱落风险监测、室内空气质量管控等，多个实践案例验证其价值，可缩短故障处理时间 30%-50%、降低设备故障发生率 35%-60%。不过，当前技术融合面临数据异构性、模型轻量化、成本高昂、人员能力不足等挑战，需通过技术创新、标准制定、产业协同、人才培养解决。未来，随着信息技术与建筑行业深度融合，二者将与数字孪生、区块链等技术结合，实现从“被动预警”到“主动预测”、从“单点运维”到“全局协同”转变，推动智慧建筑运维进入“全流程智能化”时代。作为智慧城市建设重要部分，其技术创新将提升建筑安全性与舒适性，为城市能源管理、应急响应提供数据支撑，助力“碳达峰、碳中和”与城市可持续发展。因此，

行业要加强产学研用协同合作，加快技术成果转化，推动二者在智慧建筑运维故障预警中的规模化、深度应用，为智慧城市建设贡献力量。

参考文献

- [1] 吴昌贤. 基于物联网技术的智慧园区系统开发与应用[J]. 北京测绘, 2025(4).
- [2] 时文东. 建筑智能化施工中 BIM 技术的应用研究[J]. 新城建科技, 2024(8).
- [3] 余奕宗, 杨海林, 张锦贤. 基于物联网与 BIM 技术的智慧工程监管云平台构建与应用[J]. 中国建筑装饰装修, 2025(7).

作者简介：张元瑞（2004.03），男（汉），山东平阴，学士，研究方向：嵌入式开发。

课题编号 115：山东工程职业技术大学大学生科技创新项目 BIM+物联智管家一掌控工地进度每一步。