

基于数字孪生的建筑设备运维故障诊断系统开发

齐永超

陕西诚信亿达建设工程有限公司 陕西榆林

【摘要】随着建筑智能化的发展，建筑设备运维管理面临诸多挑战。为提升运维效率与故障诊断准确性，构建基于数字孪生的建筑设备运维故障诊断系统。该系统借助数字孪生技术，对建筑设备进行实时映射与模拟，整合多源数据。通过先进的故障诊断算法，如深度学习、机器学习等，实现设备故障的精准定位与预测。经实践验证，此系统能显著缩短故障诊断时间，降低运维成本，提高建筑设备运行的稳定性与可靠性，为智慧建筑运维提供有力支持。

【关键词】数字孪生；建筑设备；运维管理；故障诊断；智慧建筑

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 6 日

【DOI】10.12208/j.ace.2025000135

Development of a digital twin-based fault diagnosis system for building equipment operation and maintenance

Yongchao Qi

Shanxi Chengxin Yida Construction Engineering Co., Ltd., Yulin, Shaanxi

【Abstract】 With the advancement of intelligent building systems, equipment operation and maintenance management faces multiple challenges. To enhance operational efficiency and diagnostic accuracy, this study proposes a digital twin-based fault diagnosis system for building equipment. The system utilizes digital twin technology to enable real-time mapping and simulation of equipment, integrating multi-source data. Through advanced fault diagnosis algorithms such as deep learning and machine learning, it achieves precise fault localization and prediction. Practical validation demonstrates that this system significantly reduces fault diagnosis time, lowers maintenance costs, and improves operational stability and reliability of building equipment, providing robust support for smart building operations.

【Keywords】 Digital twin; Building equipment; Operation and maintenance management; Fault diagnosis; Smart building

引言

在当今时代，随着城市化进程的加速，建筑行业呈现出蓬勃发展的态势。与此建筑设备的规模与复杂性也在不断攀升。传统的运维方式在故障诊断方面，暴露出效率低、准确性差、响应迟缓等诸多问题，已难以满足现代智能建筑高效、安全运行的需求。本研究旨在开发一套基于数字孪生的建筑设备运维故障诊断系统，精准解决现有难题，全面提升建筑设备运维的智能化水平与管理效能。

1 数字孪生与建筑设备运维体系搭建

数字孪生技术凭借其独特的虚实映射能力，彻底改变了建筑设备运维的传统模式。在构建数字孪生与建筑设备运维体系的过程中，数据整合成为了首要的

环节。建筑设备涵盖了各种类型，从大型的中央空调机组到小型的配电箱，每一种设备都有其独特的技术参数和运行逻辑。设计图纸承载着设备初始的构造信息，设备参数明确了设备运行的边界条件，而历史维护记录则成为了设备健康状况的“档案”。将这些静态数据与动态运行数据相结合，能够形成一个完整的设备全生命周期的数据链条。暖通空调系统的设计风量、制冷功率等参数，配合实际运行中的风速、温度数据，可以全面地反映设备的运行状态。

物联网技术在数据采集环节发挥着关键作用。通过在设备关键部位部署传感器，可实现对设备运行参数的持续监测。以电梯系统为例，在曳引机轴承处安装振动传感器，在控制柜内设置温度传感器，在轿厢与导

轨连接处布置位移传感器,能够实时捕捉电梯运行时的振动幅度、电气元件温度变化以及轿厢运行轨迹偏移等数据^[1]。这些传感器采集到的数据通过无线网络传输至数据处理中心,形成庞大的数据流。数据处理中心利用边缘计算技术,对原始数据进行初步清洗与压缩,去除冗余信息,提高数据传输效率与后续处理速度。

BIM 技术是搭建数字孪生模型的核心支撑。BIM 模型以三维可视化的形式呈现建筑设备的空间布局与结构关系,不仅包含设备的几何尺寸、材质属性,还关联着设备的安装位置、连接管线等信息。基于 BIM 模型,将物联网采集的实时数据与模型中的设备节点进行精准匹配。将空调机组的实时运行数据与 BIM 模型中的空调设备组件关联,使虚拟模型能够随着物理设备状态变化而动态更新^[2]。通过数据融合算法,消除不同类型数据在格式、频率上的差异,确保虚拟模型能够真实反映物理设备的运行状态,构建起虚实联动的数字孪生体系,为后续故障诊断提供完整、准确的数据基础。

2 故障诊断算法与模型构建

故障诊断算法的选择与构建直接影响着建筑设备运维故障诊断的准确性与效率。机器学习算法在故障诊断领域具有广泛的应用前景。支持向量机(SVM)通过寻找最优超平面,能够在高维空间中将不同类型的故障数据进行有效分类。在实际应用中,将设备运行数据中的振动频率、电流波动、压力变化等特征参数作为输入变量,SVM 通过对历史故障样本的学习,能够建立起这些特征与故障类型之间的映射关系。随机森林算法则采用集成学习的思想,通过构建多个决策树模型,对设备故障进行投票决策。每个决策树基于不同的样本子集和特征子集进行训练,这种机制使得随机森林在处理复杂故障数据时具有更强的鲁棒性,能够有效降低过拟合风险。

深度学习算法为故障诊断带来了新的突破。卷积神经网络(CNN)擅长处理图像、时序数据中的局部特征。在建筑设备故障诊断中,将设备运行数据按时间序列整理成类似图像的矩阵形式,CNN 通过卷积层、池化层等结构,自动提取数据中的关键特征,如振动波形的异常形态、温度曲线的突变点等。循环神经网络(RNN)及其变体 LSTM 特别适用于处理具有时间依赖关系的设备运行数据。建筑设备的运行状态往往具有时序特性,例如电梯在一段时间内的启停次数、运行速度变化等数据蕴含着设备的运行规律^[3]。LSTM 通过引入门控机制,能够有效解决 RNN 中的梯度消失

问题,记忆设备运行过程中的关键信息,从而准确识别设备故障的早期征兆。

在构建故障诊断模型时,还需考虑算法的融合与优化。将机器学习与深度学习算法相结合,发挥各自优势。先用机器学习算法对设备运行数据进行初步筛选与特征提取,再将处理后的数据输入深度学习模型进行深度分析,能够提高故障诊断的准确性与效率。针对不同类型的建筑设备,根据其运行特点和故障模式,选择或调整合适的算法参数^[4]。如对于运行状态相对稳定的给排水泵,可适当降低算法的敏感度阈值;而对于运行工况复杂的中央空调机组,则需提高算法的精度与响应速度,以确保故障诊断模型能够适应各类建筑设备的运维需求。

3 系统训练优化与性能提升

系统训练优化是保障基于数字孪生的建筑设备运维故障诊断系统性能的关键环节。在模型训练阶段,丰富的历史数据是基础。历史数据不仅包括设备正常运行时的数据,还涵盖各类故障发生时的异常数据。通过对这些数据进行分类整理,按照一定比例划分为训练集、验证集和测试集。利用训练集对故障诊断模型进行迭代训练,在训练过程中,采用交叉验证方法调整模型参数。对于支持向量机模型,调整惩罚参数 C 和核函数参数,以平衡模型的拟合能力与泛化能力;对于深度学习模型,优化学习率、隐藏层神经元数量等参数,使模型在训练数据上既能准确学习故障特征,又能在新数据上保持良好的诊断效果。

数据更新与扩充是提升模型适应性的重要手段。建筑设备的运行环境复杂多变,新的故障类型和运行工况不断出现。因此,需要持续收集新的设备运行数据和故障案例,将其纳入训练数据集。当建筑设备进行升级改造后,新的运行参数和故障模式会产生,及时将这些数据补充到训练集中,能够使模型适应设备的变化。采用在线学习机制,使系统能够根据实时采集的设备运行数据动态更新模型参数^[5]。当设备运行状态出现异常波动时,在线学习机制能够快速捕捉到数据变化,调整模型权重,使故障诊断模型及时适应设备的新状态,提高诊断的及时性与准确性。

除了模型优化,系统的硬件与软件架构也需进行针对性改进。在硬件方面,升级数据处理服务器的计算能力和存储容量,采用分布式存储技术,将海量的设备运行数据分散存储在多个节点上,提高数据读取与写入速度。引入高性能的图形处理器(GPU),加速深度学习模型的训练与推理过程。在软件架构上,采用微服

务架构,将数据采集、处理、分析、展示等功能模块解耦,提高系统的可扩展性与维护性^[6]。优化数据传输协议,减少数据在网络传输过程中的延迟,确保系统能够实时响应设备运行状态变化,满足建筑设备运维对系统性能的严苛要求。

4 系统实践应用与效果评估

将基于数字孪生的建筑设备运维故障诊断系统应用于实际建筑项目,是检验其可行性与有效性的重要环节。在某大型商业综合体项目中,系统覆盖了空调系统、电梯系统、给排水系统等关键建筑设备。在空调系统运维中,系统通过实时监测压缩机的振动、电机电流、冷媒压力等参数,能够在故障发生前识别出潜在问题。当检测到压缩机振动频率出现周期性异常时,系统通过分析振动波形与历史故障数据的相似性,判断可能存在轴承磨损或转子不平衡问题,并提前发出预警。对于电梯系统,系统不仅监测电梯的运行速度、层站精度等常规参数,还对轿厢门机系统的开关门力、门锁状态进行实时监控,及时发现门机卡顿、门锁接触不良等安全隐患。

在故障发生时,系统的快速定位与诊断能力发挥了重要作用。以给排水系统为例,当某区域供水压力突然下降时,系统结合管网拓扑结构和各监测点数据,迅速锁定故障位置为某段管道发生泄漏。系统生成详细的故障诊断报告,包括故障类型、可能原因、影响范围以及维修建议^[7]。维修人员依据报告内容,能够快速携带合适的工具和材料到达现场,进行针对性维修。与传统的故障排查方式相比,该系统大幅缩短了故障诊断时间,以往需要人工逐一排查多个可能故障点,耗时数小时,而现在通过系统分析仅需数十分钟即可确定故障位置与原因。

系统的应用为建筑设备运维带来了显著的效益提升。一方面,通过提前发现设备潜在故障,减少了设备突发故障导致的停机时间,保障了商业综合体的正常运营。空调系统的稳定运行确保了室内舒适的购物环境,电梯系统的可靠运行保障了人员的安全通行。另一方面,优化了设备运维策略。基于系统提供的设备运行状态分析,运维人员能够制定更加科学合理的维护计划,避免过度维护或维护不足的情况发生,降低了运维成本^[8]。通过对设备历史运行数据的分析,还可以预测

设备的剩余使用寿命,为设备更新改造提供决策依据,进一步提升了建筑运营管理的效率与质量,实现了建筑设备运维从被动响应向主动预防的转变。

5 结语

基于数字孪生的建筑设备运维故障诊断系统在提升建筑设备运维水平方面成效显著。它实现了故障的快速精准诊断,降低了运维成本,提高了设备运行稳定性。未来,随着物联网、人工智能等技术的持续发展,该系统将在数据融合深度、故障预测精度、智能化运维决策等方面进一步优化。有望与更多建筑管理系统深度集成,为建筑全生命周期管理提供更全面、智能的支持,推动智慧建筑向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 牛笛,宋天任,项兴彬.基于数字孪生的图书馆建筑设备设施低碳运维管理[J].价值工程,2025,44(16):161-164.
- [2] 李博.利用人工智能技术手段提升智能建筑教学品牌——智能建筑虚拟仿真新形态教学研究[J].中国品牌与防伪,2024,(11):193-194.
- [3] 孙娜娜.数字化背景下建筑设备教学实践平台构建[J].办公自动化,2024,29(19):28-30.
- [4] 林剑远,苏杭,赵楚翹.智慧园区运维平台设计与建设[J].安装,2023,(12):69-72.
- [5] 荀欢欢.基于数字孪生的舰船上层建筑运维系统[J].舰船科学技术,2023,45(03):133-136.
- [6] 李婷婷,刘锐,常青,等.浅析基于数字孪生技术的智慧医院后勤运维场景应用[J].智能建筑电气技术,2022,16(02):105-110.
- [7] 李苏亮,杨启亮.建筑设备数字孪生体的图形化建模方法[J].科技创新与应用,2022,12(07):19-23+26.
- [8] 顾于珏,陆磊,吴源昊.基于 Unreal Engine 的建筑数字孪生平台解决方案及应用[J].中国建设信息化,2021,(15):72-73.

版权声明: ©2025 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