

老旧建筑机电系统安全风险评估与优化研究

杨雷刚, 樊江明

(易腾工程技术(西安)有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要 本文围绕老旧建筑机电系统的安全风险评估与优化展开研究。首先, 分析了城市化进程中老旧建筑机电系统的现状, 指出其存在“三重三轻”问题, 且一线城市核心区老化问题更为突出; 其次, 阐述了机电系统安全风险对建筑运维的影响, 通过具体案例揭示了风险的隐蔽性、系统性和突发性; 再次, 识别了老旧建筑机电系统的典型构成、老化特征、风险因子, 并介绍了风险数据采集方法。在此基础上, 构建了包含安全性、可靠性、经济性等指标的评估体系, 采用AHP-熵权法确定指标权重, 结合风险等级划分与模糊综合评价进行风险评估; 最后, 从优化原则、技术层面和管理层面提出了机电系统的优化策略, 以期为老旧建筑机电系统的改造提供参考。

关键词 老旧建筑; 机电系统; 安全风险评估; 风险识别

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.030

0 引言

随着城市建成区的持续扩张与存量建筑的自然老化, 服役年限超20年的既有建筑占比逐年攀升。此类建筑的机电系统(含供配电、给排水、暖通空调、消防等核心子系统)普遍进入性能衰退周期。受限于早期设计标准偏低、长期运维管理缺位等历史因素, 系统设备存在严重的物理损耗与效能衰减, 部分关键部件的可靠性已无法满足现行安全规范要求。多系统耦合失效引发的连锁风险尤为突出, 不仅暴露了老旧建筑风险的隐蔽性与复杂性, 更对城市公共安全构成潜在威胁。因此, 亟须构建一套精准化的风险评估体系, 通过多维度指标量化识别关键风险因子, 实现存量建筑的安全韧性提升与城市可持续发展目标的协同推进。

1 城市化进程中老旧建筑机电系统及安全风险

1.1 城市化进程中老旧建筑机电系统现状

在快速推进的城市化进程中, 城市建筑存量持续扩容, 其中建成时间超过20年的老旧建筑占比逐年攀升。这类建筑的机电系统普遍进入老化衰退期。对老旧建筑机电系统进行分析, 多数建筑在投用后未执行系统性维护计划, 设备有超期服役现象; 早期设计使供配电系统变压器负载率低于正常值, 暖通空调系统COP值(性能系数)低于现行标准; 各子系统改造缺乏协同性。例如: 一些一线城市核心区老旧建筑机电系统老化问题也尤为突出。部分20世纪80年代建成的住宅建筑群体中, 供配电系统存在电缆绝缘层老化问题, 给排水管道因腐蚀存在漏损现象。

1.2 安全风险对建筑运维的影响

机电系统安全风险已成为威胁建筑运维的关键因素。近年来, 全国建筑安全事故统计显示, 直接或间接源于机电系统故障原因的事故中, 电气火灾占比较大^[1]。例如: 某建成于1995年的办公楼发生火灾。事后调查显示, 事故根源为: (1) 供配电系统母线槽绝缘老化导致短路; (2) 消防系统因管道锈蚀堵塞, 喷淋装置失效; (3) 暖通空调系统风管积尘加速火势蔓延。该事故暴露了老旧建筑多系统协同失效的连锁风险。老旧建筑机电系统风险的隐蔽性、系统性和突发性, 凸显了建立科学评估体系的迫切性。

2 老旧建筑机电系统风险识别

2.1 典型机电系统构成与老化特征

老旧建筑机电系统主要由供配电系统、给排水系统、暖通空调系统和消防系统四大核心部分组成, 各系统在长期使用中呈现出不同的老化特征。

1. 供配电系统由变压器、高低压配电柜、电缆线路等设备构成。随着使用时间的增长, 变压器的绝缘性能逐渐下降, 易出现过热现象; 电缆线路的绝缘层会因老化而开裂, 增加短路风险; 配电柜内的元器件也会因氧化、磨损等问题导致接触不良。

2. 给排水系统包含给水泵、管道、阀门、水箱等设施。金属管道易受腐蚀, 内壁会产生水垢, 影响通水能力; 阀门密封性能下降, 容易出现漏水; 水箱若维护不当, 会滋生细菌, 影响水质安全。

3. 暖通空调系统由冷水机组、风机盘管、风管、

作者简介: 杨雷刚(1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机电智能控制。

空调箱等组成。冷水机组的换热器会因结垢而降低换热效率；风管内部易积尘，不仅影响空气质量，还会增加能耗；风机盘管的电机老化会导致运行噪声增大，制冷制热效果减弱。

4. 消防系统包括喷淋泵、报警装置、消火栓、烟感探测器等。喷淋管道可能因锈蚀而堵塞，导致喷头无法正常出水；报警装置的灵敏度会随时间下降，可能出现误报或漏报；消火栓的阀门可能因长期未使用而锈死，影响应急使用。

2.2 风险因子分类

老旧建筑机电系统的风险因子可从设备层、运行层和管理层三个层面进行分类。设备层主要涉及设备自身的物理状态变化。设备在长期使用过程中，会出现腐蚀、绝缘老化、机械部件磨损等问题。例如：金属管道的腐蚀会降低其结构强度，电气设备的绝缘老化会增加触电和短路风险。运行层侧重于系统运行过程中的性能变化，包括能效衰减、控制失灵、协同性差等情况。随着设备老化，系统的能耗会逐渐上升，运行效率降低；控制装置可能出现故障，导致系统无法按照设定参数运行；各子系统之间的联动可能出现问题，影响整体功能发挥。管理层与系统的维护和管理相关，常见的风险因子有维护缺失、档案不全、人员操作不当等。若缺乏定期的维护保养，设备的老化速度就会加快；档案资料不全，会给系统的检修和改造带来困难；运维人员操作不规范，可能引发设备故障或安全事故^[2]。

2.3 风险数据采集方法

为准确识别老旧建筑机电系统的风险，需要采用科学合理的数据采集方法，其中无损检测技术应用广泛。（1）红外热成像技术：通过检测物体表面的温度分布，能够快速发现电气设备的过热部位、管道的保温缺陷等问题。该技术无需接触设备，可在不影响系统运行的情况下进行检测，适用于供电系统、暖通空调系统等的风险排查；（2）超声波探伤技术：利用超声波在材料中的传播特性，可检测管道、容器等设备的内部缺陷，如裂缝、腐蚀减薄等。对于给排水系统的管道和消防系统的压力容器，超声波探伤能够有效评估其结构完整性。此外，还可通过现场勘查、设备运行记录分析、专家访谈等方式收集风险数据，结合无损检测技术的结果，全面掌握机电系统的风险状况。

3 安全风险评估模型构建

3.1 评估指标体系设计

构建科学的评估指标体系是进行安全风险评估的基础，可从一级指标和二级指标两个层级展开。一级

指标包括安全性、可靠性和经济性。安全性指标主要衡量系统对人员和建筑结构的安全保障能力；可靠性指标反映系统在规定条件下正常运行的能力；经济性指标则考虑系统的运行成本、维护费用等经济因素。二级指标是一级指标的细化。安全性指标可细化为故障率、事故发生率等；可靠性指标包括平均无故障运行时间、系统恢复能力等；经济性指标涵盖能耗指数、维修成本、设备更新费用等。通过明确各级指标的含义和计算方法，能够为风险评估提供具体的量化依据。

3.2 基于 AHP-熵权法的组合权重计算

为提高评估指标权重确定的科学性，可采用 AHP（层次分析法）与熵权法相结合的组合权重计算方法。AHP 法通过建立层次结构模型，邀请专家对指标的重要性进行两两比较，构建判断矩阵，计算出各指标的主观权重。该方法能够充分体现专家的经验 and 判断，但可能存在一定的主观性。熵权法根据指标数据的离散程度确定客观权重，数据越离散，指标的信息量越大，权重越高。该方法基于实际数据计算，客观性较强，但可能忽视指标的内在重要性。将两种方法计算得到的权重进行组合，既考虑了专家的主观判断，又结合了数据的客观特征，使权重分配更加合理。

3.3 风险等级划分与模糊综合评价

风险等级划分和模糊综合评价是对风险进行量化和定性描述的重要环节。风险矩阵通过分析风险发生的可能性和后果的严重性，构建风险矩阵。将可能性分为极高、高、中、低、极低五个等级，将严重性分为严重、较严重、一般、较轻、轻微五个等级，两者的组合可确定风险等级，如极高风险、高风险、中风险、低风险等。由于风险评估中存在许多模糊因素，采用模糊数学的方法对风险进行综合评价^[3]。首先确定评价因素集和评价等级集，然后通过隶属度函数计算各因素对不同评价等级的隶属度，结合指标权重进行模糊合成，最终得到系统的综合风险评价结果。通过风险等级划分和模糊综合评价，能够清晰地呈现老旧建筑机电系统的风险水平，为后续的优化决策提供依据。

4 机电系统优化策略

4.1 优化原则

老旧建筑机电系统的优化需遵循安全性优先与经济性平衡的原则。安全性作为不可逾越的底线，需根据系统的功能重要性实施分级保障。对于直接关联生命安全的消防系统和供配电系统，应通过结构强化和功能冗余设计消除潜在隐患，确保在极端情况下仍能维持基本防护能力；对于影响居住或使用舒适度的给

排水、暖通空调系统,则以控制故障影响范围为核心,避免局部问题扩散为系统性事故。经济性考量应突破短期投入的局限,转向全生命周期成本核算。需综合评估设备更换、系统改造与长期能耗、维护成本的关联,结合建筑剩余使用年限制定适配方案,既避免过度改造造成的资源浪费,也防止因投入不足导致短期内重复维修,通过科学测算实现成本与效益的动态平衡,确保优化方案的可持续性。

4.2 技术层面优化

技术层面的优化主要包括设备更新和系统重构。对于性能严重衰减且安全风险较高的设备,应优先替换为能效更高的新型产品,从根本上提升系统运行的稳定性;对于尚能维持基本功能但效率下降的设备,可通过核心部件翻新延长使用寿命,在控制成本的同时延缓老化进程。同时,引入智能监测元件,实时捕捉设备运行参数,实现异常情况的早期预警,减少突发故障的发生概率。系统重构要结合建筑自身特点与能源供应条件进行统筹设计。例如:对于存在多回路交叉供电的老旧建筑,可通过负荷重新分配与智能断路器的加装,构建具备动态调整能力的供配电网络,提升供电可靠性;在空调系统改造中,采用变频技术与分区控制相结合的方式,根据不同区域的实际需求调节运行参数,降低无效能耗。此外,针对老旧建筑管线老化、布局混乱的问题,需进行系统性梳理与改造,采用耐腐蚀、寿命长的新型管材,并通过BIM技术对管线走向进行优化设计,减少施工对建筑结构的影响,同时为后续维护提供清晰的数据支持。对于消防系统,应升级为智能报警与联动控制模式,将烟感探测器、喷淋系统与消防泵组通过物联网技术互联互通,实现火情的快速定位与自动响应,最大限度缩短应急处置时间。整合分布式能源系统,如太阳能光伏发电、地源热泵等,减少对传统能源的依赖,提升能源利用效率;优化管网布局与设备配置,消除各子系统间的协同障碍,增强整体运行的协调性。通过技术整合,使机电系统在满足功能需求的同时,更好地适应现代建筑的节能与环保要求,实现性能的全面提升^[4]。

4.3 管理层面优化

借助BIM技术构建可视化运维平台,将建筑设计资料、设备参数、运行数据等信息整合到三维模型中,形成全面的管理数据库。通过三维模型可直观呈现系统布局与设备状态,便于快速定位问题和制定维护计划,大幅提升管理的效率与精准度。平台还能实现数据的实时更新与共享,为决策提供及时有效的支持。

建立完善的预防性维护制度,根据不同系统的运行特性制定个性化维护方案。定期开展设备检查、清洁与保养,及时处理潜在故障,避免小问题演变成大事故;加强运维人员的专业培训,提升其操作技能与应急处理能力,确保在突发情况发生时能迅速响应、有效处置。通过规范化管理,降低人为因素导致的故障风险,延长设备使用寿命,保障系统长期稳定运行^[5-6]。

5 结束语

本文针对老旧建筑机电系统的安全风险评估与优化展开研究,通过对风险的识别、评估模型的构建和优化策略的探讨,取得了以下成果:明确了老旧建筑机电系统的典型风险因子,包括设备层、运行层和管理层的各类风险;构建了包含安全性、可靠性、经济性等指标的评估体系,并采用AHP-熵权法和模糊综合评价等方法进行风险评估;提出了技术层面和管理层面的优化策略,为老旧建筑机电系统的改造提供了理论和技术支持。未来的研究可进一步探索数字孪生技术在老旧建筑机电系统风险预测中的应用。数字孪生技术能够构建与实体系统完全一致的虚拟模型,通过实时采集实体系统的运行数据,在虚拟模型中模拟系统的运行状态和故障演化过程,实现对风险的提前预测和预警。此外,还可结合人工智能、大数据等技术,提高风险评估的准确性和优化策略的科学性,推动老旧建筑机电系统的智能化运维和可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈淑伟.建设单位视角下老旧小区综合整治项目全过程造价管理研究[J].工程抗震与加固改造,2023,45(04):183.
- [2] 王轶宏.老旧建筑健康智能监测评估体系与安全性数值预测研究[D].西安:长安大学,2023.
- [3] 朱正言.建筑结构动态监测技术研究及其若干应用[D].成都:四川大学,2022.
- [4] 高敬.老旧建筑机电系统改造安装技术要点与应用研究//新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛:绿色智造·采购革新专题(第二册)[C].《中国招标》期刊有限公司,2025.
- [5] 苗智慧.基于BIM的建筑设备可视化运维管理系统研究[J].土木工程信息技术,2022,14(01):119-125.
- [6] 翟越,雷尚学,王轶宏,等.基于数字孪生的老旧建筑结构安全性定量预测方法[J].中国安全科学学报,2024,34(09):69-77.