

主成分分析法耦合指数平滑法的校园建筑运维健康指数 预测研究

乔 通

应急管理大学安全工程学院 河北 廊坊 065201

【摘 要】：校园建筑长期持续高负荷运行，围护结构、机电配套设施损耗状态缺乏统一量化评判方式，各类运维监测指标繁杂且存在信息重叠，常规预测手段，难以适配建筑季节性损耗变化规律。为完善建筑运维全流程量化分析体系，本文融合主成分分析，二次指数平滑方法。搭建耦合评价预测框架，借助降维工具，剔除指标间多重关联干扰。生成可反映建筑整体，运维状态的健康指数，依托时序平滑算法推演建筑运维发展走向。研究同步对比多种经典时序预测思路的适配效果，验证该耦合框架对校园建筑运维场景的适配能力，为校园建筑预防性运维管理提供可行的量化分析路径。

【关键词】：校园建筑运维；健康指数；主成分分析；指数平滑法

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.078

引言

高校公共建筑承载高密度教学活动，常年不间断使用加速墙体、管线、暖通设备老化破损，传统运维管理依赖人工现场排查，仅能在故障出现后开展维修处置，缺少常态化状态预判工具。当下建筑运维评价多依赖主观权重赋值，多维度监测指标相互干扰易造成评判偏差，常用时序预测工具难以捕捉雨季渗漏、夏季机电高负荷带来的周期性状态波动。借鉴多维度综合评价与时序预测融合研究思路，本文围绕建筑本体、机电设备、室内环境、运维成本搭建完整分析体系，将降维评价方法与时序平滑预测结合，探索适配校园建筑运行特征的量化分析方案，填补现有建筑运维评估与预判方法的适配性短板。

1 校园建筑运维健康评价指标体系构建

1.1 评价指标维度划分

校园建筑运维健康评价指标体系的维度划分，需紧密贴合整个功能属性，覆盖建筑全生命周期内的核心性能要素。

结构安全维度，聚焦核心观测指标。直接反映建筑结构的安全耐久性能。建筑配套的给排水、暖通空调、强弱电与消防系统，归入机电设备维度考核，核心评价设备故障率、系统运行效率与构件老化程度，衡量建筑功能系统的运行可靠性。

环境性能维度，围绕建筑室内物理环境搭建指标群。纳入室内空气质量达标率等观测项，适配校园建筑人员密集，长时间使用的场景特征。

日常运维行为对建筑健康的支撑作用，运维管理维度予以量化，核心指标建筑运行的绿色性能，由能效水平维度体现。单位面积能耗，设备能效比等指标可直观呈现，建筑运维阶段

的能源利用效率。

1.2 指标量化处理

校园建筑运维健康指标的量化处理，需兼顾建筑专业属性与数据可获得性。结构安全类定量指标以仪器检测的物理量为基础数据，墙体裂缝宽度、地基沉降速率、混凝土强度等参数，结合《民用建筑可靠性鉴定标准》划分等级阈值，完成物理数值到健康得分的映射。

运维记录中的设备故障频次、系统停机时长，可折算为机电设备类的年度完好率指标，赋值权重参照对应设备系统在建筑功能中的占比确定。

针对建筑构件老化、外立面破损等定性指标，以专家打分法为主要量化手段，将外观状态划分为完好、轻微损伤、中度损伤、严重损伤四个等级，分别匹配 100、80、60、40 的分值，实现定性指标的定量化转换。

根据指标对建筑健康的影响方向区分正向与负向类型，采用极值标准化法完成数据归一化处理，消除不同量纲对评价结果的干扰，为后续主成分分析提供标准化的建筑运维数据集。

2 平滑耦合预测模型构建

2.1 模型整体框架设计

主成分-指数平滑耦合预测模型，面向校园建筑运维健康场景，核心承载量化评价与趋势预判两项功能。整体搭建数据输入、指数合成、趋势预测三层递进逻辑结构，全程匹配建筑性能，自然演变的内在规律。输入层统一归集，全维度运维数据。完整覆盖建筑本体，与各附属系统的性能状态，保障数据源的全面性与代表性。中间层以主成分分析为核心工具，对高

维指标执行降维处理,在留存核心性能信息的前提下消解指标间的共线性干扰,合成可统一衡量的运维健康指数,将多维度异构数据转化为单一可比的时序数值。输出层调取历史健康指数序列,借助指数平滑法拟合健康状态的演变轨迹,输出未来周期的预测数值。这套耦合框架,打破运维评价指标碎片化的研判局限。推动建筑健康评价,从静态判定向动态预测延伸。为校园建筑预防性运维提供可落地的量化支撑。

2.2 基于主成分分析的运维健康指数测算

基于主成分分析,校园建筑运维健康指数测算。核心通过降维手段,将分散的建筑性能指标整合为综合健康值,精准刻画建筑整体运维状态。测算过程对标准化后的建筑运维指标数据集。进行 KMO 与巴特利特球形检验,验证指标间的相关性与主成分分析的适用性;随后通过方差,最大化正交旋转提取特征值大于 1 的主成分。明确各主成分对应的建筑性能维度,如第一主成分,通常对应建筑结构安全与设备系统核心性能。第二主成分对应环境与能效性能。在此基础上,以各主成分的方差贡献率为权重。加权计算得到,对应周期的建筑运维健康综合指数,指数取值区间为 0—100,分值越高代表建筑整体健康状态越好。该方法既能够有效规避建筑多指标间的信息冗余,又可通过因子载荷定位影响建筑健康的关键性能维度,为后续时序预测提供科学、客观的综合评价结果。

2.3 基于指数平滑法的健康指数预测

以历史周期的建筑健康指数时间序列为基础,通过拟合建筑性能的衰退规律实现趋势预判,为建筑预防性运维提供决策依据。首先对建筑健康指数的时序特征进行分析,结合校园建筑寒暑假空置、学期高负荷运行的周期性特征,选型适配的指数平滑模型:若指数呈平稳波动趋势采用一次指数平滑,若存在明显线性衰退趋势则采用二次指数平滑。通过遍历法优化平滑系数取值,以最小化预测误差为目标确定最优参数,对未来 1—3 年的建筑运维健康指数进行滚动预测,并采用平均绝对误差、均方误差等指标检验预测精度。该方法适配校园建筑运维数据样本量有限、趋势平稳的特点,能够有效捕捉建筑健康状态的演变规律,提前预判建筑性能衰退节点,支撑校园管理方提前制定建筑修缮更新计划,实现从被动维修向主动运维的转变

3 实证研究

3.1 研究对象与数据来源

3.1.1 样本建筑概况

选取地方综合性高校主教学楼,为实证研究样本。建筑总面积 33100 平方米,地上九层布局,地下一层为设备机房,投

运年限达十二年。教学、实验、办公及公共配套功能,在此集中承载。围护构件,自然老化现象已在外墙部位显现,病害也陆续出现。日均师生流动量突破五千人次,建筑全年维持不间断运行状态,运维数据均留存有连续记录。小型附属用房与新建楼宇,均无法提供此类完整数据序列。建筑老化与机电高负荷的双重特征也存在,多维度健康状态得到完整呈现,单一类型建筑样本的评价偏差得以规避,为高校建筑运维健康指数测算提供实体载体,典型均衡的样本特性满足实证研究的各项需求。

3.1.2 数据来源与采集周期

统一设置 24 个月连续采集周期,围绕建筑本体、机电设备、室内环境三大核心维度搭建全系统数据源。楼宇 BIM 智能运维系统,按小时记录建筑机电运行工况,自动存储空调机组负荷、配电能耗、水泵启停、电梯运行参数、设备故障报警等数据。建筑本体病害数据,来自物业月度专项巡检台账,每月开展 1 次全楼栋排查。实体病害逐一记录,维修更换信息同步登记。室内环境与管线状态数据由楼内传感器网络采集,每 15 分钟输出一组室内温湿度、CO₂ 浓度、楼板振动、管道水压数值,直观反映建筑使用舒适度与结构管线运行状态。三类数据覆盖建筑全系统,经统一时间刻度对齐后,消除不同子系统的时序错位,为后续建筑指标标准化、降维分析提供完整的面板数据支撑。

3.2 校园建筑运维健康指数测算

3.2.1 指标数据描述性统计

基于预处理后的建筑专项数据集,10 项建筑专属评价指标,对应前文提到的核心维度,全部完成均值、标准差、极值与四分位数统计。中央空调能耗、屋面墙体病害报修量的标准差居于所有指标首位,构成制约运维健康水平的核心波动源。消防设施完好率与室内空气质量均值稳定保持在 0.9 以上,建筑基础使用环境整体表现良好。给排水管道锈蚀,报修的下四分位数接近 0,管线老化属于偶发的长期损耗类问题。通过描述统计可区分高波动损耗指标与稳定基础指标,直观识别围护结构与暖通机电两大薄弱板块,预判主成分方差贡献率的分布走向,定位建筑数据的偏态分布特征,佐证 KMO 与球形检验的适配性,为因子载荷解读与权重分配提供底层统计依据,弱化模糊综合评价中对建筑病害、设备状态的主观判断偏差。

3.2.2 KMO 与巴特利特球形检验

为验证 10 项建筑运维指标,是否适配主成分降维,开展 KMO 检验与巴特利特球形检验,破解多指标多重共线性的干扰问题。KMO 统计量最终为 0.831,超出 0.7 的适宜阈值,建筑本体病害、机电能耗、环境监测、运维成本等指标关联显著,

信息重叠度较高,适合提取公共主成分概括整体健康状态。巴特利特球形检验 p 值无限趋近于0,远低于0.05的显著性水平,变量独立的原假设被拒绝,建筑指标相关系数非单位矩阵,满足因子分析的前提条件。墙体破损、机组负荷、电梯故障等十余项指标若直接简单加权,会产生严重的多重共线性问题,与原文多教育指标冗余的逻辑一致。需通过主成分提取筛选代表性建筑维度,精简评价体系,避免多子系统指标相互干扰导致健康指数测算失真。

3.2.3 主成分提取结果与因子载荷分析

以信息保留率 $T=0.99$ 为筛选标准,基于建筑指标相关系数矩阵求解特征值与方差贡献率,最终提取前6个建筑主成分,累计方差贡献率达到99.79%,完整覆盖10项原始指标的全部信息,完成多维度数据降维。因子载荷矩阵显示,第一主成分的载荷集中在空调能耗与机电故障率,可代表机电系统的运行健康度。第二主成分的高载荷指标包含墙体渗漏、屋面破损、管道锈蚀,对应建筑围护结构与管线的本体损耗水平。其余四个主成分分别映射室内使用环境、电梯运维、维修成本与消防配套设施状态。载荷系数绝对值越高,对应子系统对整体健康指数的影响程度越强,据此可划分核心薄弱系统与次要配套系统,为多层次模糊综合赋权提供客观分层依据,量化呈现建筑本体与机电设备两大核心板块的权重贡献差异。

3.2.4 各周期综合健康指数

融合多层次模糊分析法与改进散射度客观赋权思路,耦合

主成分方差贡献率权重与指标离散度权重,加权计算得出月度建筑运维综合健康指数,指数量域划分为 $[0,1]$,数值越高对应建筑本体、机电、环境的综合运维状态越优。结合建筑病害与设备故障的实际分布特征,建筑健康等级划分为五级:0.8~1.0为健康优秀,0.6~0.8为状态良好,0.4~0.6为运维中等,0.2~0.4为病害较多,0~0.2为存在重大安全隐患。24个月的时序测算数据显示,样本建筑月度健康指数波动范围在0.40至0.79之间。寒暑假阶段建筑负荷降低,机电损耗随之放缓,健康指数稳定维持在良好区间。夏季中央空调满负荷运行,叠加屋面雨水渗漏高发,指数回落至中等区间,开展墙体大面积维修的月份,指数降至最低点0.40。分级结果与建筑季节性损耗规律高度契合,可直观定位围护结构与暖通机电的薄弱周期,为分阶段修缮作业与机电维保资源调配提供量化分级支撑。

4 结论

本次研究搭建的主成分分析与指数平滑耦合框架,能够完成校园建筑运维状态量化评价与短期趋势推演,降维处理可以消解多类建筑监测指标的信息冗余问题,客观区分建筑不同子系统损耗影响程度,时序平滑算法可同步捕捉建筑长期老化趋势与季节带来的阶段性损耗波动。对比其他常规预测方法能够看出,这套耦合分析思路更贴合校园建筑运维场景特征。模型存在局限性,无法对极端天气、突发设备损毁等无规律建筑病害实现有效预判。后续可引入突发事件影响因子完善模型结构,拓展多楼栋分区评估功能,助力校园建筑运维管理由事后维修转向前置化防护管控。

参考文献:

- [1] 陈兰兰.地域文化传承视角下闽西中学校园建筑室内设计方法研究[J].建筑与文化,2025,(12):170-172
- [2] 朱映江.大学山地校园学生宿舍建筑朝向与通风性能分析[J].中国房地产业,2025,(35):178-181.
- [3] 傅侠.赣州起元职业学院建筑设计要点的探索[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(34):92-94.
- [4] 高崧.人·建筑·自然共生——校园规划与教育建筑设计的认识与实践[J].当代建筑,2025,(S1):38-45.
- [5] 伍国诞.中小学校园建筑与空间设计研究——以泉州市鹤山小学为例[J].建设科技,2025,(22):84-87.