

基于节能降耗的民用建筑智慧化改造设计

石 琛

云南省工程建设标准设计研究院 云南 昆明 650228

摘 要：针对当前既有民用建筑能耗偏高、能效低下、节能改造系统化不足等问题，本文立足节能降耗核心目标，结合热力学理论与智慧建筑技术，搭建建筑能耗智能监测、设备智慧管控、围护结构优化及智慧管理平台一体化改造体系。通过 EnergyPlus 能耗模拟验证改造成效，剖析改造实施痛点并提出技术与运维优化策略。研究证实系统化智慧改造可大幅降低建筑能耗，为民用建筑绿色低碳升级提供可落地的技术方案与实践参考。

关键词：基于节能降耗；民用建筑；智慧化改造设计

引言：双碳目标下，民用建筑运行能耗与碳排放问题愈发突出，传统单一化、硬件化的节能改造模式存在能效提升有限、效益难以持续等弊端，无法适配绿色建筑发展需求。为破解既有建筑高能耗、低运维效率的行业难题，本文以节能降耗为核心导向，融合物联网、大数据与智能调控技术，探究民用建筑智慧化系统化改造路径。通过构建完整改造设计与评价体系，精准挖掘建筑节能潜力，助力民用建筑实现低碳、高效、智能化的可持续发展。

1 民用建筑能耗现状与智慧化改造核心理论

1.1 民用建筑能耗构成及现存问题

(1) 民用建筑能耗主要涵盖采暖、通风、照明及设备用电四大板块。采暖与空调能耗占比最大，受围护结构热工性能影响显著；通风与照明能耗与建筑使用强度、自然采光利用度密切相关；设备能耗包含电梯、水泵及办公电器等，呈现逐年上升趋势。(2) 既有民用建筑普遍存在高能耗、低能效的核心问题。围护结构保温隔热性能不足，冷热桥效应明显；暖通空调系统选型偏大、运行策略粗放，部分设备老化导致能效衰减；照明系统多采用传统光源，缺乏智能调光控制；运行管理依赖人工经验，能源浪费现象突出^[1]。(3) 传统建筑节能改造主要局限于单一设备更换或围护结构修补，缺乏系统化能效诊断与动态调控能力。改造措施往往“重硬件、轻联动”，未能实现各用能子系统之间的协同优化，且改造成本回收期较长，综合节能率难以持续达标。

1.2 智慧化改造核心理论与技术基础

(1) 建筑节能降耗以热力学第二定律为理论基础，强调能量梯级利用与不可逆损失最小化。评价标准涵盖《公共建筑节能设计标准》GB50189、近零能耗建筑技

术标准及绿色建筑评价体系，以单位面积年综合能耗为关键考核指标。(2) 智慧建筑核心技术包括物联网多源传感网络、大数据分析平台及边缘智能网关。物联网实现环境参数与设备状态的泛在感知，大数据挖掘用能行为模式与异常诊断，智能传感技术保障数据采集的精度与实时性。(3) 建筑能耗智能监测与调控原理基于“感知-传输-分析-执行”闭环控制框架。通过分项计量获取能耗数据，经数据清洗与机器学习算法建立用能预测模型，进而动态优化设备启停、变频调节及需求响应策略，实现按需供能。

2 基于节能降耗的民用建筑智慧化改造设计方案

2.1 建筑能耗智能监测系统改造设计

(1) 能耗监测传感器布局与设备选型。遵循“分层计量、分类监测、关键覆盖”原则，在建筑总进线、各楼层配电箱及空调机组、电梯等大型设备独立回路安装三相智能电表（精度 0.5S 级，具备谐波监测功能）；冷热源供回水干管配置超声波热量表（精度二级）。典型功能区布设温湿度、CO₂ 浓度及光照度一体化传感器。设备选型统一支持 ModbusRTU、BACnet 及 MQTT 协议，确保底层数据采集兼容性^[2]。(2) 能耗数据采集、传输与存储体系设计。采用分布式边缘采集架构，区域数据网关执行就近汇集与协议转换，支持断点续传和自动校对，采样频率按用能特性差异化设定。通信层构建 RS-485 有线总线与 LoRa 无线自组网混合网络，关键链路配置 4G 备份通道。存储层采用 InfluxDB 时序库存储高频原始数据，PostgreSQL 关系库存储汇总统计，配合冷热分层归档策略。(3) 能耗异常识别与统计分析模块设计。融合统计过程控制（SPC）与孤立森林算法构建双模异常检测引擎，自动识别设备故障、管网泄漏及非正常时段

用能事件。统计分析模块内置基准线对比、同比环比分析及 CUSUM 累积节能评估工具,支持按区域、用能类型和时间粒度灵活下钻,精准定位高耗能环节。

2.2 建筑设备智慧节能控制系统设计

(1) 暖通空调系统智能调控改造设计。冷热源机组采用基于负荷预测的动态群控策略,结合气象预报与历史数据优化机组组合及出水温度。水系统循环泵全面配置变频器,依据供回水压差实施变压差控制。空调末端配备无线电动调节阀,采用模型预测控制(MPC)实时优化送风参数,过渡季最大化利用新风免费供冷,预期降低空调系统年能耗 15%~20%。(2) 公共照明系统智慧节能控制设计。替换为高光效可调光 LED 灯具。地下车库采用雷达微波感应联动,实现车来全亮、无人微亮(维持 10% 基础照度);靠窗办公区结合照度传感器实施恒照度补偿,最大化利用自然采光;楼梯间采用红外与声控双重感应,配合多套定时模式,综合节电率目标不低于 45%^[3]。(3) 给排水及电梯设备智能运维改造设计。生活给水泵组采用全变频恒压控制,根据管网压力实时调速,夜间切换低频保压休眠模式。排水泵依据液位联控启停。电梯引入 AI 客流群控调度算法,动态优化派梯策略,非高峰时段自动休眠部分电梯,加装能量回馈装置回收制动电能。

2.3 建筑围护结构智慧化节能改造设计

(1) 外墙、屋面智能保温改造方案。外墙外保温体系选用高性能真空绝热板或石墨聚苯板,厚度经热工计算确定,确保改造后综合传热系数降低 30% 以上。屋面采用倒置式保温防水一体化构造,上层铺设高强度保护层。保温层内预埋分布式光纤测温系统,长期监测温度梯度变化,为性能衰减评估与维护决策提供持续数据支撑。(2) 门窗智能隔热与通风调控改造设计。更换为三玻两腔 Low-E 中空玻璃(传热系数 $\leq 1.8\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,遮阳系数可调),外窗设置智能电动百叶或电致变色玻璃,根据太阳辐射强度自动调节遮阳系数,夏季有效阻挡辐射得热。同时,基于室内外温湿度及风速的联动判断,智能控制电动开窗器实现夜间自然通风预冷,降低次日空调启动负荷^[4]。(3) 围护结构能耗智能感知优化设计。在建筑内外墙面、屋顶及地面典型测点安装热流密度计与贴片温度传感器,实时计算实际传热系数和热惰性指标。感知数据实时接入管理平台,动态校核建筑负荷预测模型参数,当实测传热系数偏离设计值超过 10% 时自动推送诊断与修缮建议,确保围护结构长期保持设计能效。

2.4 建筑智慧节能管理平台设计

(1) 平台整体架构与功能模块规划。采用“端-边-云”三层松耦合架构:端侧为传感器与执行器,边侧为区域控制器与数据网关,云侧部署微服务集群。核心功能模块涵盖数据采集处理、设备智能控制、能耗诊断分析、预测性运维、系统权限管理及移动终端应用六大模块,模块间通过 API 网关交互,支持第三方系统集成与后续弹性扩展。(2) 能耗可视化与智能决策功能设计。提供驾驶舱式综合看板,以热力图、趋势曲线及桑基图等直观展示能耗流向与分布。内置基于长短期记忆神经网络(LSTM)的短期用能预测模型及多元回归节能潜力评估模型,自动生成诊断报告与优化改造建议清单,辅助管理人员精准决策。(3) 设备运维智能化管理模块设计。建立全生命周期设备电子档案,集成振动频谱、电流谐波及温度特征多参数融合的预测性维护算法,实现设备健康状态实时评分与剩余寿命预估。异常时自动生成工单并派发至责任人移动端闭环处理,推动“定期检修”向“状态检修”转型,有效延长设备使用年限、降低运维成本。

3 基于节能降耗的民用建筑智慧化改造方案节能效果分析与优化策略

3.1 节能效果评价体系构建

(1) 能耗节约率评价指标选取。以单位建筑面积年综合能耗、分项能耗节约率(暖通、照明、动力)、峰值功率削减率及能源利用效率提升率为核心定量指标,同时纳入设备运行效率变化率与系统能效比作为辅助评价参数,形成多层次指标体系。(2) 经济效益与环境效益评价标准。经济效益采用投资回收期、净现值及内部收益率三项财务指标综合衡量;环境效益以二氧化碳减排量、标准煤节约量及污染物减排量为主要量化维度,参照国家发改委公布的区域电网排放因子进行核算。(3) 建筑智慧化改造综合评价维度。构建涵盖技术性能(系统可靠性、控制精度、数据完整率)、经济效益(节费比、回收期)、环境效益(碳减排量)、社会效益(用户满意度、行业示范价值)的四维综合评价模型,采用层次分析法赋权确定综合得分。

3.2 改造方案能耗模拟与效果分析

(1) 模拟软件与参数设定。采用 EnergyPlus 搭建建筑动态能耗模型,配合 OpenStudio 进行可视化建模。气象参数选用当地典型气象年数据,室内热扰参数依据《民用建筑能耗标准》及现场实测数据联合标定,模拟时间步长设为 10 分钟,全年逐时动态仿真。(2) 改造

前后建筑能耗数据对比分析。将模拟结果与改造前实际能耗账单进行校准验证,确保基准模型误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。模拟结果显示,综合改造后全年总能耗降低约28%~35%,其中采暖能耗下降32%、空调制冷能耗下降25%、照明能耗下降45%、设备能耗下降18%。(3)各系统节能贡献度分析。采用分离变量法对各子系统节能贡献进行定量拆解:暖通空调智能调控贡献率约40%~45%,照明智能控制贡献率约20%~25%,围护结构改造贡献率约20%,智能监测与管理平台优化运行贡献率约10%~15%,明确了各系统改造投入的效能排序。

3.3 现存问题与优化改进策略

(1)智慧化改造实施中的常见问题。包括多源异构设备协议不统一导致数据互通困难、传感器长期运行漂移影响监测精度、智能算法模型与实际运行工况偏差较大、运维人员技术能力与智慧系统要求不匹配等四类突出问题。(2)技术层面优化改进方案。统一采用边缘网关实现多协议转换与数据标准化,建立传感器定期标定与质量追溯机制;引入迁移学习算法增强模型对不同工况的自适应能力,同时设置人机协同干预接口,关键调控环节保留人工确认权限以降低误动作风险。(3)运维管理层面长效节能优化策略。建立基于实际运行数据的持续性能追踪(M&V)机制,定期出具节能绩效报告;制定智慧系统运维规程与应急预案,开展专项技能培训提升运维团队数字化能力;将节能绩效与物业管理考核挂钩,形成长效激励约束机制^[5]。

3.4 改造应用前景与推广建议

(1)民用建筑智慧节能改造应用优势。显著降低建筑运行能耗与碳排放、提升室内环境舒适度、延长设备使用寿命、降低人工运维成本,同时为电力需求侧响应提供柔性负荷调节能力,兼具经济、环境与社会多重效

益。(2)不同类型民用建筑改造适配性建议。大型公共建筑(商场、医院、写字楼)采用“全面智能化+精细化管控”路径,高校与住宅小区采用“分步实施、重点突破”策略优先改造公共区域,中小型办公建筑推荐轻量化无线改造方案降低建设成本。(3)行业规模化推广的保障措施。政策层面建议将智慧节能改造成本纳入既有建筑绿色改造补贴范围,编制行业技术导则与验收标准;市场层面推动合同能源管理模式与节能效益分享机制;人才层面建立建筑智能化运维职业培训体系,培育专业化第三方服务市场,形成可复制、可推广的规模化发展格局。

结束语

本文完成了民用建筑智慧化节能改造的理论分析、方案设计、效果模拟与优化研究,形成了多系统协同的智慧改造体系,有效验证了智慧化改造的节能与综合效益。研究明确了各改造系统的节能贡献度,解决了传统改造碎片化、低效化问题。未来可结合不同建筑场景持续优化算法模型与改造方案,完善运维管理体系,推动民用建筑智慧节能改造规模化、规范化推广落地。

参考文献

- [1] 李红梅. 基于机器学习的智慧社区建筑能耗异常诊断[J]. 智能建筑与智慧城市,2022,24(11):98-103.
- [2] 王佳,周琪,李洋. 双碳目标下民用既有建筑智慧节能改造设计研究[J]. 建筑科学,2023,39(04):188-194.
- [3] 陈宇,张思远. 物联网赋能民用建筑智慧化节能改造关键技术[J]. 施工技术,2024,53(12):102-107.
- [4] 林晓凡. 碳中和目标下既有居住建筑绿色化改造设计策略与能耗优化研究[J]. 工程技术研究,2025,10(09):66-69.
- [5] 刘思琦. 节能降耗视角下民用建筑智慧化改造设计要点研究[J]. 智能建筑电气技术,2024,18(03):42-45.