

基于物联网的既有公建照明与空调联动节能研究

张瑶瑶¹, 黄凯行², 郭雨辰¹

(1. 浙江建设职业技术学院; 2. 中国计量大学)

【摘要】针对既有公共建筑照明与空调系统独立运行导致能源浪费的问题, 提出一种基于物联网的照明与空调末端联动节能系统。该系统通过研发智能LED灯具与无线联动温控器, 构建了“人员感知—数据融合—智能决策”的闭环控制机制, 并建立了改进型灰色关联—多元非线性回归耦合能耗预测模型。实验结果表明, 该系统可实现照明节能, 验证了其在提升能效与舒适性方面的有效性。

【关键词】物联网; 公共建筑; 照明空调联动; 灰色关联分析; 节能控制

【基金项目】浙江省教育厅科研项目: 基于物联网的既有公建照明联动空调末端节能研究与应用, 项目编号: Y202456603

中图分类号: TU113.66; TU83

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.03.038

Research on Energy Saving of Lighting and Air Conditioning Linkage in Existing Public Buildings Based on Internet of Things

ZHANG Yao-yao¹, HUANG Kai-xing², GUO Yu-chen¹

(1. Zhejiang College of Construction; 2. China Jiliang University)

【Abstract】To address the issue of energy waste caused by the independent operation of lighting and air conditioning systems in existing public buildings, this study proposes an IoT-based energy-saving system for lighting and air conditioning terminal linkage. By developing intelligent LED lamps and wireless-linked temperature controllers, this system has established a closed-loop control mechanism of "personnel perception—data fusion—intelligent decision-making," and constructs an improved grey relational analysis-multivariate nonlinear regression coupled energy consumption prediction model. Experimental results show that the system achieves lighting energy savings, verifying its effectiveness in improving energy efficiency and comfort.

【Keywords】internet of things; public buildings; lighting and air conditioning linkage; grey relational analysis; energy-saving control

1 引言

能源与环境问题是全球关注的焦点。在我国“双碳”战略与高质量发展目标引领下, 建筑领域节能减碳已成为实现绿色转型的关键路径。照明与空调系统作为公共建筑主要用能设备, 合计能耗占比高达70%~80%, 照明约占建筑电力消耗的20%~30%, 空调系统能耗可达建筑运行总能耗的50%以上, 节能潜力显著^[1-6]。

现有研究多将照明与空调系统独立分析, 缺乏基于人员活动的协同联动控制机制, 未能充分发挥系统集成节能潜力^[7-11]。基于物联网技术, 开展既有公共建筑照明与空调末端联动节能系统研究, 通过人员感知与动态调节实现按需供能, 从而在提升建筑环境舒适度的同时, 显著降低运行能耗。

2 系统整体设计

以公共建筑区域照明和空调系统的控制技术为

研究对象, 提出一种基于计算机物联网技术的照明控制与空调运行管理控制耦合联动的新型智能联动控制技术, 通过无线网络通信技术整合为一体化系统, 依托云平台开展集中化管理。

整体架构分设备层、传输层、数据层和应用层。设备层可对光照和空调系统的设备运行状态与能耗情况进行实时监测, 并实现设备的精准控制。传输层实现设备层采集数据的稳定传输, 数据层依托数据统计方法完成对采集数据的专业处理与深度分析。应用层搭建可视化用户界面, 支持用户查看并控制照明和空调的运行状态、查阅能源消耗数据^[12]。

首先由蓝牙灯具搭载的人体红外传感器检测人员进出状态, 判定人员是否在有效时段内进入场所, 因每个灯具为固定网络节点^[13-14], 可依据网络节点信息实现人员定位与人数统计, 再根据人员信息判定是否达到空调开启的阈值条件, 即依据单位时间内的人员进入数量判断是否开启空调, 后续结合空调

系统的温湿度传感器监测数据,精准确定空调开启的区域与台数,如图1示。

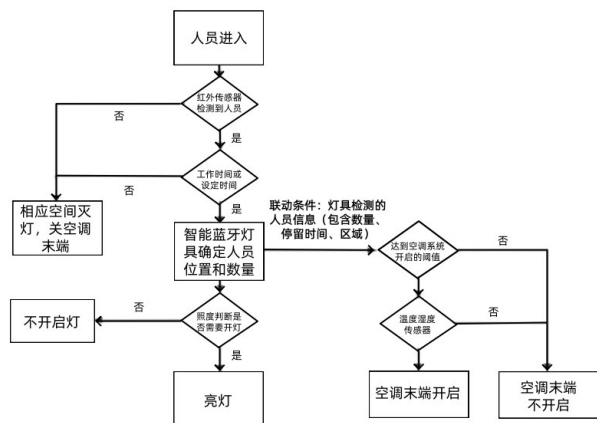


图1 联动控制逻辑图

3 改进型照明与空调末端联动模型

针对既有公共建筑照明—空调系统联动控制中能耗预测精度不足、多因素耦合作用量化不充分的问题,提出一种改进型灰色关联—多元非线性回归耦合能耗控制模型。采用“三段式”框架,包括前置筛选模块、核心预测模块与后置控制模块,具体框架如图2所示。

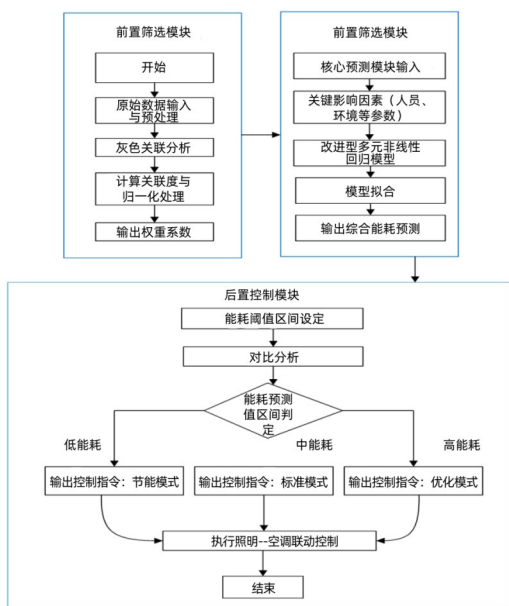


图2 联动模型流程图

前置筛选模块以建筑照明—空调系统综合能耗为参考序列,以人员活动参数、照明运行参数、环境参数为比较序列,通过灰色关联分析计算各比较序列与参考序列的关联度,筛选关联度大于0.6的关键

影响因素,并将关联度归一化处理后作为核心预测模块的权重系数。核心预测模块以前置模块筛选的关键影响因素为输入变量,以照明—空调系统综合能耗为输出变量,构建改进型多元非线性回归模型,通过模型拟合得到能耗预测值。后置控制模块设定能耗阈值区间,将核心模块输出的能耗预测值与阈值进行对比,输出对应的照明—空调系统控制指令,实现能耗的精准控制。

3.1 灰色关联分析

设参考序列为建筑照明—空调系统综合能耗序列: $X_0 = \{E(1), E(2), \dots, E(n)\}$

比较序列为6个影响因素序列($i=1, 2, \dots, 6$ 分别对应人员数量、停留时间、灯具开启率、亮度等级、室内温度、室内湿度): $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$

1)数据标准化,把数据进行均值化

$$x'_0(k) = \frac{E(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E(k)}, x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k)}, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

2)计算各因素的关联系数

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k |x'_0(k) - x'_i(k)| + \zeta \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|}{|x'_0(k) - x'_i(k)| + \zeta \max_k |x'_0(k) - x'_i(k)|} \quad (2)$$

3)计算关联度

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (3)$$

4)关键因素筛选与权重分钟,设定关联度阈值 $\gamma_{th} = 0.6$,筛选出满足 $\gamma_i \geq \gamma_{th}$ 的关键因素集合S,对关键因素关联度进行归一化处理,得到权重系数

$$\omega_i = \frac{\tau_i}{\sum_{j \in S} \tau_j}, i \in S \quad (4)$$

3.2 改进型多元非线性回归模型

基于筛选的关键因素,构建能耗预测模型

$$E = (\omega_1 \alpha + \omega_2 \beta + \omega_3 T_{norm} + \omega_4 H_{norm}) \cdot a \cdot \gamma^b \cdot E_{base} \quad (5)$$

变量说明如下。

E_{base} :系统基准能耗,由实验测定。

$a \in [0.8, 1.2], b \in [1.0, 1.5]$:非线性修正系数,由数据拟合得到。

T_{norm}, H_{norm} 是归一化的温度。

$$T_{norm} = \frac{T_{in} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \cdot H_{norm} = \frac{H_{in} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}} \quad (6)$$

其中 $H_{min} = 30\%RH$, $H_{max} = 80\%RH$ 。

3.3 阈值判断与联动控制指令

设定能耗阈值 E_{low} 、 E_{high} ($E_{low} < E_{high}$), 基于能耗预测输出控制指令。常规运行模式, 输出 $E < E_{low}$; 节能调节模式, $E_{low} \leq E < E_{high}$; 紧急节能模式 $E \geq E_{high}$ 。

4 灯具与空调末端控制设备硬件设计

4.1 基于物联网技术的新型智能 LED 灯具研制

研发一种基于蓝牙 mesh 进行通信的智能 LED 灯具, 主要原理是将通讯模块、感应模块和电路驱动模块集成到 LED 灯具上, 灯中电路驱动模块为 LED 灯条、通信模块、感应模块提供电源, 通信模块负责收发蓝牙 Mesh 网络中的消息, 感应模块用于感知人体和照度。每盏灯具是单独的网络节点, 根据控制需求可对单盏灯具、群组灯具和全部灯具进行控制^[15], 通过三点定位的原理, 可以识别员工的位置, 将信息采集并传至照明系统的控制中心, 从而开启该员工附近的灯^[16-19]。

4.2 基于物联网的空调末端设计

为实现通过智能 LED 灯具感知人员活动情况后, 通过蓝牙 mesh 无线网络连接控制中心后与空调末端设备进行联动, 改进传统联网型温度控制器, 研发无线联动温度控制器。在空调末端温度控制器内置 Wi-Fi-2.4G/5G 双频模块, 当其接收到控制中心的指令后, 可启动、关闭和调节空调末端设备。

5 结语

为验证本文提出的物联网灯具与空调控制末端联动设计的实际效果, 选取某既有办公楼进行为期一年的系统部署与实验验证。验证结果表明: 该控制模型和硬件产品在测试集上的预测精度显著优于传统线性回归模型, 验证了模型的有效性与可靠性, 该方案对推动建筑领域智能化升级与“双碳”目标实现具有积极意义。

参考文献

- [1] 顾佳磊. 复合功能大型公共建筑能耗水平分析[J]. 制冷, 2017, 36 (4): 60-65.
- [2] 陈海波, 王凡. 基于能耗分项计量数据的大型公建节能

- 诊断方法及典型案例[J]. 建筑科学, 2011, 27 (4): 23-26.
- [3] 邓杰文, 何适, 魏庆芃, 等. 公共建筑空调系统运行调适方法研究 (1): 冷水系统[J]. 暖通空调, 2019, 49 (8): 85-91+102.
- [4] 刘伯霞, 刘杰, 程婷, 等. 中国城市更新的理论与实践[J]. 中国名城, 2021, 35 (7): 1-10.
- [5] 陈红兵, 涂光备, 陈国泰. 自然光的利用与节能分析[J]. 太阳能学报, 2004, 25 (4): 515-518.
- [6] 王庆美. 照明节能技术在建筑电气工程中的应用探析[J]. 中国高科技, 2023 (17): 119-121.
- [7] Reinhart C F, Voss K. Monitoring manual control of electric lighting and blinds[J]. Lighting Research and Technology, 2003, 35(3): 243-260.
- [8] Li D H W, Lam T N T, Wong S L. Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47 (9-10): 1133-1145.
- [9] Galasiu A D, Atif M R. Applicability of daylighting computer modeling in real case studies: comparison between measured and simulated daylight availability and lighting consumption[J]. Building and Environment, 2002, 37(4): 363-377.
- [10] Maitreya V K. Daytime artificial lighting in office buildings in India[J]. Building and Environment, 1977, 12 (3): 159-163.
- [11] Verderber R R, Morse O C, Jewell J E. Building design: impact on the lighting control system for a daylighting strategy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1989, 25(2): 198-202.
- [12] 王庆美. 照明节能技术在建筑电气工程中的应用探析[J]. 中国高科技, 2023 (17): 119-121.
- [13] 林方键, 胥布工. 基于 Zigbee 网络的路灯节能控制系统[J]. 控制工程, 2009, 16 (3): 324-330.
- [14] 查成源, 冯明春. 基于单片机的智能照明控制系统设计[J]. 电子制作, 2021 (23): 36-38.
- [15] 邴树林, 刘凤勇, 苏布雨. 公共建筑照明系统动态节能方法研究[J]. 光源与照明, 2024 (2): 20-22.
- [16] 李肖金. 浅谈大型公共建筑电气节能及采取的节能措施[J]. 中国工程咨询, 2017 (6): 71-73.
- [17] 彭飞. 基于低功耗蓝牙 Mesh 组网的照明系统设计与实现[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
- [18] 刘永欣, 崔佳冬, 何登强, 等. 基于蓝牙 Mesh 分布式控制和平均一致性的智慧照明系统[J]. 电子技术应用, 2024, 50 (4): 109-114.
- [19] 刘雪燕. 上海某办公建筑冷热源系统节能改造方案对比[J]. 制冷与空调, 2024, 24 (10): 36-44.