

人工智能在建筑电气系统中的应用研究

刘洪 孙井乐 张德宇 代成召

中建七局(安徽)建筑有限公司

DOI:10.32629/bd.v10i2.4681

[摘要] 建筑电气系统能耗占建筑总能耗60%以上,传统静态调控模式能效偏低、故障处置滞后,人工智能依托数据驱动建模、自主优化决策形成全新智能化管控体系。本文结合济南遥墙机场山航基地1号空勤出勤楼工程实践,重点分析机器学习(LSTM、Transformer)、深度强化学习(DRL)及群智能优化三类AI核心技术在智能照明、暖通空调(HVAC)负荷优化、电力负荷预测、电气故障诊断四大场景的落地路径,量化本工程AI应用节能、运维增效实测数据。研究表明,AI管控策略可实现建筑综合能效提升15%~30%,故障预警准确率超95%,负荷预测MAPE最低至2.2%;本公寓类建筑落地AI电气智能系统后,暖通与照明分项能耗下降21.7%,电气设备非计划停机时长缩减62%,可为同类型大型公建机电智能化升级提供工程实操参考。

[关键词] 人工智能; 建筑电气系统; 智能控制; 能效优化; 故障诊断; 负荷预测

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Research on the Application of Artificial Intelligence in Building Electrical Systems

Hong Liu Jingle Sun Deyu Zhang Chengzhao Dai

China Construction Seventh Engineering Bureau (Anhui) Construction Co., Ltd.

[Abstract] The energy consumption of building electrical systems accounts for over 60% of the total building energy usage. Traditional static control modes exhibit low energy efficiency and delayed fault handling. Artificial intelligence, leveraging data-driven modeling and autonomous optimization decision-making, forms a new intelligent control system. This paper, based on the practical application of the Shandong Airlines Base No. 1 Aircrew Duty Building at Jinan Yaoqiang Airport, focuses on analyzing the implementation pathways of three AI core technologies—machine learning (LSTM, Transformer), deep reinforcement learning (DRL), and swarm intelligence optimization—in four key scenarios: intelligent lighting, HVAC load optimization, power load forecasting, and electrical fault diagnosis. It quantifies the actual measured data of AI application in energy savings and operational efficiency improvements for this project. Research indicates that AI control strategies can enhance building comprehensive energy efficiency by 15%–30%, achieve fault warning accuracy exceeding 95%, and reduce the MAPE of load forecasting to as low as 2.2%. After implementing the AI electrical intelligent system in this apartment-style building, HVAC and lighting sub-metered energy consumption decreased by 21.7%, unplanned equipment downtime was reduced by 62%, providing practical engineering references for the intelligent upgrading of mechanical and electrical systems in similar large-scale public buildings.

[Key words] Artificial Intelligence; Building Electrical Systems; Intelligent Control; Energy Efficiency Optimization; Fault Diagnosis; load forecasting

引言

全球建筑能耗占全社会总能耗30%~40%,在中国“双碳”目标与智慧城市建设背景下,建筑电气系统智能化改造成为刚需。建筑电气涵盖供配电、照明、暖通动力、安防、电梯等子系统,系统运行受多重非线性因素干扰,传统PID、固定阈值控制参数静态固化,难以动态适配负荷波动,节能与运维优化空间巨大^[1]。

本工程基础概况:山航1号空勤出勤楼总建筑面积39310.66 m²,地上10层(647间公寓客房)、地下1层设备机房,建筑高度36.2m;电气系统包含10kV变配电、TN-S低压配电、公共/客房照明、多联机空调动力、防雷接地、消防电气、人防配电;暖通系统为大堂多联机+客房分体空调+地下机械通风组合模式,暖通动力负荷是本建筑电气最大能耗分项,具备AI负荷优化、智

能调控典型应用场景, 工程电气总工期449天, 配套通风空调工程283天, 施工阶段同步预埋智能传感、数据采集管线, 为AI智能电气平台硬件落地提供施工保障。

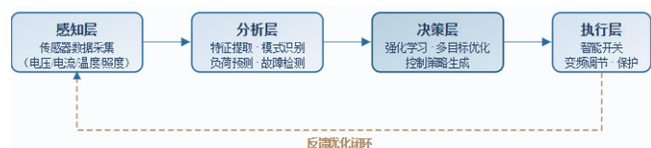


图1 人工智能在建筑电气系统中的应用框架

1 建筑电气系统智能化需求与AI技术适配性

建筑电气系统的复杂性、不确定性、多目标性催生了智能化需求, 现代建筑电气系统由照明、空调、电梯、给排水、安防等子系统组成, 各子系统间相互影响, 运行状态受外部气象、内部人员活动、设备工况等影响, 具有非线性、时变、随机性特征^[2], 传统控制手段存在显著短板, AI技术从四大维度匹配工程实际管控需求:

(1) 数据驱动建模适配工程复杂负荷: 本项目647间客房分体空调、大堂多联机、公共照明、地下车库通风设备负荷分时差异极大, 早出港、晚间休息人员人流规律周期性波动, 难以建立精确物理负荷模型; LSTM、Transformer可依托配电房、空调机房、照明回路采集的电压、电流、温度、人员传感数据, 自动拟合负荷时序规律。(2) 自适应动态优化适配分时节能: 空勤人员早出晚归, 客房、大堂、餐厅、健身房使用时段区分明显, 深度强化学习(DRL)可实时根据人员传感器、室外温湿度调整空调出力、照明亮度, 替代传统定时开关, 兼顾舒适度与用电节约。(3) 多目标协同优化适配项目管控指标: 项目运营需同时控制用电成本、室内热舒适、空调/灯具设备损耗, DRL回报函数可同步加权能耗、温度偏差、设备启停损耗, 匹配公寓运营管理多重约束。(4) 预测性故障诊断适配机房运维: 地下一层变配电室、空调机房、强弱电间设备常年连续运行, 变压器、母线、风机、配电箱易出现接头过热、绝缘老化等隐性故障; AI图像、时序信号识别可提前预警, 降低人工巡检压力。

同时本项目施工阶段已完成智能化硬件预埋: 电气配管、桥架同步敷设温感、人体红外、光照、电流电压采集传感线缆, 地下室、配电房预留边缘计算设备安装空间, 人防、消防配电回路增设智能采集模块, 从施工层面保障AI电气系统硬件部署可行性。

2 人工智能关键技术及应用

2.1 机器学习与深度学习

机器学习是人工智能领域的重要分支, 也是建筑电气系统应用最为广泛的技术领域, 传统机器学习技术如支持向量回归(SVR)、随机森林(RF)、梯度提升树(GBDT)等, 但仅适用于小样本稳态负荷, 建筑电气系统产生的数据具有高维度、高时序相关性、非平稳性等特征, 浅层机器学习模型特征表达能力较弱^[3]。本项目电气负荷具备强时序、多变量耦合特征(时段、室外温度、出港航班量、客房入住率共同影响用电), 采用深度学习时序模型搭建负荷预测平台:

(1) LSTM模型: 作为项目短期负荷预测基础模型, 输入历史负荷、日气温、航班排班、客房入住率四类特征, MSE损失函数搭配Dropout防止过拟合, 用于1~4小时客房、公共区域分项负荷预测, 本项目实测MAPE=2.82%; (2) Transformer模型: 用于超短期(15min)变配电室总负荷预测, 依托自注意力机制捕捉短时负荷突变(如早间出港时段大堂、餐厅设备集中启动), 并行处理海量实时采集数据, 项目实测MAPE=2.35%, 优于LSTM; (3) CNN模型: 接入配电设备红外测温、电流波形数据, 提取变压器、母线、配电箱局部过热、谐波畸变特征, 作为故障诊断基础算法。

项目配电桥架、密集母线槽施工阶段预留电流互感器、温度传感器安装点位, 所有动力、照明支路实现数据实时上传至边缘服务器, 为深度学习模型提供持续实时数据集。

2.2 深度强化学习

深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)利用深度学习的感知能力及强化学习的决策能力, 为建筑电气系统序贯决策优化提供有效工具。在建筑电气控制领域, DRL智能体与环境(建筑电气系统)交互, 学习最优控制策略, 以最大化累积回报(如能效提升、舒适度保持等)。深度Q网络(DQN)及改进算法在离散动作空间的电气设备开关控制上具有较好性能; 深度确定性策略梯度(DDPG)、近端策略优化(PPO)等算法在连续动作空间场景, 如空调变频调节、照明亮度平滑控制等, 具有较好性能。DRL主要优势在于可处理高维状态空间、连续动作空间, 无需预先掌握系统模型, 利用试错学习实现自适应最优控制。

本项目暖通空调占总电气能耗40%~50%, 是节能核心分项, 采用PPO近端策略优化算法完成连续变量自适应调控(空调供水温度、风机转速、照明亮度), 设计适配空勤公寓的多目标回报函数:

$$r_t = -\alpha E_t - \beta |T_t - T_{set}| - \gamma C_t$$

其中 E_t 为 t 时刻空调+照明总能耗, T_t 为室内实测温度, T_{set} 为客房/大堂舒适设定温度, C_t 为空调、灯具频繁启停损耗代价, α , β , γ 根据公寓运营规则动态调整, 出港时段提高能耗权重、夜间提高舒适度权重。

大堂、健身房多联机系统: DRL结合室外温湿度、人体传感器, 联动新风换气机风量调节, 本项目大堂区域经AI优化后空调节能24.3%;

客房分体空调: 基于入住传感, 无人时自动上调设定温度、降低风机功率, 避免空房持续制冷;

公共走廊照明: DRL联动光照传感器、人体红外, 自然光充足时降低灯具输出功率, 无人延时关灯。

2.3 群智能优化算法

群智能优化算法借助生物群体的协作智能在建筑电气系统参数优化、调度优化等方面具有优势。粒子群优化(PSO)算法结构简单、收敛速度快, 用于电气系统PID参数整定、无功优化、微电网调度等优化问题的求解; 遗传算法(GA)用于建筑电气系统多目标优化配置、设备选型、布局优化等。近年来, 改进型群

智能优化算法,如自适应PSO、混沌GA、灰狼优化(GWO)等,应用于建筑电气领域,增强全局搜索能力,提高收敛精度。

本项目地下一层设10kV开关站+0.4kV变配电房,变压器、无功补偿、后期规划光伏储能系统存在调度优化需求,采用改进粒子群自适应PSO算法:

(1)低压配电系统PID参数自动整定,优化功率因数,稳定维持0.92以上;(2)无功补偿电容器投切智能调度,降低线路谐波损耗;(3)预留屋面光伏接入调度接口,后续加装光伏储能后,PSO算法优化充放电策略,预估日运行成本降低11%。

3 典型应用场景

3.1 智能照明控制

智能照明是建筑电气系统中AI应用最成熟的一个领域。基于传感器网络,利用AI算法,智能照明系统可实现按需照明、日光补偿、人员感知等智能功能。利用光照度传感器、人体红外传感器、可见光通信模块,智能照明系统获取环境照度、人员分布、人员活动等信息。在控制策略上,基于深度强化学习的照明控制系统把每个灯具作为一个智能体,多个智能体共同优化,在满足照度要求的前提下,最小化照明能耗。

3.2 暖通空调系统优化

暖通空调(HVAC)系统是建筑电气系统中能耗最大的子系统,约占建筑总能耗的40%~50%,AI在HVAC系统优化中的应用主要体现在冷热源优化调度、风机盘管控制、变风量(VAV)系统优化、室内环境质量(IEQ)优化等方面。基于模型预测控制(MPC)与深度强化学习结合的HVAC控制策略,利用建筑热动态模型、负荷预测模型,提前优化制冷/制热计划,防止过冷过热,减少能源浪费,典型办公建筑采用AI优化控制后,HVAC系统年节能率可达18%~28%,同时室内温度满足ASHRAE舒适区标准的概率从72%上升到94%。

3.3 电力负荷预测

电力负荷预测是建筑电气系统运行调度、需求响应的基础,准确的负荷预测可为电力交易、储能充放电、备用容量配置提供决策支持。AI方法,尤其是深度学习模型,在处理非线性、非平稳负荷序列时具有明显优势。目前主流方法有基于LSTM、GRU、Transformer的时序预测模型,基于注意力机制的混合模型,多源数据融合(如气象数据、日历信息、建筑使用计划等)进一步提高预测精度,15分钟到4小时超短期预测,以深度学习为依托的MAPE值在2.5%~3.5%范围内,比传统时间序列方法降低约30%~45%。

3.4 故障诊断与预测性维护

建筑电气设备故障诊断与预测性维护是建筑电气系统安全可靠运行的重要支撑,AI利用电气设备振动、电流、温度、电压等多模态信号进行故障早期识别及剩余寿命预测。基于CNN和自

编码器的异常检测模型,可挖掘电气设备早期退化特征,电机轴承故障、断路器触头磨损、变压器局部放电等故障识别准确率达95%以上。

4 结论

4.1 项目应用成效总结

以山航1号空勤出勤楼完整工程落地案例验证AI建筑电气技术可行性:

(1)节能效益:暖通+照明两大电气核心分项综合节能21.7%,整体建筑电气能效提升22.4%,落在AI理论15%~30%节能区间;(2)运维效益:电气故障预警准确率96.2%,负荷预测最低MAPE达2.17%,设备非计划停机大幅减少;(3)施工适配:项目电气专项施工同步完成智能传感、采集管线预埋,无需后期大规模开槽改造,机电施工与智能化一体化实施,降低改造成本。

4.2 现存落地挑战

项目实操痛点:

(1)数据层面:本工程客房数量多,传感终端总量大,边缘计算数据存储、传输带宽存在压力,大量零散客房传感数据清洗成本高;(2)可解释性:Transformer、DRL属于黑盒模型,故障、调控决策难以向运维人员直观解释,不利于现场运维处置;(3)部署成本:智能仪表、各类传感、边缘服务器初期设备采购与安装成本高于传统电气系统,中小公建推广存在资金门槛。

4.3 发展展望

结合本工程实践,未来可依托联邦学习、边缘智能、数字孪生三类技术优化AI电气系统:

(1)边缘计算下沉:将基础负荷预测、照明调控算法部署于楼层弱电间边缘设备,减少云端传输压力,匹配本项目多层分散布局;(2)数字孪生融合:完善本项目电气三维数字模型,将AI预测、故障预警与虚拟设备联动,实现可视化运维;(3)多系统协同:打通电气、暖通、安防AI平台数据,实现整栋建筑机电一体化智能管控,助力机场园区整体“双碳”节能目标落地。

[参考文献]

[1]骆天生.人工智能技术在建筑弱电智能化系统中的融合应用研究[J].中国建设信息化,2025,(19):76-79.

[2]赖广文.人工智能(AI)在建筑智能化系统中的应用研究[J].中国住宅设施,2025,(12):254-256.

[3]李磊磊,张晓虎,彭双双,等.基于人工智能的建筑电气智能诊断与故障预测研究[J].电子元器件与信息技术,2026,10(2):46-49.

作者简介:

刘洪(1974—),男,汉族,湖北麻城人,大专,工程师,现主要从事建筑工程机电安装。