

建筑设备自动化系统节能控制技术研究

郭娟

广东白云学院, 广东 广州 510545

[摘要]建筑运行能耗占社会总能耗的 46.5%，降低建筑能耗是实现碳中和目标的主要战场。建筑设备自动化系统依靠传感器、控制器和智能算法的配合，对暖通空调、照明等机电设备实施即时监测并加以优化控制，是达成建筑节能的主要技术手段。整理出系统的节能控制技术体系和关键技术发展，提出目前存在设备联动协调性差、能耗数据利用率低、控制策略适应性差、运维管理机制不健全等主要问题。因此从完善协同联动机制、建立数据分析平台、提高智能算法的应用水平、健全运维评价体系四个方面提出优化途径。

[关键词]建筑设备自动化；楼宇自动化系统；节能控制；智能控制

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20128

中图分类号: TU608

文献标识码: A

Research on Energy-saving Control Technology for Building Equipment Automation System

GUO Juan

Guangdong Baiyun University, Guangzhou, Guangdong, 510545, China

Abstract: Building operation energy consumption accounts for 46.5% of the total social energy consumption, and reducing building energy consumption is the main battlefield for achieving carbon neutrality goals. The building equipment automation system relies on the cooperation of sensors, controllers, and intelligent algorithms to implement real-time monitoring and optimized control of mechanical and electrical equipment such as HVAC and lighting, which is the main technical means to achieve building energy conservation. Organize the energy-saving control technology system and key technology development of the system, and propose the main problems currently existing, such as poor coordination of equipment linkage, low utilization of energy consumption data, poor adaptability of control strategies, and inadequate operation and maintenance management mechanisms. Therefore, optimization approaches are proposed from four aspects: improving the collaborative linkage mechanism, establishing a data analysis platform, enhancing the application level of intelligent algorithms, and improving the operation and maintenance evaluation system.

Keywords: building equipment automation; building automation system; energy-saving control; intelligent control

引言

建筑运行能耗占社会总能耗的比重已经超过了 46%，建筑运行能耗占社会总能耗的比重为 21.7%，降低建筑能耗已经成为实现碳中和目标的主要战场。据估计，建筑部门占全球总能耗的 40%左右以及相关碳排放，改善建筑能效对于实现气候目标和可持续发展来说十分重要。新型城镇化推进、双碳战略深入实施之际，怎样依靠自动化、智能化技术改善建筑机电系统运行效能，成了行业焦点。建筑设备自动化系统依靠传感器、控制器和智能算法三者之间的配合，对暖通空调、照明、给排水等机电设备实施实时监测并加以优化控制，是达成建筑节能的关键技术手段。但是目前大部分建筑的自动化系统存在着重建设轻运维、只监不控的问题，智能化潜力没有得到充分发挥。在

此背景下，对 BAS 节能控制技术的现状、问题及优化途径进行系统的分析，有重大的理论意义和现实意义。

1 建筑设备自动化系统节能控制技术概述

建筑设备自动化系统节能控制以降低建筑运行能耗为根本目的，通过监测、分析和调节各种机电设备，使能源供需达到动态匹配、系统运行效率不断改善。它的技术内涵是由感知层、决策层、执行层三部分组成的，感知层通过传感器采集建筑环境和能耗数据，决策层用控制算法来制定运行策略，执行层对空调、照明等设备进行准确的调节。传统的 BAS 依靠 PID 等经典算法，对于暖通空调这类非线性、大惯性的系统来说存在响应滞后、能效不佳等缺点。近些年来，人工智能技术的融入使 BAS 由被动响应向主动节能转变，依靠机器学习对历史数据加以分析，

预估负荷需求,并且自主调节控制参数。但是从实际应用情况来看,大量的系统还只是停留在数据采集和基本的控制上,智能决策以及跨系统协同的能力还很弱。

2 建筑设备自动化系统节能控制关键技术分析

2.1 建筑设备自动化系统架构与数据采集技术

BAS 的典型结构是由现场设备层、控制层、管理决策层这三个部分构成的。现场设备层有各种传感器、执行器和末端控制器;控制层用可编程逻辑控制器或者专用控制器来执行设备级的控制逻辑;管理决策层通过中央工作站或者云平台来实现系统的监控、数据处理以及策略改进^[1]。BAS 中各个系统组件的无缝通信十分重要,标准化通信协议使得传感器、控制器、执行器等不同的设备同平台之间可以有效通信,常用的协议有 BACnet、LonWorks、KNX、Modbus 等。目前架构演进的一个明显趋向就是边缘计算能力下沉,在控制层部署具有 AI 算力的智能控制站,使得实时控制决策不需要依赖云端,从而减小延迟,加强鲁棒性。数据采集为节能控制打下了基础。安装在房间和走廊的传感器就犹如神经网络一样感受着大楼冷暖、湿度、能耗、人员行为等各种各样的隐性碳排放因素,对室内温度、湿度、电耗等众多的隐性碳排放因素实施实时监测。高质量的数据采集要实现全面覆盖、测点无误,还要解决各种设备、各种协议间数据的互通问题。目前 BACnet/IP 等标准协议的普及给系统集成带来方便,但是多源异构数据的融合和治理还存在困难。

2.2 建筑设备自动化系统智能节能控制技术

暖通空调智能控制属于节能的重中之重。空调系统能耗占商业建筑总能耗的 40%左右,由于空调系统的非线性、多变量耦合等特点,传统的控制方法很难达到全局最优。目前的策略存在着动态环境响应滞后、多目标冲突处理能力弱、高精度建模依赖性强、缺乏跨系统协同等问题,多目标深度强化学习、无模型自适应控制、全局优化框架和分布式智能协同是主要的发展方向。近几年来,以数据驱动为基础的控制策略取得了明显的发展,模型预测控制依靠建筑热动态模型预测未来负荷,提前调节供能策略,强化学习依靠和环境的持续互动,自主学习最佳控制策略。从研究结果可知,用 AI 驱动和优化控制做硬件在环测试可以取得较好的节能效果。照明及辅助设备节能还有很大的潜力^[2]。以人员占用感知和自然光补偿为依据的智能照明控制,在保证照度要求的基础上可以减少照明能耗。电梯、给排水等辅助设备群控优化以及变频调速,也成了综合节能的重要部分。以占用为基础的 HVAC 控制、智能

照明、预测性维护等 IoT 驱动技术,最大程度上降低了能耗,又提高了室内环境质量。跨系统协同控制属于提高整体能效的一个方向,空调、照明、遮阳这些系统不再是独立的控制回路,而是借助统一的平台达成信息交流和联动调节。

3 建筑设备自动化系统节能控制存在的主要问题

3.1 设备联动控制协调性不足

目前大部分 BAS 中,空调、照明、给排水等子系统各自为政,控制逻辑互相独立,没有全局协同机制。烟囱式架构造成系统之间不能共享感知信息,也不能实现多目标的综合优化。传统的环境控制和设备管理信息系统存在着分散化、缺少合作以及资源利用率低下的状况,不能满足现代智能建筑对于高效能源管理和环境舒适度的要求。空调系统和遮阳系统如果可以联动,根据日照强度提前调节冷负荷,但是在实际工程中很少见。传统的 BAS 依靠系统内日常活动来运行,没有考虑到居住者的活动和喜好,而 IoT 在建筑中的应用则是对居住者行为、偏好以及室内气候的实时监测,并且根据这些因素实现自适应控制,从而达到提高舒适度和节能的目的。

3.2 能耗数据利用率不高

大量的数据被采集,但是并没有被真正地使用。很多建筑的数字化装备只是停留在数据展示的层面,设备只监视不控制,不能把数据变成控制决策。从调研结果可知,在大多数的建筑和园区中,空调、照明等能源设施没有得到有效的控制,节能依靠经验,降费依靠关机;大量的数字化设备只是监视而不控制,造成用电成本反而上升。即使具有数据分析功能,由于算法同业务脱节、数据质量差等原因,也不能对实际运行进行指导。智能建筑不智能的根本原因在于重建轻运维的现象普遍存在,对于建筑运行中能耗的智能控制投入很少;同时,主导楼宇能耗自控系统的智能化技术被进口产品所垄断,不能与本地环境完全兼容,造成节能管控的效果较差。

3.3 控制策略适应性与智能化水平不足

大量的 BAS 仍然依靠固定的逻辑和预先设定好的参数来运行,并没有考虑到建筑的实际使用模式以及室外气候的变化。即使部署了 AI 算法,模型训练时间长、迁移性差、工程部署难等也会影响它的应用效果^[3]。技术复杂度高、模型训练时间长、经济上难以为继是项目推进的三大难题。另外,在多目标优化过程中,节能和舒适度之间的矛盾、模型精度与控制鲁棒性之间的矛盾等,都是需要解决的学术问题。传统的环境控制系统大多采用独立模块工作方式,不能对温度、湿度、光照等各个参数进行实时

准确的控制,设备自动化管理缺少全局优化功能造成能耗大、设备利用率低。

3.4 系统运行维护与管理机制不完善

重建设轻运维是行业通病。建筑竣工交付之后,BAS 的运维投入一般较少,传感器漂移、执行器故障、控制参数失配等隐患长时间累积,造成系统性能不断下降。设备老化、系统集成度不高、控制策略简单化、能耗监测管理不到位问题,在楼宇机电设备群控制系统中普遍存在。缺少科学的节能评价体系造成节能成效无法量化的评估,运维人员也得不到有效的反馈来指导改进。系统互操作性差距、数据治理问题、改造建筑中方案的可扩展性都是智能建筑节能推广的持续困难。

4 建筑设备自动化系统节能控制技术优化路径

4.1 完善设备协同联动与智能控制机制

打破子系统壁垒,建立全局协同控制的框架。从架构上来说,使用统一的通信协议和数据模型来实现各个系统的数据共享,从策略上来说,创建以总能耗最小化为优化目标的协同优化模型,协调空调、照明、遮阳等设备的联合控制。多智能体系统依靠智能体间的高效通信与协作,可以达成环境参数控制及设备自动化调度的动态优化,模型考虑了环境控制的多目标约束以及设备运行的能源平衡,使用强化学习的优化算法提升了系统的响应速度和适应性。暖通空调和照明系统可以共享人员占用信息,在无人区域同时减少空调出力和照度,避免各自独立控制造成的能源浪费。同时采用风水联动等精细化控制策略,根据末端负荷的变化来调节冷源的供应量,避免出现大马拉小车的现象。

4.2 构建建筑能耗监测与数据分析平台

创建数据驱动决策的智慧能源管理平台,使碳排放可以被看见、计算、控制。园区减碳的要义是依靠数据驱动决策和技术集成创新,智慧平台相当于大脑,可以产生碳足迹,实时追踪光伏、储能等主要指标,依据数据分析预测用电需求,科学安排设备运行,改善节能指标。平台应

该具有实时显示能耗、碳排放图谱的功能,对用能情况进行智能分析,预测异常,预测设备故障和能效降低,给出改进措施来调节运行策略的变化。建筑数据是量化碳耗的主要手段,传感器测得的能耗数据经由 AI 算法加以计算之后,便能清晰地呈现出碳排放图谱,使得隐形碳排放变得可以被看见、可以被计算,进而达成建筑能耗摸得透的目的。关键在于打通数据采集、分析、控制、评价的闭环链条,把数据从展示品变成决策引擎。

4.3 优化节能控制策略与智能算法应用

推动人工智能算法由实验室走向工程现场。一方面发展轻量化的、可以边界的部署的 AI 模型,把智能控制策略嵌入到现场控制器中去,克服云架构的延迟和可靠性问题;另一方面对多目标、强非线性系统,采用深度强化学习、多目标优化等先进算法来研究 HVAC 控制,在节能和舒适度之间找到帕累托最优解。AI 同 IoT 技术相结合,达成对实时数据的搜集,高级分析以及建筑系统自动控制的目的,依靠传感器网络,机器学习算法以及云计算,系统可以预估居住者的需要,察觉系统出现的毛病并且自动调节能源消耗。同时开发出可以在线学习的自适应算法,使系统可以根据建筑使用模式的变化、季节更替等不断优化控制策略,防止模型一劳永逸后出现性能衰减的情况。

4.4 健全系统运维管理与节能评价体系

创建全生命周期的 BAS 运维管理机制。运行阶段要制订出设备巡检、传感器校准、控制参数复核的标准化程序,保证系统长久稳定地运转。建立科学的节能效果评价指标体系,从系统能效比、节能量、设备运行寿命、室内环境满意度等各方面来衡量系统的节能效果,不能只看能耗这一项指标的好坏。COP 是反映制冷系统机组效率的指标,经过系统优化改造可以明显提高 COP,从而获得较好的能效改善。借鉴济南绿地普利中心改造经验,用系统优化方法使制冷 COP 由原来的 3.49 提高到现在的 4.45,实现能效提高 27%的目标,并建立诊断、优化、验证、推广的闭环改进模式,用量化数据来驱动持续改善。

表 1 BAS 节能控制技术各维度问题与优化路径对照

分析维度	存在的主要问题	优化技术路径	预期节能效果
设备协同联动	子系统各自为政,缺乏全局协同机制,跨系统信息共享不足	构建多智能体协同控制框架,统一通信协议与数据模型,引入风水联动策略	减少设备无效运行时间,综合节能率可达 10%~15%
能耗数据利用	数据采集后仅停留于展示层面,只监不控,数据价值未释放	打造智慧能源管理平台,打通数据采集-分析-控制-评估闭环链条	通过数据驱动优化,降低运行能耗 5%~10%
控制策略智能	依赖固定逻辑运行,缺乏自适应能力,AI 算法工程化部署困难	发展轻量化边缘 AI 模型,应用深度强化学习,开发在线自适应算法	制冷系统 COP 提升 20%-30%,总能耗降低 7%~15%
运维管理与评价	重建设轻运维,传感器漂移与执行器故障累积,缺少科学评价体系	建立全生命周期运维标准化流程,构建多维度节能效果评价指标体系	保障系统长期高效运行,节能成效可量化可追溯

如表 1 所示, 根据 BAS 节能控制技术四个维度存在的主要问题, 采取相应的优化技术路径可以取得不同程度的节能效果。采用多智能体协同控制框架以及风水联动策略, 能够使设备运转时间更少, 平均综合节能率在 10%~15% 之间。能耗数据利用上, 用智慧能源管理平台打通数据闭环, 可以降低运行能耗 5%~10%。轻量化边缘 AI 模型、深度强化学习的应用可以使制冷系统 COP 提高 20%~30%, 总能耗降低 7%~15%。在运维管理及评价方面, 全生命周期标准化运维流程和多维评价体系的创建, 能保证系统长久高效运转并且可以量化、可追溯节能效果。四个维度的改进互相联系、互相支撑, 一起形成 BAS 节能控制技术更新的大体架构。

5 结语

建筑设备自动化系统节能控制属于建筑领域达成双碳目标的重要技术手段。目前该领域正处在由自动化向智能化转变的重要时期, 感知层越来越完善, 决策层开始具

备智能, 但是执行层的跨系统协同以及算法工程化落地依然是主要的瓶颈。未来要推动数据采集、智能控制、系统协同、运维管理这四个方面的协同升级, 把 BAS 从数据平台变成真正意义上的智能决策中心, 给建筑节能、绿色转型提供强有力的科技支撑。

[参考文献]

- [1]刘佳莉,黄晓家,赵耀华,等.建筑暖通空调系统控制和节能优化策略研究综述[J].建筑科学,2026,42(2):97-110.
- [2]郭斌,黄孝斌,李擎,等.面向建筑 HVAC 系统能效提升的模型预测控制方法综述[J].工程科学学报,2026,48(3):657-670.
- [3]杨岚翔,张成杰,鲍凤斌,等.建筑中央空调系统智能控制与节能优化协同策略[J].资源节约与环保,2025(12):108-113.

作者简介: 郭娟 (1984—), 女, 汉族, 湖南常德市人, 高校土木建筑类其他专业副教授, 硕士研究生, 建筑信息化与智能建造高校教学工作。