

基于人工智能的公共建筑中央空调系统节能优化研究

王魁^{1,2,*}

1. 广西桂物节能有限公司, 广西 南宁, 530299

2. 广西桂物金岸制冷空调技术有限责任公司, 广西 南宁, 530299

摘要: 大型公共建筑空调系统能耗占建筑总能耗的 40%~60%, 为有效降低大型公共建筑空调系统运行能耗, 响应国家节能减排要求, 文章以某高校大学生活动中心中央空调系统节能改造项目为例, 融合人工智能技术与强弱电一体化监控系统, 构建了覆盖中央空调主机、水泵、冷却塔风机及末端设备的整体综合优化节能控制策略, 在此基础上, 搭建了基于云-管-端一体化架构的中央空调人工智能节能智能控制系统, 实现了系统运行的自动化与智能化, 研究成果可为同类大型公共建筑的暖通空调系统设计、运行维护策略优化及节能改造提供重要的理论参考和实践指导。

关键词: 人工智能; 中央空调系统; 节能优化; 能效提升; 智能控制

Research on Energy-saving Optimization of Central Air Conditioning Systems in Public Buildings Based on Artificial Intelligence

Kui Wang^{1,2,*}

1. Guangxi Guimu Energy Saving Co., Ltd, Nanning Guangxi China, 530299

2. Guangxi Guiming Jin'an Refrigeration and Air Conditioning Technology Co., Ltd, Nanning Guangxi China, 530299

Abstract: The energy consumption of air conditioning systems in large public buildings accounts for 40% to 60% of the total building energy consumption. To effectively reduce the operational energy consumption of air conditioning systems in large public buildings and respond to national energy conservation and emission reduction requirements, this article takes the energy-saving renovation project of the central air conditioning system in a university student activity center as an example. By integrating artificial intelligence technology with a strong and weak electricity integrated monitoring system, an overall comprehensive optimization energy-saving control strategy covering the central air conditioning host, water pumps, cooling tower fans, and terminal equipment is constructed. Based on this, a central air conditioning artificial intelligence energy-saving intelligent control system based on a cloud-pipe-end integrated architecture is built, achieving automation and intelligence in system operation. The research results can provide important theoretical references and practical guidance for the design, operational maintenance strategy optimization, and energy-saving renovation of HVAC systems in similar large public buildings.

Keywords: Artificial Intelligence (AI); Central air conditioning systems; Energy-saving optimization; Energy efficiency improvement; Intelligent control

大型公共建筑空调系统能耗占建筑总能耗的 40%~60%^[1, 2], 在冬夏季负荷高峰时段, 其占比甚至可超过建筑总能耗的 60%。根据《绿色高效制冷行动方案》要求, 到 2030 年, 大型公共建筑制冷能效提升 30%, 制冷总体能效水平提升 25%以上; 国务院《2024—2025 年节能降碳行动方案》明确要求建筑领域提升能效。然而, 调研发现, 既有大型公共建筑的中央空调系统普遍存在以下问题: 冷热水系统普遍存在“小温差、大流量”的不经济运行模式, 导致水泵能耗显著增加; 缺乏有效的智能调控策略, 过度依赖人工经验调节, 致使系统整体能效比(COP)常低于设计预期^[3]。某些公共建筑的中央空调实际负荷大多在低于设计负荷 65%的情况下运行, 大部分系统的实际负荷率在 70%以下的时间不少于全年运行总时间的 90%^[4]。在“碳达峰、碳中和”(“双碳”)国家战略目标的推动下, 对大型公共建筑中央空调系统实施节能改造已势在必行, 这不仅是降低建筑运行能耗的关键环节, 更是实现国家“双碳”战略目标的重要举措。

本文以某高校大学生活动中心为研究对象, 通过深入调研其中央空调系统运行现状, 精准识别系统存在的能效瓶颈问题, 并据此实施了以人工智能为核心的节能改造方案。本研究不仅对大型公共建筑中央空调系统的节能设计、改造施工及智慧运维具有重要的工程实践价值, 同时也对推动建筑领域节能减排、助力“双碳”目标达成具有显著的环保意义。研究成果可为同类大型公共建筑暖通空调系统的能效提升路径提供有益借鉴。

1 工程概况及中央空调系统基本情况

大学生活动中心位于广西南宁市, 建筑高度 23.9 m, 建筑面积约 22000 m², 地下 1 层, 地上 5 层, 地上部分主要为校学工处办事大厅、学生会及学生社团活动中心、演出剧场、学术报告厅、教职工工会活动中心等公共区域, 地下部分主要为车库, 于 2019 年竣工并投入使用。

建筑中央空调系统采用两台制冷量 1200 Kw 的螺杆式冷水机组以及一套变频多联机组, 总制冷量约为 2426 Kw, 额定制热量为 1180 kW。冷冻水泵、冷却水泵各 3 台, 均为变频, 与螺杆式冷水机组联动运行; 配备 1 组冷却塔, 其风机未配置变频装置。改造前, 系统仅具备冷水机组自带的定时启停功能, 缺乏集中监控与群控系统, 无法实现基于负荷需求的智能化运行调控。

中央空调系统设备启停均需人工前往各设备机房现场操作, 夏季工况冷水供水温度设定为 7℃, 冷水机组的启停台数控制主要依据供水温度是否达到设定值(7℃)进行简单判断, 所有冷冻水泵均固定运行在工频状态(约 46.5 Hz)。系统运行时间为每天 8:00-21:30, 周末亦正常启用, 室内人员活动密集, 人流较大。根据近几年统计数据, 大学生活动中心中央空调系统高负荷期约 180 天, 低负荷期约 90 天, 年耗电量约为 1,100,000 kWh。

2 基于人工智能的节能改造方案

为解决该大学生活动中心中央空调系统存在的问题, 对其进行节能改造; 节能改造方案采用最先进的人工智能技术和强弱电一体化监控系统, 旨在以最优的性能价格比实现系统能效的最大化提升。

2.1 改造方案

本改造方案采用系统化方法, 按照设备层改造、控制层部署和平台层建设 3 个方面进行。在设备层改造中, 为冷源系统(冷水机组)、冷冻水泵、冷却水泵加装通讯控制模块, 为冷却塔风机加装变频驱动器(VFD)及通讯控制模块。在控制层部署方面, 增设 1 台 PLC 主控柜及冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔专用 PLC 控制柜各 1 台; PLC 主控柜内配置一对一的专用冷冻泵、冷却泵、冷却塔控制

器,并配置多台网关(每台网关可连接多台冷水机组及电能表),通讯采用局域网有线方式。在平台建设方面,在机房监控室部署中央空调 AI 节能控制平台,实现对各硬件控制柜的通信配置与联动调试。该平台基于人工智能技术,通过实时采集环境温湿度、人员密度、设备运行状态等数据,结合历史运行模式与天气预测信息,运用机器学习算法动态优化空调系统运行策略,最终实现中央空调主机、水泵、冷却塔风机及末端设备的全局协同优化与节能控制。

系统硬件改造与 AI 节能控制平台部署同步进行,末端设备改造安排在大学生活动中心非运行时段实施。施工需确保 VFD、PLC 控制柜安装规范, AI 节能控制平台调试合格,并严格遵守安全规程。

2.2 AI 智能控制方案

中央空调 AI 节能控制方案采用分布式算法库与自主控制技术,依托数字化平台与人工智能技术进行模块化开发,核心功能模块包括数据采集、设备 AI 控制、节能分析、智能预警等,底层数据实时采集上传以支撑优化模型运行。采集的关键参数数据,主要包括制冷机组参数:包括压缩机输入功率、蒸发温度、冷凝温度、冷凝器进水温度、冷凝器冷却水流量、蒸发器进水温度及蒸发器冷冻水流量;冷冻水泵与冷却水泵参数:水泵电功率、水泵运行频率和水泵水流量;空气处理机组(AHU)风机参数:风机电功率,风机运行频率和风机风量。

平台基于海量历史运行数据,构建关键设备(冷水机组、水泵)能耗模型及建筑空调负荷预测模型。利用人工智能算法进行运行参数动态寻优,滚动预测下一时刻各设备的最优工况。在精准预测建筑冷热负荷需求的基础上,通过网络向设备控制器下发优化指令,自动调节水温、风量及设备启停,实现对空调系统的实时优化与节能控制,在保障舒适度的前提下持续最大化降低能耗。该智能控制方案的核心功能模块包括:

(1) 全面监控与安全管理:实时监测冷水机组、循环水泵等关键设备的运行状态(运行/停止、手动/自动、正常/故障、运行频率、水流状态等)及电流参数,实现故障预警与安全保护。

(2) 设备均衡运行管理:根据设备累计运行时间、负载状况等信息,对空调主机、循环水泵、冷却塔及相关阀门进行自动编组;执行轮循启停策略:开机优先启动运行时间最短的主机及其配套辅机,关机优先关闭运行时间最长的主机及其配套辅机,确保设备磨损均衡。

(3) 系统联锁控制:根据预设的系统运行模式(如制冷模式、供热模式),制定并执行设备的安全启停顺序与联锁逻辑。

(4) 多模式灵活控制:系统支持程序智能控制、单机联动控制、设备群控等多种控制模式,满足用户在不同场景下的灵活控制需求。

(5) 全面的系统保护:对冷冻水、冷却水、空调热水回路实施低温保护、变频调速保护及流量保护等,确保系统在各种工况下安全稳定运行。

(6) 负荷跟随与主机台数优化:基于冷水系统总供回水温度及流量,实时计算建筑实际冷负荷需求,并依据负荷变化动态调整冷水机组的运行台数,实现主机容量与负荷的最佳匹配。

(7) 水力平衡优化控制:通过动态调节各分支环路的电动调节阀开度,实现各环路能量供应与实际需求的精确匹配。同时,通过调节压差旁通阀开度,维持冷冻水/热水系统供回水主干管间的压差稳定。

3 节能改造运行效果分析

3.1 节能效果测试

节能改造完成后，在保证建筑室内温湿度及热舒适度要求不变的前提下，以改造前的典型运行工况（设定冷冻水供水温度 8℃，冷却水泵固定 50Hz 运行，冷冻水泵固定 50Hz 运行，冷却塔风机工频运行）作为基准进行对比；采用交替测试法：即 1 天运行 AI 智能控制模式，次日切换回改造前非智能控制模式（原状态），交替记录系统日能耗数据。对 2025 年 5 月 7 日至 6 月 7 日期间（5 月 25 日因天气原因未开机）采集的测试数据进行了对比分析。中央空调系统冷源系统各设备的运行日能耗详情如表 1 和图 1 所示。

表 1 2025 年 5 月 7 日-6 月 7 日空调冷源系统日用电量统计表

Table 1 Statistics of Daily Electricity Consumption of Air-Conditioning Cold Source System from May 7 to June 7, 2025

测试日期 执行工况	环境温 度（℃）	冷却塔总电 量（kWh）	冷却水泵总 电量（kWh）	制冷机组总电 量（kWh）	冷冻水泵总电 量（kWh）	系统总电 量（kWh）
2025-05-07（AI）	29	84	327	1824	255	2490
2025-05-08（非 AI）	29	87	497	1937	288	2809
2025-05-09（AI）	24	52	224	1439	209	1924
2025-05-10（非 AI）	28	72	524	2091	298	2985
2025-05-11（AI）	22	0	131	623	164	918
2025-05-12（非 AI）	23	10	271	636	288	1205
2025-05-13（AI）	26	5	203	691	207	1106
2025-05-14（非 AI）	27	0	404	1164	286	1854
2025-05-15（AI）	27	29	187	746	205	1167
2025-05-16（非 AI）	25	30	311	804	291	1436
2025-05-17（AI）	29	4	194	96	197	491
2025-05-18（非 AI）	27	26	498	831	297	1652
2025-05-19（AI）	27	39	171	755	177	1142
2025-05-20（非 AI）	28	50	397	1129	293	1869
2025-05-21（AI）	30	44	251	819	222	1336
2025-05-22（非 AI）	30	72	467	1563	285	2387
2025-05-23（AI）	30	49	221	974	216	1460
2025-05-24（非 AI）	22	11	144	402	108	665
2025-05-26（非 AI）	23	15	306	750	294	1365
2025-05-27（AI）	25	33	273	1225	321	1852
2025-05-28（非 AI）	26	74	753	2203	528	3558
2025-05-29（AI）	22	19	227	1153	286	1685
2025-05-30（非 AI）	25	31	454	1048	528	2061
2025-05-31（AI）	28	18	115	539	152	824
2025-06-01（非 AI）	29	34	385	1051	450	1795
2025-06-02（AI）	30	45	164	870	116	1195
2025-06-03（非 AI）	28	33	367	1005	300	1705
2025-06-04（AI）	30	35	287	809	256	1387
2025-06-05（非 AI）	29	50	432	1262	302	2046

2025-06-06 (AI)	30	90	312	1906	239	2547
2025-06-07 (非 AI)	30	138	573	1799	369	2879

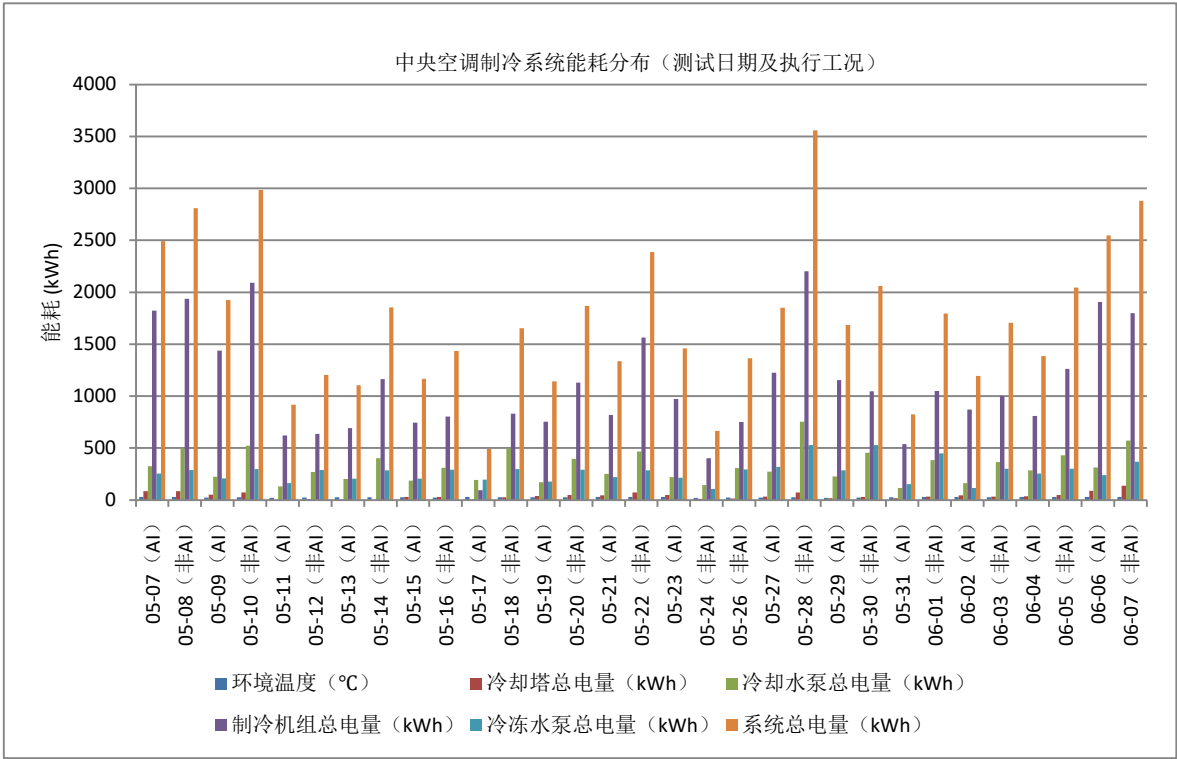


图 1 中央空调冷源系统日总能耗对比 (按测试日期及控制工况)

Fig.1 Daily Total Energy Consumption Comparison of Central Air Conditioning Cold Source System (by Test Date and Control Conditions)

经统计分析,在测试期间:冷却水泵平均节能率达 49.8%,冷水机组为 25.4%,冷冻水泵为 34.5%,冷却塔风机为 27.3%。整个冷源系统的平均节能率为 29.4%,节能效果十分显著。

3.2 节能经济效益

通过实施本次中央空调系统节能改造及 AI 智能控制,在制冷季高负荷情况下,冷源系统日平均节能率为 23.8%,日节电量约为 1155 kWh,按当地电价 0.75 元/kWh 计算,日节省电费约 866.25 元;在制冷季低负荷工况下,冷源系统日平均节能率提升至 29.9%,日节电量约 610 kWh,相应日节省电费约 457.5 元(电价 0.75 元/kWh)。

参考历史运行数据,设定制冷季高负荷期按 180 天计,低负荷期按 90 天计,则实施改造后,空调冷源系统全年预估节电量可达 262,800 kWh,全年节省电费约 197,100 元(按 0.75 元/kWh 计算)。综合计算,中央空调冷源系统的年节能率约为 23.9%。

3.3 社会效益

大学生活动中心中央空调系统节能改造项目的实施,有效提升了活动中心内的学习、活动与工作环境的舒适度。项目实现了空调系统运行的自动化与智能化,显著提升了其运行效率与稳定性;同时降低了运维人员的工作强度,提升了运维效率。在高校开展的此类节能改造项目,本身就是对广大师生最直观、最有效的环保理念教育,有力促进了师生节能减排意识的培养和绿色校园文化的

建设。

4 结论

(1) 本研究以某高校大学生活动中心为应用场景,成功实施了基于人工智能的中央空调系统节能改造项目。

(2) 本项目以 AI 智能控制平台为核心,集成分布式算法库与自主控制技术,构建了对中央空调主机、水泵、冷却塔风机及末端设备的全局协同优化控制策略,实现了中央空调系统整体能效的显著提升。

(3) 项目方案有效解决了目标建筑中央空调系统的能效瓶颈问题,取得了显著的经济效益(年节能率达 23.9%,节省电费约 19.7 万元)与社会效益(提升舒适度、降低运维强度、强化环保教育)。

(4) 本研究所提出的技术路线和实施经验,为同类大型公共建筑中央空调系统的节能改造提供了切实可行的参考方案,对推动建筑领域落实节能降碳目标具有重要的实践价值和示范意义。

参考文献

- [1] 易检长,任中俊,黄 鹤,等. 基于运行数据的大型空调冷站优化控制研究与应用[J]. 建筑节能(中英文),2022,50(2): 23-27.
- [2] 樊国辉,王舒平,张伯言,等. 基于运行数据的公共建筑中央空调设备能耗分解[J]. 建筑节能(中英文),2025,53(1): 62-69.
- [3] 刘译泽,王家奇. 通空调系统群控与能效管理的现状及问题分析[J]. 智能建筑电气技术,2024,18(6): 71-73.
- [4] 彭明嘉. 深圳市某办公大楼中央空调系统节能运行优化研究[D]. 湖南:湘潭大学,2021.

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB25069195)。

^{1,*}作者简介: 王魁(1982-),男,工学博士,高级工程师,研究方向:工程管理、工程技术、光储直柔等。 E-mail: drwkui@163.com。