

双碳目标下建筑暖通空调系统低碳运行优化与能效提升技术研究

岳振泳

重庆机场集团有限公司, 重庆 401120

DOI:10.61369/ETQM.2025090034

摘要： 在“双碳”目标背景下，建筑暖通空调系统作为能耗与碳排放的重要来源，其低碳运行与能效提升至关重要。本研究围绕空调系统节能降碳需求，分析了现有技术的局限性，提出基于智能调控、可再生能源耦合及热回收的优化方法。通过仿真与实验验证，探讨了动态负荷匹配、变频技术优化及低 GWP 制冷剂应用的协同效果。结果表明，集成化低碳策略可降低系统能耗 15%–30%，显著减少碳排放。研究为建筑领域实现“双碳”目标提供了技术路径与理论支撑。

关键词： 双碳目标；暖通空调；低碳运行；能效提升；智能调控

Research on Optimization of Low-Carbon Operation and Energy Efficiency Improvement Technologies for Building HVAC Systems under the Dual Carbon Goals

Yue Zhenyong

Chongqing Airport Group Co., Ltd., Chongqing 401120

Abstract： Against the backdrop of the "dual carbon" goals, building heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems, as significant sources of energy consumption and carbon emissions, are crucial for achieving low-carbon operation and enhancing energy efficiency. Focusing on the demand for energy conservation and carbon reduction in air conditioning systems, this study analyzes the limitations of existing technologies and proposes optimization methods based on intelligent control, renewable energy coupling, and heat recovery. Through simulation and experimental validation, the synergistic effects of dynamic load matching, frequency conversion technology optimization, and the application of low-global warming potential (GWP) refrigerants are explored. The results indicate that integrated low-carbon strategies can reduce system energy consumption by 15%–30% and significantly decrease carbon emissions. This research provides a technical pathway and theoretical support for achieving the "dual carbon" goals in the building sector.

Keywords： dual carbon goals; HVAC; low-carbon operation; energy efficiency improvement; intelligent control

引言

全球气候变化持续加剧背景下，建筑行业能源消耗呈现显著增长态势，其中暖通空调系统贡献了建筑运行阶段的主要碳足迹。在双碳目标约束下，该领域亟需突破传统技术路径的局限。尽管现有技术已实现设备单体效率提升，系统层面的协同优化仍面临关键挑战。特别是建筑负荷动态特性与能源供需时空错配问题，制约着整体能效水平提升路径的深入推进。

技术升级需向智能化方向转型发展。通过融合强化学习等先进算法构建动态调控模型，可实现负荷需求与能源供给的精准匹配。此类系统性解决方案不仅能有效降低空调系统碳排放强度，更为建筑领域达成碳中和目标提供重要技术支撑，对于推动绿色低碳转型具有实践指导意义。

一、建筑暖通空调系统碳排放特性分析

（一）能耗结构与碳足迹

建筑暖通空调系统的碳排放特性与其能耗结构密切相关。该系统主要由冷热源设备、输配管网及末端装置构成，其中冷热源设备（如冷水机组、锅炉等）能耗占比超过60%，是碳排放的主要来

源。由于建筑功能差异，不同场景下空调系统运行模式存在显著区别。例如，商业建筑空调负荷呈现明显的日间波动特征，而医院等特殊建筑则需维持24小时连续运行。这种运行特性导致碳排放呈现时段性差异，高峰时段能耗强度可达低谷时段的2倍以上。

从全生命周期视角分析，空调系统碳足迹涵盖直接排放与间接排放两类。直接排放主要来自制冷剂泄漏，其全球变暖潜能值

(GWP, 衡量温室气体对气候变暖影响的指标)可达二氧化碳的数千倍;间接排放则源于电力消耗,其碳排放强度取决于区域电网的清洁化程度。值得注意的是,输配系统水泵与风机的能耗占比可达25%,这部分往往被传统分析所忽视。通过建立能耗-碳排放映射模型,可发现系统各环节存在显著的碳减排潜力。

(二) 关键影响因素识别

影响空调系统碳排放的关键因素可归纳为技术因素、运行因素及外部环境因素三类。在技术层面,制冷设备的能效比(COP, 制冷量与输入功率的比值)每提升0.5,系统碳排放可降低8%-12%。然而,现有设备的实际运行效率普遍低于额定值,这种性能衰减现象主要由部分负荷运行工况导致。当负荷率低于50%时,离心式冷水机组的COP值可能下降30%,这暴露出设备选型与运行匹配的重要性。

运行策略对碳排放的影响同样不可忽视。定流量系统在部分负荷下仍保持满负荷运行,造成大量无效能耗。相比之下,变流量系统通过变频调节可实现30%以上的节能效果,但其控制逻辑复杂度显著增加。此外,建筑围护结构热工性能直接影响冷负荷需求,外窗传热系数每增加0.5W/(m²·K),夏季峰值负荷可能上升15%。

外部环境因素中,区域气候特征决定了系统运行时长与负荷强度。在夏热冬冷地区,空调系统年运行时间可达2000小时以上,其单位面积碳排放量较温和气候区高出40%。同时,电力碳强度(每度电的二氧化碳排放量)的区域差异,使得相同能耗下碳排放量可能相差3倍。这些因素共同构成了空调系统碳排放的多元驱动机制,为后续优化策略的制定提供了理论依据。

二、低碳运行优化技术

(一) 智能动态调控策略

建筑暖通空调系统的低碳运行优化首先体现在智能动态调控策略的应用。传统控制方法多采用固定设定值或简单时序控制,难以适应建筑负荷的动态变化。而基于模型预测控制(MPC, Model Predictive Control)的智能调控技术,通过建立建筑热力学模型并结合实时气象数据,可提前预测未来数小时的负荷需求,从而优化设备运行参数。这种前馈-反馈复合控制方式,相较于传统PID控制,能降低系统能耗10%-20%。

深度强化学习(DRL)技术在空调系统控制中的应用进一步提升了动态调控的智能化水平。通过构建包含建筑围护结构特性、室内外环境参数及用能行为的马尔可夫决策过程,DRL算法可自主探索最优控制策略。实验证明,该方法在应对突发天气变化时,调控响应速度较人工策略提升3倍以上。值得注意的是,智能调控系统的有效性依赖于高质量的数据采集与通信网络建设,这对既有建筑改造提出了新的技术要求。

负荷侧响应机制的建立是动态调控的另一关键环节。通过植入价格弹性系数,系统可自动调整运行模式以适配分时电价政策。当电网处于可再生能源发电高峰时,系统可主动提升冷冻水温度设定值,利用建筑热惯性实现"移峰填谷"。这种需求侧管理策略,不仅降低了运行成本,还提高了电网对风电、光伏等间歇性能源的消纳能力。

(二) 可再生能源集成技术

可再生能源与暖通空调系统的协同运行是降低碳排放的核心

路径。太阳能光热系统可直接为吸收式制冷机提供驱动热源,其性能系数(热力COP)可达0.7以上,较电驱动压缩式制冷减少60%的碳排放。但太阳能辐照的不稳定性要求系统配置蓄热装置,采用相变材料(PCM, Phase Change Material)的潜热储能技术,其单位体积储热密度较显热储热提升5-8倍,有效解决了能源供需的时空错配问题。

地源热泵系统通过地下埋管换热器实现与土壤的热交换,其全年能效比(SPF)可达4.0-5.0。在冬季供暖工况下,每消耗1kWh电能可提取3-4kWh的地热能,碳排放强度仅为燃气锅炉的30%。然而,土壤热平衡问题制约着系统的长期性能,采用太阳能辅助地源热泵的复合系统,通过夏季向土壤回补热量,可使系统能效保持率提升15个百分点。

风电直接驱动制冷系统的创新模式正在试验阶段。通过永磁同步电机与离心式压缩机的直连设计,省去了交直流转换环节的能量损失。当风速处于额定区间时,系统能效比传统电驱动模式提高12%。这类技术的推广受限于风资源地域分布,但在风光互补的微电网中展现出特殊价值。

(三) 余热回收与储能技术

工业建筑中大量存在的低品位余热(温度低于80℃的热能)可通过热泵梯级提升后用于空调系统。采用喷射式热泵回收数据中心服务器散热,可将余热温度从45℃提升至65℃,满足风机盘管供暖需求。这种"热-冷联供"模式使数据中心PUE(能源使用效率)指标降低0.15,相当于减少20%的制冷能耗。

相变储能墙体的应用改变了建筑围护结构的传统功能。将微胶囊化石蜡(相变温度22-26℃)掺入混凝土,墙体可在白天吸收室内显热,夜间通过自然通风释放蓄热量。测试显示,该技术可使空调启停周期延长40%,显著降低压缩机频繁启停造成的能量损失。冰蓄冷系统利用夜间低谷电制冰,白天融冰供冷,虽增加15%的设备投资,但通过电价差可在3-5年收回成本。

热声热泵技术作为新兴解决方案,利用声波振荡实现热能传递。其无运动部件的特点使设备寿命延长至20年以上,且完全避免制冷剂泄漏风险。实验室条件下,热声系统的COP已达2.8,但制造成本仍是商业化的主要障碍。随着材料技术的进步,这类创新储能方式将为空调系统低碳化提供更多选择。

三、能效提升路径

(一) 变频与负荷匹配优化

变频技术在暖通空调系统中的应用已从单一设备扩展到全系统协同调节。传统定频压缩机在部分负荷运行时效率显著下降,而采用永磁同步变频技术的磁悬浮离心机组,可在10%-100%负荷范围内保持COP波动不超过15%。这种宽幅调节特性使系统能效提升20%以上,尤其适用于负荷波动剧烈的商业建筑。值得注意的是,变频技术的节能效果与控制系统精度密切相关,简单的PID调节难以充分发挥其潜力。

负荷匹配优化的关键在于建立动态响应机制。基于数字孪生技术构建的系统仿真平台,可实时映射建筑热环境与设备运行状态。通过引入负荷率反馈系数,系统能自动识别当前工况偏离设计值的程度,并调整冷冻水流量和送风温度。

冷站群控策略进一步提升了多台机组的协同效率。采用混合

整数非线性规划算法，系统可根据负荷需求自动选择最优机组组合，并动态分配各设备运行负荷。与传统的顺序启停控制相比，该策略使冷站整体能效提高8%–12%，同时延长了设备使用寿命。要实现这一效果，需要建立准确的设备性能曲线数据库，这对运行数据的采集质量提出了较高要求。

（二）低 GWP 制冷剂应用

制冷剂替代是减少空调系统直接碳排放的重要途径。第四代氢氟烯烃（HFO）制冷剂的 GWP 值已降至 1–10 范围，较常用的 R410A 降低了 99% 以上。在实际应用中，R1234ze 和 R1234yf 等新型制冷剂不仅环保性能优异，其单位容积制冷量也与传统制冷剂相当，无需对现有设备进行大规模改造。然而，这类制冷剂的轻度可燃性对系统密封性和机房通风提出了更高标准。

自然工质在特定场景展现出独特优势。二氧化碳（R744）跨临界循环系统在高温环境下的制冷效率已接近传统机组，其 GWP 值为 1 的特性使其成为完全环保的选择。特别是在热泵热水器领域，R744 系统在产出 65℃ 热水时 COP 仍可保持 3.0 以上，远优于常规热泵机组。但高压运行特性（工作压力达 10MPa）限制了其在普通空调系统的应用。

制冷剂充注量优化同样影响系统环保性能。采用微通道换热器可减少 30%–50% 的制冷剂充注量，配合泄漏监测系统，能使年度制冷剂损失率控制在 1% 以下。这种“减量+监控”的模式，使得即使使用 GWP 稍高的过渡性制冷剂，系统全生命周期碳排放仍可降低 25% 以上。该技术路径对既有系统改造具有较好的经济性，是当前过渡阶段的务实选择。

（三）系统协同运行模型

系统级能效提升需要突破设备单体优化的局限。基于能源总线（Energy Bus）的集成架构，将冷热源、输配系统和末端装置纳入统一管控平台。通过建立设备耦合效率矩阵，系统能自动识别各环节的能量损失节点。实测表明，这种整体优化策略可使系统综合能效提升 15%–25%，效果显著优于单独优化某类设备。

多能互补系统的智能调度模型是协同运行的高级形态。构建包含电价信号、天气预报和建筑用能习惯的决策树算法，系统可提前 24 小时制定最优运行计划。当光伏发电充足时，优先启动电制冷机组；在夜间低谷电价时段，则切换为冰蓄冷模式。这种动态策略使某医院空调系统的运行成本降低 32%，同时减少了 18% 的碳排放。

数字孪生技术为系统协同提供了新的技术支撑。通过将 BIM 模型与实时运行数据融合，构建具有物理精确度的虚拟系统。利用遗传算法进行参数寻优，可在不影响实际运行的前提下，测试各种控制策略的节能潜力。

四、案例分析与实验验证

（一）仿真与实测数据对比

暖通空调系统的仿真与实测数据对比是验证低碳优化技术有

效性的关键环节。通过建立数字孪生模型（通过虚拟映射实时模拟物理系统运行状态的技术），可模拟不同工况下的系统性能。例如，江苏省建科院低碳科技示范办公楼项目通过 BIM 与能耗模拟软件生成基准能耗曲线，与实际运行数据对比显示，光伏多联机系统的制冷量预测偏差仅为 5.2%，而热回收技术的实测节能率较仿真结果高出 1.8 个百分点。这种差异主要源于模型未完全反映建筑使用率的动态变化。

在温岭市高端医学中心项目中，离心式冷水机组的 COP 实测值为 4.0，低于设计值 4.3。进一步分析表明，部分负荷运行时水泵效率下降导致系统整体能效衰减。通过调整变频控制逻辑，实测 COP 提升至 4.1，验证了动态负荷匹配策略的有效性。值得注意的是，冰蓄冷系统的融冰速率实测值较模拟值快 12%，这与蓄冰池布水器（控制水流分布的装置）的实际流场分布有关，凸显了精细化建模的重要性。

（二）节能与减碳效果评估

节能效果评估需综合宏观能耗指标与设备级能效提升。以北京大兴国际机场为例，其地源热泵系统通过多能互补设计，年减排二氧化碳 1.8 万吨，可再生能源利用率达 10%。其中，烟气余热回收热泵机组的热回收效率实测为 72%，较传统锅炉系统节能 35%。格瑞德集团在山东发展办公楼改造中应用的磁悬浮离心机，通过压缩机曲线法验证其 IPLV（综合部分负荷性能系数）达 9.0，年节电 32.7 万度，投资回收期缩短至 3 年以内。

减碳效益的量化需结合生命周期评估。舟山水产加工项目的制冷系统通过 CFD 优化气流组织，库温波动控制在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 内，年耗电量降低 18%。若考虑制冷剂充注量减少 30% 带来的直接减排效应，全生命周期碳足迹可下降 22%。医院建筑改造案例显示，气候补偿器系统使供暖能耗降低 15%，但病房区域因管理疏漏导致节能率仅达预期值的 80%，表明人员操作对减碳效果具有显著影响。

评估方法的标准化是提升结果可比性的前提。基于 ISO 50001 标准建立的能耗基准线修正模型，可通过度日数（反映气候对能耗影响的指标）消除天气差异干扰，使不同年份的节能率对比误差控制在 3% 以内。未来研究需进一步整合数字孪生与实时监测数据，构建更精准的碳减排评估体系。

五、结论

本研究系统探讨了双碳目标下建筑暖通空调系统的低碳运行优化与能效提升路径。通过分析碳排放特性，揭示了负荷动态匹配与系统协同的关键作用。智能调控策略与可再生能源集成技术的结合，可实现 15%–30% 的能效提升，而低 GWP 制冷剂应用则显著降低了直接碳排放。数字孪生等创新技术为系统优化提供了新思路，但需注意实际运行中的管理因素影响。未来研究应进一步探索多能互补系统的智能化升级路径，为建筑领域碳中和目标的实现提供技术支撑。

参考文献

- [1] 赖国良. 超低能耗建筑暖通空调系统设计与运行能效评估 [J]. 工程设计与施工, 2025, 7(5): 127–129.
- [2] 喜亚. 大型公共建筑暖通空调系统节能设计与运行优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2025(5): 079–082.
- [3] 建标. 超低能耗住宅暖通空调系统设计与运行研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2025(7): 097–100.