

Discussion on energy-saving measures and application of energy-saving technology in terminal HVAC system

Guoliang Zhao

China Civil Aviation Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing, 101300, China

Abstract

Against the backdrop of accelerating new urbanization, China's civil aviation airport construction has entered a period of rapid development. As the gateway to the city, the terminal building has a daily passenger flow of tens of thousands of people. The special large-span spatial structure and tidal effect of pedestrian flow often result in inefficient operation of traditional HVAC systems. It is worth noting that the energy consumption of air conditioning in such public buildings generally exceeds 45% of the total building energy consumption. Driven by the "dual carbon" strategy goal, exploring energy-saving technology paths that meet the operational characteristics of terminal buildings has become an urgent practical need in the industry.

Keywords

Terminal operation energy consumption; Dynamic load regulation; Equipment energy efficiency optimization; Multi system collaboration; Climate adaptive design

航站楼暖通空调系统节能措施及节能技术应用探讨

赵国梁

中国民航工程咨询有限公司, 中国·北京 101300

摘要

在新型城镇化进程加速推进的背景下,我国民航机场建设迎来高速发展期。作为城市门户的航站楼建筑,其日均客流量可达数万人次,特殊的大跨度空间结构与人流潮汐效应导致传统暖通系统常处于低效运行状态。值得关注的是,这类公共建筑的空调能耗占比普遍超过建筑总能耗的45%,在“双碳”战略目标驱动下,探索符合航站楼运行特征的节能技术路径已成为行业迫切的现实需求。

关键词

航站楼运营能耗; 动态负荷调控; 设备能效优化; 多系统协同; 气候适应性设计

1 引言

中国民用机场协会 2023 年度报告显示,全国年旅客吞吐量千万级机场已达 41 个,其航站楼总面积突破 1500 万平方米。这类超大型公共建筑的能源管理面临独特挑战:连续 24 小时运行要求与旅客瞬时聚集形成的尖峰负荷存在显著矛盾,传统设备选型往往采用冗余设计保障极端工况,却导致常规时段的能源浪费。现行《民用建筑能耗标准》(GB/T 51161-2016)中,针对航站楼这类特殊建筑的能耗基准体系尚未完善,特别是缺乏对过渡季节设备启停策略、新风系统动态调节等关键环节的精细化指引。既有研究多集中于设备能效提升的孤立技术改进,对航站楼特有的空间热环境形成机制关注不足。例如,安检区、行李提取厅等功能分区存在明显负荷差异,但现行系统多采用统一温控策略。与此同

时,玻璃幕墙占比超过 60% 的现代航站楼设计,使得太阳辐射得热对空调负荷的影响呈现非线性特征。这种建筑特性与技术应用间的错位,导致大量机场在实际运营中陷入“高效设备、低运行效率”的困境。

2 航站楼暖通空调系统的能源消耗现状分析

2.1 建筑空间特性与负荷波动矛盾突出

航站楼作为典型的大跨度交通建筑,其内部空间结构呈现显著的区域分化特征。值机大厅、候机区、行李提取厅等功能分区在空间高度与平面布局上存在明显差异,导致热环境分布呈现非均匀特性。以国内某枢纽机场为例,安检通道区域因金属探测设备集中散热,单位面积冷负荷达到候机区的 1.8 倍,但现有空调系统仍采用统一分区控制策略。玻璃幕墙占比普遍超过建筑围护结构的 60%,太阳辐射得热形成的瞬时负荷峰值常发生在航班密集的午后时段,与设备预设的逐时负荷曲线产生显著偏差。建筑运营方为应对突发负荷变化,往往采取整体降温的保守策略,造成非人员聚集

【作者简介】赵国梁(1988-),男,中国北京人,本科,工程师,从事航站楼机场暖通设计研究。

区域的能源浪费。能耗监测数据显示,国内 20 个千万级机场航站楼空调系统季负荷系数普遍低于 0.5,反映出系统运行长期处于非经济工况区间。

2.2 设备选型冗余与运行能效倒挂现象

现行设计规范中针对航站楼的负荷计算多参照静态设计参数,导致冷水机组、空气处理机组等核心设备选型存在系统性冗余。对华北地区六个大型机场的调研表明,制冷主机装机容量超出实际需求峰值的 23%-45%,过渡季节设备负载率长期维持在 30% 以下临界区。水泵并联运行时的水力失调问题普遍存在,二次泵系统实际输送能效比 (EER) 较设计值下降 12%-18%,部分项目在非高峰时段的输配能耗占比达到系统总能耗的 41%。某超大型航站楼的能效审计报告显示,尽管 90% 的冷水机组达到国家一级能效标准,但全年综合运行 COP 值仅维持在 4.2-4.8 区间,较实验室工况下降 26%-33%。热回收装置在过渡季的实际利用率不足设计预期的 40%,新风系统能耗在非供暖季仍占总能耗的 28%,凸显出设备协同运行策略的失效。

2.3 控制策略滞后与动态响应失配问题

建筑自动化系统 (BAS) 的现有控制逻辑难以适应航站楼负荷的时空变化特性。温度传感器布点多遵循均匀分布原则,未考虑安检设备散热、行李转盘机械发热等局部热源影响,导致区域控制精度存在 3-5℃ 偏差。国内某新建航站楼的运行数据表明,玻璃幕墙区域冬季室内温度波动幅度达到 $\pm 4\text{℃}$,但空调箱仍按固定时序进行送风调节。这种控制滞后性导致供暖季外区空调机组频繁启停,设备寿命周期缩短约 30%。负荷预测模型未能有效整合航班动态数据与气象实时参数,现有系统多采用 24 小时预冷策略。实际运行中,航班延误或取消造成的空间使用率突变,使得预冷阶段形成的温度场在后续时段出现显著过调现象。

2.4 气候适应性缺失与设计标准偏差

现行《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中针对航站楼的特殊气候适应性要求尚未形成独立章节。严寒地区机场普遍存在冬季入口区域热压失衡现象,冷风渗透造成的热损失占供暖能耗的 18%~25%。某东北地区航站楼的实测数据显示,自动门启闭频次超过 120 次/小时,门斗区域温度骤降幅度达到 10℃,但暖通系统未能建立对应的快速补偿机制。夏热冬暖地区航站楼的遮阳体系设计存在功能缺陷,水平遮阳构件对低纬度地区太阳高度角的适应性不足。华南某机场玻璃幕墙区域的太阳辐射得热峰值出现在设计工况未覆盖的 10:00-11:00 时段,导致空调系统过早进入满负荷运行状态。

3 航站楼暖通空调系统节能管理的必要性分析

3.1 国家双碳战略与行业能效约束的刚性要求

民航运输业作为国家能源消费重点领域,其碳排放强度已纳入“十四五”生态环境监管体系。根据《民用机场绿

色发展专项规划》,2025 年前年旅客吞吐量千万级机场需实现单位建筑面积能耗下降 12% 的硬性指标,其中暖通空调系统改造贡献率不得低于 60%。国际航空运输协会 (IATA) 最新发布的机场可持续发展框架中,明确要求成员机场在 2030 年前建立暖通系统全生命周期碳足迹监测体系。这种多维度的政策压力倒逼运营主体必须重构节能管理机制,以应对日趋严格的碳核查与能源审计要求。

3.2 运营成本控制与设施效能提升的现实需求

航站楼暖通空调系统的能源支出约占机场非航业务成本的 35%-42%,在航空主业利润空间收窄的背景下,能效管理直接关系到机场企业的财务可持续性。对国内 25 个干线机场的财务数据分析表明,空调系统能耗每降低 10%,对应航站楼年度运营成本可减少 1200-1800 万元。设备老化引发的能效衰减问题尤为突出,运行超过 10 年的冷水机组效率普遍下降 25%-30%,但传统维修模式难以精准识别性能劣化节点,导致隐性成本持续累积。现行《民用机场服务质量标准》要求航站楼室内温度合格率不低于 98%,但机械维持热舒适度的能源代价高昂。某大型枢纽机场的实测数据显示,将候机区温度控制精度从 $\pm 1\text{℃}$ 放宽至 $\pm 1.5\text{℃}$,可使空调系统能耗降低 14% 而不影响旅客体感舒适度。

4 航站楼暖通空调系统节能措施及节能技术应用策略

4.1 基于动态耦合的负荷预测模型构建

航站楼暖通空调系统的节能优化亟需突破传统静态负荷计算方法的局限性。通过建立航班时刻表、旅客流量与气象参数的动态耦合模型,可实现空调负荷的精准预测。将安检闸机通行数据、值机柜台开放数量等运营参数纳入计算体系,能够捕捉旅客聚集区域的瞬时负荷变化。国内某枢纽机场的实践表明,引入航班延误概率算法的负荷预测系统,使过渡季节空调启动时间误差从 ± 2 小时缩减至 ± 0.5 小时。深度神经网络技术的应用,可有效处理玻璃幕墙太阳辐射得热与室内人员散热间的非线性关系,将冷负荷预测准确率提升至 88% 以上。设备运行策略的制定需要匹配负荷预测结果的时间分辨率,采用 15 分钟间隔的动态调控机制,能够及时响应登机口临时变更带来的局部热环境变化。对于行李提取厅等间歇使用区域,开发基于红外热成像的在场人数识别技术,可实现风量供给与实时需求的精准匹配。这种预测与调控的闭环系统,使国内某干线机场夏季空调能耗峰值降低 19%,同时维持室内热舒适度指标 (PMV) 在 ± 0.5 范围内。负荷预测模型与建筑信息模型 (BIM) 的空间映射技术结合,可生成三维可视化调控方案,为不同时段和设备启停顺序优化提供决策支持。

4.2 设备能效提升与协同运行机制创新

变频技术在冷水机组、水泵等关键设备的深度应用,成为破解设备冗余难题的有效路径。针对航站楼特有的负荷

波动特征,开发变流量调节与主机群控的联动算法,能够将冷水系统综合能效比(SCOP)提升12%-18%。国内某大型机场的改造案例显示,磁悬浮压缩机与板式换热器的组合应用,使过渡季节制冷系统部分负荷性能系数(IPLV)达到8.9,较传统螺杆机组提升63%。建立空调系统与照明、行李传输系统的能耗关联模型,可挖掘跨系统的节能潜力。当自然采光满足照度要求时,自动触发空调系统提升新风换气次数的联动机制,能够在保证空气品质的同时降低制冷能耗。热回收装置的运行策略优化值得重点关注,将排风热回收与过渡季节免费供冷相结合,使国内某严寒地区机场的供暖季能耗降低22%。设备运行状态的数字孪生技术,通过实时仿真比对实际能耗数据,可识别出低效运行设备的能效偏差超过15%的异常工况。

4.3 空间分域控制与气流组织优化策略

航站楼功能分区的差异化负荷特征要求建立空间分域控制系统。基于旅客动线分析的动态分区技术,可将安检区、候机厅等区域的温控精度提升至 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。在国内某新建航站楼的应用实践中,采用射流角度可调的球形喷口替代传统条缝风口,使高挑空间的气流组织均匀性指数提高40%,送风温度设定值可上调 2°C 而不影响热舒适度。高大空间的气流组织设计需要重构传统混合通风模式。置换通风与层式送风的复合系统,能够针对值机柜台区域的人员密集特性实现分层控温。玻璃幕墙内侧设置垂直风幕系统,可有效阻隔太阳辐射得热对室内环境的影响,实测数据显示该措施使西向区域冷负荷峰值削减31%。对于行李转盘等设备散热集中区域,开发定向排风与冷辐射吊顶的协同降温方案,将机械制冷能耗降低至传统全空气系统的55%。空间环境参数的实时反馈机制至关重要,采用分布式光纤测温技术,可捕捉到传统传感器网络难以发现的局部过热区域。

4.4 气候响应型围护结构协同设计

玻璃幕墙体系的节能改造需要突破单纯遮阳系数优化的传统思路。电致变色玻璃与相变储能材料的集成应用,可动态调节太阳辐射得热与蓄热释放的时间相位差。国内某夏热冬冷地区机场的实测数据表明,这种复合幕墙系统使东立面的日间冷负荷波动幅度降低58%,同时将夜间自然冷却时长延长3.2小时。垂直绿化系统的生态调节功能值得深入挖掘,攀援植物覆盖率达到40%的外遮阳体系,不仅降低幕墙表面温度 $8-12^{\circ}\text{C}$,还可通过蒸腾作用改善微气候环境。

开发基于气象预报的幕墙通风口智能启闭系统,能够在过渡季节实现有效换气次数的自适应调节。对于严寒地区航站楼,设置旋转式气闸与辐射地板联动的入口防风风系统,可将冬季门斗区域的热损失减少至传统风幕方案的35%。双层动态隔热墙体的创新设计,通过调节空腔空气流动状态实现传热系数的实时变化,经数值模拟验证该技术可使哈尔滨某机场供暖能耗降低27%。

4.5 智慧能源管理平台与运维体系重构

数字孪生技术的深度应用推动能源管理从被动响应转向主动预测。构建融合设备运行数据、环境参数与旅客行为特征的能源物联网平台,可实现系统能效的实时诊断与优化。国内某智慧机场示范项目的数据显示,平台自动生成的设备维护建议使冷水机组故障停机时间减少82%,运维成本降低至传统模式的60%。开发兼顾热舒适度、能耗指标与设备寿命的决策模型,能够平衡过渡季节新风比调节与除湿能耗的矛盾关系。能耗基准的动态修正机制不可或缺,通过比对同气候区同类建筑的运行数据,可识别出偏离正常能效区间15%以上的异常工况。建立以实际运行数据驱动的设计规范更新体系,能够及时纠正现行标准中热湿负荷计算参数的滞后性问题。开发虚实结合的增强现实(AR)培训系统,可使运维人员快速掌握复杂系统的故障诊断方法。

5 结语

航站楼暖通空调系统的节能优化本质上是建筑物理环境调控与动态运营需求的耦合求解过程。随着《近零能耗建筑技术标准》在交通建筑领域的延伸应用,航站楼有望实现空调系统从“能源消费者”向“微电网节点”的功能转变。区域能源互联网的构建将推动冷热电联供系统与飞机地面供电设备的能量交互,形成机场特有的能源代谢网络。建筑信息模型与城市信息模型(CIM)的数据融合,将为多尺度能源管理提供新的方法论支撑,最终实现航站楼节能从技术升级向生态重构的跨越发展。

参考文献

- [1] 袁准,朱文杰,李罗新,李小聪. 机场航站楼暖通空调系统的节能施工技术应用[J]. 工程建设与设计, 2023, (18): 190-192.
- [2] 张定洋. 暖通空调辐射系统在绿色航站楼中的施工与应用[J]. 四川建筑, 2022, 42 (S1): 143-145.
- [3] 袁建伟. 乌兰察布集宁机场航站楼暖通空调设计[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40 (09): 98-101.