

机场中央空调系统变流量控制策略研究现状与趋势

岳恒刚

四川省机场集团有限公司成都天府国际机场分公司 四川 成都 610200

【摘要】：机场中央空调系统能耗占整体建筑能耗比重较大，亟需通过高效控制策略实现节能优化。变流量控制技术因具备动态响应与按需调节特性，逐渐成为提升能效的重要手段。该策略结合负荷变化、区域需求与实时数据，实现水系统与风系统的精细化管理，显著提升系统运行效率与舒适性表现。当前研究逐步向智能化、自适应与多系统协同方向发展，为推动机场绿色低碳运行、提升能源管理水平提供了关键技术路径与理论基础支持。

【关键词】：机场空调系统；变流量控制；节能优化；智能调节；系统集成

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.011

引言

机场作为典型的大型公共交通枢纽，建筑空间体量庞大，人员流动密集，对室内热环境稳定性与舒适性有着极高要求。中央空调系统作为保障热环境品质的核心环节，其能耗在机场整体运营能耗中占据显著比重。在“双碳”战略目标推动下，提升空调系统运行效率、实现精细化控制成为行业关注的重点方向。传统定流量控制方式已难以满足负荷快速变化、区域差异化调节等实际需求，导致能耗偏高与调节滞后等问题频发。变流量控制策略应运而生，凭借其精准调节能力与运行灵活性，在机场空调系统中展现出广泛应用前景，并推动空调系统向智能化、节能化方向持续发展。

1 机场中央空调系统能耗特征与运行难点分析

1.1 大型机场空调系统的构成及运行场景复杂性

机场建筑通常集候机楼、值机大厅、登机口、行李分拣区、办公区、商业区等多功能空间于一体，各区域对温湿度需求存在显著差异。中央空调系统需兼顾不同区域的舒适性要求与能效控制目标，一般由冷冻站、水系统、风系统、末端设备及控制系统构成。在运行过程中，由于航班时刻、乘客流量、气候环境等因素的持续变化，空调负荷波动频繁，昼夜差异大、冷热负荷同时存在等情况较为常见。传统的集中式控制难以快速响应局部负荷变化，易造成部分区域过冷或过热，进而导致能耗浪费。机场属于高运行等级的场所，对空调系统的可靠性、冗余性、安全性要求更高，在设计及运行调度中必须考虑多工况、多目标协调运行，增加了系统构建和运行优化的复杂度。

1.2 典型机场空调负荷变化特点与能耗结构解析

机场空调负荷具有显著的非线性变化特征，受到乘客数量、运行时间、天气条件、季节变化等多种因素共同影响，呈现出高峰短时剧烈波动与低谷长期低负荷的交替状态。在运行高峰时段，候机楼区域需求急剧上升，而夜间或凌晨则进入低

负荷运行模式。该特点对空调系统调节能力提出极高要求。能耗结构方面，冷站系统占据能源消耗的主要部分，特别是冷水机组与水泵在高负荷时段的持续运行，使得全系统电力消耗集中且高峰突出。风系统中大型送风机与回风机对电力需求亦不容忽视，尤其在大型空间如值机大厅中需维持较高送风量。由于负荷变化频繁，而控制策略响应滞后，常见现象包括局部过冷、能源冗余输出、系统频繁启停等，进一步拉高单位面积能耗。

1.3 现有定流量控制模式下存在的节能瓶颈问题

在传统定流量中央空调系统中，水泵与风机多采用恒速运行方式，系统设计以满足最大负荷为前提，缺乏动态调节能力。实际运行过程中，即便负荷降低，设备仍按照固定流量工作，导致大量能源被浪费在非必要的冷量输送过程中。末端设备控制与主机联动性差，也加剧了系统响应滞后问题。为避免管网末端出现水流不足或送风不足的风险，系统常设较高冗余裕度，进一步提升了整体运行能耗。随着建筑规模增大和系统复杂化，定流量模式在机场这类大空间、变负荷场所下暴露出调控滞后、能效低下、运维成本高等多重问题。实际数据表明，该模式下单位冷量能耗水平偏高，夏季高峰期尤其明显，难以满足绿色机场与节能减排目标要求。

2 变流量控制在机场空调中的应用现状剖析

2.1 变流量水系统与风系统的控制原理与适用条件

变流量控制技术通过调节水泵或风机转速，使流体输送能力与实际负荷匹配，从而有效降低空载运行造成的能耗浪费。在水系统中，变流量设计通常采用二次泵变频与压差旁通控制相结合的方式，依据末端阀门开度、管网压差或流量信号进行调速，实现按需供水；风系统则依靠 VAV（变风量）末端配合风机变频器，实现风量根据区域负荷波动进行动态调整。这类策略对管网设计、水力平衡、系统联控精度提出更高要求。机

场系统适宜采用变流量控制的前提包括：末端设备支持自动调节、有完整反馈信号链路、管网具备稳定调节裕度等。适用条件的判断需结合实际建筑布局、负荷变化趋势及能源计量基础设施完备性，避免因参数响应延迟或控制逻辑混乱引发系统波动。

2.2 当前工程案例中主流控制策略的实际应用分析

近年来，北京首都机场、广州白云机场、成都天府机场等大型枢纽在空调系统建设与改造中广泛引入变流量控制技术。冷冻水系统多采用变频主泵联合分区控制方式，根据不同区域实际冷量需求进行动态分配，实现多区域的精准协同调节。风系统方面，配合 VAV 末端装置与压差反馈机制，可根据实时负荷变化灵活调整送风量，显著提升运行的适应性与舒适性表现。同时，部分机场还将 BAS 系统嵌入空调控制体系，实现了负荷预测与能源调度的自动化管理。实践应用表明，该类控制策略在航站楼负荷频繁波动区域展现出良好调节性能与能效表现。不过在部分实施案例中仍存在传感器数据采集精度不高、控制算法响应滞后等问题，影响系统的稳定运行与快速调节能力，相关优化仍需进一步推进。

2.3 影响系统性能的关键技术参数与集成方式探讨

在机场中央空调变流量系统运行中，影响控制策略效果的关键技术因素主要包括：管网压差设置、控制器灵敏度、数据反馈周期、系统响应时间等参数。其中，压差控制点位置直接决定了系统调节响应的有效性；控制器的灵敏度设定过高或过低都可能导致频繁启停或调节延迟。系统集成方式方面，冷源系统、泵站、水系统、风系统间的联动协调尤为关键。通过构建多级联动控制链路，建立能耗计量与负荷预测模型间的数据通路，可有效提升策略响应效率。中央监控系统与楼宇自控平台的高度集成，有助于实现系统运行参数统一调配与故障联动控制。采用开放协议（如 BACnet 或 Modbus）进行设备信息整合，也是提升控制协同能力的重要技术保障。

3 基于数据驱动的变流量智能控制策略技术路径

3.1 多源传感器数据采集与空调负荷预测模型构建

在机场复杂空调系统中，多源传感器可实现对温度、湿度、风速、水流量、压差等关键参数的连续采集，为控制策略提供实时数据支撑。通过构建空调负荷预测模型，可以依据历史运行数据、环境气象条件与人流密度趋势，提前预测未来负荷变化趋势。该类模型通常借助时间序列分析、关联回归分析等方法进行建立，为调节系统提供先导信号，有效避免滞后响应所导致的能耗偏高与舒适度下降，提升系统前瞻调控能力。

3.2 控制算法智能化演进与机器学习在控制逻辑中的应用

传统空调控制策略多依赖工程经验设定参数，通常以固定规则应对复杂多变的运行环境，调节过程存在滞后与不精准的问题。引入机器学习算法后，系统可在大数据支撑下对运行状态进行动态分析与策略优化。通过聚类分析可对历史工况进行归类识别，提取典型运行模式；优化算法则用于生成在特定工况下的最优控制参数组合，实现自适应调节。在系统运行过程中，模型可以不断迭代学习新数据，修正策略偏差，提升应对突发负荷变化的能力。这种智能控制方式不仅提高了调节的精准性与响应速度，也使空调系统具备更强的弹性，能更高效地兼顾舒适性与节能目标。

3.3 实时监测反馈机制对系统运行稳定性的保障作用

实时监测反馈机制是实现闭环控制的关键环节，其通过不断比对实际运行状态与设定目标，动态修正控制指令。在机场空调系统中，该机制有助于在负荷突变、设备状态变化等情况下快速响应，避免系统超调或运行波动带来的舒适性影响。监测反馈环节通常集成在 BAS 系统中，与控制系统实现参数闭合，为系统稳定运行提供保障，并支持故障预警与远程调度，提高运行安全性与效率。

4 多系统协同下的节能调控机制与控制策略融合

4.1 空调系统与建筑能耗管理平台之间的融合趋势

当前大型公共建筑趋向构建统一的能耗管理平台，将中央空调系统纳入整体能源管控体系。通过与建筑能耗平台融合，可实现对冷源负荷、照明、电力等多能系统的统一调度，避免能源浪费与运行冲突。空调系统在此框架下，依据建筑整体负荷变化进行响应调节，确保在保障舒适性的同时实现综合节能效果，为机场运营管理提供更清晰、可视化的能源数据支撑。

4.2 HVAC 系统与机场运行管理系统的联动机制设计

机场运行涉及航班调度、乘客流动、值机安排、安检通道开放等多个动态因素，这些信息具有高度的时间敏感性与区域性特征。HVAC 系统若能与机场运行管理系统建立数据联动通道，便可根据航班计划、登机口启用时间、旅客密度分布等数据，实现按需调节空调运行状态。在实际应用中，通过数据共享机制，可以提前识别出即将出现人流高峰的区域，提前调整冷量分配与风量输出，确保温湿度在乘客进入前已达到目标值，避免热滞后效应影响舒适性。该联动机制不仅提升了调节的前瞻性，也减少了非必要区域的能源输出，实现资源的精准配置。借助信息系统的实时更新能力，空调策略得以灵活响应运行计划变更，保障运行的可靠性和节能效率双重目标。

4.3 分布式协同控制框架下的策略优化与实施路径

针对机场不同区域空调系统的独立性和运行差异,构建分布式协同控制框架成为实现高效管理的可行路径。各子系统依据本区域实时负荷及运行状态进行独立控制,同时通过中央平台实现策略级联与互通。在该模式下,不同区域可灵活适配不同运行策略,提升整体系统运行效率。通过设定优化目标函数与调控边界,实现全系统控制策略的协同统一,有效兼顾局部精细化管理与整体能效优化。

5 变流量控制策略未来发展趋势与关键突破方向

5.1 基于大模型的自适应控制系统构建技术趋势

AI大模型在控制系统中的应用正在逐步改变传统空调控制模式的逻辑结构。通过大规模训练与深度特征提取能力,可构建具备复杂环境理解和调节能力的自适应系统。在机场这一高复杂度场景中,大模型可融合多源数据如气象信息、人流量、负荷预测结果,对运行状态做出精准判断,并自动调整水系统和风系统的控制策略,实现精准匹配与协同响应。该趋势推动控制策略从单点优化向全系统联动过渡,使能源利用更高效、故障处理更主动。模型一旦部署,便可通过持续学习机制不断提升应对新工况的能力,适应建筑运行的长期演变需求。

5.2 低碳运行与绿色建筑评价体系对控制策略的导向作用

绿色建筑标准如LEED、绿色三星等对建筑能源绩效设定了明确评价指标,对空调控制系统提出了更高要求。在项目设计初期,控制策略需要对能耗控制、碳排放水平、系统效率等方面进行统筹规划,确保在符合节能标准的同时维持环境舒适

性。变流量控制技术在实现精细化调节的基础上,能更好地适应不同运行阶段的能耗目标。绿色评价体系还促使控制策略与建筑环境、光照条件、外气参数等要素进行协同联动,从而实现建筑整体运行的低碳化。这一发展方向不仅提高了系统节能效果,也促进了建筑运维向环保型、责任型管理模式的转变。

5.3 高维集成平台下的全生命周期智慧运维发展路径

数字化技术的发展推动空调系统的管理方式向智能化、系统化方向演进。高维集成平台通过整合空调系统的结构参数、运行状态与能耗数据,打通从建设到运营全过程的信息链路,实现对整个生命周期的统一调度与运维管理。该平台常融合建筑信息模型(BIM)、物联网终端、实时监测模块等工具,构建空调系统的数字孪生体,便于预测性维护与运行异常自动诊断。在机场等大型建筑场景中,通过平台联动可实时识别设备运行状态变化,及时进行能效评估与调控优化,使系统长期运行更加高效稳定,也为后续技术更新与扩容提供数据支持与决策依据。

6 结语

本文围绕机场中央空调系统中的变流量控制策略展开分析,从系统运行特征、关键技术路径到未来发展趋势进行了系统梳理与探讨。研究指出,变流量控制在提升能效、实现动态响应与智能调节方面具有明显优势,已成为大型机场空调系统优化的重要方向。未来,在人工智能、大数据平台与绿色建筑评价体系的持续推动下,变流量控制将朝着集成化、自适应化与平台化方向深度演进,为机场低碳运行和智能化运维提供坚实支撑与广阔空间。

参考文献:

- [1] 陈立新,黄泽宇.大型公共建筑空调系统变流量节能控制研究[J].暖通空调,2022,52(7):45-49.
- [2] 孙浩然,梁志强.基于BAS系统的机场空调智能控制优化分析[J].建筑节能,2021,49(10):83-87.
- [3] 蒋志新,徐文睿.中央空调水系统变流量运行模式的应用研究[J].建筑热能通风空调,2023,42(2):27-31.
- [4] 欧阳锦涛,韩梦莹.多功能综合体空调系统变风量控制策略研究[J].智能建筑与城市信息,2020,36(6):60-64.
- [5] 鲁建辉,崔雅琦.绿色机场建筑中中央空调系统节能控制策略探索[J].中国民航,2022,35(4):92-96.