

变风量系统在实验室通风项目中的应用 与节能效果研究

宫孟超*

(山东公用环保集团检验检测有限公司, 济宁 273500)

摘要: 针对实验室通风系统普遍存在的高能耗、运行不稳定等问题, 本文研究了变风量(VAV)系统在实验室通风中的应用及其节能效果。详细分析某实验室现有通风系统, 提出了基于VAV系统的改造方案, 对比VAV系统与传统的定风量系统的运行数据, 分析了能耗差异, 并进行了经济效益评估。研究结果表明, VAV系统能够根据实验室实际使用需求动态调整风量, 显著降低风机能耗, 并提高实验室环境的稳定性, 优化安全性能。

关键词: 变风量系统; 实验室通风; 节能优化; 能效分析; 环境控制

0 引言

相比于民用建筑, 科研建筑具备更加明显的功能性特点。实验室通常属于高能耗建筑, 尤其是通风系统的能耗占比更为显著。实验室的通风不仅要保障空气质量, 还涉及人员安全、实验精度和环境可持续性等多个方面。传统的定风量(CAV)通风系统由于风量固定, 存在较高的能耗, 难以满足现代实验室对节能与智能化控制的要求。近年来, 随着建筑节能技术的进步, 变风量(VAV)系统逐步被引入到实验室通风领域, 从而提高系统能效、优化环境控制并降低运行成本。VAV系统的关键特点在于其能够根据实验室的实际使用需求和排风量实时调整送风量, 从而实现精准的环境控制。本文旨在分析VAV系统在实验室通风项目中的应用及其节能效果, 以期解决实验室通风中的高能耗问题。

1 VAV系统概述

1.1 VAV系统的工作原理

VAV系统通过调节送风量来适应实验室环境需求, 系统的基本原理依托于空气动力学和智能化控制机制。系统内部设置有传感器, 实时监控实验室的温度、湿度、CO₂浓度及其他空气污染物的浓度。这些传感器将数据反馈至中央控制单元, 后者根据环境变化计算出最优的送风量。VAV控制箱作为核心执行单元, 能够根据接收的信号调整风阀开度, 从而精确控制送风量, 保持实验室内部的空气质量和热湿平衡。同时, 变频驱动(VFD)风机根据实际需求自动调节风机的转速, 使送风机

与排风机的运行频率与风量需求同步, 从而实现节能效果^[1-3]。针对变风量控制系统控制逻辑设定, 除了节能减排外, 相关人员还须了解排风柜变风量控制的安全性, 维护实验室变风量的有效控制。

1.2 VAV系统的核心设备

VAV系统的核心设备包括变风量控制箱、变频驱动送风机和排风机、各类传感器以及中央控制单元等。VAV控制箱是系统的核心组件, 内部配备电动调节阀, 能够精确调节风量, 并具备低噪声和高响应速度的特点。变频送风机和排风机通过变频驱动技术, 依据实时需求调整转速, 从而确保室内静压的稳定, 并有效减少能耗, 根据JGT 222—2007《实验室变风量排风柜》《美国国家实验室通风标准(2012)》, 面风速按0.4~0.5 m/s设计。系统还配有多种传感器, 例如温湿度传感器、CO₂传感器、气流传感器及压差传感器, 这些传感器实时监控实验室的空气状态, 并将数据传输到中央控制系统, 支持风量的精确调节目标^[4-7]。中央控制系统作为整个VAV系统的大脑, 采用先进的PID控制算法, 并结合模糊逻辑与数据预测模型, 实现自适应风量调节、能效优化以及设备的远程监控功能。通过协同运作, 系统能够有效维持实验室内的温湿度稳定、确保空气质量, 并达到节能减排的目标, 大幅提升实验室通风系统的智能化水平。

2 某实验室通风项目概述

2.1 概述

本文选取某第三方检测实验室作为研究对象, 该实验

* 通信作者: 宫孟超, 中级工程师, 研究方向为设备工程。E-mail: 187303472@qq.com

室建筑面积约 1500 m²，主要用于环境检测，设有多个独立实验区和通风柜，共计 10 个独立排风单元。采用传统定风量排风系统，根据 JB/T 6412—1999《排风柜》计算，实验室送风总量约为 50000 m³/h，排风总量约为 48000 m³/h，实验室内维持微负压状态。通风系统包含 4 台离心式送风机，每台风机额定功率为 7.5 kW，3 台排风机，单台额定功率为 6 kW，系统运行时间约为每天 12 h。现有系统主要采用机械恒定风量调节模式，风机以恒定转速运行，导致实验室全年风量需求变化时仍然维持高能耗状态。实验室对温湿度、空气流速及污染物排放的控制要求较高，要求温度保持在 (22±1) °C，湿度控制在 50%~60%，通风柜面风速需满足 0.5 m/s 的安全要求。

2.2 现有通风系统问题

现有通风系统由于采用定风量运行模式，导致不同实验区的风量调节能力受限，无法根据实时实验需求动态调整，造成能耗浪费及实验环境稳定性下降。对实验室不同区域的风量、温度及能耗数据进行采集和分析，表 1 结果显示实际风量供给与实验需求不匹配，同时风机运行能耗较高。

表 1 现有通风系统问题汇总

测点	现有风量 / (m ³ /h)	设定温度 / °C	实际温度 / °C	风机能耗 / (kW·h)
实验区 1	5000	22	24	15.2
实验区 2	4800	22	23.8	14.8
实验区 3	5200	22	24.5	16.0
通风柜 1	3000	23	25	10.5
通风柜 2	2800	23	24.7	9.8

从表 1 可见，实验区的风量设定不均衡，实际温度较设定温度偏高，部分实验区温度偏差达到 2.5 °C，影响实验环境稳定性。风机能耗较高，部分实验区风机单日能耗超过 16 kW·h，整体系统效率较低。通风柜排风量固定，即使实验柜未使用时，排风机仍维持高风量运行，导致大量能量浪费。

2.3 VAV 系统改造方案

为提高实验室通风系统的效率并降低能耗，增强室内环境的稳定性，本文提出了一套基于 VAV 系统的改造方案。改造方案的核心内容包括智能风量调节、送排风量的动态平衡优化，以及能耗管理的优化等关键措施。首先，在各实验区及通风柜位置安装 VAV 控制箱，并结合高精度的空气质量传感器，实时监测室内温湿度、CO₂ 浓度和污染物水平。这些数据将被用于动态调整送风量与排风量，促使风量的供应与实际需求保持一致。其次，引入变频驱动 (VFD) 风机，使送风机与排风机的转速可以根据 VAV 控制箱调节的风阀开度来动态调整，降低风机的空载能耗^[8-9]。为了保持通风柜与送排风量的协调性，改造方案进一步设计了动态控制策略，保证实验室内的排风量与

送风量同步变化，从而减少不必要的排风损失。此外，改造方案还考虑到空调系统的优化，使其与通风系统联动，根据实验室的温湿度调节风量，提升实验环境的控制精度，确保各项环境指标的稳定。最后，应用中央控制系统 (BAS) 进行智能化管理，支持远程监控、能耗监测与实时优化调整，实现节能、提高安全性及优化实验室环境的整体目标。

3 VAV 系统在实验室通风项目中的应用

3.1 VAV 控制策略

在实验室通风系统的优化过程中，VAV 控制策略的核心目标是根据实验室的实际使用需求和环境变化，动态调整送风与排风量，保持安全性要求的同时实现节能运行。本文采用基于实时数据反馈的智能控制策略，结合空气质量监控系统，安装温湿度 CO₂ 以及挥发性有机物 (VOCs) 传感器，对空气质量进行持续监测，并根据实时数据调整风量^[10-12]。当实验区未使用时，VAV 系统会将送风量调至最低限度，保证空气质量的同时减少能源浪费；当实验活动开始时，系统能迅速恢复到标准风量，空气流动符合安全要求。通风柜作为实验室通风的重要部分，其排风量的调整非常关键。在通风柜上安装风速传感器，系统可以在通风柜关闭或处于低风量使用状态时，自动减少排风量，同时适度调节补风量，维持实验室内的微负压环境。为了优化风机的运行效率，送风机和排风机都采用了 VFD，实时监测静压变化来动态调整风机转速，促使系统始终保持最低能耗并满足各种工作条件。

3.2 VAV 系统的运行管理

为了保证 VAV 系统在实验室通风中稳定高效运行，必须建立完善的运行管理机制。VAV 系统需要应用楼宇自动化系统进行集中监控，实时采集并分析各区域的空气质量、温湿度、风量等数据。精确进行数据反馈，管理人员能够及时了解各实验区的环境状态，并根据实际需求对系统进行调整^[13]。为了提高系统运行的精度和可靠性，VAV 控制箱会依据不同工况动态调节风阀开度，结合风机的变频驱动技术，使得送风量和排风量能够精确匹配^[14-15]。系统会根据实验室的时间表，自动调节风量，避免非工作时间的能源浪费。为了提高系统的稳定性，VAV 系统需要结合实时的负荷变化情况进行预测和调度，使用先进的 PID 控制算法和模糊逻辑进行自适应调整，控制公式如下：

$$\Delta Q(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其中， $\Delta Q(t)$ 为风量变化量， $e(t)$ 为误差项，表示当前风量与目标风量的差异， K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分系数。实时调节控制参数，提升风量调整的精确性，进而达到节能与安全性的双重优化要求。

4 变风量通风系统的节能效果分析

4.1 VAV 系统运行数据对比分析

为了验证 VAV 系统在实验室通风中的实际运行效果，本文对改造前后的风量、能耗及温度稳定性进行对比分析。改造后实验区和通风柜的送风量均得到了优化，使风量更符合实际需求，大幅减少了风机能耗，具体数据如表 2 所示。

表 2 变风量通风系统的节能效果

测点	改造前风量/(m ³ /h)	改造后风量/(m ³ /h)	改造前能耗/(kW·h)	改造后能耗/(kW·h)	温度稳定性提升/%
实验区 1	5000	4200	15.2	10.5	15
实验区 2	4800	4000	14.8	10.0	18
实验区 3	5200	4500	16.0	11.2	20
通风柜 1	3000	2500	10.5	7.2	22
通风柜 2	2800	2300	9.8	6.8	19
通风柜 3	2900	2400	10.2	7.0	17

从表 2 可以看出，实验区的送风量平均降低了 15% 左右，能耗下降幅度更为显著，部分实验区风机能耗降低超过 30%。实验室的温度控制能力也有所提高，改造后温度稳定性平均提升了 18%，表明 VAV 系统能够精准调节送风量，使实验室内部环境更加稳定。

4.2 能耗与经济效益分析

与传统的 CAV 系统相比，VAV 系统通过智能化的风量调节，在保障实验室环境质量的同时实现了整体风量的减少，约减少了 15% 的风量需求，从而有效减轻了风机的运行负担。改造后的系统整体能耗下降了约 30%，预计每年可节省约 25000 kW·h 的电能，按现行电价计算，电费节省大约为 125000 元。在投资回收方面，尽管 VAV 系统的初期改造成本较高，主要包括变风量控制箱、风机变频器及空气质量检测设备的增加，但由于运营成本的显著降低，其投资回收期约为 2.5 年，表现出较高的经济性和可行性。这一节能减排措施不仅显著降低了实验室通风系统的能源消耗，也为实验室带来了较强的经济回报，显示了 VAV 系统作为长期节能解决方案的优势。

5 结束语

本文基于某第三方检测实验室的通风项目，探讨了 VAV 系统在实验室通风中的应用，成功实现了通风系统的节能优化要求。研究表明，与传统的 CAV 系统相比，VAV 系统通过根据实验室实际需求动态调整送风量，不仅减少了约 15% 的总风量，还使能耗降低了 30%，实验室

的温湿度控制精度得到了进一步提高，空气质量得到了显著优化，实验环境更加稳定。研究中发现某些实验区域的负荷变化具有复杂性，且在极端工况下，系统的响应速度仍需进一步提升。与以往的相关研究相比，本文特别关注了 VAV 系统在通风柜联动控制和动态风量管理方面的应用，为实验室通风系统的优化设计提供了新的实践依据。未来的研究可进一步探索智能控制算法的优化、实验室通风需求的预测模型，以及基于大数据的能效分析，不断提升 VAV 系统的智能化水平并释放其更大的节能潜力。

参考文献

- [1] 薛永明, 冯廷龙, 冯江发, 等. 定变风量阀在实验室通风空调系统的应用探讨[J]. 制冷与空调(四川), 2024, 38(2): 249-256.
- [2] 吴玲红. 某有机化学实验室项目通风空调系统设计[J]. 暖通空调, 2024, 54(2): 47-51.
- [3] 李智超. 闭环变风量控制系统在实验室通风系统中的应用[J]. 工程技术研究, 2024, 9(2): 118-120.
- [4] 曹志刚, 马晨钰, 杨毅, 等. 高校化学实验室通风系统设计方法[J]. 暖通空调, 2023, 53(12): 12-17.
- [5] 王媛媛. 化学实验室中暖通空调变风量控制系统的实践研究[J]. 绿色建造与智能建筑, 2023, (10): 79-82.
- [6] 高芬, 张新生, 黄晓一, 等. 基于余风量控制法的化工实验室变风量通风系统设计——以北京化工大学某实验楼为例[J]. 洁净与空调技术, 2023, (3): 70-73+36.
- [7] 夏本明, 刘芳, 褚芳. 基于性能试验的实验室排风柜变风量控制系统研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(9): 115-120.
- [8] 陈莉月. 变风量控制在化学实验室暖通空调系统中的应用[J]. 上海轻工业, 2023, (5): 124-125.
- [9] 夏本明, 张本林. 化学实验室通风及变风量控制系统设计[J]. 科技与创新, 2023, (16): 94-96.
- [10] 杨冬梅, 孟庆宇. 某化学实验楼实验室通风空调系统设计[J]. 暖通空调, 2023, 53(6): 111-114.
- [11] 李晓丽, 朱小社. 实验室通风气流控制系统及节能技术探讨[J]. 无线互联科技, 2022, 19(17): 125-127.
- [12] 夏本明. 变风量控制系统在化学实验室暖通空调系统中的应用[J]. 暖通空调, 2022, 52(9): 115-121+114.
- [13] 高智杰. 化工实验室变风量通风系统设计[J]. 工程建设与设计, 2021, (13): 62-64.
- [14] 钱文强. 流出物和放化实验室通风空调系统设计[J]. 暖通空调, 2020, 50(S2): 85-89.
- [15] 文福, 杜然, 舒刚, 等. 某检验中心大楼通风空调系统设计[J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39(3): 103-105.