

实验室暖通空调设计在科研建筑中的关键技术与应用

倪杰

广州澳企实验室技术股份有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2025080004

摘 要 : 介绍科研建筑实验室暖通空调设计, 包括特殊设计标准, 如温湿度精度、换气次数、压差梯度等。阐述 VAV 系统等关键技术及 BIM 协同平台作用。还涉及全生命周期质量管理、物联网监测平台、智能化控制与大数据运维分析等, 以及多种节能技术和案例挑战。

关 键 词 : 科研建筑; 暖通空调设计; 实验室

Key Technologies and Applications of Laboratory HVAC Design in Research Buildings

Ni Jie

Guangzhou Aoqi Laboratory Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This paper introduces HVAC design for research building laboratories, covering specialized design standards such as temperature-humidity precision, air change rates, and pressure differential gradients. It elaborates on critical technologies including VAV systems and the role of BIM collaborative platforms. The study also addresses whole-lifecycle quality management, IoT monitoring platforms, intelligent controls, big-data operational analytics, alongside various energy-saving techniques and case-specific challenges.

Keywords : research buildings; HVAC design; laboratories

引言

科研建筑中的实验室暖通空调设计是保障科研活动顺利开展的关键因素。随着科技发展和相关政策的推动, 如《绿色建筑创建行动方案》(2020 年) 强调建筑的绿色节能要求, 其设计面临更高要求和挑战。实验室对环境控制有特殊要求, 需依据相关规范, 在温湿度精度、换气次数、压差梯度等方面精准设计。同时, 涉及多种核心技术, 如变风量系统、智能气流组织算法等。还需构建 BIM 协同平台提高设计效率, 加强全生命周期质量管理, 并应用智能化控制技术和大数据运维分析模型等, 以提升科研建筑环境品质和能源利用效率。

一、实验室暖通空调设计关键技术分析

(一) 实验室环境控制特殊性设计标准

科研建筑中的实验室对环境控制有特殊要求, 其设计标准与常规建筑不同。参考 ASHRAE 和 GB50736 规范, 在温湿度精度方面, 实验室通常要求更严格的控制范围。例如某些高精度实验要求温度波动控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内, 相对湿度在 $\pm 3\%$ 以内^[1]。换气次数上, 实验室为保证空气质量和实验安全, 一般需要较高的换气频率。如化学实验室可能要求每小时换气 10 - 15 次, 以有效排出有害气体。压差梯度也是关键指标, 不同功能区区域间需保持合理的压差, 防止污染物流窜。比如洁净实验室与相邻区域可能要求保持 5 - 10Pa 的正压差^[1]。这些特殊的设计标准是实验室暖通空调设计的重要依据。

(二) 先进通风控制技术体系

变风量 (VAV) 系统在生物安全实验室中具有重要应用。它

能够根据实验室的实际需求, 精确调节送风量, 有效维持室内的压力平衡和空气质量。通过合理设置风量传感器和控制器, 实现对通风量的动态调控, 确保实验环境的稳定性^[2]。智能气流组织算法也是关键技术之一。该算法可依据实验室的布局和设备分布, 优化气流路径, 避免交叉污染, 使清洁空气能够有效覆盖实验区域, 同时将污染空气及时排出。压差联动控制则是通过监测不同区域之间的压力差, 自动调节通风设备的运行, 保证实验室内部的压力梯度符合生物安全要求, 防止有害气体的泄漏和外界污染的侵入。基于 REVIT 的 CFD 仿真验证方法, 能够在设计阶段对通风系统的性能进行模拟评估, 提前发现潜在问题并加以优化。

二、项目设计管理中的技术统筹策略

(一) 跨专业协同设计机制

构建建筑、结构、电气与暖通专业的 BIM 协同平台, 可实现

各专业信息的集成与共享，提高设计效率和质量。在该平台上，各专业设计师能够实时获取其他专业的设计信息，及时发现并解决设计冲突。设计负责人在跨专业协同设计中起着关键作用，对于工艺设备排风量计算、消声减震节点处理等方面的冲突协调至关重要。在工艺设备排风量计算方面，需综合考虑设备的功率、运行时间、散热特性等因素，确保计算结果的准确性。同时，要与建筑、电气等专业进行沟通协调，避免因排风量过大或过小而影响其他专业的设计。在消声减震节点处理方面，要根据设备的振动频率、噪声水平等因素，选择合适的减震器和消声器，并与结构专业协同设计，确保节点的可靠性和稳定性。通过构建 BIM 协同平台和加强设计负责人的协调作用，能够有效提高实验室暖通空调设计在科研建筑中的应用水平^[3]。

（二）全生命周期质量管理

在实验室暖通空调设计的全生命周期质量管理中，从方案可行性研究到竣工验收需进行全过程管控。首先是设计方案专家论证，邀请行业内专家对设计方案的科学性、合理性及可行性进行深入探讨，确保其满足科研建筑的特殊需求^[4]。关键设备选型评审也至关重要，要综合考虑设备的性能、质量、能耗等多方面因素，选择最适合的设备。在系统调试验收阶段，明确严格的验收标准，对系统的运行参数、稳定性、舒适性等进行全面检测，保证暖通空调系统能够高效、稳定地运行，为科研工作提供良好的环境支持。

三、科研建筑暖通系统技术创新体系

（一）智能化控制技术应用

1. 物联网监测平台架构

科研建筑中，构建有效的物联网监测平台架构对暖通系统的智能化控制至关重要。可搭建包含温湿度传感器网络、DDC 控制器和中央监控系统的三级智能控制系统。温湿度传感器网络能实时采集环境数据，为后续控制提供依据^[5]。DDC 控制器可根据传感器传来的数据进行初步分析和调控。中央监控系统则对整个暖通系统进行全面监控和管理，实现各部分的协同工作。以某国家重点实验室为例，其系统集成方案通过合理配置各级设备，优化了暖通系统的运行，提高了能源利用效率，同时也保证了实验室环境的稳定性和舒适性，满足了科研工作的需求。

2. 大数据运维分析模型

随着科研建筑对暖通系统要求的提高，智能化控制技术与大数据运维分析模型的应用至关重要。在智能化控制技术应用方面，通过传感器网络实时监测暖通设备的运行参数，如温度、湿度、压力等，实现对系统的精准控制^[6]。同时，利用机器学习算法开发故障预警模块，能够提前发现设备潜在故障，提高系统的可靠性。在大数据运维分析模型构建中，建立设备能效比（EER）动态评估体系，收集和分析大量的设备运行数据，包括能耗、性能等指标，为优化系统运行提供决策依据，实现科研建筑暖通系统的高效节能运行。

（二）绿色节能技术集成

1. 能量回收系统优化设计

对于高能耗的直流式实验室，转轮热回收与溶液除湿复合系统是一种有效的解决方案。转轮热回收系统能够有效回收排风中的热量，降低新风处理的能耗。溶液除湿系统则可以对空气进行

除湿处理，提高室内的舒适度。通过将两者结合，可以充分发挥各自的优势，进一步提高能源利用效率。在不同气候区，该复合系统的适用性有所不同。例如，在潮湿的气候区，溶液除湿的作用更为突出，可以有效去除空气中的大量水分；而在寒冷的气候区，转轮热回收系统则能更好地回收热量，减少供暖能耗。因此，需要根据不同气候区的特点，制定相应的改造方案，以实现最佳的节能效果^[7]。

2. 可再生能源耦合利用

光伏驱动溶液调湿新风机组在化学实验室的应用具有重要意义。该机组通过利用可再生能源光伏，实现对空气的调湿处理。其工作原理基于溶液对水分的吸收和释放特性，在光伏能源的驱动下，溶液循环工作，有效调节室内湿度。通过建立 TRNSYS 仿真模型，可以对该系统的性能进行准确评估。模拟结果显示，该系统能够显著提升系统的性能系数（COP）^[8]。这意味着在相同的能量输入下，系统能够实现更多的除湿量，从而提高能源利用率。在化学实验室中，精确的湿度控制对于实验结果的准确性至关重要，该机组的应用不仅能够满足实验室对湿度的严格要求，还能通过可再生能源的利用，实现绿色节能，符合科研建筑暖通系统技术创新体系中绿色节能技术集成以及可再生能源耦合利用的要求。

四、典型工程应用中的挑战与对策

（一）特殊实验室环境控制难点

1. 高洁净度实验室动态平衡控制

在某芯片洁净厂房案例中，温湿度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 精度维持面临诸多挑战。首先是环境干扰因素复杂，如人员流动、设备散热等，这要求暖通空调系统具备高精度的传感器和智能控制系统来实时监测和调节。其次，FFU 风机过滤单元阵列控制也存在难点，不同区域的洁净度要求差异大，需要精确调整 FFU 的运行参数以实现动态平衡。针对这些问题，采用先进的温湿度传感器和自适应控制算法，可有效提高温湿度控制精度^[9]。同时，通过分区控制和智能调节 FFU 的风速和启停时间，能够满足不同区域的洁净度要求，实现高洁净度实验室的动态平衡控制。

2. 生物安全实验室负压保障

三级生物安全实验室对环境控制要求极高，其中负压保障是关键。维持合理的压差梯度至关重要，它能有效防止有害生物因子的泄漏。双风机冗余系统可作为一种保障措施，当一台风机出现故障时，另一台能及时接替工作，确保通风系统的正常运行^[10]。应急泄压装置的合理配置也不可或缺，它能在紧急情况下迅速平衡压力，避免因压力异常导致的安全事故。在设计过程中，需根据实验室的具体规模、实验类型以及可能面临的风险等因素，科学确定双风机冗余系统的参数以及应急泄压装置的位置和容量，从而实现可靠的负压保障，为实验室的安全运行提供有力支持。

（二）复杂工艺需求应对策略

1. 化学实验室废气处理系统

在化学实验室废气处理系统中，两级喷淋 + 活性炭吸附 + 催

化燃烧组合工艺在 VOCs 处理的工程应用面临诸多挑战。从投资成本来看,设备采购、安装以及场地改造等都需要大量资金投入。例如,高质量的喷淋设备和活性炭吸附装置价格不菲。运维成本方面,定期更换活性炭、对催化燃烧设备进行维护以及监测系统运行状况等都增加了成本。同时,不同方案的投资运维成本差异较大,需要综合考虑废气成分、处理量等因素。为应对这些挑战,需优化工艺设计,提高设备利用率,降低设备闲置率。并且要建立完善的成本核算体系,根据实验室实际需求和预算,选择最适合的处理方案,确保在满足废气处理要求的同时,实现成本的有效控制。

2. 动物实验室异味控制技术

在动物实验室异味控制技术方面,开发光催化氧化与生物滤床联合处理系统是一种有效的方法。以某 SPF 级动物房为例,该系统展现出了良好的异味处理能力,其对 NH₃ 的去除效率能够达到 95% 以上。光催化氧化过程中,利用特定的催化剂在光照条件下产生强氧化性的自由基,这些自由基能够将异味分子分解为无害的小分子物质。生物滤床则通过微生物的代谢作用,进一步降解异味物质。两者联合,优势互补,能够高效处理动物实验室产生的异味,为动物实验提供一个良好的环境,同时也满足了科研建筑中对实验室暖通空调设计在异味控制方面的关键技术要求。

(三) 既有实验室改造技术路径

1. 老旧系统能效提升方案

某高校实验室改造项目面临诸多挑战。在既有实验室改造技术路径方面,采用分区独立控制改造技术,可根据不同区域的需求精准调控环境参数,提高能源利用效率。同时,管道水力平衡重构技术措施也至关重要,能有效解决原有管道系统水力失衡问题,确保各区域空调系统稳定运行。在老旧系统能效提升方案

上,通过优化设备选型和运行策略,如选用高效节能的暖通空调设备,并合理设置运行参数,可降低能耗。此外,加强系统的智能化控制,实现根据室内外环境实时变化自动调节,进一步提升能效,保障实验室环境满足科研需求。

2. 智能化升级实施路径

在既有实验室改造及智能化升级过程中面临诸多挑战。设备兼容性是关键问题之一,不同品牌和型号的暖通空调设备可能无法直接实现物联。针对此,制定基于 MODBUS 协议的设备物联方案,该协议具有开放性和通用性,能有效解决设备通信问题。同时,构建数字孪生系统也是一大挑战,需要整合大量设备数据和运行参数。为实现远程运维管理,需利用先进的传感器技术和数据采集系统,准确获取设备实时数据,并通过云计算和大数据分析技术,对数据进行处理和分析,从而实现对实验室暖通空调系统的智能化管理和优化控制。

五、总结

科研建筑中的实验室暖通空调设计至关重要。核心技术体系涵盖了多方面,包括合理的通风系统设计以保障室内空气质量,精确的温度和湿度控制技术满足实验环境要求等。同时,有效的管理方法确保系统稳定运行。未来发展方向明确,智能控制系统优化可提升运行效率和精准度,新型节能技术研发有助于降低能耗,符合可持续发展理念。全生命周期碳足迹管理则从更宏观的角度关注环境影响。这些发展方向将为实验室暖通空调设计提供新的思路和方法,进一步提高科研建筑的环境品质和能源利用效率,为科研活动的顺利开展提供有力保障。

参考文献

[1] 李沛泽. 机构与类型视野下南京民国科研建筑研究 [D]. 东南大学, 2022.

[2] 朴成哲. 基于天然采光评价的广州地区高校科研建筑实验单元设计研究 [D]. 华南理工大学, 2022.

[3] 沈雅忱. 面向建筑暖通空调空气处理单元的故障检测与诊断方法 [D]. 苏州科技大学, 2022.

[4] 孙毅. 面向智慧商业建筑的暖通空调系统控制方法研究 [D]. 南京邮电大学, 2021.

[5] 罗茜. 高校科研建筑非正式学习空间室内设计研究 —— 以华中大清洁能源大楼为例 [D]. 华中科技大学, 2022.

[6] 李静. 论绿色建筑在暖通空调中的应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2016(12): 00054-00054.

[7] 钟雨帆. BIM 技术在暖通空调设计中的应用初探 [J]. 江苏建材, 2022, (04): 35-37.

[8] 曹洪栋. 绿色建筑暖通空调设计技术 [J]. 上海轻工业, 2024(4): 173-175.

[9] 于欣. 节能技术在暖通空调设计中的应用探讨 [J]. 建筑与装饰, 2023(1): 22-24.

[10] 何海亮, 陈晓春, 潘云钢, 李嘉. 中国建筑设计研究院创新科研示范楼暖通空调设计新技术应用 [J]. 暖通空调, 2018, 48(10): 34-37