

实验室气流组织设计与控制方法研究

郭亚南

中电系统建设工程有限公司, 北京市丰台区, 100071;

摘要: 研究围绕实验室气流组织设计与控制展开, 明确气流组织设计需遵循安全优先、兼顾能效与适配性原则, 通过量化分析确定污染特性并构建分级防护体系, 同时注重设备选型与空间布局合理性以强化气流均匀性。在此基础上, 提出压差梯度控制、风量动态适配控制及智能传感联动控制三种核心方法, 阐述各方法的设计要点、实施流程及设备配置要求, 通过数值模拟、实时监测与动态调节等技术手段, 实现污染物定向控制、能耗优化与系统稳定运行, 为实验室气流系统的科学设计与高效管控提供技术支持。

关键词: 实验室; 气流组织; 设计; 控制方法

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.073

引言

实验室作为污染物产生频繁的特殊场所, 气流状态直接关乎人员安全与实验可靠性, 当前部分实验室存在气流分布不均、污染物扩散风险高、能耗过大及控制精度不足等问题。基于这一现状, 亟需优化气流组织设计与控制策略, 兼顾安全防护与能源高效利用。研究以解决上述问题为目标, 结合量化分析、数值模拟与智能传感等技术, 从气流组织设计原则与布局方法入手, 构建多维度气流控制体系, 实现对实验室气流的精准调控, 提升实验室运行的安全性与经济性。

1 实验室气流组织设计

1.1 安全优先, 兼顾能效与适配性

实验室气流组织设计需奉行安全优先、兼顾能效与适配性的基本原则, 在设计环节应通过量化分析明确实验过程中可能产生的有毒有害气体、易燃易爆物质及生物污染物的种类、浓度与扩散特性, 进而确定不同区域的安全防护等级需求并据此构建分级防护体系。对于化学合成实验室、生物安全实验室等高危风险区域, 应采用独立排风系统与负压环境设计, 保证污染物定向流动并经高效过滤后排放; 针对中低风险区域, 则需结合局部排风装置与全面通风方式控制污染物浓度。此外还应设置压力梯度监测装置实时反馈气流状态, 确保防护体系动态适配实验操作需求。

在筑牢安全防护基础后, 需通过动态气流调控策略实现能效最大化, 具体而言要在排风系统中集成变风量控制技术, 根据实验操作状态实时调节排风量以规避固定风量模式下的房间压力不平衡以及能源浪费, 同时在送风系统中采用变频风机与温湿度传感器联动机制, 依据室内温度、湿度变化调整送风状态, 减少因过度制冷制热引发的能耗损耗, 在此过程中还需在排风管道内设

置热回收装置, 回收排放气体中的余热余冷用于预热或预冷新风, 进一步提升能源利用效率。

1.2 合理选型与布局, 强化气流均匀性

在实验室气流组织设计工作中, 设计师需注重设备选型与空间布局的合理性, 以此强化气流分布的均匀性。

1.2.1 选型

在排风设备选型阶段, 设计师应通过数值模拟分析实验区域污染物扩散路径与浓度分布规律, 据此确定排风机的排风量、变频参数及气流组织形式, 确保排风设备可精准捕获污染物并规避气流短路现象; 送风设备选型则需结合实验室负荷与补偿实验室排风和保持空调区域空气压力之和, 选用具备均匀送风能力的设备, 同时通过计算流体力学模拟优化送风速度梯度, 使送风气流在抵达工作区前充分混合, 降低温度与速度的局部差异。在此过程中要建立设备性能参数与气流均匀性的量化关联模型, 通过参数敏感性分析筛选关键选型指标, 继而选择合适的送风设备。

1.2.2 空间布局

完成设备选型后, 在实验室空间布局方面, 设计师需根据实验流程与污染风险等级将实验室划分为清洁区、缓冲区与污染区, 在各区域间设置气密隔离装置并通过压力梯度控制引导气流定向流动, 避免交叉污染发生。设备布局层面, 应将实验室内各种设备集中布置于实验室内有利于气流由污染风险低的区域向污染风险高的区域流动, 减少对其他区域气流的干扰, 根据实验室类型合理布置送排风口位置, 如生物安全实验室气流由污染概率小区域流向污染概率大区域的定向气流, 最大限度减少室内回流与涡流, 提升整体通风效率; 具备条件时可通过 CFD 模拟技术验证布局方案合理性, 通过调整设备位置与送排风口参数优化气流布局, 保障整

个设计过程可追溯、可复现。

2 实验室气流控制方法

2.1 压差梯度控制法

2.1.1 初步设计

压差梯度控制法的核心是通过精准设定不同功能区域的压力差值形成定向气流,从而防止污染物扩散。规划阶段需结合实验室类型、污染风险等级及气流组织形式量化设计压力参数,首先明确各区域功能定位,依据相关标准确定基础压差值,例如清洁区相对大气压设定为 10Pa ,污染区相对大气压设定为 -30Pa ,随后通过数值模拟技术分析不同压差组合下的气流分布规律,优化压差梯度曲线,确保气流从高清洁度区域向低清洁度区域单向流动,且相邻区域压差梯度不小于 5Pa 以避免气流倒灌。设计完成后需编制压差梯度设计说明书,明确各区域压力设定值、允许波动范围及监测点布局。

以生物安全实验室为例,工作人员首先明确实验室各功能区域的具体定位,将实验室划分为辅助工作区和防护区,依据19489-2008《生物安全实验室通用要求》确定各区域基础压差值,以BSL-3实验室为例,非径空气传播致病因子的实验室核心工作间的气压与室外大气压的压差值应不小于 30Pa ,与相邻区域的压差应不小于 10Pa ,杜绝气流倒灌风险。

2.1.2 实时监控与动态调节

压差梯度的实现需依赖硬件系统完成压力参数的实时监控与动态调节,监测环节需在关键区域安装高精度压差传感器,通过有线或无线方式将数据传输至中央控制系统;执行环节则配置变频风机与电动调节阀,根据压差反馈信号自动调节送风量与排风量,确保压差稳定在设定值范围内。针对冗余环境设计,需为关键传感器与执行机构配置备用设备,在主设备故障时自动切换以保障系统连续运行;调试过程中应先进行单点调试再开展多点联动调试,最终通过二十四小时连续运行测试确认系统可靠性,调试完成后编制硬件配置清单与调试报告。

例如,工作人员在12个压力监测点均安装精度为 0.1Pa 的高精度压差传感器,传感器通过有线以太网方式将实时压力数据传输至中央控制系统,系统界面实时显示各监测点压力数值及变化曲线。送风系统配置变频离心风机,排风系统在各区域排风口均安装变风量调节阀,中央控制系统根据压差传感器反馈信号自动调节变频风机转速与变风量调节阀开度。

2.2 风量动态适配控制法

风量动态适配控制强调依据实验室实时工况调整

送排风量,相关单位需建立风量需求动态模型,结合实验室操作类型、设备运行状态、实验室工作模式等多维变量,通过数学算法构建各变量与所需风量的量化关系。实践环节需在实验室关键区域部署多参数传感器网络,实时采集上述变量数据并传输至中央控制系统,系统结合动态模型及时计算当前工况下的最优送排风量,为后续调节提供精准依据;该模型需定期通过历史数据回溯与现场实测进行校准,确保计算结果与实际需求偏差不超过5%。

风量动态适配的实现依赖具备快速响应与精准调控能力的设备,设备选型与协同控制至关重要,送风系统应选用转速可随控制信号无级调节的变频风机,调节范围需覆盖实验室最大与最小风量需求;排风系统则配置开度可精确控制至0.1%的变风量调节阀,以匹配房间排风口与实验室内部局部排风设备的风量变化。操作环节需将变频风机与变风量调节阀纳入同一控制系统,通过PID控制算法实现送排风量的联动调节,当排风量增加时系统自动提高送风机频率以维持室内正负压要求,当排风量减少时系统同步降低送风机频率维持室内正负压要求以及避免能源浪费。

例如,相关单位针对化学分析实验室的实操场景,建立风量需求动态模型,模型纳入的变量包括原子吸收分光光度计、气相色谱仪等设备的运行台数与功率,实验室温度、湿度及室外大气压。工作人员通过现场实测与数据分析,构建各变量与所需风量的量化关系,例如单台原子吸收分光光度计运行时需增加 $150\text{m}^3/\text{h}$ 排风量。

工作人员在实验室试剂配制区、样品前处理区、仪器分析区等关键区域部署20个多参数传感器,传感器实时采集设备运行状态、环境参数等数据并传输至中央控制系统。系统调用风量需求动态模型,根据实时采集的数据计算当前工况下的最优送排风量,例如当3台气相色谱仪同时运行时,系统计算得出送风量需维持在 $1200\text{m}^3/\text{h}$ 、排风量维持在 $1300\text{m}^3/\text{h}$ 。工作人员每季度通过历史运行数据回溯与现场实测数据对比,对模型参数进行校准,确保计算结果与实际风量需求的偏差始终控制在5%以内。

2.3 智能传感联动控制法

2.3.1 多级控制逻辑

智能传感联动控制涵盖技术感知层、执行层与分析层多个层级,工作人员需基于引进的智能传感器系统构建联动控制逻辑,实现对实验室气流的精细化控制。具体而言需开发规则引擎,建立传感器数据与执行机构的智能联动机制,该规则引擎应基于实验室气流控制目标

构建多级控制逻辑。第一级为安全控制逻辑,当污染物浓度超标或压差梯度失衡时立即启动紧急排风模式,优先保障人员安全;第二级为节能控制逻辑,根据人员活动强度调整送风量并调控设备运行状态,动态优化风量以降低能耗;第三级为舒适性控制逻辑,通过调节送风温度与湿度,维持工作区域温湿度在设定范围内。规则引擎需具备动态优化能力,要求定期分析历史控制数据,通过机器学习算法优化规则参数,提升控制策略的适应性与精准性,建议优化周期为每月一次。

例如,工作人员基于引进的智能传感器系统,为化学分析实验室开发规则引擎,建立传感器数据与执行机构的智能联动机制,构建三级控制逻辑。第一级安全控制逻辑关联实验室的有机溶剂浓度传感器、有毒气体传感器及压差传感器,当传感器检测到污染气体浓度超标或压差梯度失衡时,系统立即启动紧急排风模式,将所有排风设备运行功率提升至100%,同时关闭实验室与外界连通的门窗,优先保障实验人员安全;第二级节能控制逻辑关联人员存在传感器,当检测到某区域无人员活动持续30分钟后,系统调整为值班模式,自动将该区域送风量降低,在不影响实验设备运转和房间环境要求情况,降低对应区域排风设备运行风量;第三级舒适性控制逻辑关联温度传感器与湿度传感器,通过调节空调送风温度与加湿器运行状态,维持工作区域温度在22-26℃、相对湿度在30%-70%范围内。

2.3.2 引进智能传感联动控制体系

此外,需构建基于可靠性设计与故障自恢复机制的智能传感联动控制体系,可靠性设计需从硬件与软件两个层面落实。

(1) 硬件

硬件层面为关键传感器与执行机构配置备用设备,主设备通过双链路通信接入控制系统,主设备故障时自动切换至备用设备,切换时间控制在五百毫秒以内。

例如,硬件层面,工作人员为实验室核心区域的10个关键传感器配置备用传感器,主传感器与备用传感器同时采集数据并相互校验,当主传感器数据异常时立即切换至备用传感器;2台主变频风机与2台备用变频风机通过双链路通信接入中央控制系统,主风机出现故障时系统在500毫秒内自动切换至备用风机,确保送风不中断。执行机构方面,所有电动调节阀均采用双电源供电,避免因单一电源故障导致调节失效。

(2) 软件

软件层面开发控制逻辑冗余模块,当规则引擎因数据异常或算法错误无法执行时启动备用控制策略,确保系统不中断运行。故障自恢复机制需包含故障诊断、定位与修复三个环节,诊断环节通过分析传感器数据与执行机构反馈信号识别故障类型,定位环节利用网络拓扑分析确定故障设备位置,修复环节则根据故障等级采取不同措施进行维修优化,并记录故障日志供后续分析使用。

例如,工作人员开发控制逻辑冗余模块,当规则引擎因传感器数据异常或算法错误无法正常执行时,冗余模块立即启动预设的备用控制策略,维持基础的送排风与温湿度控制功能。系统内置故障自恢复机制,诊断环节通过对比传感器采集数据与历史正常数据的偏差、分析执行机构反馈信号,识别传感器故障、执行机构卡滞等故障类型;定位环节利用网络拓扑分析确定故障设备的具体位置并在系统界面标注;修复环节根据故障等级处理,轻微故障通过远程调节参数修复,严重故障则自动发送报警信号至工作人员手机终端,同时记录故障发生时间、类型、处理过程等信息至故障日志。

3 结束语

总体来说,实验室气流组织设计与控制的核心要义在于构建安全防护与能效优化的协同机制。气流组织的分级设计与科学布局为污染物控制奠定基础,压差梯度、风量动态适配及智能传感联动三种控制方法形成互补体系,通过技术协同实现气流状态的精准调控。研究揭示了量化分析与动态调节在气流管控中的关键作用,其核心见解为实验室气流系统设计提供了系统性思路。后续可进一步探索智能算法与气流控制的深度融合,推动实验室气流管控向更高效、更智能的方向发展,为实验室安全运行与绿色发展提供更全面的学术支撑。

参考文献

- [1] 陈涛,张超,周中林,等. 酿酒实验室排风柜气流组织仿真与优化设计[J]. 洁净与空调技术, 2025, (01): 52-56.
- [2] 刘文胜. P3 实验室净化空调、通风系统设计实践[J]. 中国医院建筑与装备, 2024, 25(10): 92-97.
- [3] 杨鹏. 高级别生物安全实验室空调系统设计要点[J]. 制冷与空调, 2024, 24(04): 52-57.
- [4] 丁勇, 胡玉婷, 胡熠. 基于既有公共建筑室内热环境改善的气流组织优化研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(06): 150-155+170. DOI: 10. 19991/j. hvac1971. 2023. 06. 27.