

暖通施工遗留问题对后期运行的影响及整改方案

袁 哲

中国电子系统工程第二建设有限公司 江苏 无锡 214135

摘 要：洁净厂房暖通空调系统是保障生产环境洁净度、温湿度和压差控制的核心设施，施工阶段的预留预埋、风管制作安装、设备就位及调试等环节的遗留问题，往往在系统投入运行后方才充分暴露，导致洁净度不达标、温湿度失控、运行能耗攀升等严重后果。本文从洁净机电工程的特殊要求出发，系统梳理了施工阶段常见的六类遗留问题，分析了其对后期洁净运行的具体影响机制，并提出了分级整改技术方案。施工阶段的过程管控与竣工前的性能验证同等重要，早期识别与分类处置是降低整改成本、保障洁净环境的关键路径。

关键词：洁净机电；暖通施工；遗留问题；洁净度；整改方案；调试

引言：洁净厂房广泛应用于半导体、生物制药、精密制造和医疗卫生等领域，其暖通空调系统不仅要满足常规的温湿度控制要求，更需承担空气净化、压差梯度维持和微粒污染物排除等关键功能。然而，洁净机电工程具有系统复杂、交叉作业多、洁净度要求高、调试周期长等特点，施工过程中若管控不到位，极易留下隐蔽性质量问题。本文聚焦洁净机电方向，分析暖通施工遗留问题对洁净环境控制的影响机理，并在此基础上提出分阶段、可操作的整改技术方案，为洁净厂房暖通工程的施工质量控制与运行维护提供参考。

1 洁净机电工程的特殊性与施工质量控制难点

1.1 洁净暖通系统的基本构成与功能要求

洁净厂房暖通空调系统与普通舒适性空调存在本质区别，其核心任务是为生产工艺提供受控的洁净环境。系统由新风处理机组空调箱（含初效、中效、表冷/加热段、加湿段、风机段）、送回风管道、末端高效过滤器（HEPA/ULPA）、排风系统及自控系统组成。不同洁净等级对换气次数、截面风速和压差梯度均有量化要求——ISO 7 级（十万级）换气次数不低于 15 次/h，ISO 5 级（百级）需采用单向流、截面风速不低于 0.45m/s。多数电子厂房要求温度控制在 $(22\pm1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(45\pm5)\%$ 。这些功能的实现高度依赖于施工安装精度与系统调试完整性，任一环节的疏漏都可能导致环境参数超标。

1.2 洁净机电施工的组织与技术难点

洁净机电施工面临三重技术难点。其一，多专业深度交叉——风管、水管、电管、工艺管线在有限吊顶空间内密集排布，任一专业偏差都会挤占其他专业空间，

导致保温层压缩或风管变形。其二，洁净度控制的即时性约束——风管安装前须进行机械清洗和酒精擦拭，所有敞口须每天收工时封堵，对工序衔接要求严格^[1]。其三，系统联调的周期性——风量平衡测试、高效过滤器检漏、压差设定、自控逻辑验证环环相扣，调试周期常被压缩导致系统未经充分验证即投入运行。

1.3 施工遗留问题的典型特征与分类框架

洁净暖通施工遗留问题具有隐蔽性、累积性和延迟暴露性三大特征。隐蔽性指问题被吊顶或保温层覆盖，竣工验收难以发现；累积性指多个微小偏差叠加后效应放大，综合作用导致系统不达标；延迟暴露性指问题在运行初期被富余容量掩盖，随设备性能衰减才逐步显现。基于工程实践，遗留问题可归纳为六类：风管系统类（漏风、清洁度不足）、设备安装类（基础减振不良、接管应力）、自控仪表类（传感器位置不当）、过滤器安装类（边框密封不严）、压差控制类（房间气密性不足）及调试类（风量不平衡）。前五类问题最终均会集中反映在调试环节，导致系统带病移交。

2 施工遗留问题对后期洁净运行的影响

2.1 风管系统施工缺陷对洁净度与能耗的双重影响

风管漏风是最突出的问题。规范要求高压系统漏风率不超过 2%，但咬口不严密或法兰垫片老化可使实际漏风率达 5%~10%。漏风导致未经高效过滤器的渗风直接污染洁净环境，漏风率每增加 1%，洁净室含尘浓度约上升 8%~12%；风量损失迫使风机提高转速，漏风率从 2% 升至 5% 时风机能耗增加约 10%~15%；漏风点周围保温层因冷热空气交汇而结露，导致保温失效、吊顶渗水。风管内壁清洁度不足同样危害严重——

铁屑如未彻底清除,运行后随气流冲击产品表面,直接导致良率下降。

2.2 设备安装不当对系统可靠性与温湿度控制的影响

空调箱基础减振不良导致振动传递至洁净室,对于光刻、电子显微镜等对振动敏感的工艺,微振动超标将直接导致设备误动作,振动还会加速过滤器密封失效。接管应力问题在冬季尤为突出——管道热胀冷缩产生的应力传递至表冷器铜管束,可致铜管变形甚至拉裂。冷凝水排水管道坡度不足导致积水满溢,水沿风管渗入吊顶或生产区域,是洁净厂房常见质量事故之一。加湿器安装位置距下游部件过近,空气未充分汽化即接触过滤器,导致过滤器受潮变形^[2]。

2.3 自控系统与传感器施工偏差对运行稳定性的影响

温湿度传感器若安装在空调箱出口而非回风位置,所测数据无法代表房间真实状态,测量值可能偏高或偏低 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,导致房间温度持续偏离设计值达 $(22\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 以上。压差传感器取压口若安装在气流死区,测值无法反映真实压差梯度;量程选型偏大则小量程区间分辨率不足,系统无法有效响应。风阀执行器连杆长度调整不当,实际开度与反馈信号偏差达 $20\%\sim 30\%$,风量平衡失控。

2.4 洁净度检测与调试遗留问题的延迟暴露效应

高效过滤器边框密封不严是典型隐蔽性缺陷——检漏时若未对框架密封处重点核查,微小泄漏点易被遗漏。运行后因压力脉动或温度变化导致泄漏加剧,洁净度从ISO 6级降至ISO 7级甚至ISO 8级,常被误判为过滤器寿命到期。风量平衡未达标即移交,FFU之间出风偏差可达 $\pm 25\%$,造成局部气流组织紊乱、污染物横向扩散不可控。

3 分级整改技术方案

3.1 洁净度问题的快速评估与整改优先级确定

整改工作的第一步是对已暴露问题进行分级,合理配置有限的停产窗口资源。根据问题对生产的影响程度划分为三个等级:A级——洁净度持续超标、产品批量报废、冷凝水泄漏造成吊顶渗水,须在48小时内局部停产整改;B级——风量偏差超标、压差不足但未造成产品报废,可在月度维护窗口内整改;C级——能耗偏高、自控动作偏差但环境参数仍合格,可利用年度大修窗口逐步解决。评估采用“四维排查法”:查阅施工验收资料、对比运行趋势数据、实施专项检测、现场重点勘查,基于排查结果制定分阶段整改计划。

3.2 风管系统漏风与清洁度问题的整改技术措施

漏风整改的关键在于准确定位漏点。采用超声波检漏仪结合烟雾示踪法进行定位——前者可在系统带压运行状态下远距离捕捉漏气信号,无需停产。针对不同漏风部位差异化处理:咬口漏风补打中性硅酮密封胶,法兰连接处更换三元乙丙闭孔海绵密封垫片,螺栓按对角线重新紧固(M8螺栓约 $25\text{N}\cdot\text{m}$)。漏风率超过5%的严重风管段应拆除保温层全面检查,咬口二次压筋加固后重新测试。风管内部清洁度整改流程:拆下过滤器并用盲板封堵送风口→清洗机器人干式清扫→白布擦拭法验收→重新安装高效过滤器→恢复运行后重新检测洁净度,需48~72小时连续作业窗口。

3.3 自控系统精度校正与传感器重新标定

自控系统整改需从传感器校验、执行器调整和逻辑优化三方面展开。温湿度传感器采用精密校验仪(精度不低于 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1.5\%\text{RH}$)现场比对校准,偏差超标应送计量机构重新标定或更换。压差传感器取压管检查有无堵塞或积水,取压口位置不当的移至气流稳定区域(距墙至少1m)。对每个风阀执行器进行全行程动作测试,偏差超过5%的应重新调整连杆长度或更换。PID参数整定尤为关键——洁净室温度控制响应延迟大,不合理参数会导致温度持续振荡(振幅可达 $\pm 2^{\circ}\text{C}$),应委托自控工程师现场整定,以衰减率(75%~90%)和稳定时间(≤ 15 分钟)作为合格判据^[3]。

3.4 高效过滤器安装密封与气流组织整改

高效过滤器边框密封不严的整改需配合压差和粒子监测数据综合判断。采用气溶胶发生器和光度计逐台扫描检漏,重点检查边框密封条及框架连接缝隙。发现泄漏应拆下重新安装,密封条更换为发泡聚氨酯密封条(密度不低于 $45\text{kg}/\text{m}^3$),框架不平整处采用不锈钢垫片找平,安装后再次检漏确认。气流组织整改涉及送回风口位置、导流板角度和FFU风速均匀性优化。局部涡流区粒子浓度偏高时,可通过CFD模拟辅助判断缺陷,加装多孔均流板或调整导流叶片角度。FFU风速偏差超过设计值 $\pm 20\%$ 的区域,应逐台测试风速,通过调整输入电压或更换电机,将风速偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内。

4 整改实施的组织管理与预防措施

4.1 整改实施的组织流程与作业窗口安排

洁净室整改作业面临的最大约束是停产时间窗口有限——电子厂房通常只有春节或国庆假期可提供3~7天的连续停产窗口,生物制药车间则需配合产品批次间隙进行分区域轮换整改。因此,整改工作的组织须做到

“停前准备充分、停中高效执行、停后快速恢复”。建议整改实施流程分为四个阶段：第一阶段（停工前 2~4 周），完成问题排查确认、整改方案编制、材料备货及施工队伍交底；第二阶段（停工前 1 周），办理动火、登高等特种作业审批，完成预制件加工和预组装，制定突发应急预案；第三阶段（停产窗口内），按“先急后缓、先内后外、先测后改”的原则执行整改作业；第四阶段（恢复运行后），完成功能测试与洁净度验证，整理整改记录并更新竣工图。

4.2 施工阶段的质量过程控制措施

整改工程的经验反复证明：问题预防优于事后补救。在新建或改造项目的施工阶段，应重点落实以下过程控制措施。风管制作安装阶段，应严格执行“三检制”：班组自检（每段风管密封胶涂抹均匀度、法兰螺栓紧固程度）→质检员专检（漏光法或漏风量测试）→监理验收。风管清洗后应使用白布擦拭法进行清洁度验收（每根风管内壁白布擦拭三处，三处均无明显变色为合格），合格后两端用塑料薄膜封堵方可安装。设备安装阶段，应重点管控空调箱减振器安装的定位精度——减振器顶面水平度偏差不超过 2mm，相邻减振器顶面高差不超过 3mm，空调箱与风管、水管的柔性连接安装时必须消除接管应力（柔性接管在自由状态下与设备接口对中，偏差不超过 5mm）。冷凝水排水管坡度不得小于 1%，最低点设放水阀，接入排水系统前设透明观察管供运维检查^[4]。自控系统安装阶段，传感器安装位置应严格按图纸定位，温湿度传感器应安装于回风管直管段（距弯头、阀门等局部阻力件下游至少 5 倍管径处），压差传感器取压口应避开涡流区。所有传感器安装后应记录实际安装位置与设计位置的偏差，偏差超过允许范围（ $\pm 200\text{mm}$ ）的应视为不合格、重新安装。

4.3 竣工前性能验证与洁净度确认

竣工前的系统性能验证是防止施工遗留问题流入运行阶段的最后一道防线。验证内容应至少包括：风管漏风量测试（按系统工作压力分级验收，高压系统漏风率 $\leq 2\%$ ）、高效过滤器逐台扫描检漏（穿透率 $\leq 0.01\%$ 为合格）、各风口风量平衡测试（偏差 $\leq \pm 10\%$ ）、房间

压差测试（相邻房间压差 $\geq 5\text{Pa}$ ，洁净区与非洁净区 $\geq 10\text{Pa}$ ）、温湿度控制精度测试（连续 24 小时运行数据达标率 $\geq 95\%$ ）。所有验证记录须由施工方、监理方和业主三方签字确认，作为工程移交的必要条件。

4.4 运维阶段的持续监测与早期预警

即便竣工验收通过，洁净室在长期运行中仍可能出现性能衰减。建议在运维阶段建立基于趋势分析的早期预警机制。关键参数的趋势监控包括：每天记录洁净度（粒子计数仪定点监测）、温湿度、压差数据；每周记录各级过滤器终阻力值并绘制阻力上升曲线——高效过滤器阻力达到初始阻力的 2 倍或绝对阻力超过 600Pa 时即可安排更换，不必等到洁净度超标后再换。年度性能复核则包括每年一次风量平衡复测、高效过滤器全面扫描检漏、自控系统传感器精度校验（偏差超过允许范围即重新标定），确保系统长期维持设计性能。

结束语

洁净厂房的暖通施工遗留问题不同于普通建筑的“带病交付”，其对洁净度、温湿度及压差控制的侵蚀效应会随着系统运行时间的推移而逐级放大，最终反映为产品良率下降和设备寿命缩短等直接经济损失。本文系统分析了风管系统、设备安装、自控系统、过滤器密封及调试验证六类主要遗留问题的成因与影响机制，并提出了从快速评估、分级整改到施工过程控制的全链条应对措施。洁净环境的维持既取决于设计合理性，更依赖于施工全过程的质量管控与运行初期的充分验证。建议新建项目将洁净度与系统性能验证作为竣工验收的核心指标，在源头上降低后期整改风险。

参考文献

- [1] 张旭. 建筑暖通施工难点及改进分析 [J]. 城镇建设, 2025(1): 59-61.
- [2] 吴雪琴, 卢科, 杨萌, 等. 地下污水处理厂暖通系统施工问题分析与总结 [J]. 暖通空调, 2026, 56(4): 109-113.
- [3] 许立杰. 新形势下暖通空调设备安装施工问题分析 [J]. 建筑与装饰, 2022(3): 193-195.
- [4] 许承训. 建筑暖通空调安装施工技术问题探讨 [J]. 江西建材, 2022(6): 306-307, 310.