实验室改造项目系统化设计方法与实践要点

周 刚 徐伟楠
中国中元国际工程有限公司 北京 100089

【摘 要】：实验室改造并非单纯的空间翻新，而是在既有建筑条件下对科研功能、环境控制、机电系统及运行管理进行重新组织的系统工程。针对结构边界固定、设备需求差异明显、专业接口复杂及投资受限等问题，从需求识别、空间重组、系统适配和实施控制等方面构建设计方法。借助现状条件分级评估明确保留、改造与拆除范围，以实验流程和风险等级优化功能分区及人、物流线；统筹暖通、给排水、电气、气体和自控系统参数，并结合 BIM 开展综合校核。同时将限额设计、设备更新预留和运维要求前置到方案阶段，以减少设计冲突和施工返工，增强空间利用率、系统可靠性及投资有效性。

【关键词】：实验室改造；系统化设计；功能布局；系统适配；专业协同；BIM

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.069

科研设备更新、实验工艺变化以及安全环保要求提高，使部分既有实验室逐渐出现空间利用不足、环境参数不匹配、机电容量偏紧和设备接口不统一等问题。改造设计又受到原建筑柱网、层高、楼板荷载、消防条件及既有管线的直接限制，许多矛盾难以依靠单一专业调整解决。尤其在精密仪器增加、排风需求提高、供配电扩容和智能监测接入后，空间与工程系统之间的协调难度进一步增加。若前期勘查不充分，或各专业缺少统一接口条件，施工阶段容易出现管线碰撞、设备无法就位、系统容量不足及反复拆改。实验室改造需要从实验工艺出发，在既有条件约束下统筹空间、安全、环境、设备与投资。

1 改造需求与设计边界识别

（1）开展现状调查评估：实验室改造前的现状调查宜从建筑、结构和机电三个层面同步展开。建筑测绘除核对房间尺寸外，还需记录梁底标高、吊顶内净高、竖井位置、门洞宽度及大型设备运输路径，避免设备能够落位却无法进入房间。结构复核重点关注楼板厚度、梁柱截面、原设计荷载及后期加建情况，对离心机、质谱仪、大型恒温设备等集中荷载较大的设施，结合设备自重、底座尺寸和运行振动校核楼板承载与局部变形。既有风管、水管、桥架和气体管道则按保留使用、检测后利用、拆除封堵分类编号，并同步标注阀门、检修口和隐蔽接口。原有管线继续利用前宜完成压力、绝缘或运行状态检查，废弃水气管道在支管根部可靠封堵；对位置不明的隐蔽管线，可借助探测仪、内窥设备或局部拆检确认走向。对于仍在运行的实验区域，还需记录停机窗口、临时供电和临时通风条件，把勘查结果与设备清单逐项对应，形成现状底图和问题台账，减少后续设计变更。

（2）梳理实验工艺需求：实验工艺需求宜围绕样品进入、前处理、实验操作、仪器分析、清洗和废弃物退出的实际过程展开，避免只按房间名称统计需求[1]。设备清单除名称、数量和外形尺寸外，还需列明额定功率、散热量、给排水接口、排风量、气体种类、工作压力、连续运行时间和检修净距，以此反算空调冷负荷、电力容量和管线接口。涉及质谱、色谱、电子显微等精密设备时，还需核对地面振动、电磁干扰、温湿度波动及 UPS 供电条件。试剂储存、样品制备、洗消和废弃物暂存与实验操作区之间，可依据风险等级确定相邻关系，高频共享仪器布置在多个实验单元便于到达的位置，酸碱、有机溶剂和高压气体则按介质特性分别设置储存条件。由实验流程反推空间关系，再将近期刚性需求与后续扩展需求分开记录，可减少设备更新后再次开墙、改管和调整配电的情况。需求确认后，将设备条件转化为房间接口表，标注近期安装、远期预留和共享使用三类状态，使空间、能源供应和科研计划相互对应。

（3）建立系统设计目标：完成现状调查和工艺梳理后，可将各专业条件整理为统一的设计边界表，并区分固定项、可调整项和预留项。结构柱网、承重墙、竖井、消防分区及原有主干系统容量通常属于固定条件，隔墙、实验台、末端风口、支管和局部设备接口具有一定调整空间，后续科研设备更新则宜采用预留回路、封堵支管和备用桥架容量处理。投资控制也宜在方案阶段同步介入，将预算拆分至结构加固、装饰、暖通、给排水、电气、气体、自控及实验家具等分项，核心实验区优先保证排风、稳定供电、环境控制和安全设施，普通办公及辅助空间减少非必要装饰投入。对于原有风机、水泵、配电柜和管线，经检测确认性能满足要求后纳入改造方案，同时把检修空间、过滤器更换位置和阀门操作距离写入施工图，使建设成本、

运行成本和维护条件在同一阶段完成权衡。对于分期实施区域，还需统一接口标准和预留位置，设备更新频繁的实验单元则配置标准接口和可拆装构件，为后续调整留下条件。

2 实验空间与工程系统设计

（1）优化空间功能布局：实验空间重组宜把实验风险、操作频次和运输路径放在同一张流线图中校核。样品制备、仪器分析、试剂储存、清洗和废弃物暂存分别确定边界，人员通道尽量不与污染物运输路线长距离重叠；频繁搬运样品或大型耗材的区域可靠近货运电梯或运输入口布置，缩短周转距离。产生噪声、振动和高温的设备间与精密仪器室之间宜设置实体隔墙，并减少共用结构构件传递振动；存在挥发性有害物的实验间则需保持清洁区向污染区的气流方向，通风柜避开门口、窗边及强扰动送风口。层高受限时，可将桥架、小口径水管和气体管道布置在综合支吊架上层，大截面风管置于下部，再依据阀门、过滤段和法兰拆卸需求预留检修距离。实验台采用标准模数组合，墙边预留设备更换通道，可在不改变主体结构的情况下为后续实验流程调整保留余量[2]。对于设备更换频繁的开放实验区，可采用可移动实验台、顶部服务柱等方式，将电源、数据和气体终端集中布置，减少固定点位对空间重组的限制。

（2）深化环境与机电系统：环境与机电系统设计需围绕实验设备运行条件进行容量核算。暖通部分先统计通风柜、万向罩及设备排风量，再结合房间压差和补风方式确定送排风规模，排风量较大的区域宜采用独立系统或变风量控制，减少低负荷时段的无效能耗；实验室通风系统的定风量、变风量排风及补风控制应根据实际实验条件确定。给排水系统将生活水、实验工艺水、纯水和冷却水分开设置，酸碱、有机溶剂或含特殊污染物废液采取源头分类收集，不与一般排水直接混接。电气负荷依据设备额定功率、同时系数和预留容量逐级复核，质谱、色谱及数据采集设备设置独立回路，连续运行或掉电恢复困难的设备配置 UPS。集中供气需结合气体纯度、压力和腐蚀性选择管材，在汇流排、减压阀和使用终端之间设置压力监测、泄漏报警及紧急切断装置；环境监测系统接入温湿度、压差、VOC 及设备状态信号，并将设备故障、压差异常和气体泄漏设置分级报警，为运行维护保留连续数据，关键设备接口还宜保留检修与扩容条件。

（3）处理新旧系统衔接：改造项目中的返工较多发生在新增系统与既有系统的接口位置，因而接口设计不能停留在管径和尺寸匹配[3]。新增排风接入原有竖井前，需复核竖井有效截面、风机余压和同时开启工况，防止支管连接完成后仍出现风量不足；配电扩容则从变压器容量、配电干线、电缆截面到末端回路逐级核算，若上级供电能力不足，单独增加实验室配电箱并不能解决问题。既有给排水立管继续利用时，可结合压力、通水或内窥检查判断堵塞、腐蚀和渗漏状态，新设管线尽量避开梁柱节点、消防设施及重要检修通道。吊顶空间紧张时，综合支吊架统一控制风、水、电、气标高，大风管和重力排水优先确定位置，再布置桥架及压力管道；后期可能增加设备的房间预留电源回路、封堵接口及一定桥架余量，使后续扩建设备时减少拆墙、拆顶和重新开槽。接口处还需明确法兰、软接、阀组和检修口位置，涉及原控制系统升级的设备，则同步核对通信协议、信号类型和联锁条件，便于后期检修和设备更新期间及时定位。

3 协同设计与实施控制要点

（1）强化多专业协同：多专业协同宜以设备条件表作为共同输入文件，同一台设备的供电、给水、排水、排风、气体和控制接口采用统一编号，设备位置调整后同步检查各关联专业，避免建筑平面已经移动设备而机电图仍沿用原坐标[4]。对通风柜、洁净工作台、大型仪器和气瓶柜等接口密集设备，可在平面图之外增加节点详图，明确插座高度、阀门位置、排水标高、风管接口、气体终端及检修方向。吊顶内管线密集区域在施工图阶段统一确定安装顺序，大截面风管、重力排水和主桥架优先确定标高，压力管道和小口径气体管再利用剩余空间排布。实验室改扩建涉及基建、设备、安全及资产等多类管理事项，联合审查有助于把水、电、消防等基础安全问题前移至设计阶段。方案调整时，各专业围绕设备条件表核对接口变化对结构、负荷、风量和空间的影响，协调会议则形成问题编号、责任专业、修改位置及关闭条件；设备采购后厂家参数发生变化，还需同步复核设备基础尺寸、配电容量、排风需求和检修净距，并依据最终技术资料统一更新接口表、综合平面及施工图，防止实际现场安装阶段出现接口遗漏、坐标偏移和参数错位。

（2）应用 BIM 综合设计：BIM 在实验室改造中的应用重点集中于既有条件复核、设备定位和管线综合，既有建筑改造采用 BIM 正向设计能够在结构、装修和机电专业之间形成较为完整的协同基础。建模时不宜只录入建筑墙体，还需将梁底、设备基础、竖井、保留风管、桥架、给排水主管和主要设备同步建模，现场暂时无法确认的隐蔽部位单独标记，待拆顶、探测或局部开孔后修正。模型综合阶段将大截面风管、

桥架和重力排水作为优先控制对象，对梁下净高、吊顶标高、设备检修范围及管线交叉逐点检查；碰撞消除后继续核查法兰连接、阀门手柄、过滤器抽出方向和大型设备搬运空间，避免模型无碰撞而现场无法安装。对于吊顶内条件复杂的区域，可将激光扫描点云与模型叠合，核查原图与现场实际偏差，并输出综合平面、剖面及关键节点用于施工定位。施工阶段再把最终确认的管线路由、阀门编号、设备位置和接口参数回写模型，同时记录隐蔽工程和变更信息，使竣工模型与现场实物保持一致，为后续设备更换、系统检修、容量核查和局部扩建提供可追溯的基础资料，并辅助后续检修方案及设备更新位置的更快速判断。

（3）控制投资与实施质量：投资控制宜落实到工程量、设备配置和拆改范围，而不是在施工图完成后统一降低材料或设备等级[5]。方案比选时可统计风管、桥架、给排水和气体管线长度，核对实验台数量、设备功率、拆墙面积及结构加固范围，若空间重组能够减少长距离排风支管、重复竖向穿层和二次转接，其成本控制效果通常优于削减核心设备配置。实验台、储物柜和普通隔断采用标准模数组合，可减少非标加工和现场切割；原有风机、水泵、配电柜经性能检测满足继续使用条件时予以保留。施工阶段把隐蔽工程、设备接口和系统调试作为质量控制重点，封板前核对阀门、检修口、支吊架和管线标识，送排风系统完成风量平衡后再校核压差，电气系统开展绝缘、接地及备用电源切换试验，气体系统完成强度、气密和报警联动检查。材料进场同步核验规格、耐腐蚀等级和设备铭牌参数，系统调试保留原始记录；投用初期结合能耗、报警记录和使用反馈复核运行状态，并对风量、控制逻辑、报警阈值和维护周期适当修正，使设计指标、施工质量与后期运行要求保持一致，并将试运行期间发现的问题纳入整改台账，复核时间与责任人员。

4 总结

实验室改造受既有建筑条件、科研需求变化和多专业系统交叉影响，单项优化难以保证整体效果。设计宜从现状调查和工艺需求识别入手，明确结构、空间及机电系统边界，围绕流程完成分区组织、设备定位、环境控制和能源配置。对于保留与新增系统，应重点核查风量、电力容量、给排水条件、气体接口及检修空间，并借助 BIM 校核管线。投资控制需前移至方案阶段，对核心实验区、安全设施和关键设备优先配置资源，普通区域采用标准化做法控制成本。施工阶段结合隐蔽验收、系统调试和接口复核验证参数，投用后依据数据修正策略。由此可增强改造适配性、可靠性和扩展能力，减少返工与运维负担。

参考文献：

[1] 曹志刚,马晨钰,杨毅,糜娜.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.

[2] 高克文,吴美娴,余俊祥,等.某科研中心实验室改造工程暖通空调系统设计要点分析[J].暖通空调,2023,53(12):18-23.

[3] 张孟尧,郭瑾程,陈姝璇.基于联合审查工作机制的高校实验室改扩建安全管理[J].实验技术与管理,2024,41(4):215-221.

[4] 张海峰,许厚材.BIM 正向设计方法在改造项目中的研究与应用[J].建设科技,2022(5):33-36.

[5] 徐文,杜坤,李江,等.数字孪生技术在高校实验室安全管理中的实践[J].实验技术与管理,2024,41(4):222-227.