

某研发中心实验室空调通风系统 案例分析与讨论

同济大学 林忠平[☆] 张 昊

烟台宝源净化有限公司 杨云涛 于自强

摘要 介绍了该研发中心化学实验室的空调与通风系统及其控制方案设计;通过对该实验室空调与通风系统的测试与评估,发现部分排风柜的排风量不足、变风量(VAV)末端装置未调试整定、部分区域噪声过大等问题,并对引起这些问题的原因进行了分析;根据案例分析,总结了实验室空调通风系统选择、调试、运行维护等应针对具体实验室特点重点考虑的因素,强调了系统调试对保证实验室空调通风系统正常运行的重要性。

关键词 实验室 空调通风 调试 运行维护 节能

Case study of HVAC systems used in laboratories of a research and development center

By Lin Zhongping[★], Zhang Hao, Yang Yuntao and Yu Ziqiang

Abstract Presents the HVAC system and its control scheme used in the chemical laboratory in this center. Testing and assessing the system, finds that the exhaust air rate from partial fume hoods is insufficient, the variable air volume terminal devices are not adjusted, and noise is higher in part zones. Analyses the causes resulting in these issues. According to the case study, summarizes the factors which should mainly be considered when selecting, commissioning, operating, maintaining the system. Emphasizes the importance of system commissioning on the normal operation of HVAC system in the laboratory.

Keywords laboratory, air conditioning and ventilation, commissioning, operation and maintenance, energy saving

★ Tongji University, Shanghai, China

根据用途,常见的实验室可分为生物实验室、动物实验室、物理实验室、化学实验室四类^[1]。不同实验室对环境控制有不同的要求,因此为不同实验室设计空调通风系统时必须对其使用过程可能出现的各种风险进行评估并采取相应措施,确保空调通风系统能够维持满足使用要求的实验环境,保护实验人员与周边环境的安全。目前,我国还没有颁布实验室空调通风系统设计规范,一般设计人员参考 ASHRAE 手册及德国的 VDI 通风规范等资料。

化学实验室主要用于有机化学及无机化学合成和分析的科学研究,由于其实验过程产生和挥发的有害物质较多,相互交叉影响的可能性增大。为防止化学实验产生的有毒有害气体危害实验人员和周边环境,需要专门设计局部排风装置(如排风

柜),并保证室内微负压^[2]。本文对某研发中心的化学实验室的空调通风系统进行分析,总结在设计、调试及运行维护管理中应注意的事项。

1 项目简介

1.1 工程概况

本文探讨的案例为某跨国化工公司中国研发中心大楼的实验室空调通风系统。该项目位于上海浦东张江高科技园区,总建筑面积 16 601 m²,总空调面积 12 500 m²,共 4 层。

研发中心大楼分为 A、B、C 3 个区域。A 区为

①[☆] 林忠平,男,1968 年 3 月生,博士,教授
201804 上海市曹安公路 4800 号同济大学机械与能源工程学院
(021) 65984228
E-mail: zplin99@tongji.edu.cn
收稿日期:2013-03-11

行政办公区域、大堂及报告厅,C区为餐厅与厨房及健身房等,B区为实验室区域(约8 200 m²),其中包含少量实验室办公及会议用房(约2 000 m²)。本文着重探讨B区实验室空调通风系统的相关问题。

整个研发中心大楼空调设计总冷负荷6 282 kW,总热负荷3 825 kW。空调系统冷源采用设置于大楼屋顶的5台风冷冷水机组(单台制冷量1 300 kW),夏季提供5.6℃/12.2℃的冷水;热源采用3台燃油热水锅炉(单台制热量1 400 kW),冬季提供82℃/71℃的空调热水。空调水系统采用一级泵系统,冷源侧定流量、负荷侧变流量。

1.2 空调通风系统

B区实验室主要是化学实验室,需要考虑有毒有害气体的排放。图1为实验室空调通风系统流程示意图(受图幅所限,仅画出1台空调机组及2层部分实验室作为典型代表)。除个别产生特殊有

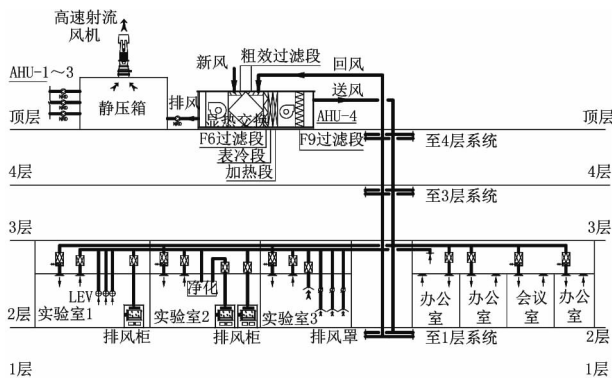


图1 实验室空调通风系统流程示意图(部分)

害污染物需要特殊处理的实验室外,整个研发中心的所有实验区域(包括实验室,实验区内的办公、会议用房)采用一个大的集中空调通风系统,空调及通风系统均采用变风量(VAV)方式,全新风运行,风管采用中压风管。共设置4台双风机空调机组,机组均置于屋顶,单台空调机组设计送、排风量为136 000 m³/h,空调机组内设显热换热器以降低能耗。新风经预过滤、显热交换、F6中效过滤、表冷段热湿处理及F9高中效过滤器过滤后送入水平连接管(消声静压箱),由送风立管送至各楼层各区域的空调变风量末端装置,通过散流器/送风百叶送入室内,实验室所有VAV送风末端装置均带有热水加热盘管。

实验室共装备了59台排风柜、一定数量的局

部排风罩以及万向排风罩(LEV)等局部通风设备。所有实验室排风(包括房间排风、排风罩排风及排风柜排风)均安装了排风VAV末端,用于调节实验室排风量以适应不同使用工况并控制室内负压,避免有害气体外泄。实验室区域内的一般办公与会议用房则采用普通吊顶排风方式。各房间排风由立管汇至水平连接管(消声静压箱)后由4台空调机组的排风机送入排风静压箱。排风静压箱顶部安装4台高速射流风机,将含有有害气体的空气向上喷射,高速气流卷吸大量室外空气对污染物进行稀释,使排风浓度迅速降低。4台高速射流风机采用台数控制结合变频控制,以适应不同排风量工况并保证排风速度(大于15 m/s)。

1.3 实验室空调通风控制系统

实验室空调通风系统既要保障实验室内温湿度要求和一定的负压,又要具备将实验产生的有害气体迅速排除的能力,而且排风柜的使用时间与使用台数随时发生变化。因此,完善的空调通风系统的运行需要良好的自动控制系统配合。图2为该项目典型实验室空调通风系统及其控制系统原理图。每间实验室分别对独立的单元进行温度、通风及压力控制,采用DDC控制系统。具体控制原理与方法如下。

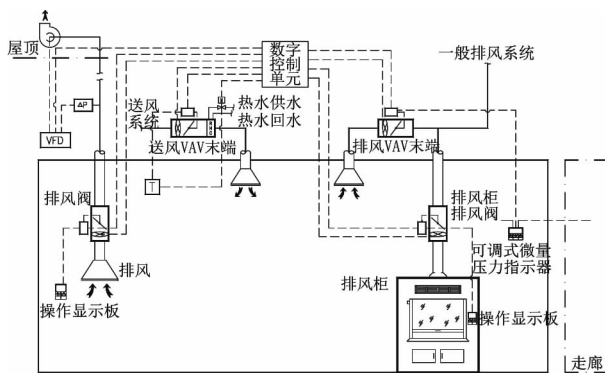


图2 典型实验室通风系统及控制原理图

1) 送风VAV风阀与再热盘管

DDC根据室内的温度控制器设定值调节VAV风阀开度,但必须保证最小换气次数要求。再热盘管根据室内温度设定值进行控制,当温度低于设定值时,打开电动两通阀进行加热。排风柜启用后,当室内与走廊的负压值大于10 Pa时,VAV风阀根据DDC指令加大送风,以满足设计要求。

2) 室内排风VAV风阀

对部分要求较高的实验室,DDC 根据室内负压对排风 VAV 风阀进行调节,保证室内与走廊的负压值至少为 5 Pa。当负压不足时,DDC 指令 VAV 风阀开度加大,增加排风量。对于一般要求的实验室,DDC 控制排风量与送风量的差值为 50 m³/h,以维持实验室微负压。

3) 排风柜排风 VAV 风阀

DDC 根据排风柜的柜门高度信号(根据面风速及使用面积确定)计算排风量,从而控制排风柜排风 VAV 风阀开度,保证排风柜面风速等于 0.5 m/s,当 VAV 风阀全开但仍然不满足 0.5 m/s 面风速要求时,发出声音报警信号(排风柜操作显示板上带有蜂鸣器)。

空调通风系统的总风量控制与传统的变风量(VAV)系统的控制无异,采用定静压控制方法调节送/排风机的运行频率,从而控制总送/排风量。高速射流风机根据排风静压箱内的压力值进行台数控制及变频控制,在保证排风静压箱为负压(−100 Pa)的同时满足高空排放要求。

2 空调通风系统实测问题及原因分析

该研发中心的空调通风系统投入使用一年多后,发现存在一些问题,笔者所在团队受业主委托对该项目空调通风系统进行了相关测试与评估咨询,从中发现了一些设计、施工安装、调试及使用管理等方面存在的问题,现总结如下并对其原因进行分析。

1) 排风柜面风速问题

部分排风柜在柜门完全开启时面风速无法达到 0.5 m/s 的设计要求。实验室排风柜设计同时使用系数为 0.3,因此在测试中将 59 台排风柜根据排风量大小设置 30%的排风柜开启使用,再逐台将各排风柜的柜门开启到最大高度,测试并检查其是否满足 0.5 m/s 的面风速要求,每台排风柜检查完后恢复其开启或关闭状态(即始终保持 0.3 的同时使用系数的最不利工况)。检测后发现 17 台排风柜(占总数的 29%)仅当柜门开启高度低于 550 mm 时,面风速才能满足要求;柜门开启高度超过 550 mm 则不满足要求。另一方面,有些实验室有多台排风柜,如果该实验室多台排风柜同时使用,则大多排风柜的面风速均无法满足使用要求。

造成这种现象的原因是部分排风柜的排风管阻力过大(有些因安装高度限制造成局部阻力较

大);排风支管风量分配不平衡,部分排风支管静压较小,排风量不足,导致即使排风柜 VAV 风阀全开也无法达到设计排风量。另一方面,设计考虑了同时使用系数 0.3,但对于排风柜数量较多的某些实验室,排风柜的同时使用系数可能超过 0.3(对现场实际使用情况的调研也证明了这一点),由于实验室多台排风柜共用一个排风支管,当多台排风柜同时开启使用时,排风量增大,管内风速提高,排风管阻力上升,导致排风量不能满足所有排风柜同时工作所需的排风量。

2) VAV 末端装置的调试问题

大量 VAV 末端的实测风量与自控系统的显示值存在较大差异(见表 1)。原因在于自控承包商并未对每台 VAV 末端进行现场整定甚至连出厂整定工作也未做,控制系统内部每台 VAV 末端的进风管尺寸参数与风量测量装置的修正系数均设定为缺省值,与实际现场安装的 VAV 末端不符,导致风量计算错误。

表 1 部分 VAV 末端实测风量与显示风量

VAV 控制器编号	自控显示风量/ (m ³ /h)	实测风量/ (m ³ /h)	偏差率/%
VAV-58.6-1-1	1 869	1 376	35.8
VAV-58.6-1-2	2 426	1 620	49.8
VAV-58.6-1-10	2 888	4 532	−36.3
VAV-58.6-4-12	1 278	199	542.2
VAV-58.6-4-15	537	1 322	−59.4
VAV-58.6-4-16	870	2 648	−67.1
VAV-58.6-4-17	802	2 705	−70.4
VAV-58.6-4-18	170	302	−43.7
VAV-58.6-4-19	1 108	313	254.0

3) 实验室负压问题

部分实验室负压偏小。原因在于 DDC 控制系统是通过控制排风量与送风量的差值(50 m³/h)进行压力控制,但有些实验室的围护结构密封相对较差,门窗缝隙较大,50 m³/h 的渗透风量无法达到需要的负压。应对每间实验室的排风量与送风量差值重新进行整定。

4) 噪声问题

个别未设 VAV 末端装置的房间风口风速过高,噪声偏大。原因在于这些房间送风直接由送风管接出,未安装 VAV 末端。这种出于降低成本考虑的设计(部分次要房间未设 VAV 末端装置)导致在其他 VAV 末端风量调小时,未安装 VAV 末端的风口风量很难控制。虽然从理论上来说一个

良好控制的 VAV 系统应能避免这种现象发生,但由于整个系统过大,系统总风量仅由风管系统某一点的静压(通常在距空调机组出口约 1/3 处的主送风管上,本案例为 1 层吊顶的送风竖管处)进行控制,当仅某支管所带的部分 VAV 末端动作时对静压控制点的静压影响很小,但对该支管上未设 VAV 末端装置的风口风量影响很大。

部分设有 VAV 末端的实验办公区域的噪声偏大。原因在于整个空调通风系统为中压系统,VAV 末端后的各个送风口之间风量分配不平衡,部分风口风量偏大,风速过大产生气流再生噪声。另一方面,设计图纸要求每个 VAV 末端应配消声器,但实际并未安装。

此外,屋顶高速射流风机噪声较大,尤其是夜间影响到邻居高校教师与学生的工作学习与休息,造成投诉。

5) 设备、安装及运行维护管理等问题

空调机组内过滤器阻力过高而未及时更换;空调机组内部过滤器安装支架破损;风机传动皮带松弛导致风机转速不足;空调机组检修门安装方式错误(应采用负压门而实际安装正压门),导致漏风严重并伴有啸叫声;空调机组内部堆放杂物;空调风管内保温脱落;空调机组未设减振垫等。

6) 其他问题

安置在屋顶的风冷冷水机组无足够的散热空间,导致散热不理想,在夏季高温运行时影响机组出力,降低机组 COP,甚至造成冷凝温度过高,风冷冷水机组无法正常工作。物业管理部门采用增设水管向冷凝器肋片喷水的方法,导致肋片锈蚀且耗水较大。

3 讨论及建议

本案例是欧美大型研发中心实验室空调通风系统比较典型的做法,总结分析该研发中心实验室空调通风系统存在的问题,可供我国实验室的空调通风系统设计与应用参考。

3.1 系统选择

实验室空调送风系统可采用定风量或变风量系统,应根据实验室的需要并结合排风系统和排风设施的型式选择,同时还应关注系统运行的能耗问题。在设计时应从多方面进行评估,包括:实验工艺的操作方式、实验室内有害物质的危险程度、实验室的安全要求、室内温湿度稳定性的要求及节能

的需要,还应根据初投资与运行费用的比较与评估进行方案比选。

实验室排风系统的型式包括定风量系统、变风量系统以及高-低双风量系统。排风系统可以设为独立排风系统或者集中排风系统。应考虑功能的需要、维护的便利及运行的安全可靠进行选择。一般对于大型新建实验室,集中排风系统具有下述优点因而应用较广^[3]。

1) 排风管、排风机以及排风烟囱数量较少,故初投资较低。

2) 排风量大,有毒污染物在排风气流中的稀释较为充分。此外,大量排风从烟囱集中高速排出造成的卷吸效应能使排风与大气充分混合稀释,降低了排风污染风险。

3) 设备较少且集中,维护方便,运行费用较低。

4) 可减小建筑内的竖井面积。

5) 可考虑同时使用系数,因而有效降低设备容量。

6) 方便备用排风机及应急电源的安装。

7) 当实验室需增加系统排风量时,便于安装增设的排风机。

8) 可有效利用变风量控制、热回收等措施达到节能目的。

9) 排风烟囱的位置选择易与建筑配合,满足建筑美观要求。

采用集中排风系统时应特别注意以下问题:

1) 不同实验室的排风污染物可能不能混合。

2) 各排风支管需做仔细的风量平衡与控制,保证排风量达到设计要求。

3) 控制系统较为复杂、控制要求较高,当部分实验室不用并关闭相关设备时,系统应能自动平衡送风量与排风量,保证其余实验室的正常使用。

4) 排风机故障时可能影响所有实验室的排风设备使用。

5) 有些排风例如含高氯酸及放射辐射的污染气体不能接入集中排风系统,应单独设置独立排风系统。

当经过方案比较采用集中排风系统时,设计集中排风系统应特别注意以下问题:

1) 排风主管及排风支管应考虑满足风量测量要求的直管段位置;

- 2) 排风管设置风量自动测量装置;
- 3) 控制阀(控制器)易于检查与维修;
- 4) 考虑设置备用风机及应急电源。

集中排风系统不适用于室内有高度危险物质或放射性物质的排风柜等排风设施,此外,既有建筑的改造项目运用较少,主要原因在于难以设置大的风管竖井。

与集中排风系统不同,独立排风系统是对每个排风设备或每间实验室单独设立排风系统,包括独立的排风管、独立排风机以及独立的排风烟囱。适用于对排风有特殊过滤或处理要求、对排风机及风管有防腐蚀要求、突发事故应急系统等。独立排风系统平衡调节简单,但占用建筑空间较多。此外,当排风机关闭时,由于实验室一般维持为负压,室外空气易通过排风管道倒流进入实验室。

本案例中的排风柜面风速问题实际上就是由于集中排风系统的部分排风管道设计与安装不合理,造成排风量不平衡以及相对复杂的控制系统未正常工作引起的。

实验区域内的办公、会议等用房与实验室共用系统不合理,本案例空调系统为保证安全采用直流式全新风系统,新风负荷很大。虽然考虑节能采用了显热换热器,但考虑到换热效率的限制以及实验区域内的办公室与会议室面积并不小($2\,000\text{ m}^2$)这两个因素,应将实验区域内的办公、会议用房的空调系统与实验室空调通风系统分开,可大大降低新风负荷,从而达到节能目的。

3.2 系统调试

一个设计及安装优良的系统如果没有经过调试是无法达到设计与使用要求的,许多工程技术人员及用户并未充分意识到调试的重要性,对于实验室相对复杂的空调通风及其控制系统,调试更是不可或缺。许多系统的失败都与调试(包括空调通风系统以及相应控制系统的调试)不当有关,本案例中 VAV 末端装置的风量显示与实测值大相径庭、部分排风柜面风速无法达到要求都与控制设备及系统未妥当调试整定直接相关。

调试工作内容不仅包括常规风系统平衡与调试、空调机组调试、冷热水系统调试、冷热源的调试,更应包括所有控制系统的调试:排风柜面风速报警、排风柜 VAV 排风量测量与控制系统、实验室安全报警、实验室送风 VAV 风量测量与控制、

实验室压力控制系统、温度控制系统、空调通风系统的总送风量/排风量控制等。例如对于规模较大的 VAV 系统,总风量控制是根据相应风道上安装的压力传感器来控制风机变频器的频率,该压力传感器的设置位置与设定值应同时考虑系统节能、舒适及安全因素。如为节能考虑,该压力设定值越小越好,可使送/排风机大多数时间处于低频工况运行,但这样可能造成部分区域风量不足,室内温湿度或排风柜面风速无法达到设计要求;如从舒适与安全角度考虑,则该压力设定值越大越好,可保证所有区域的送/排风量达到使用要求,但空调机组始终处于高频运行,部分 VAV 末端装置的静压偏高,需要 VAV 末端装置的风阀关小来节流,这对节能不利。因此定静压控制调试很重要的一项工作就是找到舒适、安全与节能的平衡点,即压力传感器的最优设定值及在风管的适当位置。本案例中分别有两根送风总管与排风总管(图 1 因图幅关系仅表示了一根),各送/排风支管布置各不相同,因而压力分布也不同,压力传感器如何设置(设置位置及具体设定值大小)需要经过仔细调试方可确定。

此外,控制系统的调试与性能验证还应包括传感器标定,控制器整定,系统的反应时间、精度、稳定性、可重复性等众多内容,遗憾的是许多该做的工作在工程实践中被有意或无意忽略,造成空调通风系统无法满足正常的使用要求。

3.3 其他

满足功能要求、安全要求与维护方便是选择实验室空调通风系统考虑的主要因素。实验室因风量大、过滤要求高因而风机压头高,温湿度控制要求严,全新风,24 h 连续运行等因素造成能耗很高,因此节能也需要考虑。实验室节能需要建筑、电气、暖通等专业的共同努力,并且是在绝对保证安全的前提条件下考虑节能,国外对实验室安全尤其重视。本案例的跨国公司环境健康与安全部门(即 EHS 部门,environment, health & safety)会不定期对每间实验室、通风设备进行检查验证,保证实验室的换气次数(一般实验室的换气次数要求为 $6\sim 10\text{ h}^{-1}$,本案例实验室的设计换气次数为 $12\sim 15\text{ h}^{-1}$)、排风柜的面风速满足要求,否则该实验室不能使用。部分无法达到面风速要求的排风柜,需要安装限位器,限制其柜门的最大开启高度,

确保实验室人员的安全与健康。

送风气流组织的设计应特别注意送风口的形式、布置位置及送风速度,避免送风气流影响排风柜及排风罩的操作工作面,保证各排风设备的排风面风速满足使用要求。目前很多实验室的送风只考虑布置的均匀性,而忽视了送风的风速过大会影响排风柜的安全使用。有时需要特别设计以满足实验室大风量送风要求,同时避免对排风设备的气流干扰造成有害气体在室内扩散。国外实验室空调送风除了采用散流器外还常采用孔板送风方式。

风机、风管、传感器的选择应综合考虑实验室可能产生的污染物类型、物理化学性质,温度,排风量的变化,管道风速与压力,消防以及室外空气温度与相对湿度等多种因素,从而避免出现腐蚀、溶解、融化、凝结等问题。

风管应注意密封,尽可能减少正压排风管。正压排风管可能导致污染物泄漏从而扩散到整个建筑内。排风机出口软接头要求质量高且应经常进行检查维护。有一种观点认为实验室排风机仅进口连接软接头、出口不连接软接头^[4],若这样应特别注意采取相关措施解决噪声及振动问题。

此外,良好的运行维护及使用管理对于实验室空调通风系统的正常运行必不可少。排风系统设计时应注意可靠性高、易维护。工程上许多问题源自设备与系统缺乏良好的维护保养,而这多因设备缺乏相应的维修空间、无法操作造成的。运行维护管理人员应了解系统原理、运行操作规范;实验室

工作人员也应了解排风柜、排风系统的安全操作规程。需要对运行维护及使用管理人员进行专业培训,保证设备与系统的正确使用,这点经常被忽略。

最后需要指出,实验室通风系统通常要求 24 h 连续运行,一般分工作模式与夜间模式,夜间模式控制排风量为工作模式的 $1/4 \sim 1/2$ 。本案例的高速射流风机夜间也需要工作,但设计时未充分考虑其夜间工作对邻近建筑的噪声影响,后期进行降噪改造则耗财费力。

4 结语

实验室空调通风系统与一般舒适性空调系统不同,设计时应针对实验室的具体使用特点进行安全风险评估,充分满足实验室空调通风系统的功能、安全与运行维护要求,兼顾节能。方案选择应全面综合考虑各种影响因素,充分了解各种不同系统各自的优缺点及适用场合。系统调试尤其是控制设备的整定与控制系统的调试对保障空调通风系统正常运行至关重要。

参考文献:

- [1] 刘琳. 实验室空调通风系统设计的关键环节[J]. 洁净与空调技术, 2001(3): 36-41
- [2] 朱轶勋, 刘传聚. 化学实验室空调通风系统设计及调试[J]. 建筑热能通风空调, 1999, 18(3): 53-54
- [3] Louis J D. Guidelines for laboratory design[M]. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2001
- [4] ASHRAE. ASHRAE handbook—HVAC applications[M], 2007