

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-249-08

# 定变风量阀在实验室通风空调系统的应用探讨

薛永明<sup>1</sup> 冯廷龙<sup>2</sup> 冯江发<sup>1</sup> 张峰<sup>3</sup> 薛红香<sup>4</sup>

(1. 山东省医药工业设计院有限公司 济南 250101;

2. 山东建筑大学设计集团有限公司 济南 250101;

3. 中海油石化工程有限公司 济南 250101;

4. 泰安市特种设备检验研究院 泰安 271000)

**【摘要】** 描述了定、变风量阀的工作原理和应用特点, 基于某实验室的工程案例, 根据实验室的不同使用功能要求, 采用定、变风量阀实时调节实验室的送风量和排风量, 且通过实验室房间的风量差独立控制室内静压。在保证实验室安全运行的情况下, 定、变风量阀的合理应用可降低空调通风系统的能耗, 从而可减少系统的运行费用。研究结果为优化实验室通风空调系统的设计提供理论依据和技术指导。

**【关键词】** 定风量; 变风量; 实验室; 通风空调系统

中图分类号 TU831 文献标志码 A

## The Discussion for the Application of Both Constant and Variable Air Volume Valves on the Laboratory Ventilation and Air Conditioning System

Xue Yongming<sup>1</sup> Feng Tinglong<sup>2</sup> Feng Jiangfa<sup>1</sup> Zhang Feng<sup>3</sup> Xue Hongxiang<sup>4</sup>

(1. Shandong Pharmaceutical Industry Design Institute Co., Ltd, Jinan, 250101;

2. Shandong Jianzhu University Design Group Co., Ltd, Jinan, 250101;

3. CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd, Jinan, 250101;

4. Tai an Special Equipment Inspection Institute. Tai an, 271000)

**【Abstract】** The paper describes the working principle and the application characteristics for both constant and variable air volume valves. Based on the project cases of a laboratory, and then the different functional requirements of the laboratory are taken into consideration. Accordingly, the constant and variable air volume valves are employed to adjust the air supply and exhaust volumes of the laboratory in real time, and the indoor static pressure is controlled independently through the differential air volume in the laboratory room. In the case of ensuring the safe operation of laboratory, the reasonable application of both constant and variable air volume valves can reduce the energy consumption of ventilation and air conditioning system, and therefore the operating cost of the system can be reduced. The research results of the paper provide theoretical basis and technical guidance for optimizing the design of ventilation and air conditioning system of laboratory.

**【Keywords】** Constant air volume; Variable air volume; Laboratory; Ventilation and air conditioning system

## 0 引言

为了满足医药行业的日渐发展和技术水平的

提升, 越来越多的医药企业扩大了药品的生产规模和种类; 同时, 为了提升企业自身的研发能力,

医药企业扩大了实验室的建设规模。根据用途划分,实验室可分为生物实验室、动物实验室、物理实验室和化学实验室四类<sup>[1-2]</sup>。不同用途的实验室对室内温湿度有不同的控制要求,因而不同实验室的通风空调系统设计必须根据实际使用过程出现的风险进行评估并采取相应的技术措施,确保空调通风系统设计满足实验设备的正常运行和实验人员的环境安全。

实验室具有局部排风设备多、散热量大、排风量大、室内温湿度控制要求高和能耗高等特点,而且实验室各房间和实验设备均存在间断运行的情况,对通风空调系统的设计和控制要求较高<sup>[3]</sup>。

针对以上问题,结合某工程项目,实验室通风空调系统合理选择定、变风量阀,通过定、变风量阀实时调节各实验室的送风量和排风量,并通过风量差值来控制实验室内的静压,保证实验室的安全运行,有效降低通风空调系统能耗,节省运行费用。

## 1 室内外设计参数及空调负荷

### 1.1 室外、室内设计参数

某实验室项目所在地的空调室外计算参数:夏季空调室外计算干球温度:34.7℃;夏季空调室外计算湿球温度:26.8℃;冬季空调室外计算温度:-7.7℃;冬季空调室外计算相对湿度:53%。

某项目实验室主要是物理类和化学类实验室,可参见《科研建筑设计标准》表 8.3.1 的数据,实验室室内设计参数<sup>[4,9]</sup>:夏季空调室内计算温度为 24℃,相对湿度为 55%;冬季空调室内计算温度为 22℃,相对湿度为 40%。

### 1.2 空调负荷

空调冷负荷主要包括常规空调冷负荷和特殊空调冷负荷。

(1) 常规空调冷负荷:包括围护结构冷负荷、人员散热量和照明散热量。

(2) 特殊空调冷负荷:包括实验设备散热量和实验室新风冷负荷。不同功能的实验室房间因设备种类不同,设备负荷变化较大,设备散热量和散湿量的差别较大。例如,设有冷藏箱、冰柜和烘箱的实验室,需要额外考虑设备散热、散湿增加的空调冷负荷。实验室新风冷负荷所占比例较高,实验室房间一般需要 3~8 次/h 的全面排风和局部排风(包含通风橱、万向罩和试剂柜等局部排风设备的

实验室房间),空调新风补风量一般为排风量的 70%~90%<sup>[3,5,10]</sup>,空调新风冷负荷与实验室房间内的局部排风设备数量和排风量有很大关系,是实验室空调负荷的最大组成部分。

由此可知,实验室房间通风空调负荷与工艺使用密切相关,不能单从节能角度盲目降低通风空调负荷。实验室房间通风空调系统设计人员应与工艺专业密切配合,了解每个局部排风设备的排风量、工作制度、同时使用系数,从而在实际运行中降低通风空调系统的能耗。

## 2 定、变风量阀工作及控制原理

### 2.1 定、变风量阀工作原理

(1) 根据工艺要求不同,实验室需要控制维持一定的静压。例如,有些实验室为保证室内工作环境洁净(如办公室、会议室、更衣室等),需要维持正压;有些实验室会产生有害、污染气体(如设置通风橱、万向罩等局部排风设备的房间),需要维持负压。

(2) 实验室各房间及局部排风设备均存在间歇工作、停止运行的情况。

基于实验室空调系统的以上两个特点,为了保证每个实验室房间的温湿度和压力控制要求,同时尽可能的降低空调系统的运行费用,根据实验室房间的特殊运行要求,在送、排风支管分别设置定风量阀或者变风量阀,实现对每个实验室房间的单独控制。常见的定、变风量阀控制方式有:(a) 定送定排方式。房间送、排风支管均采用定风量阀,泄露面积一定的情况下,保证房间压差恒定。室内维持负压适用于无局部排风、有污染有害气体的实验室房间;室内维持正压适用于办公室、会议室和更衣室等清洁房间。(b) 定送变排方式。房间送风支管采用定风量阀,排风支管采用变风量阀,排风变风量阀根据房间压差变送器的实测信号与设定压力比较后通过 PID 运算调整排风量控制室内压差恒定。(c) 变送变排方式。房间送、排风支管均采用变风量阀,既需要控制房间压力恒定,又需要通过送风变风量阀控制房间温度,该方式适用于有间歇运行的局部排风设备的实验室房间。

### 2.2 定、变风量阀的控制原理

变风量调节阀由风阀叶片、风量采集器和变风量控制器 3 部分组成。变风量调节阀控制原理主要

是风量控制原理和压差控制原理。

变风量调节阀的风量控制原理: 变风量控制器通过监测风量采集器采集流经风阀空气的动压差, 计算出流经风阀的实际风量, 再将实际风量与控制器设定风量进行对比。当实际风量大于设定风量时, 控制器驱动执行器减小风阀开度; 当实际风量小于设定风量时, 控制器驱动执行器增大风阀开度。通过若干次的对比和调节风阀开度, 可以短时间迅速将流经风阀的实际风量稳定在设定风量的偏差范围内, 实现对房间风量的有效控制。

变风量调节阀的压差控制原理: 将变风量控制器为的压差传感器的正、负压力采样口分别接到需要控制压力的区域 (如实验室房间) 和压差对比区域 (如走廊) 的压力感探头上, 从而能够实时监测控制压力区域和压差对比区域之间的压差。(1) 采用送风量来控制室内压差时, 当室内压差高于设定

压差时, 变风量控制器驱动风阀减小风阀开度; 当室内压差低于设定压差时, 变风量控制器区域风阀增大风阀开度。(2) 采用排风量控制室内压差时, 当室内压差高于设定压差时, 变风量控制器驱动风阀增大风阀开度; 当室内压差低于设定压差时, 变风量控制器区域风阀减少风阀开度<sup>[7,8]</sup>。

### 3 工程案例

本实验室项目位于某市的丙类高层厂房三层东侧区域, 实验室建筑面积为 2564m<sup>2</sup>, 主要功能房间有样品配制室、嗅辨室、无氨室、理化分析室、高温室、试剂室、标准物质间、元素前处理室、有机前处理室、理化室、元素分析室、气相气质室和气相质谱室等。房间内的局部排风设备主要包括通风橱、试剂柜和万向罩。三层东侧实验室局部功能房间布局图详见图 1 和图 2。

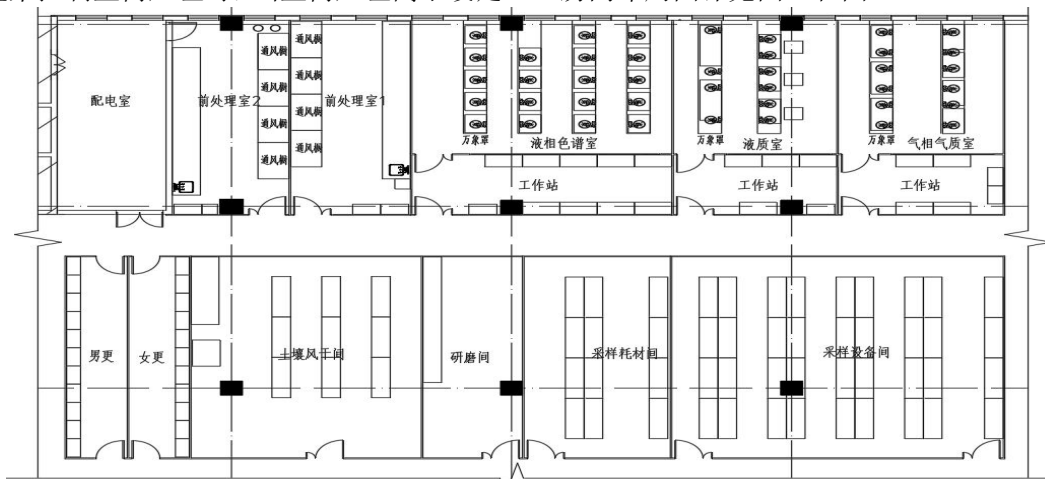


图 1 三层东侧实验室局部功能房间布局图 (一)

Fig.1 Layout of Partial Functional Rooms in the Laboratory on the East Side of the Third Floor (一)

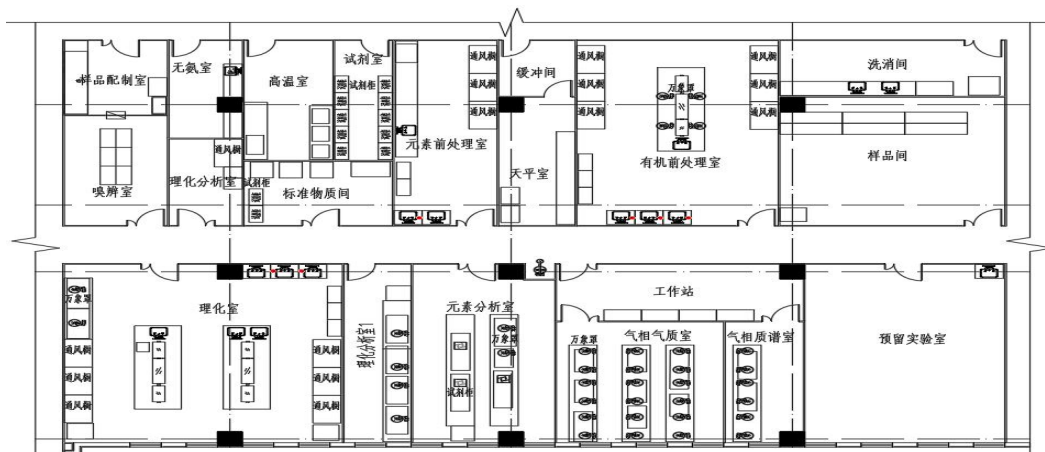


图 2 三层东侧实验室局部功能房间布局图 (二)

Fig.2 Layout of Partial Functional Rooms in the Laboratory on the East Side of the Third Floor (二)

### 3.1 空调系统冷、热负荷

本实验室空调系统的冷负荷主要包括围护结构冷负荷、实验人员散热量、照明散热量、设备散热量、全面排风和局部排风所需的新风冷负荷。

由于实验室房间的设备散热量所占冷负荷比例较大且难以确定,根据设计经验,除新风冷负荷外,其他空调冷负荷可按空调冷指标 250~300W/m<sup>2</sup> 选取,本工程案例取 300W/m<sup>2</sup>,根据表 2 的计算结果,本实验室的空调系统冷负荷(不含新风冷负荷)为 328.70kW。

实验室房间会散发对人体有害的化学品或有难闻气味的气体,应保持微负压。本实例新风送风量按照全面排风量的 90%和局部排风量的 70%之和取值计算。实验室房间的全面排风按 5 次/h 计算,通风橱、万象罩和试剂柜局部排风量分别是 1500m<sup>3</sup>/h (最小为 500m<sup>3</sup>/h)、150m<sup>3</sup>/h 和 300m<sup>3</sup>/h,根据图 1、图 2 的实验室房间布局图,表 1 列出了各实验室房间的局部排风设备数量及局部排风量汇总表,表 2 列出了各实验室房间的局部排风量、全面排风量和房间送风量汇总表。

表 1 实验室房间局部排风设备及局部排风量汇总表

Table 1 Summary Table of Local Exhaust Equipment and Local Exhaust Air Volume in Laboratory Rooms

编号	房间名称	通风橱/个	试剂柜/个	万向罩/个	局部排风量/(m <sup>3</sup> /h)	
					最小风量	最大风量
1	前处理室 2	4	0	0	2000	6000
2	前处理室 1	4	0	0	2000	6000
3	液相色谱室	0	0	19	0	2850
4	液质室	0	0	10	0	1500
5	气相气质室	0	0	12	0	1800
6	理化分析室 2	1	0	0	500	1500
7	试剂室	0	10	0	0	3000
8	标准物质间	0	2	0	0	600
9	元素前处理室	3 (同时使用 2 个)	0	0	1000	3000
10	有机前处理室	6 (同时使用 4 个)	0	4	2000	6600
11	理化室	6 (同时使用 5 个)	0	2	2500	7800
12	理化分析室 1	0	0	4	0	600
13	元素分析室	0	3	2	0	1200
14	气相气质室	0	0	18	0	2700
15	气相质谱室	0	0	6	0	900
合计	---	---	---	---	10000	46050

表 2 实验室房间空调风量及冷负荷汇总表

Table 2 Summary table of air conditioning volume and cooling load in laboratory rooms

编号	房间名称	建筑体积 /m <sup>3</sup>	换气次数	房间排风量/(m <sup>3</sup> /h)	局部排风量 / (m <sup>3</sup> /h)		房间送风量 / (m <sup>3</sup> /h)		冷指标/(W/m <sup>2</sup> )	室内冷负荷 Q <sub>L</sub> /kW
					最小风量	最大风量	最小风量	最大风量		
1	前处理室 2	101	5	550	2000	6000	1900	4700	300	10.80
2	前处理室 1	103	5	550	2000	6000	1900	4700	300	11.10
3	液相色谱室	154	5	800	---	2850	---	2720	300	16.55
4	工作站	69	5	350	---	---	---	320	300	7.40
5	液质室	97	5	500	---	1500	---	1500	300	10.40
6	工作站	43	5	250	---	---	---	230	300	4.65
7	气相气质室	98	5	500	---	1800	---	1710	300	10.50

续表 2 实验室房间空调风量及冷负荷汇总表

Table 2 Summary table of air conditioning volume and cooling load in laboratory rooms

编号	房间名称	建筑体积 /m <sup>3</sup>	换气次数	房间排风量/(m <sup>3</sup> /h)	局部排风量 / (m <sup>3</sup> /h)		房间送风量 / (m <sup>3</sup> /h)		冷指标/(W/m <sup>2</sup> )	室内冷负荷 Q <sub>L</sub> /kW
					最小风量	最大风量	最小风量	最大风量		
8	工作站	44	5	250	—	—	—	230	300	4.70
9	男更	54	5	300	—	—	—	270	200	3.90
10	女更	54	5	300	—	—	—	270	200	3.90
11	土壤风干间	206	5	1050	—	—	950	950	300	22.10
12	研磨间	89	5	450	—	—	—	410	300	9.60
13	采样耗材间	131	5	700	—	—	630	630	300	14.05
14	采样设备间	297	5	1500	—	—	1350	1350	300	31.80
1	样品配置间	37	5	200	—	—	—	180	300	4.00
2	嗅辨室	55	5	300	—	—	—	270	300	5.85
3	无氨室	35	5	200	—	—	—	180	300	3.75
4	理化分析室 2	31	5	200	500	1500	—	1230	300	3.30
5	高温室	51	5	300	—	—	—	270	300	5.55
6	试剂室	33	5	200	—	3000	—	2280	300	3.60
7	标准物质间	46	5	250	—	600	—	650	300	4.95
8	元素前处理室	92	5	500	1000	3000	1150	2550	300	9.90
9	缓冲室	21	5	150	—	—	140	140	300	2.25
10	天平室	47	5	250	—	—	230	230	300	5.10
11	有机前处理室	180	5	900	2000	6600	2210	5430	300	19.30
12	洗消间	60	5	350	—	—	—	320	300	6.50
13	样品间	139	5	700	—	—	—	630	300	14.95
14	理化室	239	5	1200	2500	7800	2830	6540	300	25.65
15	理化分析室 1	58	5	300	—	600	—	690	300	6.20
16	元素分析室	122	5	650	—	1800	—	1850	300	13.15
17	工作站	68	5	350	0	—	320	320	300	7.25
18	气相气质室	97	5	500	—	2700	—	2340	300	10.45
19	气相质谱室	46	5	250	—	900	—	860	300	4.90
20	预留实验室	99	5	500	—	—	—	450	300	10.65
合计	—	—	—	16300	10000	46050	13610	46980	—	328.70

由表 2 可知, 本实验室最大送风量为 46980m<sup>3</sup>/h, 最小送风量为 13610m<sup>3</sup>/h, 组合空调机组内选用 1 台变频循环送风机。夏季送风温度为 18℃, 送风相对湿度为 95%, 冬季送风温度为 24℃, 室

内、外设计参数按上文选取, 通过空调焓湿图和空调冷、热、湿负荷计算公式可得本实验室不同送风量的冷热湿负荷, 详见表 3。

表 3 实验室冷热湿负荷统计表

Table 3 Statistical Table of Laboratory Cold, Hot, and Wet Load

	送风量/(m <sup>3</sup> /h)	夏季供冷量 /kW	冬季预热量 /kW	冬季加热量 /kW	冬季加湿量 / (kg/h)
最大	46980	547	280	222	310
最小	13610	159	81	64	90

空调新风送风夏季处理过程焓湿图见图 3。室内状态点 N：温度 24℃，相对湿度 55%；室外状态点 W：34.7℃，湿球温度：26.8℃；送风状态点 L：温度 18℃，相对湿度：95%。

对湿度要求较高的实验室，可以处理到 14℃、95%的机器露点，然后再热至 18℃送至室内，可以通过冷冻除湿降低室内的含湿量。

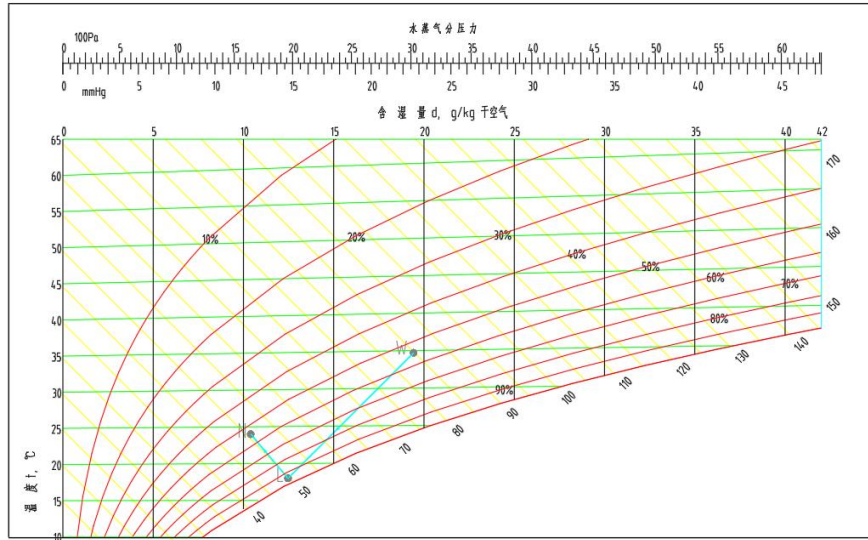


图 3 夏季新风处理焓湿图

Fig.3 Summer fresh air treatment Psychrometric Chart

由于局部排风含有污染和有害气体的成分较多，实验室全面排风和局部排风应分别设置排风机，由表 2 可知，实验室的全面排风量为 16300m<sup>3</sup>/h，根据工艺要求，土壤风干间、采样耗材间、采样设备间、有机前处理室和理化室设定为常开模式，故全面排风量变化范围是 5350m<sup>3</sup>/h~16300m<sup>3</sup>/h，满足风机的最佳变频范围，选用 1 台变频排风机，风机风量：17000m<sup>3</sup>/h，风压：435Pa，电机功率：3kW；局部排风量变化范围是 10000m<sup>3</sup>/h~46050m<sup>3</sup>/h，最小风量占比为 21.7%。超出排风机的最佳变频范围，故局部排风选用 2 台变频排风机并联运行，每台风机风量：24500m<sup>3</sup>/h，风压：550Pa，电机功率：5.5kW。

### 3.2 空调系统末端组成及冷热源

实验室空调系统末端由 VRV 多联机空调系统+组合式空调机组系统组成，VRV 多联机空调系统主要承担房间的围护结构、人员、照明散和设备散热引起的冷负荷，组合式空调机组系统主要将室外新鲜空气经过热湿处理后送入各房间内，承担新风的冷负荷，对控制湿度要求较高的实验室房间也可以承担房间的湿负荷。由于实验室要求控制一定的温湿度，需要空调系统运行具有较高的稳定性，本

组合式空调机组冷热源选用一体式双冷高效热泵机组，本建筑仅三层东侧区域为实验室房间，根据表 3 可知，夏季供冷量为 547kW（最小制冷量 159kW），选用 1 台制冷量 550kW（制热量为 428kW）的水冷一体式双冷高效变频热泵机组，冷媒供、回水温度为 7/12℃。冬季加热量为 222kW（最小加热量为 64kW），热媒供、回水温度为 50/45℃，冬季预热量为 280kW（最小预热量为 81kW），冬季加湿量为 310kg/h（最小加湿量为 90kg/h），预热热源和加湿热源均采用 0.3MPa 的饱和蒸汽，接自厂区的蒸汽管网。

为满足实验室的特殊环境控制要求，组合式空调机组应包括粗效过滤、制冷、加热、加湿、循环风机、均流、中效及亚高效等功能段。

### 3.3 定、变风量阀通风系统设计

本实验室设计中，将通风橱、试剂柜和万向罩局部排风设备合用 1 套排风系统，房间全面排风合用 1 套排风系统，实验室房间的所有新风送风采用 1 套系统，在各实验室房间的送、排风支管上分别设置定、变风量阀和电动密闭阀，保证实验室的新风送风与排风系统匹配，维持各个实验室房间的风量平衡和正、负压控制。各实验室房间的送排风方

式及定、变风量阀设置情况分类: (1) 前处理室 1、前处理室 2、理化分析室 2、元素前处理室、有机前处理室、理化室房间内有通风橱间歇运行的局部排风设备, 各通风橱局部排风支管、全面送风支管均设置变风量阀和电动密闭阀, 房间全面排风支管设置定风量阀和电动密闭阀, 即采用变送变排方式, 电动密闭阀对每个房间的送排风进行独立开关控制、变风量阀根据通风橱的运行台数来实时调节局部排风量和房间送风量, 通过送、排风量差控制室内静压, 保证室内为微负压; (2) 液相色谱室、液质室、气相气质室、试剂室、标准物质间、理化

分析室 1、元素分析室、气相气质室、气质相谱室房间内有万向罩或试剂柜的局部排风设备, 连接万向罩或试剂柜的排风支管、全面排风支管和送风支管设置定风量阀和电动密闭阀, 即采用定送定排方式, 电动密闭阀对每个房间的送排风进行独立开关控制, 定风量阀可设定为运行/值班两种风量模式, 保证室内微负压。(3) 无局部排风设备的实验室房间采用定送定排方式, 除男更、女更室内维持微正压外, 其余实验室房间室内均维持微负压, 保证有害、污染气体不对外扩散。图 4 是几种典型实验室房间的送、排风系统流程图。

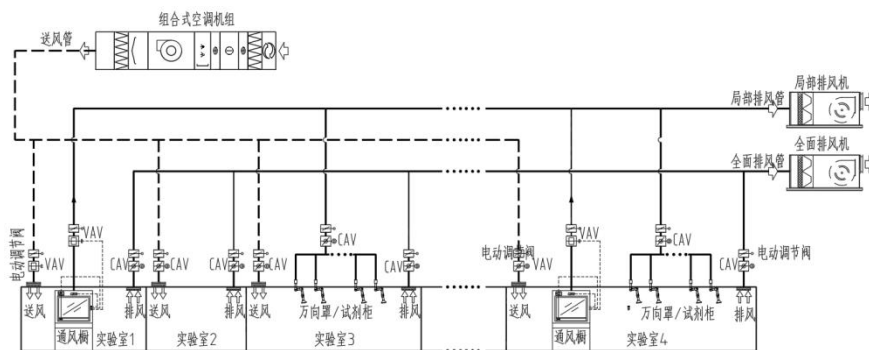


图 4 实验室通风系统流程图

Fig.4 Laboratory ventilation system flow chart

由图 4 可知, 实验室 1 和实验室 4 的房间全面排风采用电动密闭阀+定风量阀, 局部排风和房间送风支管采用电动密闭阀+变风量阀, 整个房间为变送变排方式; 实验室 2 和实验室 3 的房间的局部排风、全面排风和送风支管均采用电动密闭阀+定风量阀, 整个房间为定送定排方式。

## 4 定、变风量阀控制

### 4.1 实验室静压控制

实验室房间应维持微负压, 压差值宜取  $15 \sim 50 \text{Pa}$ <sup>[5,6]</sup>。为了维持房间的微负压, 新风补风量一般为排风量的  $70 \sim 90\%$ , 采用定、变风量阀控制送、排风风量的风量差值, 粗调室内的静压值, 再通过读取室内静压实际值来追踪、细调、控制室内静压, 需要在实验室房间内安装差压计, 当实验室为变送变排方式 (实验室 1、4) 时, 在实验室房间和走廊分别设置压力感测头, 将送风变风量阀控制器的正、负压力采样口分别接到实验室房间和走廊区域, 通过调节送风量来有效控制实验室房间压差, 使实验室房间的压差稳定在设定值, 实现变风量系

统对实验室压差的有效控制。当实验室为定送定排方式 (实验室 2) 时, 在实验室房间和走廊分别设置压力感测头, 将送、排风的风量差值的控制器的正、负压力采样口分别接到实验室房间和走廊区域, 通过调节送风量来有效控制实验室房间压差, 使实验室房间的压差稳定在设定值, 实现变风量系统对实验室压差的有效控制。

### 4.2 实验室送、排风独立控制

在每个实验室的送、排风支管上安装电动密闭阀, 根据实验室局部排风设备使用特点安装定风量阀或者变风量阀。通过电动密闭阀的启闭实现每个实验室的独立开关控制, 通过双位定风量阀和变风量阀实时调节每个实验室的送、排风量, 在个别实验室或个别局部排风设备停止使用时, 减少系统的排风量和新风量, 可有效降低实验室通风空调系统的运行能耗。

## 5 结论

(1) 在实验室通风空调系统设计中, 因局部排风设备多、排风量大, 造成新风补风量大, 补风



量大是造成实验室空调系统投资和运行费用增加的主要因素。采用定、变风量阀独立、实时控制每个实验室的送风量、排风量,在控制实验室的静压差、保证运行安全的情况下,能够极大的降低空调送风系统的运行能耗。

(2) 为保证定、变风量阀的合理、有效应用,应对不同使用功能的实验室进行分类,合理选择定风量阀和变风量阀,同时空调送风机、局部排风机和全面排风机均采用变频调速风机,保证送、排风量在最佳变频范围内调节通风空调系统的送、排风量,达到节能降耗目的。

(3) 对于实验室建筑面积较小时,选用水冷一体式双冷高效变频热泵机组,根据房间送风量的大小实时调节机组制冷量或供热量,可以降低热泵机组的运行能耗。

(4) 实验室房间采用 VRV 多联空调机+新风送风系统,对湿度控制要求较高的实验室,新风处理到 14℃、95% 的机器露点,通过等湿再热至 18℃ 送入室内,新风承担新风冷负荷和房间内的湿负荷,VRV 承担围护结构、人员、照明和设备散热引起的冷负荷。

#### 参考文献:

- [1] 林忠平,张昊,杨云涛,等.某研发中心实验室空调通风系统案例分析与讨论[J].暖通空调,2013,43(5):28-33.
- [2] 俞丽华,王洪军.恒温恒湿科学实验室的空调系统设计[J].制冷与空调,2018,32(5):511-514.
- [3] 孙晓禹,杨硕,刘舒佳.某大型制药研发实验室空调通风系统设计[J].洁净与空调技术,2023,(6):40-43.
- [4] JGJ 91-2019,科研建筑设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [5] 徐伟鹏.某高校现代化实验室通风空调系统设计研究[J].洁净与空调技术,2021,(12):63-66.
- [6] 任松保,喻稳娟.化学实验室通风节能改造案例分析[J].洁净与空调技术,2018,6(2):98-101.
- [7] 皇家空调智能快速变风量调节阀系列产品[M].美国皇家空调,2023.
- [8] 皇家空调机械式定风量阀[M].美国皇家空调,2021.
- [9] 曹斌,陆琼文.医学实验室空调通风系统能效提升技术研究[J].暖通空调,2022,52(9):147-152.
- [10] 周谨.一种新型热回收装置在实验室空调系统中的应用[J].暖通空调,2021,51(8):119-122.

#### (上接第 224 页)

- [11] 许红军.日光温室太阳辐射模型构建与墙体蓄热层厚度的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [12] 周峰,李正鹏,尚晓冬,等.工厂化瓶栽杏鲍菇培养及出菇技术浅析[J].安徽农学通报,2017,23(12):50-52.
- [13] 王福军.计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:7-12.
- [14] 陶文铨.数值传热学(第2版)[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [15] 郭鸿志.传输过程数值模拟[M].北京:冶金工业出版社,1998.
- [16] Chen L, Qian L, Zhang X, et al. Research progress on indoor environment of mushroom factory[J].

International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022,15(1):25-32.

- [17] 周超帆.食用菌温室环境CFD模拟与模糊控制系统设计[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [18] 周伟.温室环境CFD非稳态模型构建及其在温室温度控制中的应用研究[D].南京:南京农业大学,2014.
- [19] 后尚,田瑞,闫素英.呼和浩特地区太阳辐射模型分析[J].可再生能源,2008,(2):79-82.
- [20] 彦启森,赵庆珠.建筑热过程[M].北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [21] 段文利,杨洪海,刘宇宏.食用菌培养室通风气流组织改造设计研究[J].制冷与空调,2019,33(6):635-640.