

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-616-08

武汉常福医院空调压差控制设计

刘付伟 夏旭辉 陈焰华 昌爱文 黄杜钗 万东东 朱君隆

(中信建筑设计研究总院有限公司 武汉 430014)

【摘要】 武汉常福医院为平疫结合医院,介绍了该医院压差控制系统设计,讨论了不同的压差计算方法及半污染区走道送、排风风量的关系;介绍了常福医院典型科室的压力梯度设计及控制原理,分析了实际项目中压差与设计不符的原因,为同类型医院设计提供了一定的参考依据。

【关键词】 压差控制;平疫结合;清洁区;半污染区;污染区;渗透风量

中图分类号 TU83 文献标识码 B

Air Conditional Pressure Difference Control Design of Wuhan ChangFu Hospital

Liu Fuwei Xia Xuhui Chen Yanhua Chang Aiwen Huang Duchai Wan dongdong Zhu Junlong

(CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Wuhan, 430014)

【Abstract】 Wuhan Changfu hospital is a combination Hospital of epidemic prevention and treatment, this paper introduces the design of the pressure difference control system of Wuhan Changfu hospital, discusses the different calculation methods of pressure difference and the relationship between the air supply and exhaust volume in the corridor of semi polluted area, introduces the pressure gradient design and control principle of typical departments in Changfu hospital, and analyzes the reasons for the inconsistency between the actual project and the design, so as to provide a reference for the design of similar hospitals.

【Keywords】 Differential pressure control; combine normal condition with mergency; Clean Zone; Semi polluted area; Contaminated zone; infiltration Airflow

作者(通讯作者)简介:刘付伟(1981.08-),男,硕士研究生,高级工程师, E-mail: liufw@citic.com
收稿日期:2021-11-22

0 引言

2020年新冠病毒全球大流行,收治新冠病毒医疗资源严重不足,传染病医疗资源遭遇挤兑,人民生命财产损失惨重,按照国家发展改革委、国家卫生健康委、国家中医药局制定的《公共卫生防控救治能力建设方案》^[1],国家紧急发行抗疫专项债,新建、改扩建大量医院,平时作为普通医院使用,疫情暴发期间作为传染病房使用,补齐医疗资源短板。常福医院是武汉市为了完善重大疫情防控机制,提高公共卫生工作水平,统筹规划开工建设的公共卫生应急管理基础设施的平疫结合医院之一。

1 工程概况

武汉常福医院位于武汉市蔡甸区,为武汉市公

共卫生应急管理体系基础设施建设项目之一,处于医疗资源薄弱的新城区,周边无住宅用地,主要是物流仓储用地。总建筑面积约220721m²,其中地下约81701m²,地上约139020m²,由门诊楼、医技楼、感染楼、后勤楼、住院楼组成,感染楼设置有100张床位,住院楼设置有900张床位。平时为综合医院,三级疫情响应时启用感染楼,二级疫情响应时启用住院楼、急诊楼、医技楼,一级疫情响应时再启用北侧预留空地建设1000张传染病床位。

普通综合医院除了感染科及部分医技科室外,绝大部分区域只有相对的洁污分区,送风大于排风或者只送不排保持清洁区相对正压,排风大于送风或者只排不送保持污染区相对负压,对压差没有严格规定。应对疫情的平疫结合医院按呼吸道传染病

医院标准设计和建设,与普通综合医院相比是按照传染病医院的院感控制要求设计有“三区两通道”和严格的医患、洁污物理隔离和分流,对医院室内环境来说主要是在新、排风需求和房间压力梯度控制上存在差别,可以根据传染病的控制要求快速进行平疫转换。

平疫结合医院“平疫结合”区应符合现行国家标准《传染病医院建筑设计规范》GB 50849^[2]的有关规定,进行严格的物理隔离和洁污分区,即清洁区、半污染区、污染区,并且各区应保持严格的压力梯度要求,即各相邻相通空间不小于 5Pa 的压差。

2 压差计算方法

现行的国家标准、教材关于压差计算方法,主要有四种方式,分别如下。

2.1 《洁净厂房设计规范》GB 50073 计算方法

根据《洁净厂房设计规范》GB 50073 第 6.2.3 条,“洁净室维持不同的压差值所需的压差风量,根据洁净室特点,宜采用缝隙法或换气次数法确定”^[3]。

2.1.1 缝隙法

缝隙法宜按下式计算:

$$Q = a \cdot \sum (q \cdot L) \quad (1)$$

式中 Q 为维持洁净室压差值所需的压差风量, m^3/h ; a 为根据围护结构气密性确定的安全系数,可取 1.1~1.2; q 为当洁净室为某一压差值时,其围护结构单位长度缝隙的渗漏风量, $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, 详见表 1; L 为围护结构的缝隙长度, m 。

表 1 围护结构单位长度缝隙的渗漏风量

Table 1 Air leakage of unit length gap of enclosure structure

门窗形式 漏风量 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 压差 (Pa)	门窗形式			
	非密 闭门	密 闭门	单层固 定密闭 钢窗	单层开 启式密 闭钢窗
5	17	4	0.7	3.5
10	24	6	1.0	4.5
15	30	8	1.3	6.0
20	36	9	1.5	7.0
25	40	10	1.7	8.0

续表 1 围护结构单位长度缝隙的渗漏风量

门窗形式 漏风量 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 压差 (Pa)	门窗形式			
	非密 闭门	密 闭门	单层固 定密闭 钢窗	单层开 启式密 闭钢窗
30	44	11	1.9	8.5
35	48	12	2.1	9.0
40	52	13	2.3	10.0
45	55	15	2.5	10.5
50	60	16	2.6	11.5

2.1.2 换气次数法

换气次数法,宜按下列数据选用:压差 5Pa 时,取 1 次/h~2 次/h;压差 10Pa 时,取 2 次/h~4 次/h。

2.2 《建筑防烟排烟系统技术标准》GB 51251 计算方法

根据《建筑防烟排烟系统技术标准》GB 51251 第 3.4.7 条规定,门开启时,规定风速值下的其他门漏风总量应按下式计算^[4]:

$$L = 0.827 \times A \times \Delta P^{1/n} \times 1.25 \times N_2 \quad (2)$$

式中: A 为每个疏散门的有效漏风面积, m^2 ; 疏散门的门缝宽度取 0.002m~0.004m; ΔP 为计算漏风量的平均压力差, Pa; n 为指数(一般取 $n=2$); 1.25 为不严密处附加系数; N_2 为漏风疏散门的数量。

2.3 《工业通风》中计算方法

教材《工业通风》中第七章关于风压的计算公式^[5]:

$$L = 3600 \mu F (2 \Delta P / \rho) \quad (3)$$

式中: μ 为流量系数,一般取值 0.3~0.5; ΔP 为计算漏风量的平均压力差, Pa; F 为缝隙面积, m^2 ; ρ 为空气密度,取 $1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

2.4 不同计算方法讨论

换气次数法根据不同压差,漏风量选用不同的换气次数,风量范围较为宽泛,带来的误差相对较大。以压差 5Pa 为例,对于同样开设一个 1.2m×2.1m 单扇门、吊顶高度为 3m 的房间来说,面积为 15 m^2 与 30 m^2 的两个房间,按照换气次数 2 次/h 计算,漏风量分别为 90 m^3/h 、180 m^3/h ,漏风量相差一倍,而实际上两者漏风量应相同,可见换气次数法误差太大。

其余三种计算方法公式(1)~(3),以 1.2m×2.1m 的单扇门为例,计算结果详见表 2。

表 2 两种公式计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of two formulas

压差 (Pa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	备注
风量 m ³ /h											
公式 (1) 计算结果 m ³ /h ①	134	190	238	285	317	348	380	412	436	475	q 按照表 1 中非密闭门取值, a 取值 1.2
公式 (2) 计算结果 m ³ /h ②	110	155	190	220	245	269	291	311	330	347	缝隙宽度按照公式 (2) 中 0.002m 取值
公式 (2) 计算结果 m ³ /h ③	137	194	238	275	307	336	363	388	412	434	缝隙宽度按照公式 (2) 中 0.0025m 取值
公式 (3) 计算结果 m ³ /h④	122	172	211	244	243	272	298	343	365	384	流量系数 μ 取值 0.4, 缝隙宽度按 0.0025m 取值
计算误差 (②-①)/①	18%	18%	20%	22%	23%	22%	18%	25%	24%	27%	
计算误差 (③-①)/①	2.2%	2.1%	0%	3.5%	3.1%	2.6%	4.5%	5.8%	5.5%	8.6%	
计算误差 (③-④)/③	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	11.5%	

从上述结果对比可以看出, 公式 (1) 的计算结果与公式 (2) 在缝隙宽度取值 0.0025m 时结果相近, 最小误差为 0, 最大误差为 8.6%; 公式 (3) 的计算结果与公式 (2) 在同样的缝隙宽度情况下, 不同压差情况下误差趋于一致性, 均为 11.5%; 经计算, 当公式 (3) 中流量系数 μ 取值 0.452 时, 两者误差基本为 0。

公式 (1) 中单位长度缝隙渗漏空气量用公式计算是比较困难的, 表 1 是通过不同形式的门、窗进行多次试验的数据统计后得出的, 门窗形式及密封与以往均有较大变化, 公式 (1) 理论性不强; 公式 (2) 中的变量仅有缝隙面积, 公式 (3) 除了附加系数, 变量也仅有缝隙面积, 所以公式 (2) 和 (3) 计算方法更为严谨。本项目为平疫转换医院, 均为非密闭门, 计算方法采用公式 (2), 根据《防火门》GB12955-2008^[6]规定: 门扇与上框的配合活动间隙不应大于 3mm, 双扇、多扇门的门扇之间缝隙不应大于 3mm, 门扇与下框或地面的活动间隙不应大于 9mm, 考虑安装工艺及后期使用情况, 参考公式 (2) 的取值范围, 本项目缝隙宽度取 0.004m, 对于洁净度要求较高的且采用密闭门的场所, 缝隙宽度可以适当取小。

3 “三区”送、排风量关系

本项目疫情使用的病区按照“三区两通道”设计, “三区”为清洁区、半污染区、污染区, “两通

道”为医务人员通道和病人通道。清洁区维持正压, 送风量大于排风量, 污染区维持负压, 送风量小于排风量, 对半污染走道而言, 压力值维持 -5Pa, 机械排风量是否一定大于机械送风量呢? 由上述公式 (2) 可知, 在相同的压差梯度下, 渗透风量仅与门的有效漏风面积有关, 所以半污染区走道送风量与排风量存在以下三种关系:

(1) 当清洁区通向半污染区走道门的有效漏风面积等于半污染区走道通向污染区门的有效漏风面积时, 从清洁区渗透到半污染区走道的风量等于半污染区走道渗透到污染区的风量, 此时半污染区走道的排风量等于自身换气次数风量, 即排风量等于送风量;

(2) 当清洁区通向半污染区走道门的有效漏风面积大于半污染区走道通向污染区门的有效漏风面积时, 从清洁区渗透到半污染区走道的风量就会大于半污染区走道渗透到污染区的风量, 此时半污染区走道的排风量等于自身换气次数风量加上渗透风量差额, 即排风量大于送风量;

(3) 当清洁区通向半污染区走道门的有效漏风面积小于半污染区走道通向污染区门的有效漏风面积时, 从清洁区渗透到半污染区走道的风量就会小于半污染区走道渗透到污染区的风量, 此时半污染区走道的排风量等于自身换气次数风量减去渗透风量差额, 即走道排风量小于送风量。

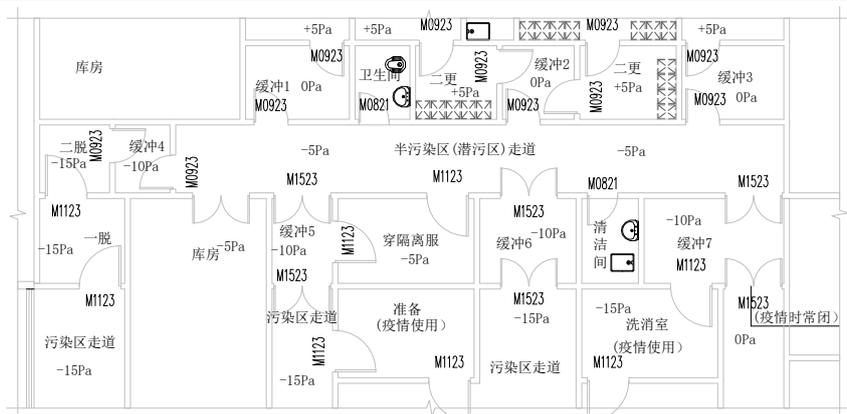


图 1 医技楼半污染区平面布置图

Fig.1 Layout plan of semi polluted area of Medical technology building

对于半污染区走道排风量很多设计人存在误区, 根据压力值 -5Pa 控制要求按照常识设计为排风量大于送风量。从上述分析可知, 此区域送、排风量关系是不确定的, 必须根据实际情况进行计算。图 1 为医技楼影像科半污染区平面布置图, 以此为例如来计算风量, 计算结果如表 3 所示。

单个房间的风量平衡计算公式为: 新风量+渗进风量=排风量+渗出风量。图 1 中库房排风量大于送风量, 卫生间、清洁间只排不送, 差额风量由通过门由走道渗入, 由于半污染区(潜在污染区)走

道维持压力 -5Pa , 所以此三个房间压力会比走道更低, 无需对此类房间压力进行设定。半污染区(潜在污染区)走道通过缓冲 1、缓冲 2、缓冲 3 渗进风量, 通过缓冲 4、缓冲 5、缓冲 6、缓冲 7 渗出风量, 同时补充库房、卫生间、清洁间的差额排风量, 经过计算渗出风量 $1403\text{m}^3/\text{h}$ 远大于渗进风量 $639\text{m}^3/\text{h}$, 此走道不但不设排风系统, 还需要进行补充风量, 且补充量也大于走道的 6 次/h 的换气次数风量, 大额渗出风量将由下一级污染区风机排走。

表 3 医技楼半污染区(潜在污染区)风量计算表

Table 3 Calculation of air volume in semi polluted area of Medical technology building

	房间压力 Pa	新风量 m^3/h	排风量 m^3/h	渗进风量 m^3/h	渗出风量 m^3/h
缓冲 1	0	200	200	213	213
缓冲 2	0	150	363	416	213
缓冲 3	0	200	200	213	213
缓冲 4	-10	150	150	213	213
缓冲 5	-10	150	150	330	330
缓冲 6	-10	200	200	330	330
缓冲 7	-10	300	560	790	230
卫生间	---	0	150	150	0
库房	---	500	600	100	0
穿隔离服	-5	250	250	0	0
清洁间	---	0	100	100	0
半污染区(潜污区)走道	-5	764	0	639	1403

注: 图中门 M0923、M1523、M1123 在 5Pa 压差情况下渗透风量分别为 213、330、230 m^3/h , M1523 在 10Pa 压差情况下渗透风量为 $460\text{m}^3/\text{h}$; 缝隙宽度均为 0.004mm 。

当系统正常运行时, 三区的压力梯度维持最终是由污染区排风保证的。对于半污染走道送风大于排风量的情况, 多余的送风量是由于半污染区与污

染区之间的门缝面积大, 补充半污染区的渗出风量, 半污染区相对于污染区是正压, 但是对于清洁区来说依旧是负压, 即半污染区依然是 -5Pa 的压力。

当开启半污染走道与上一级缓冲区之间的门,此区域压力梯度会瞬间失效,但是污染区与半污染区之间的渗透风量在正常运行,且清洁区的压力始终高于缓冲间,所以气流不会从半污染区经缓冲间到洁净区。以 0923 的门为例,正常情况下即压差 5Pa,缓冲间到半污染区的渗透风量为 213m³/h,当整扇门开启后,以整扇门为缝隙,反算出压差为 0.000764Pa,基本上可以忽略不计,即半污染区与缓冲间的压力梯度失效,但清洁区的压力是大于缓冲间的,所以气流依旧不会到洁净区。反而,若半污染区无论什么情况都按照排风量大于送风量设计,压力梯度会失衡,清洁区的清洁度可以保证,但是若半污染区设计排风量过大,有可能造成与污染区没有压力梯度甚至压力梯度相反,污染区的气流有可能传到半污染区,而且半污染区的负压会远大于设计压力,压力梯度失效。

4 典型区域压差控制设计

4.1 感染楼

感染楼完全按照《传染病医院建筑设计规范》^[2]设计,空调新风与排风分层、分区设置。门诊分设为清洁区、半污染区、呼吸道污染区和非呼吸道污染区 4 套送、排风系统。二层及以上分设为清洁区、半污染区、污染区 3 套送、排风系统。清洁区新风量按照维持压力值+5Pa 且不小于 3 次/h 换气次数设计;半污染区、污染区:非呼吸道新风量 3 次/h,呼吸道新风量 6 次/h,隔离病房新风量 12 次/h。

新风机组每层设置,排风机集中设置在屋顶。新、排风机组采用数字化节能空气处理机组和数字化节能排风机,室内新、排风采用分布式智能适应动力新风、排风模块。新风模块根据风量要求动态恒定送风量,排风模块根据压差要求动态调整排风量,新风、排风模块输出风量数字信号。新风机组根据智能适应动力模块总风量数据变频运行。“三区”渗透风量按照公式(2)计算,压力梯度为:清洁区+5Pa →→ 缓冲间 0Pa →→ 半污染区-5Pa →→ 缓冲间-15Pa →→ 污染区-20Pa,图 2 为感染楼污染区新、排风控制原理图。

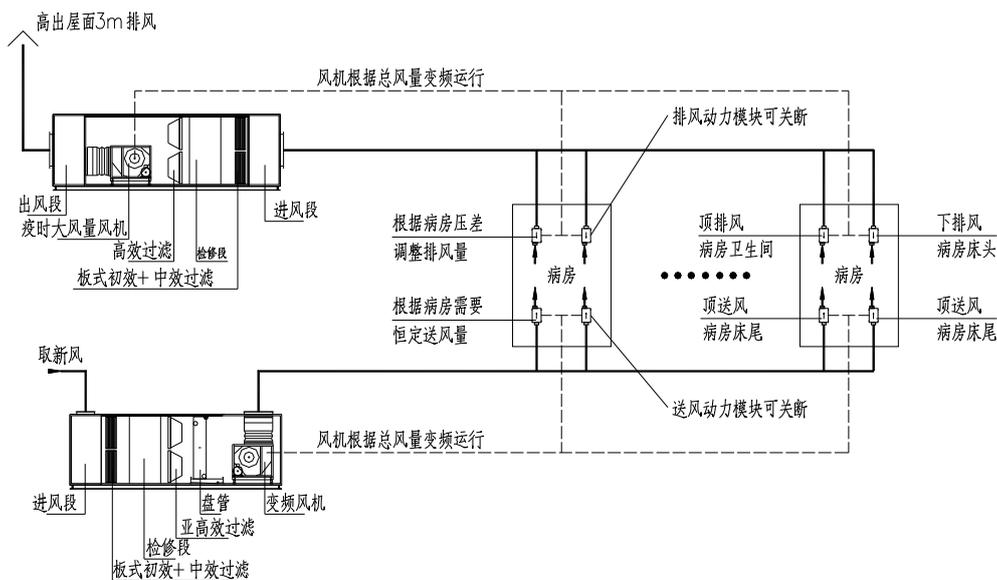


图 2 感染楼污染区新、排风控制原理图

Fig.2 Schematic diagram of new and exhaust air control in polluted area of Infection building

4.2 住院楼

普通住院楼护理单元有平疫转换要求,建筑平面按“三区”设置,由于清洁区和半污染区面积较小,平时共用新风机组,新风量均按照维持压力值+5Pa 且不小于 3 次/h 换气次数设计;疫情时此新风机组切换为仅供清洁区使用,半污染区单独设置

新风机组,按 6 次/h 换气次数设计,此机组平时不使用;污染区(病房区域)设置一台新风机组,平时按 2 次/h 换气次数,疫情时按 6 次/h 换气次数设计。新风机组分层、分区设置,均设置在清洁区,平时使用的新风机组、清洁区新风机组设置初中效过滤装置,疫情时使用的半污染区、污染区新风机

组设置初中效、亚高效过滤装置。

排风分层、分区设置, 排风机均集中在屋面布置, 平时使用的排风机组无过滤装置, 疫情时使用的半污染区、污染区排风机组设置初中效、高效过滤装置。“三区”渗透风量按照公式 (2) 计算, 压

力梯度为: 清洁区+5Pa → 缓冲间 0Pa → 半污染区-5Pa → 缓冲间-10Pa → 污染区-15Pa → 病房-20Pa, 图 3、图 4 为住院楼病房新风、排风平面布置图, 图 5 为污染区新、排风控制原理图。

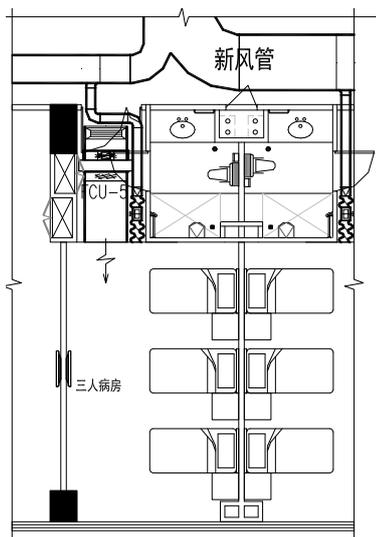


图 3 病房新风、送风平面布置图

Fig.3 Layout plan of fresh air and air supply in ward

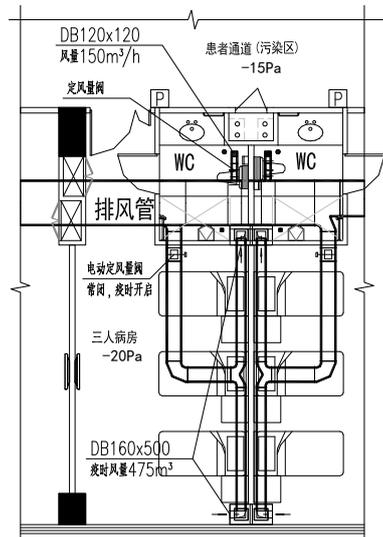


图 4 病房排风平面布置图

Fig.4 Layout plan of exhaust air in ward

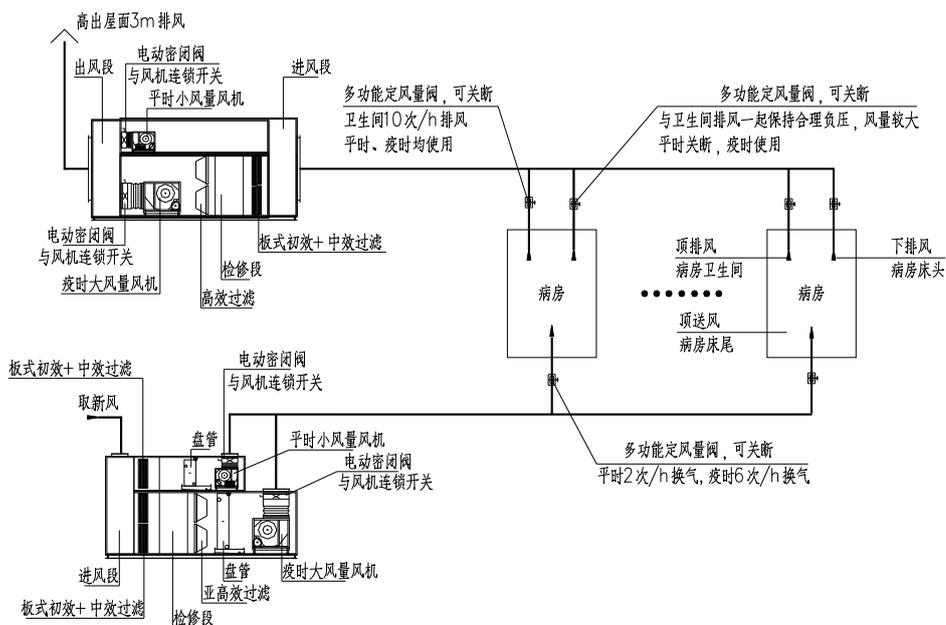


图 5 住院楼污染区新、排风控制原理图

Fig.5 Schematic diagram of fresh and exhaust air control in polluted area of Inpatient building

4.3 医技楼

医技楼中设置有放疗科、影像科、核医学、ICU、介入中心、检验科、输血科、病理科、手术中心等众多科室, 影像科、ICU 等疫情时均有使用要求,

平疫转换区域按照“三区”设置。清洁区新风按照维持压力值+5Pa 且不小于 3 次/h 换气次数设计, 半污染区和污染区平时按 3 次/h 换气次数设计, 疫情时按 6 次/h 换气次数设计, 所有区域均单独设置

新风机组。清洁区新风机组设置初中效过滤装置，疫情时使用的新风机组设置初中效、亚高效过滤装置。

排风系统同住院楼设置原则一致，分层、分区设置，排风机均集中在屋面布置，平时使用的排风机组无过滤装置，疫情时使用的半污染区、污染区

排风机组设置初中效、高效过滤装置。“三区”渗透风量按照公式（2）计算，压力梯度为：清洁区+5Pa →→缓冲间 0Pa →→半污染区-5Pa →→缓冲间-10Pa →→污染区-15Pa，图 6 为医技楼半污染区新、排风控制原理图。

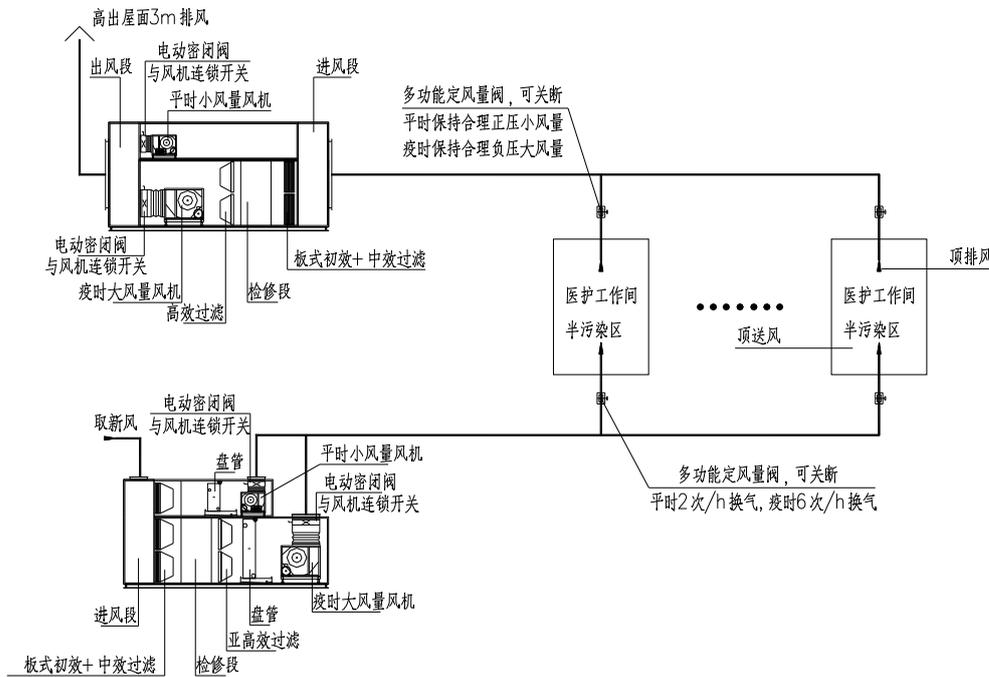


图 6 医技楼半污染区新、排风控制原理图

Fig.6 Schematic diagram of new and exhaust air control in semi polluted area of medical technology building

5 影响压差的主要因素

在实际工程项目中，很多区域压差无法按照设计要求调试出来，分析主要由以下原因造成：

(1) 压差风量计算有误

很多工程按照换气次数法进行风量计算，有些论文也采用换气次数法、或者缝隙法计算^[7-9]，如前文所述，这两种方式均不如公式（2）和（3）严谨，且应摒弃换气次数计算方法。

(2) 风机参数选型不对

末端风量计算完成以后，风机仍需考虑管路漏风量，附加 5%~10% 的系数，同时风机压头应通过计算确定，避免风压出现偏差。

(3) 围护结构密封不严

控制压差风量的大小与围护结构的气密性及维持的压差值大小紧密相关，除了门缝以外，还有

墙体、吊顶等。在实际工程中很多房间采用轻质隔墙，吊顶以上墙体均不隔到顶。吊顶上设置有灯具、设备、检修孔等，存在大量的缝隙，若隔墙不到顶，则无法保证相邻房间的压力梯度。此外管线穿越有压差要求的隔墙处，不管是否为防火墙均应密封严实，以保证围护结构的严密性^[7]。

(4) 维护管理问题

所有控制压差的风量均为根据缝隙渗透风量计算的结果，理论上所有门窗均处于关闭状态，但是实际运行中发现有些病房、走道存在外窗开启的情况，导致运行工况下无法达到设计压差。再者新、排风机组长时间运行，过滤器会附着大量污染物，使得两侧压差增加，有效送、排风量减小，一是增加空调能耗，二是压差无法达到设计要求，所以应及时清洗、更换过滤器^[10]。

6 小结

(1) 根据“平疫结合统筹设计,避免平、疫两套系统共存”^[1]及避免大规模拆改、快速投入转换的原则,所有平时和疫情时风管共用一套系统,通过阀门及设备转换来满足平疫转换的需求。因疫情是非常规状态,送排风主管风速可以适当提高,减少风管投资,建议主管风速可取10~11m/s。平疫转换时大部分区域风量相差2倍,住院病房风量相差3倍,需要根据平疫具体风量计算压头及功率。

(2) 设置合理的压力梯度及有效的压差控制措施,使空气只能定向流动,是疫情时控制病毒传播及保障医护人员安全的有效措施之一。为了便于系统风量调试和满足设计要求,有压差要求房间的风量调节阀均采用定风量阀,对于平时和疫情由于换气次数不同需要切换的阀门均采用电动控制阀,送风机、排风机均做好联动控制措施。

(3) 所有压差控制区域均按照门窗缝隙大小选择较为严谨的公式进行风量计算,且有压力梯度的相邻隔墙上应设置微压计。当人员进行三区流动时,开启缓冲间的门,压力梯度会失效,闭门后待微压计压力值显示正常时方可开启下一级的缓冲门。

(4) 对于压差控制而言,要从“三区”作为一个整体的角度来考虑,压力梯度层层递进。相邻压力梯度房间门窗缝隙决定了渗透风量大小,中间过渡压力区域可能存在送风量大于排风量的情况,但最终维持压力梯度的渗透风量还是会由污染区排风机排走,确保定向气流的实现。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家卫生健康委,国家中医药局. 公共卫生防控救治能力建设方案[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-05/21/content_5513538.htm, 2020-05-09.
- [2] GB 50849-2014, 传染病医院建筑设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [3] GB 50073-2013, 洁净厂房设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [4] GB 51251-2017, 建筑防烟排烟系统技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [5] 孙一坚, 沈恒根. 工业通风(4版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] GB 12955-2008, 防火门[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [7] 曾亮军, 王学磊. 传染病医院通风空调系统的设计特点[J]. 洁净与空调技术, 2019, 3(1): 83-87.
- [8] 龙洋波, 邢哲理. 可正负压切换隔离病房通风空调设计探析[J]. 制冷与空调, 2008, 22(5): 51-55.
- [9] 沈海英. 医院手术部及ICU病房洁净技术探讨[J]. 制冷与空调, 2019, 32(1): 65-67.
- [10] 周渊. 层流净化手术室空调系统的能源管理[J]. 医疗装备, 2019, 32(1): 65-67.
- [11] 国家卫生健康委办公厅, 国家发展改革委办公厅. 综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/18/content_5535492.htm, 2020-07-30.