

# 净化空调系统的室内压差控制

## 1 概述

压差控制在净化空调系统中是一个非常重要的环节。只有通过对净化区域的压差进行控制，保证合理的气流组织，才能达到净化和工艺的要求。例如洁净厂房必须保持一定的正压使外界未经净化的空气不会进入净化区域，保证洁净级别；并且通过对各净化区域的不同的压差控制，达到净化分区的作用，在 GMP 中就要求不同净化级别区域的压差应得到控制不小于+5Pa。在生物安全洁净室中，压差控制更是保证安全防护屏障的关键指标，在《生物安全实验室建筑技术规范》中指出必须使实验室的负压梯度得到稳定可靠的控制。因此对于净化空调系统来说，压差控制是非常重要的。

压差控制在实现中是比较困难，特别是在生物安全实验室中，要得到并保持精确、稳定的压差对于控制工程师而言绝对是一件具有挑战性的任务。因此在设计压差控制系统时，必须要根据实际情况从以下几个方面进行分析和确定：

风险分析评估；

定风量系统和变风量系统选择；

压差控制和余风量控制方法；

控制信号与噪声的影响；

制稳定性及响应速度；

建筑结构对压差控制的影响；风管泄漏对压力控制的影响。

首先必须对压差控制的风险进行分析，例如对于高等级的生物安全实验室而言，因为它有生物污染的高风险，各种相关的标准都对其有保持稳定负压梯度防止污染泄漏的严格要求，因此控制系统就必须能够稳定可靠的实现这样的控制目标。

## 2 压差控制方法

对于压差控制系统来说，其所达到的结果实质上是对渗人或渗出空气的控制，就其控制策略而言可分为被动式和主动式控制。

定风量(CAV)是一种被动式的控制方法，它使用手动风量调节阀，通过简单的送风和排风平衡，送风比排风少(或多)一定的量(余风量)，来达到所期望的压差。在选择定风量这样的控制策略时必须认真的考虑，因为定风量系统有突出的局限性。主要有以下几点：

- (1) 所有时间，设备必须保持恒定的送风量和排风量。
- (2) 不能有任何排风设备(如生物安全柜等)增加或减少，灵活性差。未来的扩展会由于系统容量限制而受限。
- (3) 必须按全负荷设计，要有较大的余量来弥补由于过滤器等造成的送风和排风系统性能的下降，连续的全负荷运行使能耗极大，因此运行成本非常高。
- (4) 由于风机系统、过滤器系统等性能下降或风阀位置改变等情况下，系统经常要重新进行风平衡调试，需要大量的维护。
- (5) 由于在所有时间都是大风量运行，噪音会过高。因此如果不能接受以上的局限性时，就不应选取这样的控制策略。目前，通过在送风管和排风管上采用压力无关型的定风量控制装置(如文丘里阀)的定风量系统，在一定程度上可以主动的、动态的调节流量，消除系统静压波动造成的对流量的影响，从而保证流量的恒定和控制的稳定。

变风量系统(VAV)是一种主动式的压力控制策略，它通过电动风量调节阀连续不断的对送风量或排风量进行调节，以保持希望的压力。主动式的 VAV 压力控制方法可以分为两种：纯压差控制(OP)和余风量(又称为流量追踪)控制(AV)。

### 2.1 纯压差控制方法

纯压差控制方法相对而言简单明了，其基本原理如图 1。其控制原理为：压差传感器测量室内与参照区域的压差(OP)，与设定点(即期望的压差)比较后，控制器根据偏差按 PID 调节算法对送风量(或排风量)进行控制，从而达到要求的压差。可以看出，送风量(或排风量)是压差( $\Delta p$ )、设定点以及 PID 常数( $\alpha, \beta$ )的函数。

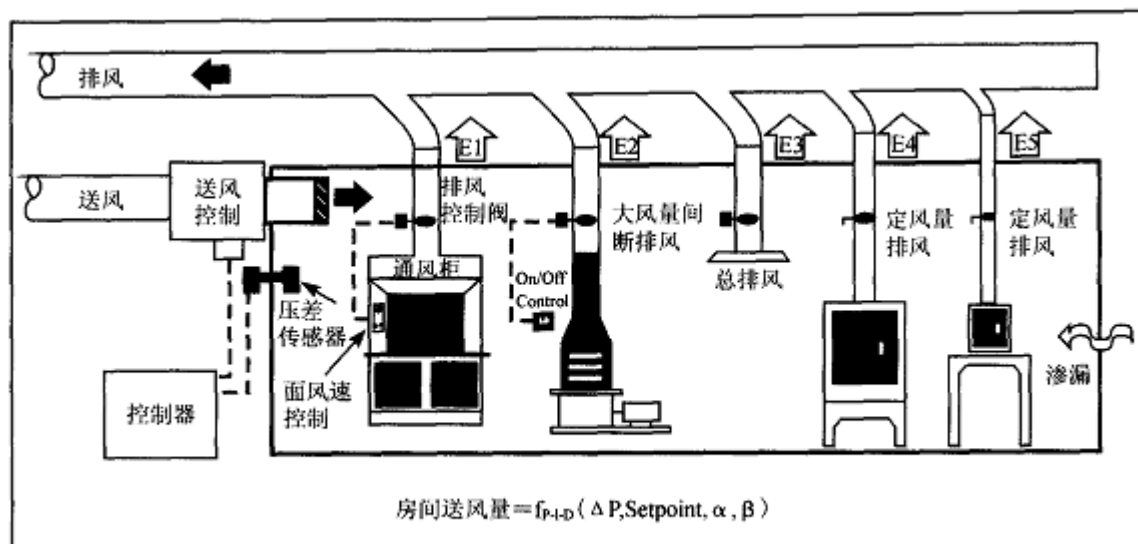


图 1 纯压差控制原理图

另外一种相似的压差控制方法则是根据伯努利原理，利用一个装在小管内的风速探头，将小管置于洁净室与参照区之间的开孔中，由于洁净室内与参照区的压力差将使空气从此小管中流过，管中的风速探头就可传感洁净室内与参照区之间的空气流速，从而根据伯努利原理利用风速计算出洁净室与参照区的压差，根据此压差信号，按照上述的方法，控制器对洁净室的送风或排风量进行控制，达到所期望的压差值，这样的方法称为“伪压差”控制方法。

## 2.2 余风量(气流追踪)控制方法

洁净室的送风量与排风量之间保持一定的风量差(称为余风量)，必然会导致洁净室产生一定的压差。余风量(气流追踪)控制即控制系统实时测量风量(送风和排风量)变化，通过调节送风量或排风量，动态的达到相应的风量平衡，使送风量和排风量之间保持恒定的风量差，从而维持恒定的压差。其基本原理见图 2，控制系统利用气流测量装置实时测量送风量和排风量，排风量可以在排风主管上测量，或如图中在各个单独的排风上进行测量并求和，控制器据此调节送风量，

使其追踪排风量的变化，保持一定的余风量，从而达到所希望的压差值。可以看出余风量控制是一个开环控制系统。

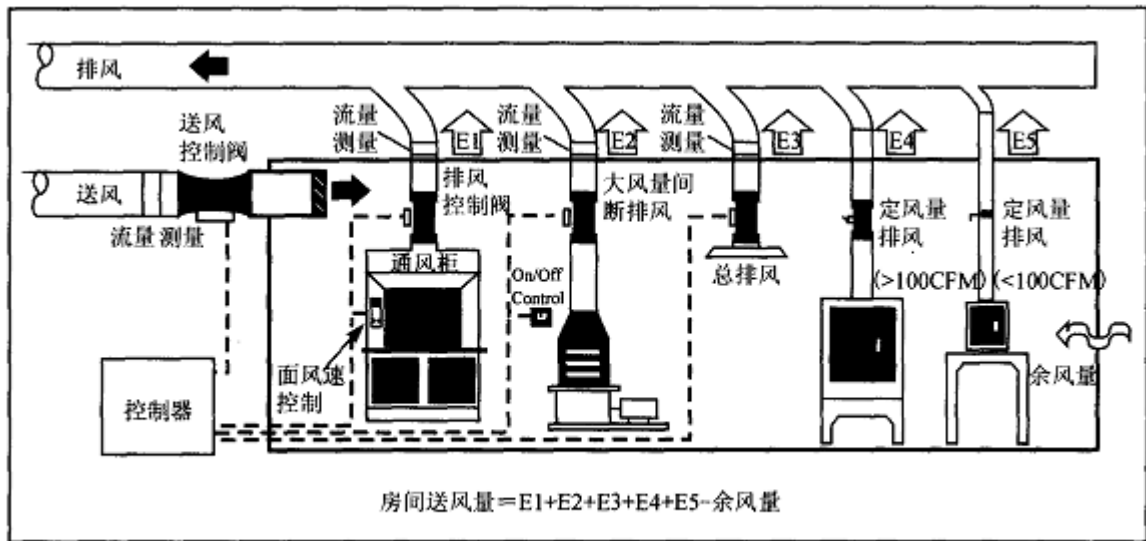


图 2 余风量控制原理图

在这里余风量就是达到所希望压差时渗入或渗出洁净室的空气流量(单位为 CFM)。负的余风量即总排风量大于总送风量，它将导致负压的产生，而正的余风量则是总送风量大于总排风量，它将导致正压产生。

在图 2 中的风量等式中，余风量是定值。但在实际情况下，它是变化的，例如当流量传感器发生偏移时，实际的余风量也将发生变化。因此，应该考虑选择足够大的余风量来弥补由于围护结构气密程度、风管泄漏以及流量测量装置精度误差等造成的影响。

上述的两种压差控制方法，在实际运用中都必须按照预定的频率进行验证。例如对余风量控制，每半年就应该进行对设定的余风量进行校正。

### 2.3 混合控制系统

由于生物安全等级 3 或 4 级的生物安全实验室的研究和实验对象非常危险，实验室的压差控制以及气流方向控制更加重要，必须确保压差和气流方向得到稳定可靠的控制。对于这样压差控制非常关键的地方，采用纯压差控制和余风量控

制两种方法混合的控制系统是很好的选择,它可以确保对实验室压差稳定可靠的控制。

通常的做法是采用余风量控制作为基本控制方法,同时加入压差传感器和控制器对余风量控制系统的余风量进行设定。当房间特性发生变化时,如风管的泄漏以及围护结构的气密性等发生变化,余风量也会发生变化(通常是变大),此时压差控制系统可以动态的计算出一个合适的余风量,以保持稳定的压差控制。

同时,一旦余风量增加到一个预定值时,系统将发出报警,此时可能需要对流量测量装置进行校正,或者对风管和围护结构的泄漏进行处理,使系统状态回到正常范围内。因此这样的系统可以通过对余风量的监视实现对整个实验室的控制系统、风管系统、围护结构完整性的监视。

### 3 稳定性与响应速度

一般建筑技术构成的房间,它能够达到的控制压差约为 2.5Pa,对于测量来说这是一个非常小的压差(信号),同样对于测量传感器的校正来说也是非常困难的。由于门的开关、生物安全柜调节门的移动、人员的运动等很多因素造成的扰动(噪声)约可达到 25Pa。因此对于纯压差控制而言,其测量信号与噪声之比为 1:10。这样的情形就如同测量一个湖泊的液位,要求精度在 1 厘米,而湖泊的波浪却有 10 厘米高,如果希望得到精确的测量值,就需要很长的时间来平均波峰和波谷。在这样的情况下,如果希望快速的响应就不可能保证精度,精度与速度(或响应时间)是矛盾的。

对于纯压差控制系统,响应时间一般要求在数分钟以内。因此,很多这样的控制系统都是牺牲稳定性来达到响应时间的要求,它在达到稳定控制之前需要在设定点附近波动相当长的时间。不幸的是,系统达到稳定控制的时间往往比扰动发生的频率长,因此系统可能整天都在波动,直到人员下班、工作结束,不再有扰动发生,系统才能够达到稳定状态。

对于“伪压差”控制系统,其测量对象是空气流速,它相对于纯压差控制更稳定、更快速一些,因为流速信号和噪音信号是与动压的开平方成比例关系,它大

约能够把信号与噪声比提高到 1:3。可以看出，测量对象的简单改变就可以大大改善系统的 J 性能。然而，即便如此，噪音依然达到了信号的 3 倍，当扰动发生后，控制系统仍需要超过 60 秒以上的时间达到稳定输出。需要注意的是，由于测量气流速度需要在房间与参照区域开孔，因此这样的控制系统对于很多场合的应用是不允许的，例如对洁净度有较高要求的场合，或高等级的生物安全实验室也不应使用。

对于压差和“伪压差”系统来说，在某些条件下会造成严重的压力问题，如在进行负压控制时，当洁净室门打开时，所有的测量信号如压差和流速都会消失。虽然一些控制器有按照预定时间锁定输出的功能来弥补这样的问题。然而，当门长时间打开时，压力控制系统就会关闭送风，以便使房间回到负压的设定值。此时，空气将会从过道(或相邻区域)被吸入打开的房间，过道(或相邻区域)的压力必然下降。而如果其他洁净室也是使用过道(或相邻区域)作为压差参照点，那么其他洁净室的压差控制器也将关闭送风，由此发生连锁反应，更多的空气被从过道(或相邻区域)吸入洁净室排走，测量压差值一直不能达到设定，而实际压力却在不断下降。同样对于正压控制也会产生类似的问题。可以想像，这将会造成整个洁净室严重的压力问题。当然，对于那些不要求严格房间压差控制，或风险评估对稳定时间以及稳定性没有较高要求的设施，并在 HVAC 系统设计中采取了措施(如采用双门互锁的缓冲间进行隔离)能够避免如上述问题发生的情况下，采用纯压差控制也是可行的。

相对而言，余风量(或流量追踪)控制系统的信号测量是采用流量测量装置对送风量和排风量进行测量。而送风量和排风量通常都是比较小的测量值，在这样的情况下，例如信号测量为 1000CFM，而噪声(各种扰动)约能达到 1000FM，信号噪声比可以高达 10 : 1。因此，在这样的情况下，系统可以达到很高的精度、很高的稳定性以及非常迅速的响应。因此在对压差控制有较高要求的运用中，通常都推荐或要求使用这样的控制方法。

对于余风量控制系统来说，流量测量装置是影响系统性能的关键装置。一般常用的流量测量装置为热线风速传感器阵列和毕托管阵列。这样的流量测量装置有很高的精度。然而一旦有颗粒附着或堵塞在传感器上，或传感器受到腐蚀的影

响时，其测量就会发生很大的偏差。对于毕托管阵列，还必须注意其在低风速时有很大的测量误差，所以应考虑其应用范围。流量测量装置的安装位置同样也需要严格按照其技术规格的说明进行选择，否则同样会造成测量的误差。

另外，在目前有一类流量控制装置出现在很多运用中。它是一种线性的、压力无关的风量调节阀，能够根据阀门位置提供相应流量反馈信号(例如文丘里阀)，其标定和校正在出厂时已经由专业供货商完成。相对于单纯的流量测量装置，这种装置功能更加的集成，它在进行流量控制的同时能够进行流量测量。在实际使用时，这种压力无关装置的流量反馈精度，一般采用备份的流量测量装置进行验证。当前这样的压力无关型风量调节阀，已经在很多要求较高压差控制中取得了成功的应用。

#### 4 影响压差控制的其他因素

建筑技术对压差控制的性能和效果有很大的影响，不密闭的围护结构很难建立起稳定的压力梯度。它需要有很大的余风量才能弥补很多的泄漏，当使用很大的余风量时，将向相邻空间中抽取(或排出)大量的二次空气，因此可能会造成温度、湿度控制的问题。因此必须使洁净室有一个密闭的围护结构，才能保证相应的压差和合理的气流方向。

风管的泄漏也会对余风量控制的精度和性能造成影响。如果在流量测量装置和洁净室围护结构之间，有空气泄漏出风管或进入风管，将会造成流量测量的误差从而引起压力控制显著的偏差。如果是在定压系统中，这个误差相对恒定；但如果系统的静压是波动的，这个误差也将会波动，因此控制系统非常难以采取技术措施消除这样的误差，从而造成控制性能的恶化。因此，必须要求对送风和排风管道进行泄漏检测，允许的最大泄漏率最大不应超过 0.5%(具体见空调专业设计要求)。