

# 高等级生物安全实验室的 自动控制方法\*

中国农业科学院哈尔滨兽医研究所 卜云婷<sup>☆</sup> 魏 一 邢国华 佟海龙  
赵春晖 高 阳 吴新洲 王 栋<sup>△</sup>

**摘要** 介绍了高等级生物安全实验室对自动控制系统的要求。通过对核心工作间、化学淋浴消毒间及防护服更换间管道风量调节阀的分析,分别研究了其压力控制方法。深入分析了通风空调故障情况下的机组切换过程。在生物安全实验室空调自动控制系统正常运行及故障情况下,该控制方法均能够保证实验室压力的稳定及有序的压力梯度。强调了自动控制系统对人员及环境安全的重要性。

**关键词** 生物安全实验室 自动控制系统 压差 风机 风量调节阀 变频器

## Control method of automatic control system in high-level biosafety laboratories

By Bu Yunting<sup>★</sup>, Wei Yi, Xing Guohua, Tong Hailong, Zhao Chunhui,  
Gao Yang, Wu Xinzhou and Wang Dong

**Abstract** Presents the automatic control system requirements in high-level biosafety laboratories. Studies the pressure control method through analysis of the air control valve of the core workshop, chemical shower room and protective clothing replacement room. Analyses the fan switching process in the case of ventilation and air conditioning failure. Concludes that the control method can ensure the stability of laboratory pressure and orderly pressure gradient under the conditions of normal operation and failure. Emphasizes the importance of automatic control system to safety of human and environment.

**Keywords** biosafety laboratory, automatic control system, pressure difference, fan, air control valve, inverter

★ Harbin Veterinary Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Harbin, China

### 0 引言

高等级生物安全实验室是从事生物因子相关实验活动的场所。随着对安全控制的要求越来越严格,对于实验室自动控制系统也提出了更高的要求。相关国家标准 GB 19489—2008《实验室 生物安全通用要求》(以下简称 GB 19489)和 GB 50346—2011《生物安全实验室建筑技术规范》(以下简称 GB 50346)对生物安全实验室自动控制系统(尤其是实验室的压力控制)均提出了相关要求,如:实验室通风空调系统的启停控制、生物安全柜

排风与实验室送排风连锁控制等<sup>[1]</sup>。实验室自动控制系统能够保证实验室有序的压力梯度,使淋浴间、防护服更换间、化学淋浴消毒间及核心工作间形成定向气流,从而防止病原微生物产生的气溶胶扩散到外部环境,是科学合理地解决生物安全实验室环境控制的关键技术,也是生物安全可靠性的重要保证<sup>[2-3]</sup>。

<sup>☆</sup> 卜云婷,女,1990年2月生,硕士研究生,工程师

\* 国家重点研发计划课题“安全高效空调通风系统关键技术与系统集成研究”(编号:2018YFC1200304)

### 1 高等级生物安全实验室的自动控制

GB 19489 和 GB 50346 对自动控制系统的要求有所不同,但两者主要针对的均是空调自动控制系统。

#### 1.1 空调自动控制系统原理

空调自动控制系统对于生物安全实验室而言,主要有两点要求:第一要保证实验室舒适的温湿度;第二要时刻保证实验室所要求的负压值及压力梯度,使其具备将实验产生的有害气体迅速排除的能力<sup>[4]</sup>。高等级生物安全实验室建立在先进的变风量空调系统的技术基础上。而变风量通风与空调技术都离不开自动控制手段的保障<sup>[5]</sup>。

自动控制系统主要包括空调机组和送排风机组的控制。各监控点均连接到直接数字控制箱。送排风经管道通往实验室的各个房间,并在管道上装有定风量(CAV)及变风量(VAV)调节阀,其结构如图1所示,图中除核心工作间以外,其他VAV风量调节阀均设置于送风管道上,CAV风量调节阀均设置于排风管道上,图中风量调节阀的开度仅针对某一间实验室的工况进行设定。

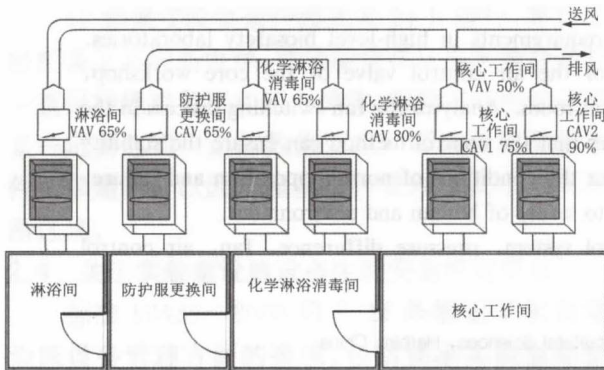


图1 送排风管道结构图

#### 1.2 实验室压差对比

不同级别实验室对压差的要求不同,如表1所示。

标准	表1 实验室压差对比		Pa	
	实验室类别	与室外大气的压差值	与相邻区域的压差值	
GB 19489	ABSL-3	≥-60	≥-15	
	4.4.3类 ABSL-3	≥-80	≥-25	
	BSL-4	≥-60	≥-25	
	ABSL-4	≥-100	≥-25	
GB 50346	ABSL-3 中的 a类和 b1类	≥-60	≥-15	
	ABSL-3 中的 b2类	≥-80	≥-25	
	BSL-4	≥-60	≥-25	
	ABSL-4	≥-100	≥-25	

由表1可以看出,GB 19489 和 GB 50346 对压差的要求基本一致。

自动控制系统最重要的作用就是保证实验室内的负压及有序的压力梯度,实验室出现正压和气流反向是严重的故障,可能导致实验室内有害气溶胶的外溢,危害人员健康和污染环境。实验室应建立有效机制,合理设计送风、排风启动和关闭时的顺序和时差,以及风机故障时的应对机制,有效避免实验室出现正压和气流反向的情况发生。

### 2 自动控制系统的启停

GB 19489 第 6.3.8.4 条规定:“启动实验室通风系统时,应先启动实验室排风,后启动实验室送风;关停时,应先关闭生物安全柜等安全隔离装置和排风支管密闭阀,再关实验室送风及密闭阀,后关实验室排风及密闭阀。”第 6.3.8.7 条规定:“应通过对可能造成实验室压力波动的设备和装置实行连锁控制等措施,确保生物安全柜、负压排风柜(罩)等局部排风设备与实验室送排风系统之间的压力关系和必要的稳定性,并应在启动、运行和关停过程中保持有序的压力梯度。”

GB 50346 第 7.3.6 条规定:“三级和四级生物安全实验室空调净化系统启动和停机过程应采取防止实验室内负压值超出围护结构和有关设备的安全范围。”第 7.3.10 条规定:“三级和四级生物安全实验室防护区的送风和排风系统必须可靠连锁,空调通风系统开机顺序应符合本规范第 5.3.1 条的要求。”

由以上标准可以看出,GB 19489 和 GB 50346 均强调了送排风机组启停顺序及启停压力梯度。

自动控制系统启停顺序的控制流程如图2所示。



图2 启停顺序的控制流程图



表 2 显示了某实验室送排风机组启动过程中的压力值,可以看出:排风机先于送风机开机时间

表 2 某实验室送排风机组启动过程中的压力值

排风机先于送风机 开机时间/s	启动时最大 负压值/Pa	启动时最大 正压值/Pa
2	-190	10
5	-190	
10	-200	
20	-250	
30	-300	

过短,实验室会出现正压;时间过长,会出现较大负压,影响围护结构。因此最佳的提前开启时间应根据具体工况测试确定,应在 5~10 s 范围内。

由于启停过程类似,因此这里只对启动过程的控制进行研究。表 3 显示了启动过程中对风量调节阀的控制调整。图 3 显示了启动过程中的压力曲线。

表 3 启动过程中对风量调节阀的控制调整

时间/s	淋浴间 VAV 开度/%	化学淋浴消毒间 VAV 开度/%
0	100	100
15	100	80
20	85	70
30	65	70

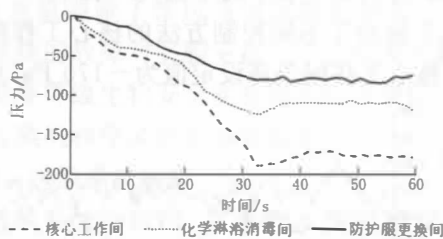


图 3 启动过程中压力曲线

由表 3 可知,在启动过程中,仅对化学淋浴消毒间及淋浴间的 VAV 风量调节阀进行了控制,化学淋浴消毒间 VAV 风量调节阀开度在启动初期从 100% 开始减小,20 s 时降至设定值。淋浴间 VAV 风量调节阀开度在 15 s 后才开始逐渐减小,30 s 时降至设定值。

由图 3 可以看出,在整个启动过程中,始终保持负压,并且始终保证有序的压力梯度。没有正压和气流反向现象发生。

### 3 自动控制系统的运行

自动控制系统运行主要是维持实验室内正常的负压及压力梯度,并且在送风或排风机组出现故障时设置可靠连锁<sup>[6]</sup>。因此自动控制系统的运行主要围绕着压力控制及故障控制。

### 3.1 核心工作间的压力控制

生物安全四级实验室由核心工作间、化学淋浴消毒间、防护服更换间、淋浴间组成,负压值从淋浴间向核心工作间依次增大,实验室的压力梯度控制通过风阀调节后的送排风的余风量来实现;若采用静态平衡控制,无法选择相关的阀门和控制系统,因此应该采用动态平衡控制。核心工作间的压力控制分为送风压力控制和排风压力控制。在核心工作间的压力稳定控制的基础上,其他房间才能稳定控制。本文所述的压力控制均为变送定排。由于核心工作间压力采用变送定排的控制方式,因此排风压力只需要跟随排风压力设定值进行调节。核心工作间主要依赖于送风压力及送风管道 VAV 风量调节阀实现压力控制。

#### 3.1.1 VAV 风量调节阀的 PID 控制方法

采用常规 PID 控制方法通过控制 VAV 风量调节阀实现核心工作间负压的控制,控制原理如图 4 所示。当核心工作间负压低于设定值时,送风管

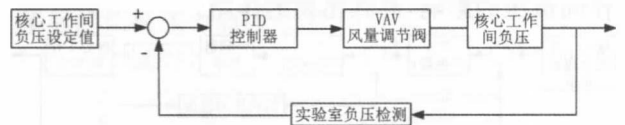


图 4 VAV 风量调节阀 PID 控制原理图

道上的 VAV 风量调节阀开度减小,直至负压满足设定值;当核心工作间负压高于设定值时,送风管道上的 VAV 风量调节阀开度增大,直至负压满足设定值。

送排风压力采用 PID 控制。送排风压力设定值与压力传感器的实测值相比较控制风机变频器的频率。

#### 3.1.2 送风机变频器的 PID 控制方法

采用常规 PID 控制方法通过控制送风机变频器频率实现核心工作间负压的控制,控制原理如图 5 所示。排风压力控制同 3.1.1 节,采用



图 5 送风机变频器 PID 控制原理图

PID 控制。当核心工作间负压低于设定值时,PID 控制器调节送风机变频器频率降低,直至负压满足设定值;当核心工作间负压高于设定值时,PID

控制器调节送风变频器频率升高，直至负压满足设定值。

### 3.1.3 串级 PID 控制方法

采用串级 PID 控制方法控制核心工作间负压，排风压力采用 PID 控制。排风压力设定值与压力传感器的实测值相比较控制风机变频器的频率。送风 VAV 风量调节阀根据房间压力实测值和设定值的比较，对风阀进行 PID 矫正控制以应对干扰和消除稳态误差。

串级 PID 控制方法选取核心工作间负压作为主被控量，送风压力作为副被控量，为了维持核心工作间负压恒定，设置 PID 控制器 1 对核心实验室负压进行控制。考虑到送风压力本身的扰动，设置 PID 控制器 2 作为副调节器，与核心工作间负压主调节器组成串级调节系统。将 PID 控制器 1 的输出作为 PID 控制器 2 的输入值，就构成了如图 6 所示的串级控制系统。控制器 1 起微调的作用，而控制器 2 控制送风压力，克服扰动对核心工作间负压的影响，起到粗调的作用。

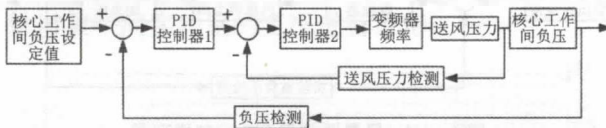


图6 送风机变频器串级PID控制原理图

影响核心工作间负压的因素很多，主要为送风温度和送风量。

当送风温度发生变化时，最先受影响的是送风压力，进而触发 PID 控制器 2 对送风变频器进行调节。串级控制能够快速克服副回路的二次扰动。在该扰动影响核心工作间负压之前，副调节器就可对其进行及时校正。通过对送风变频器的调节，送风压力被及时纠正，阻止了因为送风温度变化而形成的扰动。

当房间送风量发生变化时，例如当实验人员穿着正压防护服进入实验室时，正压防护服与生命支持系统连接，自身会有一定的漏风量，此时房间内送风量增大，核心工作间负压值降低，进而触发 PID 控制器 1 根据扰动的变化情况，不断地修正控制器 2 的设定值。PID 控制器 1 的输出将被限制在一定范围之内，以避免送风压力过高或过低。PID 控制器 2 的输出控制变频器的频率。

### 3.1.4 对比分析

1) 笔者曾经尝试过采用 3.1.1 节中的 VAV 风量调节阀控制核心工作间压力这种调节方式，发现存在以下不足：

① 温度影响较大。采用变频器控制送排风压力，VAV 风量调节阀调节核心工作间压力时，如室内温度波动较大，同等的送排风压力，核心工作间压力会相差 20 Pa 以上。核心工作间受温度影响较大。

② 调节时间过长。每次开关机，核心工作间压力调节到稳定都需要 0.5 h 以上。因为每次开机，房间分配的风量都存在偏差，核心工作间调节稳定了，化学淋浴消毒间及其他房间才能相对稳定。3 个房间完全依靠 VAV 风量调节阀调节，调节的时间较长。

③ 稳态误差较大。如果变频器频率仅仅跟随送排风压力值调节，而与核心工作间压力无关联性，仅采用 VAV 风量调节阀调节核心工作间压力，VAV 风量调节阀的变化幅度较大，对于稳定性也有一定影响。稳态误差会大大增加。

2) 采用 3.1.2 节中的送风机变频器的常规 PID 控制与 3.1.3 节中的串级 PID 控制。

图 7 显示了不同控制方法的核心工作间负压曲线。核心工作间负压设定值为 -170 Pa，从图中

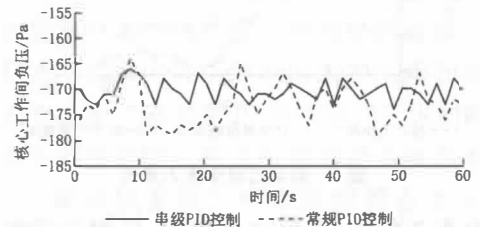


图7 不同控制方法的核心工作间负压曲线

可以看出，串级 PID 控制负压更稳定，稳态误差相对更小。提高了整个控制系统的抗扰性和自适应能力，相比于常规 PID 控制的设定值不变，串级 PID 控制的随动特性可以增强压力控制的稳定性。

## 3.2 化学淋浴消毒间及防护服更换间的压力控制

化学淋浴消毒间及防护服更换间的压力控制主要依靠房间送风管道上的 VAV 风量调节阀。采用变送定排的调节方式，通过调节送风管道上的 VAV 风量调节阀来实现房间的压力控制。控制过程如图 8 所示。而送风 VAV 及排风 CAV 风量调节阀最初的设定开度需要根据房间工况具体确定。



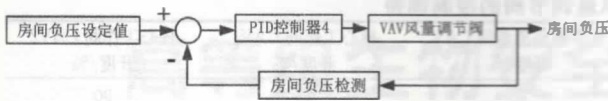


图8 房间的压力控制

### 3.3 通风空调系统故障下的压力梯度控制

GB 19489 第 6.3.8.5 条规定：“当排风系统出现故障时，应有机制避免实验室出现正压和影响定向气流。”第 6.3.8.6 条规定：“当送风系统出现故障时，应有机制避免实验室内的负压影响实验室人员的安全、影响生物安全柜等安全隔离装置的正常功能和围护结构的完整性。”

GB 50346 第 7.3.1 条规定：“空调净化自动控制系统应能保证各房间之间定向流方向的正确及压差的稳定。”第 7.3.9 条规定：“三级和四级生物安全实验室防护区应设送排风系统正常运转的标志，当排风系统运转不正常时应能报警。备用排风机组应能自动投入运行，同时应发出报警信号。”

对比分析 2 个标准可以看出，GB 19489 强调了送风和排风系统出现故障的应对机制，GB 50346 着重强调了排风系统故障的情况。由于送排风系统的故障对实验室都会产生较大的影响，因此针对高等级生物安全实验室均应设置应对机制，备用送风机和排风机是必备设施。

#### 3.3.1 送风系统故障

送风系统故障时，有可能出现实验室负压较大，影响实验室围护结构安全的情况。因此，应当在送风系统出现故障时，立即开启备用送风机，并相应降低运行排风机的频率，数秒后再将排风频率升至设定值。这样能够有效避免核心工作间出现大负压或者出现正压的情况。

为了保证送风机切换过程中的压力梯度，应调节各房间管道上的风量调节阀。下面根据切换过程压差曲线，在调试过程中对风量调节阀作出调整。表 4 给出了某一实验室送风系统切换过程中

表 4 送风机故障下风量调节阀的控制调整

时间/s	淋浴间 VAV 开度/%	防护服更换间 CAV 开度/%	化学淋浴消毒间 VAV 开度/%	化学淋浴消毒间 CAV 开度/%
0	65	65	70	80
2	100	35	100	30
20	65	55	70	80
30	65	65	70	80

对各房间风量调节阀的控制调整设定，其阀门开度变化是根据某一核心工作间的工况测试得出的，仅作为趋势的参考。图 9 为切换过程中的压力曲线图。

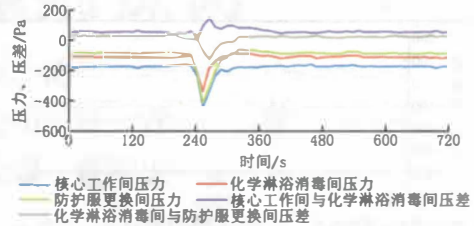


图9 送风系统故障曲线

由图 9 可以看出，送风系统故障切换过程中，20~30 s 内，化学淋浴消毒间与防护服更换间出现压差逆转现象，因此应当在调试过程中对风量调节阀进行调整。由于核心工作间与化学淋浴消毒间压差正常，所以在 20 s 后，适当减小防护服更换间 CAV 风量调节阀的开度（由 55% 减小为 45%），来减少更防护服间的排风量进而减小其压力值。调整后的切换压力曲线如图 10 所示。

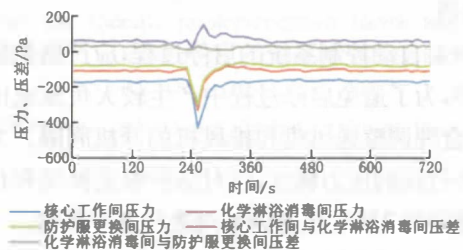


图10 调整后的送风系统故障曲线

由图 10 可以看出，在 20~30 s 内，化学淋浴消毒间与防护服更换间的压差无逆转，并且整个切换过程始终保持有序的压力梯度。

#### 3.3.2 排风系统故障

排风系统故障时，有可能导致实验室出现正压和影响定向气流。因此，应当在排风系统出现故障时，立即停止运行送风机并关闭对应送风阀，切断送风通道。与此同时立即启动备用排风机，在备用排风机启动数秒后，再将送风机开启。

为了保证排风机切换过程中的压力梯度，应调节各房间管道上的风量调节阀。表 5 显示了针对某一实验室排风系统切换过程中，对各房间风量调节阀的控制调整。图 11 为调整后的切换过程中的压力曲线图。由于送风故障已针对压差逆转进行了风量调节阀具体调整，在此不再赘述。

表 5 排风机故障下 VAV 风量调节阀的控制调整

时间/s	淋浴间 VAV 开度/%	防护服更换间 CAV 开度/%	化学淋浴消毒间 VAV 开度/%	化学淋浴消毒间 CAV 开度/%	核心工作间 CAV1 开度/%	核心工作间 CAV2 开度/%
0	65	65	70	80	75	90
2	100	0	100	40	50	100
25	65	65	70	80	75	90

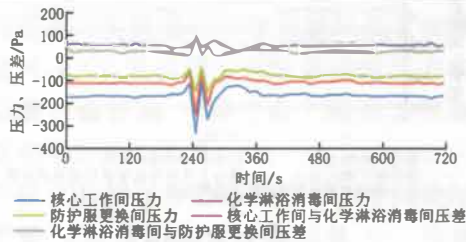


图 11 排风系统故障曲线

表 5 中的阀门开度变化是根据某一间实验室的工况测试得出的, 仅作为趋势的参考。由图 11 可以看出, 在排风系统故障切换过程中, 核心工作间始终保持负压, 且各房间始终保持着有序的压力梯度, 并没有因为排风系统故障导致实验室压力变为正压, 而是在排风系统切换时压力小幅度升高, 经过短暂调节后实验室负压恢复到设定值。

#### 4 结语

针对自动控制系统的启停过程, 应严格控制其开机顺序, 为了避免启停过程中产生较大负压或出现正压, 应合理调整送风机和排风机的开机间隔。为了保证启停过程的压力梯度, 应对防护服更换间和化学淋浴消毒间的 VAV 风量调节阀进行合理调整。

核心工作间的压力控制采用串级 PID 控制方法, 并对核心工作间 VAV 风量调节阀进行矫正控制, 提高了整个控制系统的抗扰性和自适应能力, 相比于常规 PID 控制, 串级 PID 控制的随动特性

能够增强压力控制的稳定性。化学淋浴消毒间和防护服更换间则采用变送定排的调节方式, 对房间压力进行 PID 控制。

针对 GB 19489 提出的要求, 送风或排风系统出现故障时设置可靠连锁, 在送排风系统故障下, 通过通风空调机组风机、风阀与实验室风量调节阀的相互配合及调整, 实现了在切换过程中压力及压力梯度的控制, 保证了实验室人员与环境的安全。

#### 参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院, 江苏双楼建设集团有限公司. 生物安全实验室建筑技术规范: GB 50346—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 24-25
- [2] 邢国华, 卜云婷, 高阳, 等. 关于生物安全实验室空调机组无缝切换的方法研究[J]. 洁净与空调技术, 2018 (1): 104-107
- [3] 曹国庆, 王荣, 翟培军. 高级别生物安全实验室围护结构气密性测试的几点思考[J]. 暖通空调 2016, 46 (12): 74-79
- [4] 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
- [5] 周祖毅. 现代化实验室的通风空调工程设计见解[J]. 暖通空调, 2013, 43(5): 1-9
- [6] 曹国庆, 刘华, 梁磊, 等. 由生物安全实验室检测引发的有关设计问题的几点思考[J]. 暖通空调, 2007, 37 (10): 52-57

本站文章版权归原作者及原出处所有。内容为作者个人观点, 并不代表本站赞同其观点和对其真实性负责, 本站只提供参考并不构成任何投资及应用建议。本站是公司官网提供学习交流的平台, 网站上部分文章为转载, 并不用于任何商业目的, 我们已经尽可能的对作者和来源进行了通告, 但是能力有限或疏忽, 造成漏登, 请及时联系我们, 我们将根据著作权人的要求, 立即更正或者删除有关内容。本站拥有对此声明的最终解释权。

声明: 该文章系转载, 登载该文章目的为更广泛的传递市场信息, 不代表跟司赞同其观点。文章内容仅供参考。