

欧少华,周斌,刘吉宏. 某 GLP 实验动物设施空调及通风系统设计研究 [J]. 中国比较医学杂志, 2020, 30(4): 110-116.
Ou SH, Zhou B, Liu JH. Discussion of an HVAC system design for a good laboratory practice lab animal vivarium [J]. Chin J Comp Med, 2020, 30(4): 110-116.
doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2020.04.017

某 GLP 实验动物设施空调及通风系统设计研究

欧少华,周斌,刘吉宏*

(上海开纯洁净室技术工程有限公司,上海 200233)

【摘要】 本文以某 GLP 动物实验室作为研究对象,对其空调系统的冷热源、送排风系统、气流组织及自控系统的设计进行了简单介绍和分析。通过计算流体力学(CFD)模拟技术对动物实验室的气流组织进行优化,结果表明采用上送下排辅助顶排风的方式有助于降低室内氨气浓度。本文还基于动物实验室的需求对变风量控制模式进行了重点介绍,体现了该控制模式的节能性,并对今后动物实验室的空调系统设计关注点提出了展望。

【关键词】 动物实验室;气流组织;变风量;节能

【中图分类号】 R-33 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-7856(2020) 04-0110-07

Discussion of an HVAC system design for a good laboratory
practice lab animal vivarium

OU Shaohua, ZHOU Bin, LIU Jihong*

(ShangHai KaiChun Clean-Room Technology CO. Ltd, Shanghai 200233, China)

【Abstract】 This paper examines a Good Laboratory Practice vivarium, and introduces a design for a cooling and heating source for air conditioning, a ventilation system, airflow distribution and an automatic control system. Through Computational Fluid Dynamics(CFD)simulation technology, the airflow distribution of the vivarium was optimized, and the result show that a ceiling air supply and corner exhaust with auxiliary top exhausts could help to reduce the indoor ammonia concentration. The demand-based variable air volume control mode of the vivarium is highlighted, reflecting the energy savings of the control mode. Finally, future concerns of HVAC design in vivariums are presented.

【Keywords】 lab animal vivarium; air distribution; VAV; energy saving

实验动物环境设施是实验动物科学发展的基础和先决条件。动物实验室的环境控制是保证实验室人员安全健康和动物实验数据可靠性的重要措施,而空调及通风系统对实验室环境的控制起着关键作用,因此对实验动物设施环境的空调及通风系统的研究具有十分重要的意义。目前对动物实验室的空调系统研究较多^[1-3],但所研究的动物实

验室的规模较小或者动物种类较少。随着生命科学研究和生物医药产业的发展,对实验动物设施的规模和实验动物种类多样性要求也越来越高。本文以某机构 GLP 中心建设项目为研究对象,对其空调和通风系统进行研究分析,以其结果对其他 GLP 动物实验设施的建设提供一些具有参考价值的数据。

【作者简介】欧少华(1974—),男,注册建筑师,注册造价师,本科,主要从事实验动物设施设计及建筑相关的研究工作。
E-mail:oushaohua@shkaichun.com

【通信作者】刘吉宏(1982—),男,博士研究生,研究方向:实验动物学与兽医学,实验动物设施建设与管理。E-mail:jsyzljh@163.com

1 项目概况

本项目的建设地点位于深圳市,总建筑面积为 48 259平方米,其中动物实验室的面积约13 200平方米,建筑高度为 94.8 米,其中动物实验室的层高均为 5.1 米。具体楼层信息如表 1 所示。

2 空调及通风系统介绍

2.1 冷热源

本项目的冷源采用双工况冰蓄冷工艺为空调系统提供冷水,额定制冷工况的冷水进出温度为 5℃/13℃,冷却水进出水温为 37℃/32℃。热源采用蒸汽发生器,为工艺设备和空调加湿提供 0.2~0.5 MPa 的蒸汽,通过板式换热器为空调系统提供进出温度为 50℃/60℃的热水。

2.2 室内设计参数

在满足相关规范^[4-5]要求情况下,结合本项目特点以及节能考虑,对主要的室内环境参数进行了优化设计;考虑到不同运行模式所需求的风量差异较大,且不同动物对温湿度的要求也有所差异,因此本项目中的换气次数在满足使用需求的情况下,采用变风量节能设计,详见表 2。

2.3 空调送风系统

2.3.1 空调系统划分

根据工艺条件及功能分区,不同动物实验室之间的送排风系统独立设计,避免交叉污染。为了防止臭味的蓄积,所有动物实验室的空调系统均采用直流式全新风方式。以下以清洗前后区的空调系统以及 SPF 级小鼠实验室的空调系统为例进行分析。

2.3.2 清洗区的空调系统

该区域是动物笼盒、笼具和水瓶等集中清洗消毒区,以及脏垫料集中收集处理区,也是工作人员人数最多、工作时间最长的区域^[5]。此区域涉及到的工艺设备较多,设备和蒸汽发热量较大,脏垫料的异味较浓,因此该区的空调及通风系统设计是否合理关系到工作人员的舒适性以及运行的节能性问题。通过精确计算我们发现所有设备的总排风量与房间按换气次数所计算的排风量接近,因此从空调系统运行稳定性出发,采用了总送风量和总排风量恒定的空调系统,整个区域设计为负压,避免清洗区的异味外溢。另外,根据不同排风设备开启的情况,调整房间排风量的大小,使设备和房间的总排风量恒定。

表 1 项目楼层信息
Table 1 Floor information

楼层 Floor	功能 Function	实验动物种类 Animal species	洁净等级 Environment level	笼位数 Cage No.
1-5	医疗器械检测及药品检测实验室 Medical instrument and drug testing lab	/	普通 Conventional	/
6	设备层 Mechanical floor	/	普通 Conventional	/
7-11	医疗器械检测及药品检测实验室 Medical instrument and drug testing lab	/	普通 Conventional	/
12	设备层 Device layer	/	普通 Conventional	/
13	医疗器械检测动物实验室 Medical instrument animal testing lab	猪 Pig	普通 Conventional	114
14	GLP 检测动物实验室 GLP Animal Lab	犬 Dog	普通 Conventional	310
15	GLP 检测动物实验室 GLP Animal Lab	猴 Monkey	普通 Conventional	354
16	GLP 检测动物实验室 GLP Animal Lab	普通级兔/SPF 豚鼠 Clean Rabbit/SPF Guinea pig	普通/屏障 Conventional/Barrier	798(兔 Rabbit)
17	GLP 检测动物实验室 GLP Animal Lab			1600(豚鼠 Guinea pig)
18	GLP 检测动物实验室 GLP Animal Lab	SPF 级别大小鼠 SPF Rodent	屏障/Barrier	1200(大鼠 Rat)
19	GLP 检测动物实验室 GLP Animal Lab			1170(小鼠 Mic)

清洗区的空调通风系统原理图详见图 1,其中清洗后区空调运行控制逻辑为:如果所有设备均不开启,房间送风量 9000 m³/h,排风量11 200 m³/h;如果设备全部开启,设备排风量为 7600 m³/h,房间排风量降到 3600 m³/h,总排风量仍为11 200 m³/h,房间送风仍为 9000 m³/h。清洗前区空调运行控制逻辑为:如果所有设备均不开启,房间送风量 11 000 m³/h,排风量13 600 m³/h,如果设备全部开启,设备排风量为 9800 m³/h,房间排风量降到 3800

m³/h,总排风量 仍为 13 600 m³/h,房间送风 仍为11 000 m³/h。
2.3.3 屏障环境的空调系统
根据动物实验屏障环境的要求,以及结合本项目的饲养动物种类,本项目以 18 层某 SPF 级大鼠饲养室的空调系统为例进行分析。与常规的空调系统相比,该系统具体如下特点:
(1)为维持屏障环境内的空调系统 24 h 连续不间断运行,选用双通道空调箱^[5],即该组合式空调

表 2 主要动物实验室的室内环境参数
Table 2 Room environment parameters for main lab animal labs

项目 Items	动物实验室(环境分类) Lab animal facility (By environments)	
	猪、犬、猴、兔(普通环境) Pig, Dog, Monkey, Rabbit (Conventional)	豚鼠、大鼠、小鼠(屏障环境) Guinea Pig, Rat, Mouse (Barrier environment)
换气次数(次) Air change rate (times/h)	8~15	10~25
动物笼具周边处的气流速度(m/s) Air flow speed around animal cages	≤0.2	≤0.2
与相通房间的最小静压差(Pa) Minimum pressure difference between rooms	微负压 Slight negative pressure	10
空气洁净度级 Air cleanness level	/	7
夏季设计温度(℃) Designed Temp Summer	20~26	23~26
夏季设计相对湿度(%) Designed RH Summer	40~70	40~70
冬季设计温度(℃) Designed Temp Winter	20~23	20~23
冬季设计相对湿度(%) Designed RH Winter	40~70	40~70

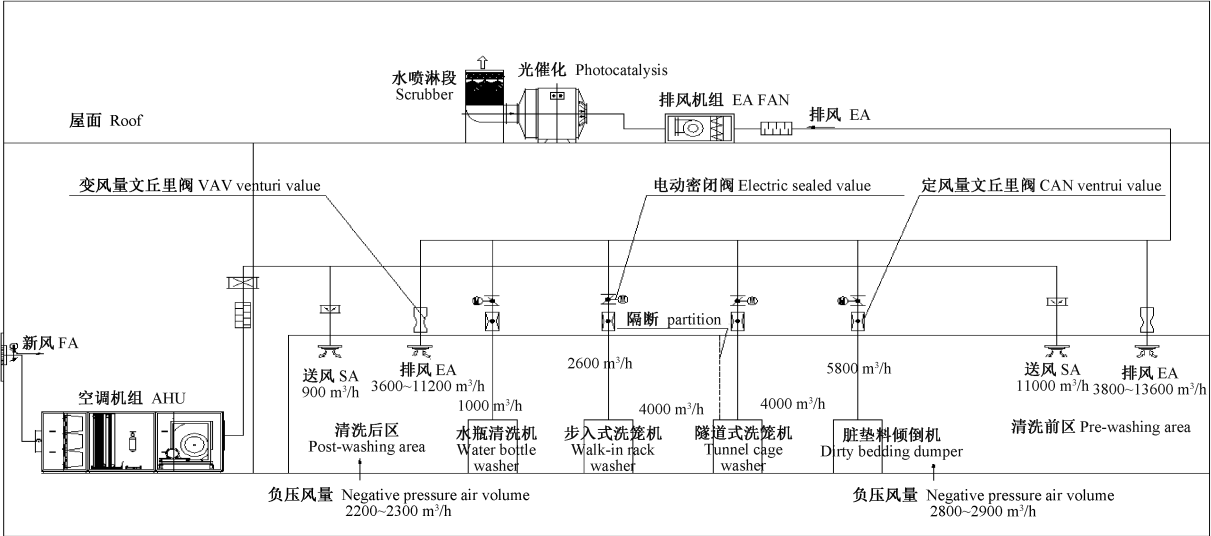


图 1 清洗区空调系统原理图

Figure 1 HVAC system scheme for washing area

机组由新风段、初效过滤段、检修段、风机段、中效过滤段、快速切换回装置段、中间段(以上所有段均为一用一备)、制冷盘管段、制热/再热盘管段、蒸汽加湿段、出风段构成,详见图 2。即当风机发生故障,或者更换过滤装置时,空调机组仍能保证正常运行;

(2)房间送排风管均安装变风量文丘里阀,在满足室内温湿度、氨气、二氧化碳浓度的情况,实现变风量节能运行。

2.4 排风系统

动物实验室的排风系统^[5-6]中除了含有氨气、硫化氢等臭气,还含有动物毛发、粪便等固体。为满足环保的排放要求,本项目的排风先经过房间的带初效尼龙网过滤的齿轮式排风口,除去大部分的毛发和粪便,再通过排风机组后导入纳米半导体光催化模块,即采用 MnO_x-TiO_2 复合物作为催化剂,选用真空紫外灯管作为催化光源,氧化分解气流中的 TVOCs 等大分子有机物,使部分难溶于水的臭味分子分解为可溶性小分子。然后再将经过光催化后的气体导入气液扰流净化装置,通过扰流球的扰动作用形成微涡旋,与向下散布雾化喷淋液充分交融,将废气中的可悬浮颗粒物、光催化分解产物、臭氧、氨气、硫化氢等空气污染物由气相转入液相,从而达到净化空气除臭的目的。此外,张忍虎^[6]对经过该喷淋除臭处理之后的废水进行了工程实测,结果显示废水中的氨氮及硫化物浓度均满足环保要求。

2.5 气流组织

规范^[5]规定,屏障设施净化区的气流组织宜采用上送下回(排)方式。为了提高通风效率,使室内气流组织更合理,本项目在动物实验室两侧设计了 250~300 mm 的排风夹道,根据动物实验室的大小以及动物笼具的布置情况,灵活地布置排风口(以四角下排风为主)。目前,国内对动物实验室的气流组织的研究^[3,7-8]主要都是从温湿度和吹风感的角度对气流组织进行优化分析,而对动物实验室内部的臭味少有研究。根据部分动物实验室使用方的反馈,尽管采用了上送下排的气流组织形式,但室内臭气还是较明显。笔者认为主要原因是动物实验室的主要臭味来源是氨气,其密度比空气轻,易集聚于天花之下,仅设计下排风不利于氨气的排放。因此,本项目在上送下排气流组织基础上,辅助设计顶排风口。

此外,通过 CFD 数值模拟软件进行辅助量化分析,对比上送下排辅助顶排方式和上送下排方式的室内氨气浓度情况。为了简化计算,对物理模型和数学模型进行了如下简化和假设:

物理模型:选取本项目中的某大鼠实验室,长×宽×高=6.5 m×3.7 m×2.5 m。室内设有 4 个长×宽×高=1.8 m×0.5 m×2.0 m 的大鼠 IVC 笼架,每个笼架有 35 个大鼠笼盒,考虑到非满负荷饲养,每个笼盒暂按饲养 2 只大鼠计算,每只大鼠发热量 6.33 W^[5],每个笼架的发热量为 433 W。另外,笼盒内的动物及脏垫料是臭味氨气的释放源,其释放量与动

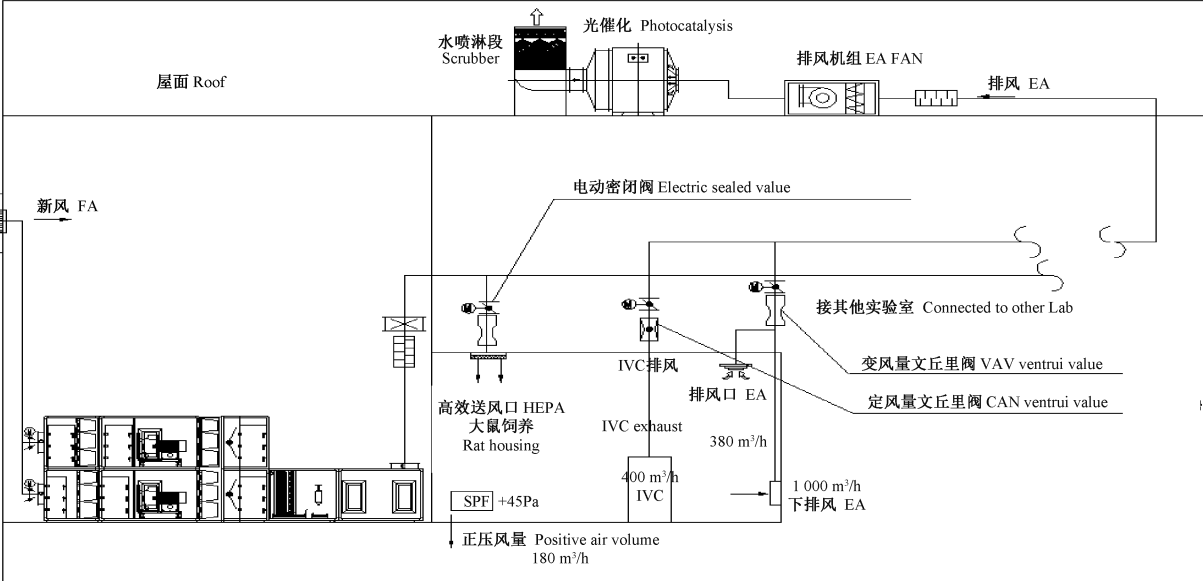


图 2 某屏障环境空调系统原理图

Figure 2 Barrier HVAC system scheme

物的饲养量以及垫料的更换频率密切相关。为简化计算,将整个笼具作为体污染源,恒定释放浓度为 10 mg/m^3 。房间设有两个高效送风口的尺寸为 $0.48 \text{ m} \times 0.48 \text{ m}$,送风口风速为 0.94 m ,送风温度为 18°C ,每个送风口的风量 $780 \text{ m}^3/\text{h}$ 。下排风口的尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,距地 0.15 m 。上送下排辅助顶排方式(以下简称模型 1)在房间的顶部四角设计了 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 的 4 个排风口,每个风口排风量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$,详见图 3。仅上送下排方式(以下简称模型 2),不设计顶排风。详见图 4。

数学模型:本模拟采用室内零方程模型,清华大学赵彬等^[9]通过实验及模拟对比发现,在非等温流动的空调通风领域中,室内零方程比标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型的模拟结果精度更高,计算速度更快。另外,将室内空气视为理想气体,符合 Boussinesq 假设,流动为稳态流动。

结果表明,模型 1 的整个房间氨气浓度为 3.42 ppm ,人员呼吸高度(约 $1.4 \sim 1.8 \text{ m}$)氨气浓度为 3.45 ppm ,模型 2 的整个房间氨气浓度 3.81 ppm ,人员呼吸高度氨气浓度为 3.90 ppm ,即增加了辅助顶排之后,室内氨气的平均浓度能降低约 10% ,详见图 5~图 7。

2.6 空调自控系统:

2.6.1 压差控制

为了保证动物实验室在正常工作或者空气平衡暂时受到破坏时,气流都能从空气洁净度高的区域流向空气洁净度低的区域,动物实验室的设计必须保持一定的压差^[5]。目前,对于压差控制方法主要有纯压差控制法和余风量控制法,以及两者混合控制法。由于受房间门的开关、室内通风柜调节门的移动以及人员运动等诸多因素对室内压力带来的扰动,如果采用纯压差控制法,控制系统的波动性会较大^[10],而如果仅采用余风量控制,随着设施运行时间的推进,房间的气密性会变化,从而导致室内的压力值会偏离原设计值^[11]。

结合纯压差控制法和余风量控制法的特点,本项目采用混合控制法,即以余风量差作为基本的控制依据,然后通过设置压差传感器以及控制器来设定余风量控制系统的余风量值。此外,在房间送排风主管上均安装了变风量文丘里阀,通过送排风的风量差来维持房间的设定压力值,并参考压差传感器的值,每半年或一年重新校订余风量值。

本项目的所有屏障环境的动物实验室设计为

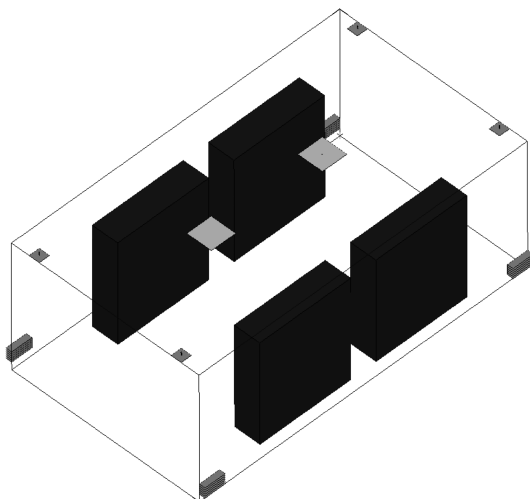


图 3 上送下排辅助顶排的物理模型(模型 1)
Figure 3 Physic Model of Ceiling SA/Wall EA plus Ceiling EA assistance(Model 1)

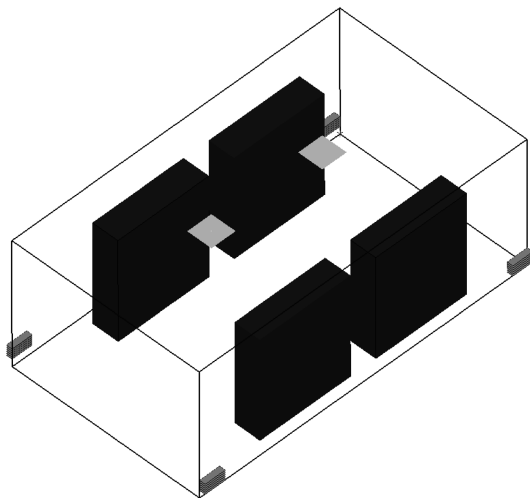


图 4 上送下排的物理模型(模型 2)
Figure 4 Physical Model of Ceiling SA/Wall EA (Model 2)

正压实验室,净化空调系统的送、排风机的连锁关系为:先开送风机,后开排风机;关闭时先关排风机,后关送风机。所有普通级动物的实验室设计为负压实验室,空调系统的连锁程序与上述正压实验室相反。

2.6.2 室内空气品质及节能控制

动物实验室的温湿度、氨气浓度等室内参数与实验室的运行模式、动物饲养量以及垫料更换频率均密切相关。为满足动物实验室的室内空气品质要求,常规设计的空调系统采用全新风直流式空调系统,且换气次数大,运行能耗和碳排放指标均较高。因此,空调系统的节能减排问题备受大家关注。Gordon 等^[12]通过对美国三类动物实验室(包

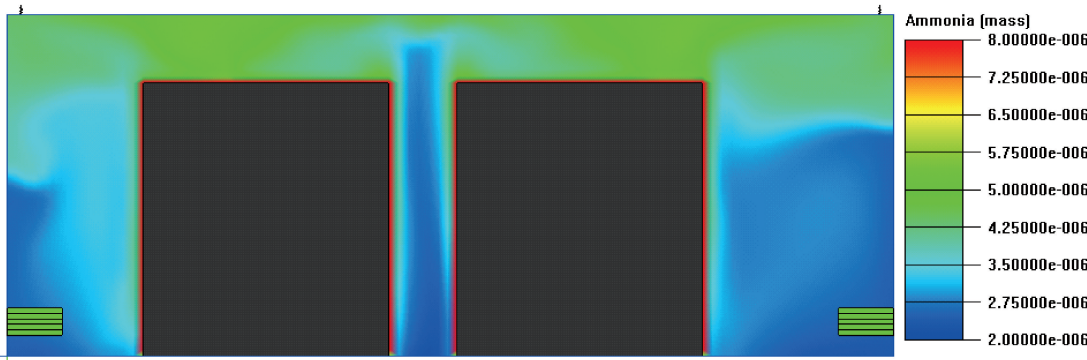


图 5 X=0.45 m 的氨气浓度场(模型 1)
Figure 5 NH₃ Concentration when X=0.45 m(Model 1)

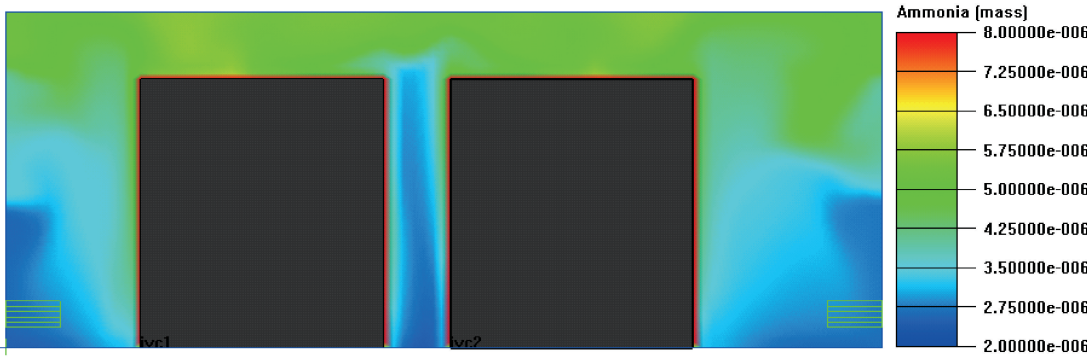


图 6 X=0.45 m 的氨气浓度场(模型 2)
Figure 6 NH₃ Concentration when X=0.45 m(Model 2)

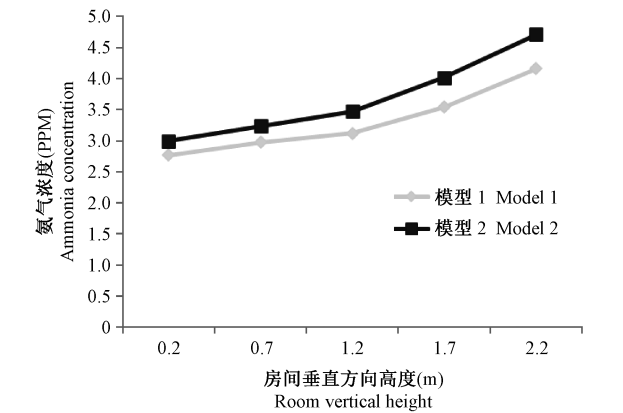


图 7 模型 1 与模型 2 室内氨气浓度与垂直高度的关系
Figure 7 Relationship of NH₃ and Room Height in Model 1& 2

括非人灵长类动物实验室、带通风笼具的啮齿类动物实验室和开放式笼具的啮齿类动物实验室)进行了约100 000 h 的 TVOC 及氨气浓度的数据进行采集分析,结果表明约 98.5% 的运行时间内,动物实验室的换气次数达到每小时 6 次即可保证 TVOC 及氨气浓度指数达标。因此,在动物实验室采用基于需求的变风量控制模式可通过降低换气次数,实现

节能减排目的。

此外,由于动物实验室在不同控制工况下的室内人员状况、实验动物状态、环境控制参数要求均不同,动物实验室有 5 种典型的运行模式^[13-15]:上班运行状态、下班运行状态、备用运行状态、自净状态和紧急状态,所以空调系统的送排风量需与动物实验室的运作模式相对应,从而即能达到实验需求,又能实现节能运行。

本项目在满足动物实验室正常运行需求的情况下,为实现节能运行,采用基于需求的变风量控制模式,在动物实验室的送排风管上均安装了变风量文丘里阀,并且配置了 AIRCUITY 空气品质检测系统,可实现对空调系统送风主管上以及每个重要动物实验室的排风管上的空气进行分散采样、集中测量分析。对采样空气进行测量的物质有:总挥发性有机物(TVOC)、氨气、二氧化碳、温度、相对湿度。将测量值与室内空气品质限定的最小值进行对比,分别求出满足室内该五项指标的最小送风量,然后取五项最小送风量的最大值,且不低于规范规定的非工作模式的最小换气次数^[4-5],并联动

房间送排风变风量文丘里阀,实现真正的基于需求的变风量控制目的。

3 结语

本项目目前正在施工中,预计 2020 年上半年进行空调调试及有关竣工验收,下半年正式投入使用,实际运行情况有待后续考证。通过对动物实验室空调系统特点的调研分析,笔者认为动物实验室的空调系统在设计时还需重点关注以下几点问题:

1)目前,大多数的动物实验室采用全新风直流式空调系统,运行能耗较大,如何在避免交叉污染的情况下,实现节能运行,是设计关注重点之一。

2)用于动物实验室废气处理的技术较多,包括有紫外线光解法、活性炭吸附法、等离子光解法、液体喷淋法等,还需要对各种技术从除臭效率、经济性和环保角度进行对比分析。

3)随着计算机配置的提高,采用数值模拟(CFD)技术辅助优化气流组织,提高空调的通风效率,将成为经济可行的方案,特别是针对室内空气质量要求较高的动物实验室。

参考文献:

- [1] 丁德,杨毅,曹志刚,等.浙江大学动物实验中心空调设计[J].暖通空调,2013,43(9):19-23,110.
- [2] 张宠宠.某实验动物实验室暖通空调系统设计施工调试的综合分析[J].暖通空调,2014,44(6):102-106.
- [3] 王红霞.某实验动物房空调系统设计[J].制冷与空调,2017,31(3):265-268.

- [4] 全国实验动物标准化技术委员会.实验动物环境及设施:GB14925-2010[S].2011.
- [5] 中国建筑科学研究院.实验动物设施建筑技术规范:GB50447-2008[S].2018.
- [6] 张忍虎.实验动物实验室设计有关问题的探讨[J].建筑设计,2017,1:42-43.
- [7] 袁静.动物饲养室洁净空调设计初探[J].制冷与空调,2010,24(3):28-30.
- [8] 蒋新波.基于CFD实验动物实验室气流环境系统的优化研究[D].衡阳:南华大学,2005.
- [9] 赵彬,李先庭,彦启森.用零方程湍流模型模拟通风空调室内的空气流动[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(10):109-113.
- [10] 李可欣,张凤梅,杨根岭,等.实验动物屏障设施系统自动化控制技术体系应用探索[J].中国比较医学杂志,2018,28(12):102-107.
- [11] 宗阿南,周欣,王丽清,等.独立通风笼具主体结构设计制作技术规范的研究[J].中国比较医学杂志,2004,14(5):55-56.
- [12] Gordon. Demand-based control of lab air change rates [J]. ASHRAE Journal, 2010, 2: 30-40.
- [13] 何婧,沈晋明,汪亚兵.实验动物实验房环境特点与空调设计[J].洁净与空调技术,2003,3(1):32-37.
- [14] 巴彩凤,刘学政,秦书俭.SPF环境设施净化空调工程节能技术的探讨[J].中国实验动物学杂志,2002,12(3):44-46.
- [15] 唐利军,杨文祥,曾开红,等.实验动物设施集中空调通风系统的公共卫生安全问题及其对策[J].中国比较医学杂志,2007,17(5):306-310.

[收稿日期]2019-11-07