大型气候环境实验室空气处理系统方案探讨

刘海燕，马建军，张惠
（中国飞机强度研究所，西安 710065）

摘 要：目的 探讨适用于大型气候环境实验室的空气处理系统方案。**方法** 从大型气候环境实验室空气处理系统的功能出发，探讨循环风系统、新风系统和空气补偿系统方案，并对各系统的工作流程和优劣进行分析，在此基础上提出优化的集成空气处理系统方案。**结果** 循环风系统采用串联风道比并联风道能更好地保证极限温湿度指标和均匀性指标，循环风系统与空气补偿系统集成方案优于两个个独立系统方案、具备可行性。**结论** 该空气处理系统方案适用于大型气候环境实验室。

关键词： 气候环境实验室；空气处理；循环风系统；新风系统；空气补偿系统

DOI：10.7643/issn.1672-9242.2014.05.021

中图分类号： P463.4 **文献标识码：** A

文章编号： 1672-9242(2014)05-0107-07

Discussion on Design of the Air Handing System in Large Climatic Environmental Test Laboratory

LIU Hai-yan, MA Jian-jun, ZHANG Hui
(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi′an 710065, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the scheme of the air handling system which is suitable for the large climatic environmental test facility. **Methods** The scheme of the air cycling system, the fresh air system and the air compensation system was discussed based on the functions of the air handling system in large climatic environmental test laboratory. The working process as well as the advantages and disadvantages of each system were analyzed. An optimized integrated air handling system scheme was put forward based on the analysis. **Results** The air cycling system adopting the ducts in series could better ensure the limit temperature and humidity as well as the uniformity indices of the facility. The integration of the air cycling system with the air compensation system was better than the two independent systems, and was feasible. **Conclusion** The scheme of the air handling system put forward in this paper was suitable for the large climatic environmental facility.

KEY WORDS: climatic environmental test laboratory; air handling; air cycling system; fresh air system; air compensation system

---

收稿日期： 2014-08-24；**修订日期：** 2014-09-04

Received: 2014-08-24; **Revised**: 2014-09-04

作者简介： 刘海燕（1968—），男，陕西户县人，硕士，高级工程师，主要研究方向为飞机结构环境强度。

Biography: LIU Hai-yan (1968—), Male, from Huxian, Shaanxi, Master, Senior engineer, Research focus: the environmental intensity of plane structure.

汽车、高铁、飞机等大型装备和各种机载设备等都是在标准大气环境下制造的，然而在实际使用过程中经常遭遇高温、低温、湿热、日照、降雨、降雾、冻雨、大风、降雪等气候环境。这些装备能否在各种自然气候环境下正常工作需要通过气候环境适应性试验来验证[1—2]。室内进行气候环境试验成本低、周期短、环境条件可控、可再现气候故障，而且有利于查找诱因，能高效地为改进设计提供可靠依据，因此在室内进行装备气候试验成为主流[3]。

1947 年，美国建成了体量约 100 000 m^3 的大型气候环境实验室[4]，主要针对飞机气候环境试验。先后有 400 多架飞机在该实验室中完成了气候试验。俄罗斯、英国、韩国等国也先后建立了可用于装甲车、飞机等大型装备的气候环境试验的大型气候环境实验室[5]。近几年来，随着装备气候环境适应性试验需求的急剧增大和环境试验技术及环境模拟能力的发展，我国也建设了一些体量在 1000 m^3 量级，适用于汽车、火车等气候试验的气候环境实验室[6]。现有的实验室远不能满足飞机气候环境试验的需求，因此，建设能够满足 ARJ-21 飞机、C919 大型客机以及未来航空器发展需求的大型气候环境实验室势在必行[7]。

飞机气候环境实验室应具备模拟高温、低温、湿热、日照、降雨、降雾、冻雨、大风、降雪等自然气候环境的功能，并能在这些环境下验证发动机启动/开车性能。由于实现这些功能的基础是实验室的温度和湿度，因此对温度和湿度进行调节的空气处理系统成为实验室各功能系统中的重点[8—10]。文中通过对空气处理系统进行综合分析和优化，提出适用于大型气候环境实验室的空气处理系统方案，期望能够对大型气候环境实验室空气处理系统的设计提供借鉴。

1　大型气候环境实验室空气处理系统简介

大型气候环境实验室指能够对汽车、装甲车、飞机等大型装备进行室内气候环境试验的实验室。大型气候环境实验室的空气处理系统是指将实验室的空气处理到目标温度和湿度，并能够提供目标压力的系统，包括循环风系统（AHU）[11]、新风系统（FMAU）和空气补偿系统[12]（JMAU）。

循环风处理系统的主要功能是调节实验室内的温度和湿度，主要由风机、换热器、加湿和除湿设备组成。

新风系统的主要功能是为实验室提供新风以保证实验室内压、新风除湿和预降温，主要由过滤器、风机、表冷换热器、除湿转轮和深冷换热器等组成。

空气补偿系统的主要功能是补偿汽车、飞机等装备在进行启动/开车试验时消耗的室内空气，主要由过滤器、降噪装置、风机、换热器等组成。

对于体量在 1000 m^3 量级的汽车环境实验室，因为新风系统和空气补偿系统较小，通常与循环风处理系统集成设计，设计技术比较成熟。空气处理系统通常布置于实验室的侧面或屋顶，如图 1 和图 2 所示。

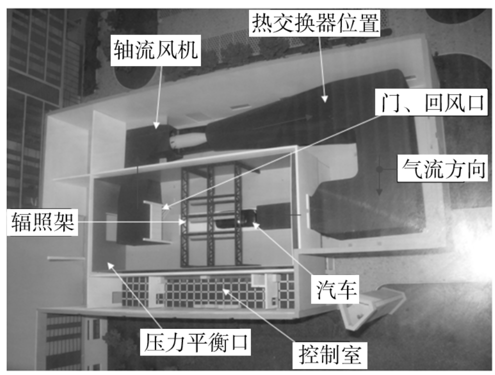

图 1　空气处理系统在实验室侧面

Fig. 1 The air handling system-side elevation

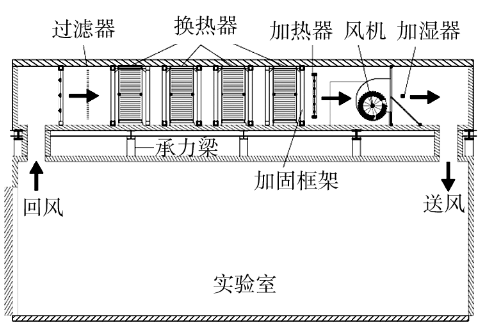

图 2　空气处理系统在实验室顶部

Fig. 2 The handling system at the top of the facility

对于体量在 100 000 m^3 量级的飞机气候环境实验室，由于空气处理系统非常庞大，用于汽车环境实验室的空气处理系统设计形式已不适用。现有的飞机气候环境试验室的空气处理系统均按照 3 个独

立的功能系统设计,基本方案如图 3 所示。

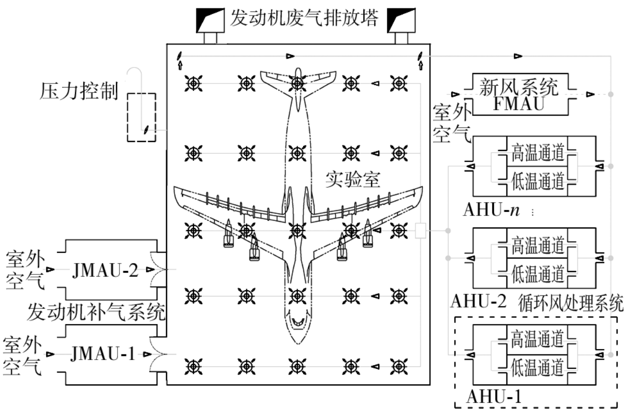

图 3　飞机气候环境实验室空气处理系统

Fig. 3 The general figure of the air handling system in the airplane climatic environmental laboratory

空气处理流程:室内空气经回风管道与经新风系统处理的室外空气在风机前端混合后进入循环风处理系统,调节温度和湿度后进入送风管道,最后由旋流器将空气合理地分布在室内空间以实现设置的温度和湿度要求。在发动机启动/开车试验时,空气补偿系统将室外空气处理到目标温度,通过舱体上的开口送入实验室。

2　空气处理系统方案及分析

2.1　循环风系统

循环风系统用于调温、调湿。依据室内-55 ~ 74 ℃的温度范围要求和±2 ℃的温度均匀度要求[14],按照 4 ℃送风温差,处理后循环风的极限低温为-59 ℃、极限高温为 78 ℃[15]。室内的湿度范围为 10% ~95%。实验室调节湿度的方法是在循环风出口用蒸汽加湿,用新风和结冰换热器除湿。如何调节温度是本节探讨的主要内容。

2.1.1　循环风量

设计循环风系统,首先要确定循环风量。总循环风量 $\dot{v}$(m^3/s)依据公式(1)和(2)计算[15]。公式(1)中的 Q 是气候实验室设计的基础参数,在实验室结构确定的情况下,Q 随试验工况在宽范围内变化,$\dot{v}$ 也随 Q 变化。为了满足所有工况需求,按照最大循环风量设计循环风系统。

$$Q=C\times\dot{m}\times\Delta T \tag{1}$$

$$v=\frac{\dot{m}}{\rho} \tag{2}$$

式中:Q 为冷/热负荷,kW ;C 为空气比热容,kJ/(kg · ℃);$\dot{m}$ 为空气质量流量,kg/s;$\dot{v}$ 为空气体积流量,m^3/s;$\Delta T=t_1-t_2$,℃;t_1 为回风温度,℃;t_2 为进风温度,℃;ρ 为空气密度,kg/m^3。

因为大风量 $\dot{v}$ 在 1 个循环风道上难以实现,通常需要多个(取值为 n)循环风道共同处理循环风,每个循环风道的流量为 $\dot{v}/n$。

2.1.2　循环风道设计

根据循环风的温度范围,循环风道的设计有 2 种形式,一种是并联形式,一种是串联形式。这两种形式的循环风道各有优劣。

2.1.2.1　并联循环风道

并联循环风道是指每个循环风道由 2 个通道组成,2 个通道并联,如图 4 所示。以某一送风温度(比如-25 ℃)为切换点,其中一个通道用于实现中高温(≥-25 ℃),另一个通道用于实现低温(<-25 ℃)。新风均由风机前的负压区进入循环风道。

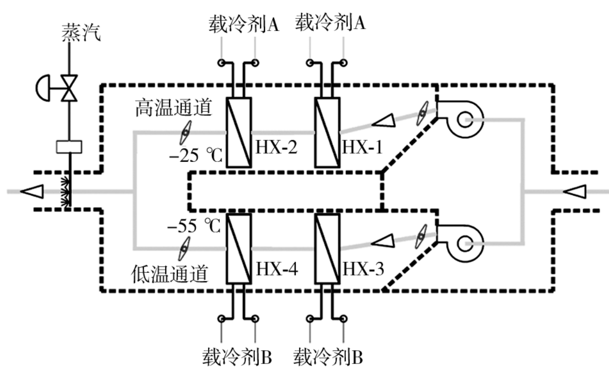

图 4　并联循环风道

Fig. 4 The air cycling ducts in parallel

图 4 中高温通道布置 2 个换热器 HX-1 和 HX-2,HX-1 和 HX-2 使用同一种载冷剂 A,载冷剂 A 可以载冷也可以载热;低温通道布置 2 个换热器 HX-3 和 HX-4,HX-3 和 HX-4 使用同一种载冷剂 B,载冷剂 B 仅用于载冷。HX-1 和 HX-3 的主要功能是除湿,HX-2 的主要功能是中温制冷或加热,HX-4 的主要功能是低温制冷。

并联风道有 3 种工作模式:

1) 送风温度≥-25 ℃时,中高温通道工作,低温通道关闭。

2）送风温度<-25 ℃时，2 个通道接力工作，即中高温通道将空气处理到-25 ℃后，切换到低温通道，继续处理到目标温度。

3）当室内冷量需求大，1 个通道风量不足以提供所需的冷量时，需要 2 个通道同时工作。此时 2 个通道将分流的空气处理到不同温度，在稳压箱掺混后，达到目标送风温度和送风量。掺混后的空气温度以 2 个通道的质量流量为加权系数计算。

并联风道优点：由于中高温通道换热器中的载冷剂 A 不经受低温环境，低温通道换热器中的载冷剂 B 不经受高温环境，因此载冷剂 A 和 B 的耐温范围要求降低。高温通道和低温通道建筑结构需要承受的温度范围相对减小，结构选材和设计难度降低。

并联风道缺点：与串联风道比较，在同等风量下，需要的建筑空间增大 1 倍；控制难度大；中高温通道和低温通道同时工作时，风机并联运行效率降低；需要有足够大的稳压箱保证处理后空气能均匀分配到各进风管道。

2.1.2.2 串联循环风道

串联循环风道指用于加热和制冷的换热器按照一定的顺序布置在同一个风道内，每个风道可以将空气处理到送风温度范围（-59 ~ 78 ℃）内的任意一个目标值，每个风道的空气流量为 $\dot{v}/n$。为了方便调整风量，可以将风道设计成 2 个完全相同的通道，每个通道的最大空气流量为 $\dot{v}/2n$。如图 5 所示。

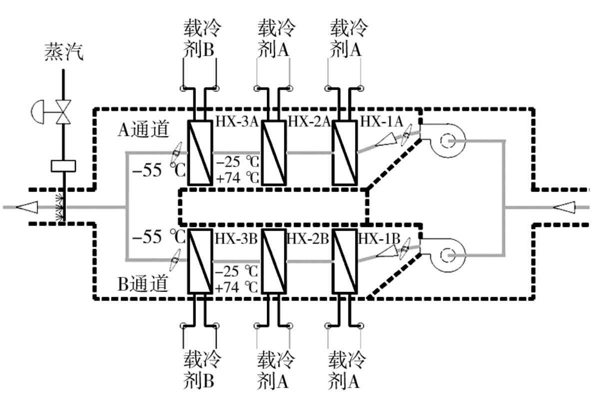

图 5 串联循环风道

Fig. 5 The air cycling ducts in series

串联循环风道工作模式：

1）在实验室进行高温试验时，HX-1A（B）和 HX-2A（B）工作，此时载冷剂 A 用作载热。

2）在实验室进行低温试验且温度≥-25 ℃时，HX-1A（B）和 HX-2A（B）工作，此时载冷剂 A 用作载冷，HX-1A（B）用于除湿，HX-2A（B）用于制冷。

3）在实验室进行低温试验且-55 ℃ ≤温度<-25 ℃时，HX-1A（B），HX-2A（B），HX-3A（B）工作，此时载冷剂 A 和载冷剂 B 均用作载冷，HX-1（B）用于除湿，HX-2（B）和 HX-3（B）用于制冷。

串联风道优点分析：

1）能够在同一个通道中将空气处理到全温度范围内的任一个目标温度。

2）在风量为 $\dot{v}/2$ 时，可以单通道运行，另一个通道作为备用通道。

3）同一个风道中的两个通道选用同功率风机，并联运行时不存在效率衰减问题。

4）与并联风道比较，在同等风量下，需要的建筑空间减小。

5）各风道的循环风独立与送风管道对接，室内温度控制灵活性更高。

串联风道缺点分析：

1）要求载冷剂 A 在最低送风温度下不能结冰、载冷剂 B 在最高送风温度下不能气化。如果选不到满足要求的载冷剂，则需要在高温试验时排空载冷剂 B，在低温试验时排空载冷剂 A。

2）风道建筑结构需要承受的温度范围大，结构选材和设计难度高。

2.2 新风系统

新风系统的最大流量按照最大泄漏量设计，最低露点温度按照实验室最低温设计。新风系统与自动泄压口（如图 3 所示）协调运行实现室内微正压，通过风机变频调节风量。新风由循环风处理系统中风机前的回风管道并入循环风道。新风出口温度和湿度决定新风系统中各设备的运行状态。新风系统的基本构成和工作流程如图 6 所示。

新风系统的工作模式：在高温试验的升温过程中，由于室内压力会随温度的升高而升高，不需要补充新风，因此此时该系统处于关闭状态；在实验室的降温过程和低温试验过程中，该系统始终处于工作状态，处理后新风的温度和湿度取决于实验室的温度和湿度要求，也决定了 FHX1、除湿转轮、FHX2、FHX3 以及再生蒸汽系统的工作状态。

由于同时满足低露点温度和大风量的新风系统

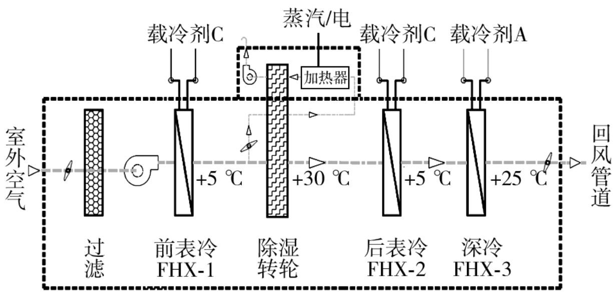

图 6　新风系统的工作流程

Fig. 6 The process of the fresh air system

投资成本高、施工难度大,而大型气候实验室新风系统又面临此问题,因此,合理地解决这两个问题是大型气候实验室新风系统的设计重点。

2.3　空气补偿系统

空气补偿系统的功能是发动机在-55 ~ 55 ℃温度范围内进行启动/开车试验时,补偿消耗的空气。空气补偿系统的最大流量按照发动机开车的最大空气消耗量设计。

该系统由空气过滤器、风机、消声器、加热换热器、制冷换热器等组成。其中 JHX-1,JHX-2,JHX-3 使用同一种载冷剂 A,可以蓄冷也可以蓄热;JHX-4 使用低温载冷剂 B,载冷剂 B 用于蓄冷。载热剂 A 和载热剂 B 需要提前存储,温度和存储量根据实验需求计算。储存的载冷剂的温度与补偿空气温度取 5 ℃温差。高温补气时,载冷/载热剂的温度高于室内空气 5 ℃,低温补气时,载冷/载热剂的温度低于室内空气 5 ℃。JMAU 的空气处理流程如图 7 所示。

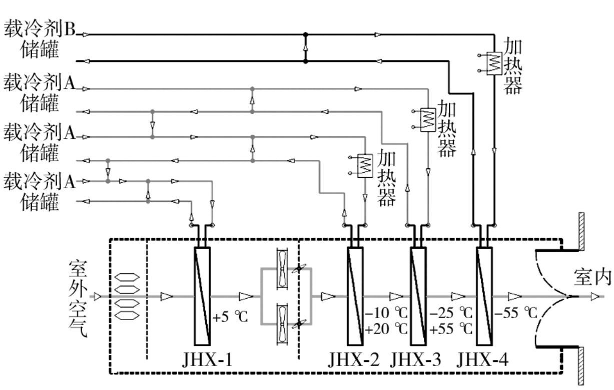

图 7　JMAU 的空气处理流程

Fig. 7 The air handling process of JMAU

空气补偿系统的工作模式:-10 ℃≤补偿空气温度≤20 ℃时,JHX-1 和 JHX-2 工作;-25℃≤补偿空气温度<-10 ℃或 20 ℃<补偿空气温度≤55 ℃时,JHX-1,JHX-2 和 JHX-3 工作;-25 ℃<补偿空气温度≤55 ℃时,JHX-1,JHX-2,JHX-3 和 JHX-4 全部工作。

为了充分利用载冷剂 A 中的冷/热量并提高换热效率,载冷剂 A 采用逆流再利用的方式是合理、可行的。例如,-25 ℃补偿空气时,出 JHX-3 的载冷剂和由载冷剂储罐供给的载冷剂混合后再进入 JHX-2 换热,依此类推,通过调节两路载冷剂的流量比例控制混合载冷剂进入各换热器的温度。

图 3 中补偿空气需要从实验室舱壁上的 2 个大型门洞进入实验室,并需要设置门。门的密封、开启方式等都是较难解决的问题,也会引起成本增高,这是现有的飞机气候环境实验室空气补偿系统的最大弊端。在现有的飞机气候环境室中,美国 McKinley 实验室的补偿空气入口在实验室顶部,韩国 ADD 实验室的补偿空气入口在实验室侧壁。

3　空气处理系统的优化

空气处理系统的优化主要包括 3 个方面:循环风道采用串联形式,每个风道与 1 个送风管道对接;循环风系统与空气补偿系统集成;新风系统采用“1+2”形式。优化的空气处理系统如图 8 和图 9 所示。

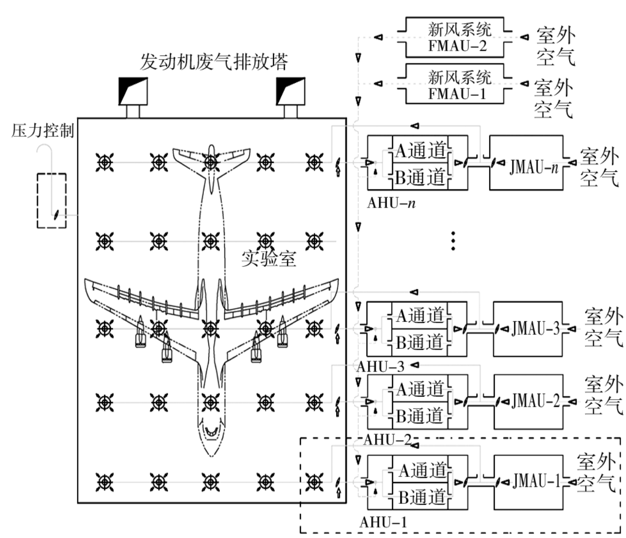

图 8　优化的空气处理系统总图(平面)

Fig. 8 The general layout plan of the optimized air handling system

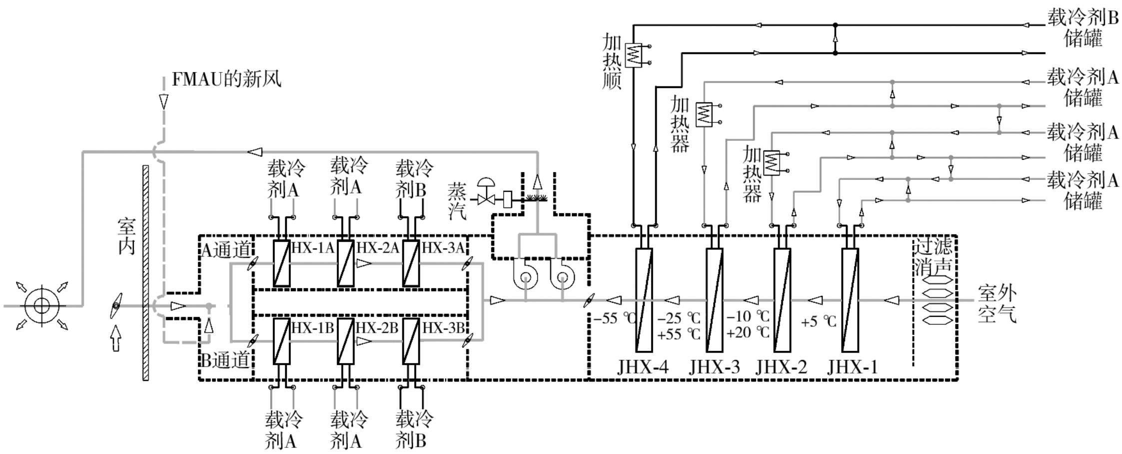

图 9 循环风与补偿空气系统集成

Fig. 9 The integration of the air cycling system and JMAU

3.1 循环风系统优选

循环风道选用串联形式,每个风道由 2 个相同的全功能通道组成。每个风道与一个送风管道对接和一个回风管道形成一个独立的循环风系统。除了文中 2.1.2 节论述的优势之外,还可以对实验室分区控温、控湿。另外,采用此方式也便于将循环风系统与空气补偿系统集成。

3.2 循环风系统与空气补偿系统集成

如图 9 所示,利用循环风道将补偿空气送入实验室内实现两个系统的集成。集成的优势有以下几个方面:

1) 避免了为空气补偿系统在实验室舱壁上设置大门以及由此引起门的密封、开启等问题。

2) 可以将补偿空气总量分配到多个空气补偿风道,降低了空气补偿系统的设备规模,使风机选型和换热器设计及制造难度降低。

3) 空气补偿系统和循环风系统公用风机,可以将风机数量减少一半,大大地降低了设备成本。

在认识到集成设计的优势的同时,也应该注意由此带来的问题,并在具体设计中予以解决。为了减少风机数量,两个系统集成时将风机移到了结合处(如图 9 所示)。这样使得循环风道和空气补偿风道在工作时处于负压状态,为了防止室外空气进入循环风道和空气补偿风道,在结构设计时,应重视密封设计。

3.3 新风系统优化

大型气候实验室的体量大决定了正压状态下的空气泄漏量大,而大的泄漏量需要大的新风补偿量。为了降低设备成本并兼顾系统运行的经济性和灵活性,从两方面进行优化设计:

1) 风量设计。将新风系统设计成露点温度相同的 2 套,其中一套系统按照最大新风需求量的 1/3 设计,另一套系统按照最大新风需求量的 2/3 设计,即采用“1+2”形式设计。

2) 露点温度设计。虽然实验室的最低温度为 −55 ℃,但经过计算可以得出,在新风的最低露点温度为 −40 ℃时,制冷换热器上的结霜不影响换热效果。在此情况下,将新风最低露点温度按照 −40 ℃设计,可以大幅度节省设备成本。

4 结语

通过对大型气候环境实验室几种空气处理系统方案的综合对比分析,提出采用“1+2”形式设计新风系统,采用串联循环风系统与空气补偿系统集成的空气处理方案。该方案可以通过循环风道全温度范围送风和室内分区控温更好地保证温湿度指标。通过新风系统的优化和循环风系统与空气补偿系统的集成大幅降低投资成本和运行成本。同时,也避免了空气补偿系统独立送风带来的一系列问题。经过初步论证,认为该方案在大型气候环境实验室是合理可行的。

参考文献:

[1] 王浚,黄本诚,万才大,等. 环境模拟技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996:5.
WANG Jun,HUANG Ben-cheng,WAN Cai-da,et al. Environment Simulation Methods[M]. Beijing:National Defence Industry Press,1996:5.

[2] 胥泽奇,张世艳,宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程,2012,9(1):54—59.
XU Ze-qi,ZHANG Shi-yan,XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environment Engineering,2012,9(1):54—59.

[3] 王浚. 我国环境模拟技术现状与发展[J]. 航空制造技术,2004(8):49—52.
WANG Jun. Present Status and Development of Environment Simulation Technology in China[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2004(8):49—52.

[4] DRAKE C W. Environment Test Capabilities of the Air Force McKinley Climatic Laboratory[R]. New York:American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc,1985.

[5] ELFSTROM M G,LEE J,LARRICK C J. Design and Operation of the ADD Environmental Test Facility[C]//26th International Congress of the Aeronautical Sciences,2008.(余不详)

[6] 池耀田. 城轨车辆的试验设施[J]. 环境试验,2011(10):6—11.
CHI Yao-tian. Testing Facilities for Mass Transit Vehicle. Environmental Testing,2011(10):6—11.

[7] 唐虎,李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程,2012,9(1):60—65.
TANG Hu,LI Xi-ming. Climatic Test of Aircraft[J]. Equipment Environment Engineering,2012,9(1):60—65.

[8] 马建军,孙侠生,李喜明. 环境实验室温度均匀性的数值分析研究[J]. 装备环境工程. 2014,11(1):48—53.
MA Jian-jun,SUN Xia-sheng,LI Xi-ming. Numerical Analysis of Temperature Uniformity for Climatic Test Chamber[J]. Equipment Environment Engineering,2014,11(1):48—53.

[9] 马广顺,马振库,赵云峰. 大型低温环境试验室制冷系统设计[J]. 装备环境工程,2013,10(2):96—98.
MA Guang-shun,MA Zhen-ku,ZHAO Yun-feng. Design of Refrigeration System for Large Environmental Test Chamber[J]. Equipment Environment Engineering,2013,10(2):96—98.

[10] 孙来燕,黄本诚,成致祥,等. 大型空间环境试验设备中的低温技术[J]. 低温工程,1999(4):218—223.
SUN Lai-yan,HUANG Ben-cheng,CHENG Zhi-xiang,et al. CryoneticsIn Large Space Simulators[J]. Cryogenics,1999(4):218—223.

[11] 郑毅穗,顾泽波,骆毅. 环境试验室用节能型空气处理机组的研制[J]. 环境技术,2011(6):52—55.
ZHENG Yi-sui,GU Ze-bo,LUO Yi. Development of Energy Saving Air Handling Unit for Environmental Lab[J]. Environmental Technology,2011(6):52—55.

[12] DOT/FAA/AR-06/60,Propeller Icing Tunnel Test on a Full-Scale Turboprop Engine[S].

[13] GJB 150A—2009,军用装备实验室环境试验方法[S].
GJB 150A—2009,Military Equipment Laboratory Test Method[S].

[14] MIL-STD-810F,Department of Defense Test Method Standard[S].

[15] HAZIM B A. 建筑通风[M]. 李先庭,赵彬,译. 北京:机械工业出版社,2011.
HAZIM B A. Ventilation of Buildings[M]. LI Xian-tin,ZHAO Bin,Translated. Beijing:China Machine Press,2011.