

环境试验与评价

大型综合气候实验室基础环境模拟系统设计

马建军, 刘海燕, 吴敬涛, 张慧, 吴相甫

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 设计出一套适用于大型综合气候实验室的基础环境模拟系统, 用于实现温度和湿度等基础环境。**方法** 通过分析实验室功能和热负荷, 并综合考虑国外气候实验室的设计特点, 提出基础环境模拟系统总体方案, 该系统由复叠制冷系统、载冷载热系统、循环风系统、新风系统等 8 个子系统组成, 并完成分系统设计。**结果** 调试结果表明, 基础环境模拟系统可实现 $-55\sim 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度环境及 RH 为 5%~95%的湿度环境, 并可完全支持降雪、太阳辐射、冻雨、淋雨、吹风等特殊气候试验。**结论** 设计出的基础环境模拟系统满足大型综合气候实验室的使用要求。

关键词: 大型气候环境实验室; 基础环境模拟系统; 制冷系统; 加热系统; 加湿系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.005

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0024-10

Design of Primary Climatic Environment Simulation System for Large Comprehensive Climatic Environment Test Laboratory

MA Jian-jun, LIU Hai-yan, WU Jing-tao, ZHANG Hui, WU Xiang-fu

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The paper aims to design a primary climatic environment simulation system for large comprehensive climatic environment test laboratory to create temperature and humidity conditions. Based on the analysis of function and heating capacity of the laboratory and design characteristics of similar climatic environment test chambers at home and abroad, a primary climatic environment simulation system including cascade cooling subsystem, secondary refrigerant and heating subsystem, recirculating air subsystem, fresh air subsystem, etc. was designed. The test results showed that, this primary environment climatic simulation system can control the temperature and humidity of the laboratory at -55 to $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 5%RH to 95%RH and can support special climatic tests including snow, solar radiation, sleet, rain, wind, etc. The primary climatic environment simulation system designed can meet the using requirements of large comprehensive climatic environment test laboratory.

KEY WORDS: large climatic environment test laboratory; primary climatic environment simulation system; cooling system; heating system; humidity system

大型综合气候实验室可模拟极端低温、高温、湿热、降雪、太阳辐照、积冰冻雨、淋雨、冻雾等地球表面的气候环境^[1], 可满足大型设备或飞机整机的气候试验需求。在所有的气候环境中, 温度、湿度是最

基本的气候因素, 风、雨、雪、冰、雾等气候环境是在温度和湿度的基础上, 通过增加专用环境模拟设备而实现的。因此温度和湿度环境的模拟是大型综合性气候实验室的核心功能, 实现温度和湿度的环境模拟

收稿日期: 2019-11-27; 修订日期: 2019-12-22

Received: 2019-11-27; Revised: 2019-12-22

作者简介: 马建军 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞机气候环境试验技术。

Biography: MA Jian-jun (1989—), Male, Master, Engineer, Research focus: climate environment test technique.

系统称为基础环境模拟系统。大型综合气候实验室具备以下特点：规模大，容积超过 100 000 m³；温湿度范围宽（-55~74℃），并且可在 24 h 内从常温降到 -55℃，在 8 h 内升温至 74℃，相对湿度范围在 10%~95% 内连续可调；模拟气候种类复杂，热负荷变化大（如 -55℃ 降温的热负荷约 3600 kW，升温至 +75℃ 的冷负荷约 5000 kW，-25℃ 降雪的热负荷约需 6500 kW 等）。这对基础环境模拟系统的设计提出了极大挑战。

文中针对大型综合性气候实验室的特点，并综合考虑国内外气候实验室的设计，提出了一种基础环境模拟系统设计方案，实现对温度和湿度环境的模拟和精确控制，并且具有安全性和可靠性高、占用空间小、可扩展性强等特点。

1 国内外气候实验室

美国空军 1947 年 5 月在佛罗里达州格林空军基地建成了目前世界上最大最先进的麦金利气候实验室，其主环境室有效尺寸为：宽 76.2 m、深 61 m、中间高度 22.8 m，附加一个 18.3 m×26.0 m 的小环境室，用于容纳超大型飞机（如 C-5 飞机）的尾部，可实现实验室温湿度范围分别为 -55~74℃ 和 10%~95%（2~74℃）。低温环境依靠三套大型离心式 R22 复叠制冷系统实现，通过 R22 的蒸发对空气进行冷却，三台大型天然气锅炉用于产生高温蒸汽，对空气进行加热和加湿，除湿则是通过降低蒸发器表面温度以降低露点温度的方式^[2-3]。经过温度和湿度处理的循环空气经实验室上部的散流器均匀地送入实验室，调节实验室内的温度和湿度环境。由于建设年代久远，且经过多次升级，实验室集成度不高，空气处理系统占地面积是环境室面积的近 2 倍，且由于是直接蒸发制冷，制冷剂充注量较大，采用的是 R22 制冷剂，对环境有破坏性。

韩国 ADD 综合气候实验室于 2008 年 2 月启用，实验室面积比麦金利实验室主环境室的 1/4 还小，环境室的尺寸为：宽 32 m、深 42 m、高 15 m，实验室温度范围为 -54~54℃，相对湿度范围为 10%~100%（20~54℃）。该实验室采用 R507 双级压缩制冷，采用载冷剂间接制冷的方式冷却空气，载冷剂为 HC-30。采用蒸汽换热器对空气加热及蒸汽加湿器对空气加湿，另采用转轮除湿机组对空气除湿，经过温度和湿度处理的循环空气同样经实验室上部的散流器送入实验室^[4]。

国内汽车、兵器、高铁、电力等行业建立了一些气候实验室，但规模都不大，体积很少超过 1000 m³，且都不是综合气候环境实验室，其环境模拟系统相对简单^[5]。

2 基础环境模拟系统总体结构

基础环境模拟系统用于对所有实验室模拟的气候环境提供最基本的温度和湿度环境，因此其必须具备对实验室空气的加热、冷却、加湿和除湿功能，此外还应保证实验室内压力高于室外，防止室外湿空气侵入实验室，破坏试验条件。为实现以上功能，设计了基础环境模拟系统的总体结构，如图 1 所示，共包括 8 个子系统，其中制冷系统、载冷载热系统、循环风系统、新风系统和微正压系统等 5 个子系统为核心子系统；变频启动系统、冷却水系统和集成控制系统等 3 个子系统为配套子系统，为常规设计，各子系统的功能如下所述。

- 1) 制冷系统为冷源，产生的冷量输送给载冷载热系统和发动机补气系统，由此产生的热量由冷却水系统带走。
- 2) 载冷载热系统为闭式循环系统，将制冷系统

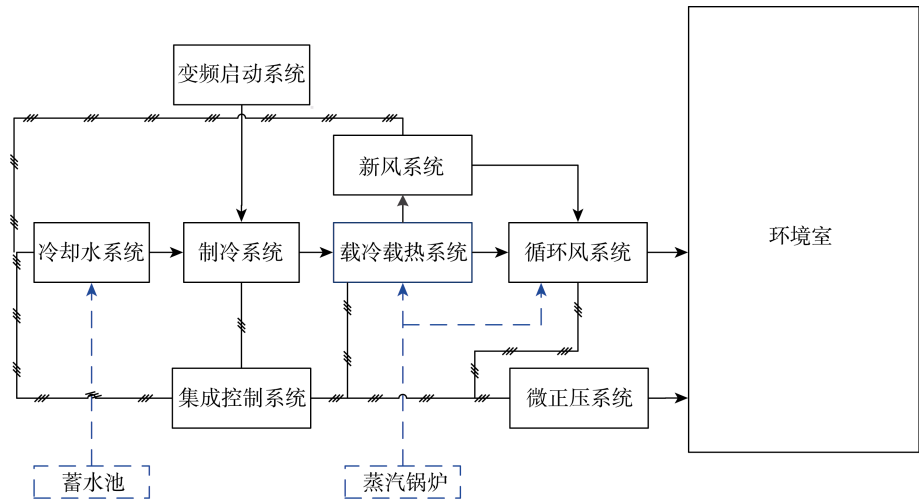


图 1 基础环境模拟系统总体结构

Fig.1 Overall structure of primary climatic environment simulation system

产生的冷量和由蒸汽锅炉输送的热量转送给循环风系统和新风系统。

3) 循环风系统对循环空气直接进行温度和湿度处理,将处理好的空气再送入环境室,调节环境室内的温湿度。

4) 新风系统将室外空气进行降温 and 除湿,然后再送入循环风系统,与循环风系统共同调节实验室湿度,维持实验室内保持微正压。

5) 微正压系统的主要功能是配合新风系统共同控制室内压力和湿度。

6) 冷却水系统的功能为将复叠制冷系统、标准制冷系统冷凝器中的热量带走,或为 AS-6 载冷载热系统降温。

7) 变频启动系统实现多台电机以任意需要的顺序的变频启动并无扰切换至工频。

8) 集成控制系统协调各系统的运行,控制各设备的开启和中断等,以实现环境室温湿度环境。

3 核心子系统设计方案

3.1 制冷系统

要实现极端低温环境,制冷系统的蒸发温度应达到 -70°C ,而实现如此低的蒸发温度主要有两种制冷方式:双级压缩制冷与复叠制冷。在较低的蒸发温度下,复叠制冷系统的经济性更好^[6-7],而且复叠系统可采用两种不同的制冷剂,每种制冷剂都在安全压力范围内,安全性和可靠性更好。如采用 R507 双级压

缩制冷(ADD 实验室),蒸发温度为 -70°C 时,其蒸发压力(绝对压力)仅为 28 kPa,属于严重负压,如图 2 所示。一旦制冷系统发生泄漏,将导致外界空气侵入,污染整个制冷系统。

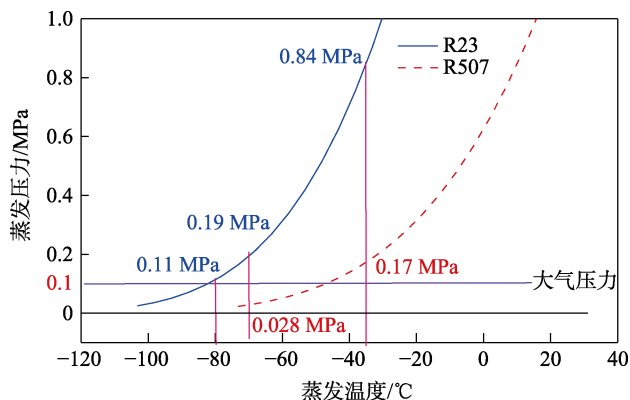


图2 R507、R23 制冷剂蒸发温度与蒸发压力关系
Fig.2 Relationship between evaporate temperature and pressure of refrigerant R507, R23

综合考虑安全性、效率、环保等因素,采用 R507/R23 复叠制冷系统^[8],以实现极端低温环境。此外,不同的气候试验项目产生的热负荷差别极大,如极端低温试验可能只需要 3500 kW^[9],但降雪试验由于水的相变释放出巨大的热量,热负荷可达低温环境的 2 倍,但温度又相对较高。因此,制冷系统还应满足宽温度、宽热负荷的要求。通过对不同气候环境热负荷的全面分析,制冷系统采用“4+3”的组合形式,即 4 台 R507 压缩机和 3 台 R23 压缩机,如图 3 所示。

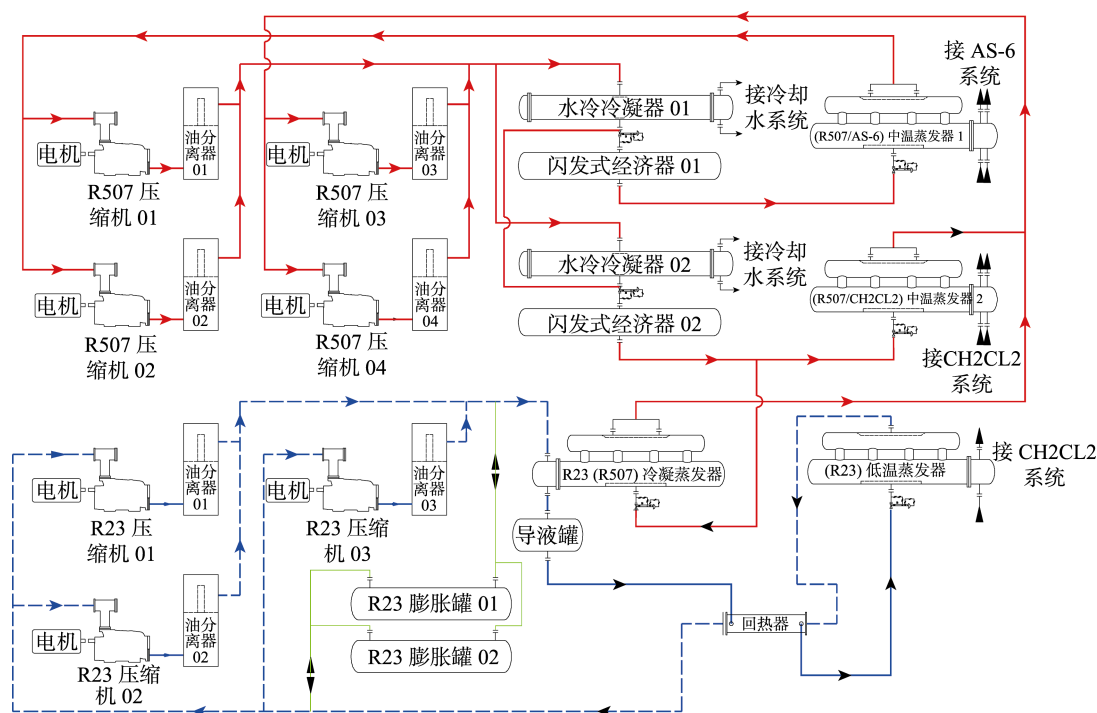


图3 复叠制冷系统
Fig.3 Scheme of cascade cooling system

针对不同的气候试验项目,制冷系统采用不同的运行模式,以覆盖所有的温度和热负荷,主要有以下 4 种。

1) 高温制冷循环,仅 1 和 2 号 R507 压缩机单级压缩运行,配套中温蒸发器 1。主要用于太阳辐照、风吹雨、环境温度 -25°C 冷浸、环境温度 $\sim 0^{\circ}\text{C}$ 瞬态降温等室内温度稍高的试验。

2) 中温制冷循环,仅 3 和 4 号 R507 压缩机单级压缩运行,配套中温蒸发器 2。功能与高温制冷循环基本相同,通常不单独使用,必要时可作为高温制冷循环的备用。

3) 高温制冷循环与中温制冷循环联合运行。主要用于降雪/风吹雪、冻雨结冰等试验温度相对较高但热负荷超大的试验。

4) 复叠制冷循环,3 和 4 号 R507 压缩机与 1、2、3 号 R23 压缩机组成复叠制冷循环,配套低温蒸发器,用于 -25°C 以下极端低温试验。

压缩机需要启动的台数可根据热负荷自动调节。

3.2 载冷载热系统与循环风系统

采用制冷剂直接蒸发冷却空气需要在制冷系统内充注大量的制冷剂,制冷剂管道内压力变化较大,这对制冷系统的可靠性提出了较大挑战,同时需要精确控制蒸发温度和制冷剂流量才能实现对室内温度的精确控制。为规避以上两个问题,采用液态载冷剂间接制冷,以载冷剂为媒介实现冷量的长距离传输和分配,并实现温度的精确控制。

综合考虑载冷剂的安全性和经济性,选用两种载冷剂^[10-12]:一种是中高温载冷剂 AS-6,工作温度为 $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$,与制冷系统的高温制冷循环匹配;另一种是低温载冷剂 CH_2Cl_2 ,工作温度为 $-70\sim 0^{\circ}\text{C}$,与制冷系统的中温制冷循环和复叠制冷循环匹配。针对两种载冷剂对应设计了两套载冷载热系统,分别为 AS-6 系统和 CH_2Cl_2 系统。由于载冷剂 AS-6 可工作在高温下,在 AS-6 系统中布置了一台蒸汽加热板换,使得 AS-6 系统不仅可以载冷,还可用于载热。载冷载热系统将制冷系统的冷量或蒸汽的热量输送到循环风系统的换热器内,对空气进行温度处理,其原理如图 4 所示。

载冷载热系统包括一级循环和二级循环,其中 AS-6 系统一级循环的设备主要包括循环泵、中温蒸发器 1(介质 R507/AS-6)、蒸汽加热板换、冷却水板换等;二级循环的设备主要包括循环泵、管道电加热器、循环风系统换热器、混温调节阀门等。 CH_2Cl_2 系统的组成结构与 AS-6 系统类似。

载冷载热系统一级循环实现冷量或热量的长距离运输,二级循环实现冷量或热量的分配。二级循环从一级循环中取液,送入循环风系统中的换热器,通过控制混温阀开度,调节从一级循环中的取液量,进

而调节进入换热器的载冷剂温度和空气温度。两级循环均为恒流量设计,针对特定的试验条件,通过调节泵的转速使得流过循环泵和换热器的载冷剂流量恒定,消除了一个控制变量,使温度控制更容易。同时一、二级可以相互独立运行,当制冷系统或蒸汽系统不稳定而导致一级循环温度产生波动时,二级循环可最大程度地消除这种波动的影响。

在高温试验结束后的降温,或高温日循环试验,可启用冷却水板换,将温度较低的冷却水作为冷源,以节省能耗。极端低温试验结束后,启动二级循环中的管道电加热器进行升温。

循环风系统包括 5 台并联且可独立运行的循环风机组^[13],每台机组包括 2 个独立且相同的全温度通道,每个通道串联内布置了 1 台离心式风机和 3 台换热器。1 台结冰换热器(HX1 或 HX4)和 1 台中高温换热器(HX2 或 HX5),配套一个 AS-6 二级循环,用于 -25°C 以上的试验。1 台低温换热器(HX3 或 HX6),配套一个 CH_2Cl_2 二级循环,用于 -25°C 以下的试验。中温和低温换热器同时工作则用于降雪、冻雨等大热负荷试验。因此,在单个通道内,即可将空气温度处理至任意一点。每台循环风机组在换热器的后方布置了一套干蒸汽加湿系统^[14],用于对空气进行加湿,最高可使空气相对湿度达到 95%以上。为了保证室内温度场的均匀性,循环风系统在 1 h 内可将实验室内的空气循环 9 次^[15]。

循环风系统的设计具有以下 4 点明显的优势:5 台小型循环风机组,使得设备的体积大大减小,可选择货架产品,降低了设计风险;全温度通道设计,使传统上的“冷、热处理分离”集成到了一个通道内,大大减少了所需建设空间;实验室的气流组织可以分成 5 个温度区进行调节,利于室内温度场的控制,如图 5 所示;5 台机组共计 10 个独立通道,大大增强了循环风系统的冗余度和可靠性,不会因为单个通道问题而造成整个循环风系统无法运行,影响试验条件。

3.3 新风及微正压系统

对实验室进行除湿主要依靠新风系统,其主要技术原理如图 6 所示。室外空气经过过滤后,由风机驱动,经过第一级表冷器 FHX-1 除去大量的水分,且温度降至 5°C 。然后经过转轮进行深度除湿,露点温度可达 -40°C ,空气温度被加热至 30°C 。小部分低露点空气经过蒸汽加热后,再次经过转轮,对转轮进行除湿。大部分低露点空气进入后表冷, FHX-2 再次冷却至 5°C 。为了减轻循环风系统的热负荷,新风系统配置了一台深冷 FHX-3,最低可冷却至 -25°C 。低露点新风经回风管道进入循环风系统(见图 4),经进一步温度处理后进入实验室内,对实验室进行除湿。

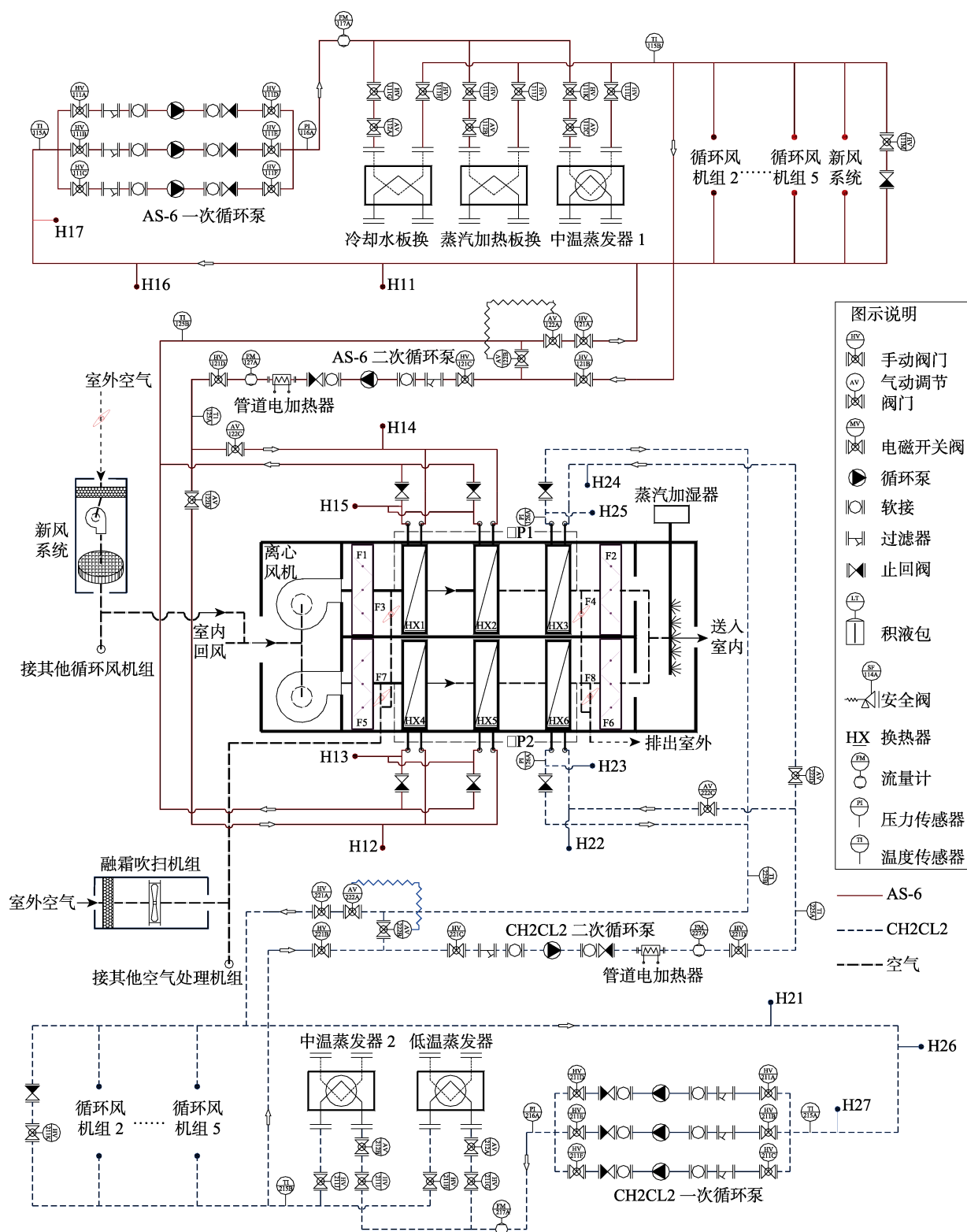


图4 载冷载热系统与循环风系统

Fig.4 Scheme of secondary refrigerant and heating system and circulating air system

配套设计了一套 R134a 标准制冷系统,载冷剂为 30%乙二醇,为前表冷和后表冷提供冷源。通常情况下,30%乙二醇供液温度恒定为 0°C 。深冷换热器则配套了一个 AS-6 二级循环,技术原理与循环风系统所配置的 AS-6 二级循环相同。

微正压系统与新风系统联合工作进行除湿,微正压系统主体为单向机械式泄压窗,如图 7 所述。主要组成结构包括保温箱体、阀门门体、配重执行机构、压差传感器、限位开关、电磁门吸、风口防护格栅等。通过调整配重,限定泄压窗的开启推力,进而限制室

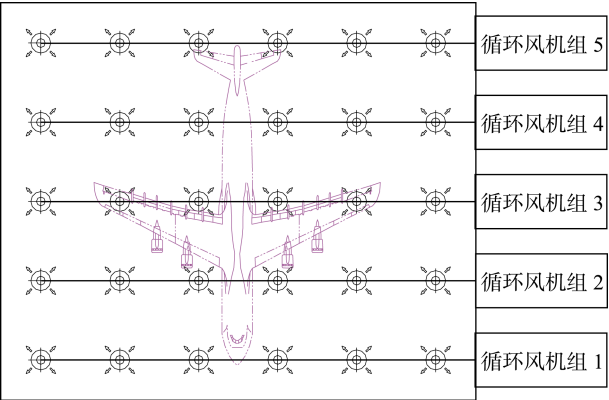


图 5 气候实验室循环风系统布置
Fig.5 Layout of circulating air system in climatic environment test chamber

内的压力。此外，非除湿时，微正压系统与新风系统联合工作，将维持室内压力为 25 Pa，防止外界湿空气浸入室内。

3.4 温度和湿度控制算法

由于实验室容积大，换气次数较低，围护结构热沉大，实验室温度响应存在明显的滞后，是一个带滞后的一阶惯性系统^[16-17]。与载冷载热系统两级循环相匹配，温度控制也分两级控制：一级控制载冷载热系统一级循环的供液温度，实现粗调；二级控制载冷载热系统二级循环的供液温度，实现精调。

一级温度控制根据实验室目标温度，计算出所需载冷载热一级循环的供液温度，供液温度控制主要由

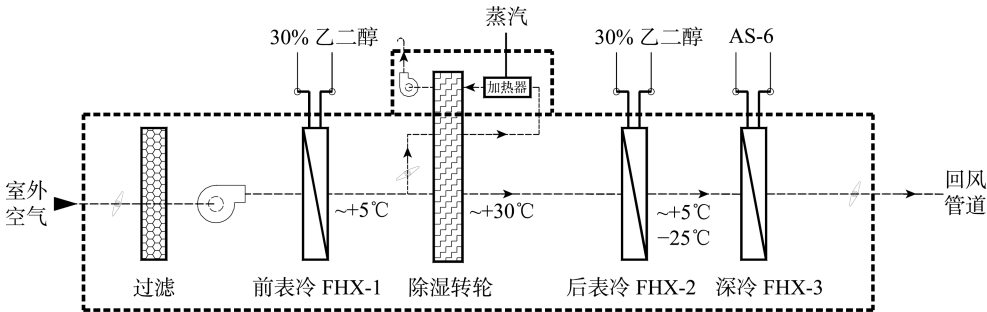


图 6 新风系统
Fig.6 Scheme of fresh air system

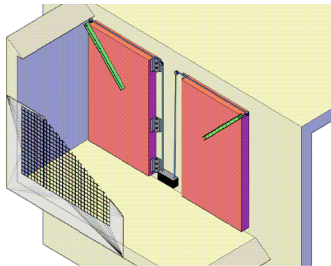


图 7 微正压系统
Fig.7 Scheme of micro-positive pressure system

制冷系统自行控制，或调节蒸汽板换、冷却水板换的供汽/供水量来实现。二级温度控制采用如图 8 所示

的前馈-串级 PID 控制系统^[18]，外环 PID 的输入是实验室期望温度。其与实验室温度反馈值作差，经外环 PID 计算出送风温度，并作为内环 PID 的输入。内环选择距离调节阀较近、滞后时间小的送风温度作为被控量，计算载冷剂混温阀的开度，调节换热器进口的载冷剂温度，从而改变送风温度，内环副回路的超前作用控制及时，达到快速控制室内温度的目的。对于前馈环节，可采用静态型前馈控制器，即计算出热负荷干扰带来的送风温度变化值，并引入内环控制器单位时间经过换热器的送风温度偏差计算中，从而达到抵消热负荷干扰的目的。

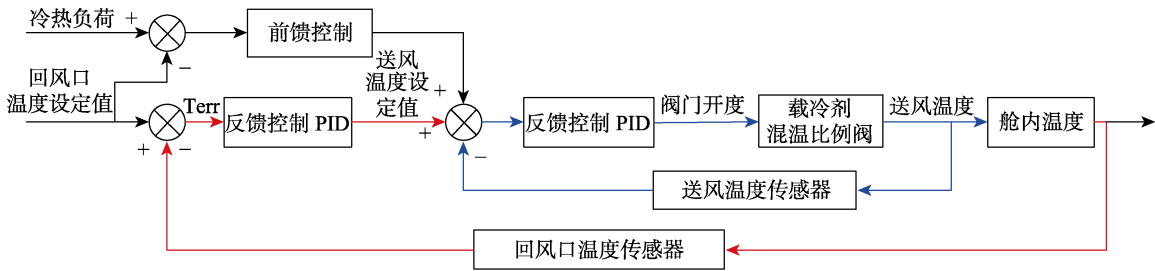


图 8 二级温度控制流程
Fig.8 Secondary temperature control process

湿度控制依靠新风系统和蒸汽加湿器共同完成，以绝对含湿量为控制对象，实现温湿度解耦控制：室

内湿度低于目标湿度允差下限时，启动蒸汽加湿器并 PID 调节加湿量，实现加湿，此时新风系统仅小风量

运行,维持室内压力;室内湿度高于目标湿度允差上限时,仅启动新风系统并以 PID 调节新风量^[19],实现除湿。

4 关键设计

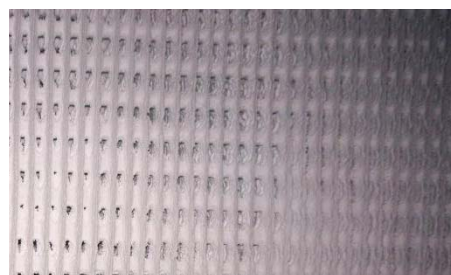
4.1 结冰换热器

结冰换热器是保证循环风系统正常运行的关键设计之一,结冰换热器为变片距设计^[20-21],迎风面片距为 24 mm,背风面片距为 8 mm。在降雪、冻雨等室内温度较低但湿度较大甚至有雾滴、冰晶的情况下,结冰换热器可有效对来流空气预除湿,即使迎风面结冰严重仍能保证换热器具有一定的空气流通面积,保护下游的中温换热器换热,有效减缓换热器性能衰减,保证试验的持续进行,如图 9 所示。

4.2 载冷载热定压子系统

由于载冷载热系统工作温度范围大,温度引起的热胀冷缩效应非常明显,若不处理,将导致载冷剂系统管道压力超限,危及系统运行安全。因此,在两套载冷载热系统的一级循环上均设计了定压系统,如图

10 所示。



a 结冰换热器迎风面



b 中温换热器迎风面

图 9 降雪试验时结冰换热器预除湿的效果

Fig.9 Effect of frosting heat exchanger in snow test: a) windward side of ice heat exchanger; b) windward side of medium temperature heat exchanger

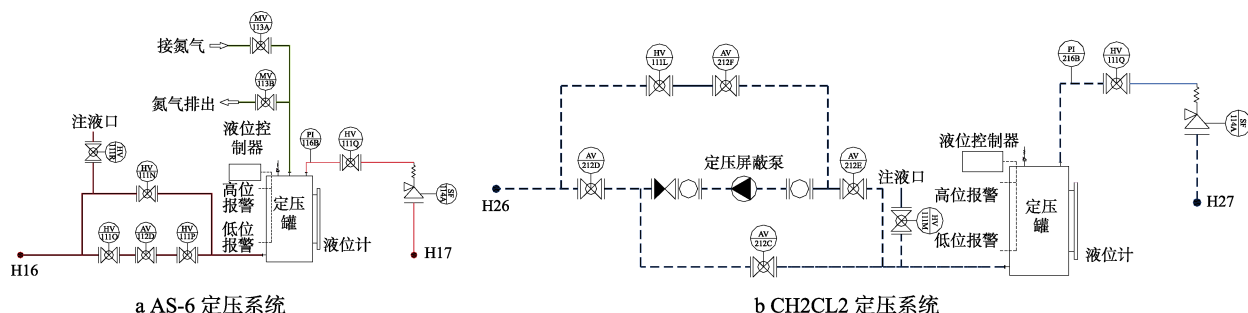


图 10 载冷载热定压 BB 系统

Fig.10 Pressure control system for secondary refrigerant and heating system: a) AS-6 pressure control system; b) CH₂CL₂ pressure control system

AS-6 定压子系统主要由调节阀、定压罐、安全阀、压力传感器等组成,通过监测一次循环泵的出口压力,控制定压系统相关阀门的开启和关闭。系统压力低时,向定压罐补充高压氮气,定压罐中的 AS-6 流向一级循环,为系统增压;系统压力高时,则排出氮气,AS-6 流回定压罐,为系统减压。

由于 CH₂CL₂ 在常压下的沸点仅为 39.8 °C,且易挥发,整个 CH₂CL₂ 为闭式系统。CH₂CL₂ 定压子系统主要依靠带有吸程的高压屏蔽泵,配合相关阀门的开启来实现。系统压力低时,高压屏蔽泵将定压罐中的 CH₂CL₂ 抽出,并泵送到一级循环内,定压罐中的压力降低,CH₂CL₂ 汽化填充剩余空间;系统压力高时,高压屏蔽泵将一级循环内的 CH₂CL₂ 抽出,并泵送到定压罐中,定压罐压力上升,导致处于气态的 CH₂CL₂ 再次液化。

4.3 载冷载热辅助子系统

循环风系统全温度通道设计意味着 AS-6 换热器和 CH₂CL₂ 换热器在任何时刻都将暴露在基本相同的温度条件下。AS-6 的冰点为 -50 °C,极端低温下可能会结冰膨胀,造成换热器损坏。CH₂CL₂ 在高温下面临沸腾问题,引发换热器内压力升高,同样影响系统安全。为此,设计了两套载冷载热辅助子系统^[22]。在极端低温试验时,排空 AS-6 换热器中的载冷剂;在高温试验时,控制 CH₂CL₂ 换热器中的压力,主要技术原理如图 11 所示。

在试验温度降至 -40 °C 以下之前,对 AS-6 换热器进行排空操作。排空流程是:关闭 AV122C、122D→打开 MV123A、123B、123C、123D→打开 AV122F、122H 和 AS-6 辅助循环泵→打开 MV123E,向换热器

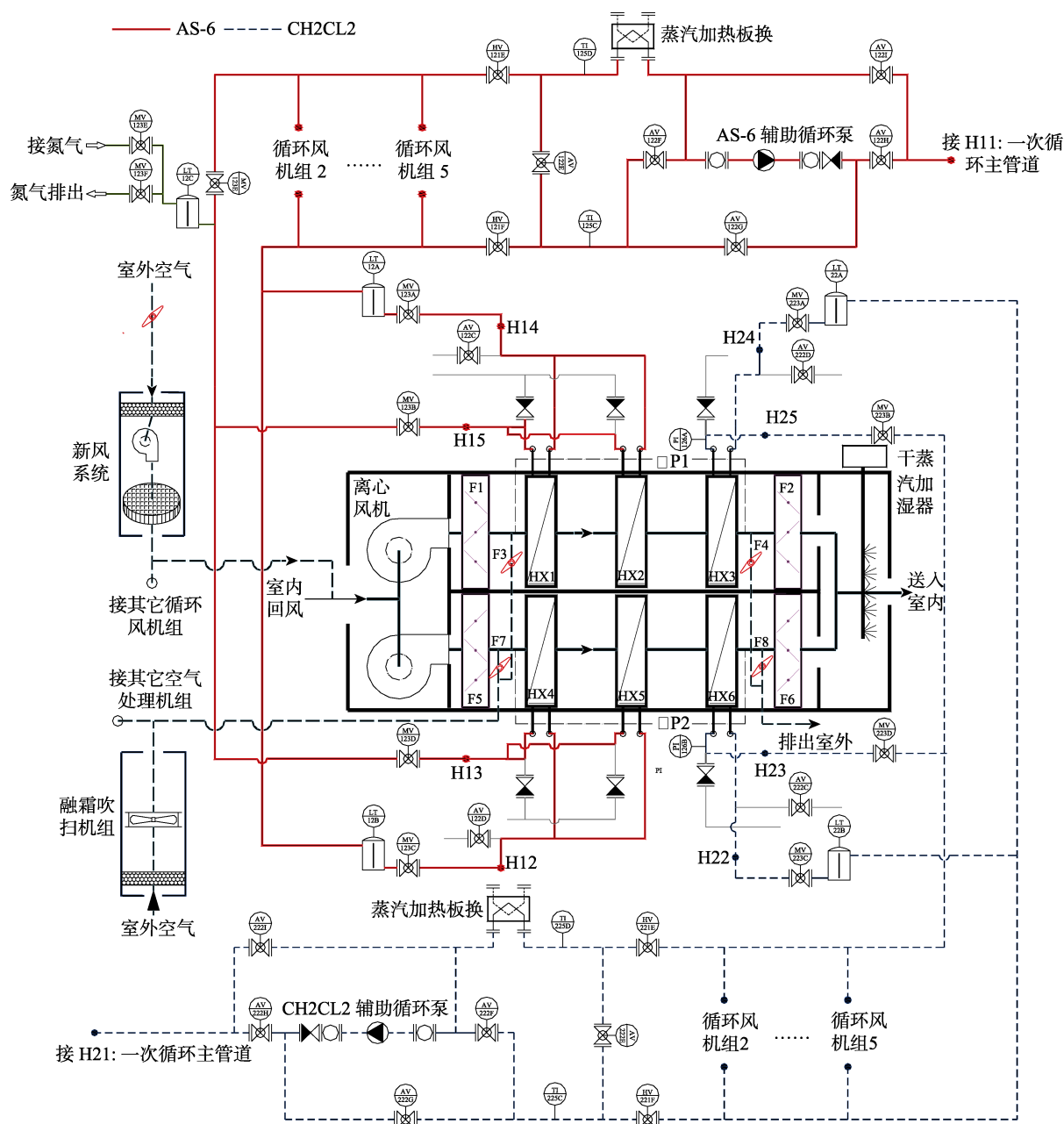


图 11 载冷载热辅助子系统

Fig.11 Auxiliary subsystem for secondary refrigerant and heating system

中充注氮气→换热器液位下降，低于低温积液包 LT12A、12B 中液位开关的位置时触发液位信号→关闭 MV123E，排空完成，随后关闭 MV123A、123B、123C、123D 和 AV122F、122H，关闭辅助循环泵。

在试验温度回到 -40°C 时，重新充注 AS-6 换热器。操作流程是：打开 MV123A、123B、123C、123D → 打开 AV122I、122G 和 AS-6 辅助循环泵 → 打开 MV123F，将氮气排出 → 换热器液位上升，触发高位积液包 LT12C 中的液位开关 → 关闭 MV123E，排空完成，随后关闭 MV123A、123B、123C、123D 和 AV122I、122G，关闭辅助泵。

由排空或充注引起的系统压力变化将由 AS-6 定压系统自动消除。

CH_2CL_2 辅助系统的操作流程与 AS-6 辅助系统类似，但 CH_2CL_2 辅助系统只对换热器内的压力进行控制，无须将换热器排空，为此 AS-6 换热器上安装有压力传感器。

载冷载热辅助子系统还具有对循环风系统换热器进行融霜的功能，可对循环风系统 10 个通道逐个或多个并行融霜（同一个循环机组机的两个通道不可同时融霜）。当结冰换热器和低温换热器的前后压差 ΔP 增量大于 300 Pa 时，进行融霜操作。以 AS-6 辅助子系统及图 4 中的上通道为例：关闭循环风机和风阀 F1、F3 → 关闭 AV122C → 开启 AV122E、122G，开启 AS-6 辅助循环泵、蒸汽加热板换，预热 AS-6 → TI125C 上升至 35°C 时，打开电磁开关阀 MV123A、

123, 同时缓慢关闭 AV122E, 进行换热器融霜→打开风阀 F3, F4, 开启融霜吹扫机组, 排出湿气, 正常情况下 20 min 即可除霜完成。 CH_2CL_2 辅助子系统融霜操作流程与 AS-6 辅助子系统类似。

在载冷载热系统二级循环泵出现问题时, 辅助子系统还可充当备用二次循环使用。以 AS-6 辅助子系统为例, 操作流程为: 关闭二次循环泵→关闭 AV122C、122D→打开 MV123A、123C→打开 AV122I、122G, 开启 AS-6 辅助循环泵, 备用二次循环运行。 CH_2CL_2 辅助子系统备用操作流程与 AS-6 辅助子系统类似。

5 结语

通过分析实验室的功能和热负荷, 综合考虑国内外气候实验室设计特点, 提出了基础环境模拟系统的功能和结构, 并提出了关键子系统的设计方案: 采用“4+3”结构的制冷系统设计, 满足所有试验条件的温度和热负荷要求; 采用液态载冷剂实现冷量和热量的长距离运输和分配, 载冷载热系统的两级循环结构为温度的精确控制奠定了基础; 5 套小型全温度双通道循环风机组的设计, 减小了设备体积和所需建设空间, 降低了设计风险, 并对实验室分区控温, 提高实验室温度场均匀性; 结冰换热器的设计延缓了循环风系统在低温大湿度试验时的性能衰减速率, 增强了试验的可持续性; 载冷载热定压系统和辅助子系统保证了载冷载热系统的安全性和可靠性。初步调试结果表明, 基础环境模拟系统可实现 $-55\sim 74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度环境及 5%~95% 的湿度环境, 温度场允差在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 湿度场允差在 $\pm 5\%$ 以内, 并可支持降雪、冻雨等气候试验, 达到了设计要求。

参考文献:

- [1] 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 Environmental Engineering, 2012, 9(1): 60-65.
- [2] DRAKE C W. Environmental Test Capabilities of the Air Force Mckinley Climatic Laboratory [R]. Reno: AIAA, 1985.
- [3] CLENDON L H. Flight Testing under Extreme Climatic Conditions[R]. AFFTC-TIH-88-004, 1988.
- [4] ELFSTROM G M, LEE J H, LARRICK J C. Design and Operation of the ADD Environmental Test Facility[C]// 26th International Congress of the Aeronautical Sciences. 2008.
- [5] 张文超, 李果, 张双俊, 等. 大型车辆高低温湿热气候环境试验系统设计及应用[J]. 环境技术, 2018, 36(5): 14-20.
- [6] 赵瑞昌, 杨永安, 刘园, 等. 复叠与双级压缩系统的模拟对比分析[J]. 低温与超导, 2018, 46(7): 92-96.
ZHAO Rui-chang, YANG Yong-an, LIU Yuan, et al. Simulation and Comparison Analysis of Overlapping and Two-stage Compression Systems[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2018, 46(7): 92-96.
- [7] 郭耀君, 谢晶, 朱世新, 等. 双级压缩与复叠式压缩制冷系统的技术经济分析[J]. 化工进展, 2015(8): 3194-3201.
GUO Yao-jun, XIE Jing, ZHU Shi-xin, et al. Techno-economic Analysis of Two-staged Compression and Cascade Compression Refrigeration System[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015(8): 3194-3201.
- [8] 张惠, 刘海燕, 李喜明, 等. 大型气候实验环境实验室冷媒的分析选择[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 104-109.
ZHANG Hui, LIU Hai-yan, LI Xi-ming, et al. Analysis and Selection of Refrigerants Used in the Large Climatic Environmental Test Facility[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 104-109.
- [9] 马建军, 刘海燕, 成竹. 基于状态空间法的大型气候环境实验室热负荷仿真模型[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 115-121.
MA Jian-jun, LIU Hai-yan, CHENG Zhu. A Climatic Test Laboratory Cooling Capacity Calculation Model Based on Space State Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 115-121.
- [10] 张惠, 吴敬涛, 刘海燕. 大型气候环境实验室中高温载冷剂的稳定性分析[J]. 工程与试验, 2018, 58(4): 31-33.
ZHANG Hui, WU Jing-tao, LIU Hai-yan. Stability Analysis of High-Temperature Secondary Refrigerant Using in Large Climatic Environment Test Facility[J]. Engineering & Test, 2018, 58(4): 31-33.
- [11] 曹中兴. 各种载冷剂的技术经济性比较[J]. 低温与特气, 2013, 31(3): 9-12.
CAO Zhong-xing. Technical and Economical Comparison of Various Secondary Refrigerants[J]. Low Temperature and Special Gas, 2013, 31(3): 9-12.
- [12] 刘坤, 张保军, 岳磊, 等. 综合气候环境试验室载冷剂方案选择研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 105-110.
LIU Kun, ZHANG Bao-jun, Yue Lei, et al. Research on the Selection of Refrigerants Used in Combined Climatic Environmental Chambers[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 105-110.
- [13] 刘海燕, 马建军, 张惠. 大型气候环境实验室空气处理系统方案讨论[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 107-113.
LIU Hai-yan, MA Jian-jun, ZHANG Hui. Discussion on Design of the Air Handling System in Large Climatic En-

- vironmental Test Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 107-113.
- [14] 张亚娟, 吴敬涛, 刘海燕. 气候环境实验室加湿系统设计的关键技术研究[J]. 环境技术, 2017, 35(6): 76-79.
ZHANG Ya-juan, WU Jing-tao, LIU Hai-yan. Study on Key Technology of Air Humidifying System Design of Climate Environment Laboratory[J]. Environmental Technology, 2017, 35(6): 76-79.
- [15] 马建军, 姜亚军. 大型气候实验室气流组织仿真分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(11): 56-63.
MA Jian-jun, JIANG Ya-jun. Analysis of Airflow Distribution for Large Climatic Test Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(11): 56-63.
- [16] 吴相甫, 李冬梅. 气候环境实验室建模及温度控制系统仿真[J]. 测控技术, 2015, 34(10): 63-66.
WU Xiang-fu, LI Dong-mei. Modeling of Climatic Environment Test Facility and Temperature Control System Simulation[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(10): 63-66.
- [17] 吴相甫. 基于自适应模糊 PID 的环境模拟设施温控系统设计[J]. 控制系统与智能制造, 2018, 33(6): 34-38.
WU Xiang-fu. Designation of Environment Simulation Facility Temperature Control System Based on Adaptive Fuzzy PID[J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(6): 34-38.
- [18] 宋壮, 李军, 钱世豪. 大型气候环境实验室温度控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 200-203.
SONG Zhuang, LI Jun, QIAN Shi-hao. Simulation of Temperature Control System for Large Climatic Environmental Test Laboratory[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 200-203.
- [19] 吴相甫, 李冬梅. 气候环境实验室新风系统控制方法研究[J]. 控制工程, 2017, 24(s0): 30-35.
WU Xiang-fu, LI Dong-mei. Study on the Control Method of Fresh Air System for Climatic Environmental Test Facilities[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(s0): 30-35.
- [20] LEE M, KIM Y, DONG B, et al. Air-side Heat Transfer Characteristics of Flat Plate Finned-tube Heat Exchangers with Large Fin Pitches under Frosting Conditions[J]. Heat Mass Transf, 2010, 53(13): 2655-2661.
- [21] 马建军, 刘海燕. 间接制冷换热器除霜方案研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(7): 50-54.
MA Jian-jun, LIU Hai-yan. Defrost of Heat Exchangers Using Secondary Refrigerant[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(7): 50-54.
- [22] 刘海燕, 马建军. 大型气候实验室高低温模拟系统关键技术研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 79-84.
LIU Hai-yan, MA Jian-jun. Key Issues on Extreme High and Low Temperature Simulation Systems for Large Climatic Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 79-84.