

实验室气候环境模拟应用进展

曹云昌¹ 贺晓雷¹ 诸葛杰² 王乙竹³ 梁静舒¹ 赵盼盼¹ 成振华³ 罗晋⁴ 梁宏¹

(1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 2 佐格微系统(杭州)有限公司, 杭州 311402;

3 广西壮族自治区气象技术装备中心, 南宁 530022; 4 云南省气象局, 昆明 650034)

摘要: 实验室气候环境模拟用来模拟气压、气温、湿度、风速、降水、日照和特定天气状况等气候气象以及太空行星大气等环境因素, 试验、测试计量、考核评价特定对象(人和物)对气候环境等的适应性、耐久性, 以及研究气候气象乃至太空环境影响的相关科学技术, 从20世纪出现以来具有越来越重要的研究应用价值。本文回顾了国内外气候环境模拟在生物、农业、航空航天、汽车交通、建筑、兵器、太空探索等产业领域及科学工程等方面的试验、测试计量及应用等工程项目, 介绍了相关温、压、湿、风、雨、雪、雾霾等相关模拟设备的技术及系统平台, 展示了这一领域在国内外几十年来的应用研究进展, 并对该领域在科学和产业应用、精密调控、仿真、虚拟现实和增强乃至太空环境模拟及生命支持研究等领域的发展进行了分析和展望。

关键词: 气候环境模拟, 测试计量, 精密调控, 云雾室, 风洞

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.05.007

Overview of Applications and Technological Progress for Climatic Environment Simulation in Laboratory

Cao Yunchang¹, He Xiaolei¹, Zhuge Jie², Wang Yizhu³, Liang Jingshu¹, Zhao Panpan¹, Cheng Zhenhua³, Luo Jin⁴, Liang Hong¹

(1 Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081; 2 ZOGLAB

Microsystem Co. Ltd., Hangzhou 311402; 3 Guangxi Meteorological Technical Equipment Center, Nanning 530022;

4 Yunnan Meteorological Service, Kunming 650034)

Abstract: In the climatic environment simulation test laboratory, air pressure, temperature, humidity, wind speed, precipitation, sunshine and specific weather conditions, even the environment of space and planet atmosphere can be simulated in the indoor facilities. The adaptability and durability are assessed for human beings or the specific objects. Furthermore, science and technology are studied for the impact of climate, meteorology, and even space environment. Since 1900s, the study of simulation test laboratory has been a frontier in various scientific and technological applications. In the paper, a series of projects on climatic environment simulation fields of biology, agriculture, aerospace, transportation, construction, weapons, and space explorations as well as on science and engineering are reviewed. The advancement of simulation technologies and systems for the environment element simulation is discussed. The progress and great potential about its future in the scientific and industrial applications and technological simulation trend in fine adjustment, Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR), environment simulation and life support in space are projected.

Keywords: climatic environment simulation, test measurement, accurate adjustment, fog chamber, wind tunnel

0 引言

自然环境是人类生存所必需的自然条件和资源。随着社会和科学技术的发展, 自然环境对人类发展的影响和制约越来越被重视, 并作为一门科学技术领域被深入研究, 进行各种类型的环境适应性及可靠性试验, 称为环境模拟技术^[1-2]。环境种类通常分为气候

环境、力学环境、电磁环境和复合环境。从20世纪开始, 对自然环境中, 涉及空气、阳光和水的状态模拟, 通常称为气候环境模拟^[3]。气候环境又可分为地面环境、空中环境和空间环境。由于地面环境和空中环境的交融, 通常按环境参数分为温度环境、压力环境、湿热环境、沙尘环境、烟雾环境、雨环境、霉菌环境和太阳辐照环境以及多参数综合环境, 逐渐被科学界和工业界重视并开展研究。

1926年, 苏联莫斯科季米里亚捷夫农学院建造了可以进行人工光照并有冷却系统的小型培养室^[4]。1949年, 美国植物生理学家温特教授在加利福尼亚州

收稿日期: 2024年1月17日; 修回日期: 2024年3月14日

第一作者: 曹云昌(1968—), Email: caoyc@126.com

通信作者: 贺晓雷(1971—), Email: 13501210217@139.com

资助信息: 中南半岛水循环综合观测暨中港大湾区水汽输送观测试验(GCSYJH23-04)

帕萨迪纳的加州理工学院建造了第一个植物人工气候室，采用人工的方法模拟自然界中四季气候变化，可人工控制光照、温度、湿度、气压和气体成分等因素，研究气候、水分对植物生长发育和作物生理等的影响，开创了环境模拟技术研究的先河^[5]。20世纪50年代以来，气候环境模拟技术广泛应用于生物、汽车交通、航空航天、建筑、兵器、工农业、科学研究等领域，从而诞生了一门研究各种自然环境的人工再现技术和相关科学应用的环境模拟工程学科。在这些环境模拟中，比较基础的、模拟最多的是气候或气象环境，即在实验室中模拟气候气象环境因素，包括气压、气温、湿度、风速、降水、日照和特定天气状况，试验、测试计量、考核评价特定对象（人和物）对气候环境等的适应性、耐久性及研究气候气象环境影响。在工业应用方面进行各种机械电器等设备的环境适应性测试^[6-7]，在科学研究方面开展如风洞、云室和雾室的研制和应用等^[8-9]。近年来，随着人类星际探索的发展，诸如空间站、月球、火星甚至太空深处的空间环境的气候模拟也开始进入气候环境模拟领域，大大丰富了环境模拟的场景和内容^[10]。

1 国内外气候环境模拟

气候环境对交通运输、航空航天等国民经济各个行业具有重要影响。为了研究这些影响，国外开展了各种类型的气候环境模拟实验室的研制，比较出名的综合实验室有美国麦金利气候实验室，另外还有一些专门应用的模拟实验室，如交通、航空航天、科学应用实验室等。我国该领域发展虽然相对较晚，但各方面发展迅速^[11]。

1.1 航空航天领域

飞机要实现全天候飞行，经常遇到各种恶劣天气，比如高温、低温、雨淋、降雪、结冰等，而且还会遇到风沙、盐雾、油雾、大风、雷击等特殊极端环境。这使飞机的环境适应性、飞行安全性以及内外环境引起的座舱舒适度等问题变得非常重要。美国、英国和荷兰等均有全球气候实验室，如麦金利气候实验室。该实验室位于美国南部佛罗里达州埃格林空军基地，1943年9月建造，主舱测试高度约252 ft (1 ft \approx 0.3 m)，深260 ft，高70 ft，模拟包括热、雪、雨、风、沙和尘埃在内的所有气候条件，室内温度范围为-53~73℃，可测试飞机、坦克、导弹发射器、汽车等大型设备的环境适应性（图1）^[12]。

随着航天事业的发展，针对航天器的试验测试模拟也随之发展起来^[13]，著名的有法国国家航空航天研究中心（ONERA）（图1）航空航天实验室、美国阿波



图1 麦金利气候实验室一角

Fig. 1 Part of the McKinley Climatic Laboratory

罗飞船环境模拟舱等。航天模拟的环境包括太阳辐射、紫外线、电子、质子、太阳风、极高真空、冷热交变、等离子体等，试验航天器耐真空、冷黑、太阳辐射、磁场和承受高能粒子辐射、太阳风和微流星体等的的能力，用于对航天器零部件和材料的研究与检验试验^[14]。

ONERA主要业务包括空气动力学、推进、材料、结构强度、物理学和仪表测试。ONERA拥有功能齐全的航空航天实验室和12座完整大功率的风洞群，这些风洞能制造出马赫数（可压缩流体流场中某点的速度与该点的声速之比）0.1~20.0的飞行条件，从亚声速到高超声速，满足飞机外形、性能、噪声水平、安全性的试验，开展包括各种空气动力学、流体力学、气动弹性和试验结构动力学、传感器天线和微波技术、电磁学和雷达研究等^[15]。我国这方面有航空工业飞机强度研究所的气候环境实验室、中国科学院空天信息创新研究院环境模拟实验室，目前实验室具有高温、低温、高低温循环、潮湿、盐雾、正弦振动、随机振动、冲击响应谱、离心加速度、真空放电、真空冷热浸等环境模拟^[16]。

1.2 车辆交通领域

车辆交通环境模拟可以模拟车辆在实际行驶中遇到的雨、雪、阳光、振动、冷热、负荷、高低气压和行驶速度等。在模拟试验装置中可复现自然条件和模拟极值条件，不受地区、季节及时间限制，可在相同环境条件下多次重复试验，有利于评估和详细分析试验数据。比较有代表性的有维也纳国际车辆试验站^[17]、英国MIRA气候风洞实验室、英国皇家陆军科学研究院车辆环境实验室等。

维也纳国际车辆试验站作为一家国际活跃的独立研究和测试机构，致力于铁路和公路车辆、新的运输系统以及技术设施受极端气候条件影响情况的研究和

测试,通过进行高温、低温、湿度、太阳辐射、风、雨、雪、雾及结冰等试验以及现代化的气候风洞试验,优化公共交通工具的热舒适性,研究和提高系统的可用性和安全性。

我国目前有许多机构建造的关于车辆环境的实验室,如中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心的高速铁路环境模拟试验系统,由人工气候环境模拟室、恒载-环境耦合模拟室、动载-环境耦合模拟室和恒温-恒湿收缩徐变室4个模拟室组成。人工气候环境模拟室由大气环境模拟试验系统、水溶液环境模拟试验系统、土壤环境模拟试验系统和中心控制系统组成,各子试验系统既可以独立使用,又可以组合成一个大型的环境模拟室,进行长达10.0 m的混凝土试件环境模拟试验。恒载-环境耦合模拟室由环境模拟箱、持荷装置系统、试验试件运输系统和中心控制系统组成,环境模拟箱长10.0 m、宽4.5 m、高3.0 m,可实现长达10.0 m的混凝土试件恒载-环境耦合模拟试验。动载-环境耦合模拟室由环境模拟箱、动力加载系统、试验试件运输系统和中心控制系统组成,环境模拟箱长10.0 m、宽4.0 m、高3.0 m,可实现长达7.0 m的混凝土试件动载-环境耦合模拟试验。恒温-恒湿收缩徐变室由恒温恒湿室、持荷装置系统、试验试件运输系统和中心控制系统组成,环境模拟箱长12.0 m、宽7.0 m、高3.5 m,可实现长达10.0 m的混凝土试件收缩徐变试验。模拟系统技术参数见表1。

1.3 建筑领域

在建筑领域,可对真实自然环境进行全方位的动态模拟,以更真实、有效、快速地再现建筑承受的环境荷载,研究建筑的性能退化、围护结构材料和构件的节能及耐久性、建筑室内环境、建筑设备以及规划设计中的物理问题等^[18-19]。

日本大和住宅工业公司的大型环境模拟室^[20]采用了先进的控制系统和设备,可以模拟各种自然环境条件,包括温度、湿度、光照、风速等,分为试验区 and 设备区两个部分。试验区包括多个独立的试验间,可进行不同类型的试验,每个试验间均配备有相应的测试设备和仪器。设备区包括控制系统、数据采集系统、能源系统、空调系统等设备,保障试验区的正常运行。控制系统采

用智能化控制,可实现自动化运行和远程监控;数据采集系统则能够实时采集试验数据,并进行处理和分析。我国在该领域有北京市建筑工程研究院的环境模拟综合实验室、广州大学建筑与城市规划学院的全气候环境模拟舱等。除了常规的建筑气候模拟外,近年来关于太空站的气候环境模拟也成为研究的热点^[21-22]。

1.4 军事应用领域

环境模拟实验室在军事领域的应用十分广泛,可进行武器装备、零部件和材料以及弹药等装备和设备的环境模拟试验^[23],主要有3个功能:武器装备考核功能、环境武器试验功能和特种部队训练功能,如美国阿伯丁试验场兵器环境试验场、麦金利气候实验室等。

表1 中南大学高速铁路环境模拟试验系统技术指标

Table 1 Technical indicators for environmental simulation test system of high speed railway in Central South University

模拟室名称	项目名称	技术指标
人工气候环境模拟室	模拟室尺寸(长×宽×高)	由3个4.0 m×3.0 m×2.5 m模拟室组成
	模拟状态	大气、酸雨、冻融、盐及海洋环境
	相对湿度	40%~95%, 控制精度±5%
	温度	-20~60 °C, 控制精度±2 °C
	气体浓度范围	CO ₂ =(20±2)%, SO ₂ =(10±2)%
恒载-环境耦合模拟室	模拟室尺寸(长×宽×高)	10.0 m×4.5 m×3.0 m
	模拟状态	环境因素与静荷载交互作用
	相对湿度	40%~98% 波动度≤±2% 均匀度≤±5%
	温度	-20~60 °C 波动度≤±0.5 °C 均匀度≤±2.0 °C
	气体浓度范围	CO ₂ =(20±2)%, SO ₂ =(10±2)%
	雾化	雾滴直径为1~5 μm, 盐雾保持中性(pH值为7), 盐雾沉降量均匀(0.1~5.0 ml/(cm ² ·h))
动载-环境耦合模拟室	最大恒载	20 t
	模拟室尺寸(长×宽×高)	10.0 m×4.0 m×3.0 m
	模拟状态	环境因素与动荷载交互作用
	相对湿度	40%~98% 波动度≤±2% 均匀度≤±5%
	温度	-20~60 °C 波动度≤±0.5 °C 均匀度≤±2.0 °C
	气体浓度范围	CO ₂ =(20±2)%, SO ₂ =(10±2)%
恒温-恒湿收缩徐变室	雾化	雾滴直径为1~5 μm, 盐雾保持中性(pH值为7), 盐雾沉降量均匀(0.1~5.0 ml/(cm ² ·h))
	最大动荷载	50 t
	模拟室尺寸(长×宽×高)	12.0 m×7.0 m×3.5 m
	模拟状态	恒温恒湿条件下混凝土结构收缩徐变
	相对湿度	40%~98% 波动度≤±2% 均匀度≤±5%
温度	5~60 °C 波动度≤±0.5 °C 均匀度≤±2.0 °C	

美国阿伯丁试验场兵器环境试验场是美军最大的综合性武器和装备试验基地，负责模拟和测试各种不同的作战环境和武器系统性能。试验场拥有广阔的试验区域和先进的设施，可以模拟各种极端环境条件，如高温、低温、沙漠、丛林、高原和城市等。试验场通过在不同环境条件下进行测试，可以评估武器系统的可靠性和性能，为作战指挥提供决策依据，同时还可以为武器系统的改进和升级提供技术支持。试验场拥有各种先进的试验设备，包括大型环境模拟舱、温度试验箱、湿度试验箱、风洞、淋雨试验装置、模拟爆炸装置等^[24]。

1.5 特定科学领域

19世纪末20世纪初，英国著名的物理学家、诺贝尔物理学奖获得者威尔逊（Charles Thomson Rees Wilson）^[25]在一次日晕的观察后发明了云雾舱，直接观察到粒子运动的径迹。从此，云雾舱作为一种用于研究云雾物理特性及大气污染影响的重要设备，在各种科学研究中发挥了重要作用，如德国、法国、英国、意大利、日本均拥有云雾模拟舱。该设备通过控制试验舱内的温度、湿度、风速等参数，模拟不同的大气环境条件，进行云雾物理特性的研究^[26]。

“生物圈2号”（图2）是美国一个旨在模拟地球生物圈的工程，是全球最大的半人工生态设施。该工程位于美国亚利桑那州，拥有完备的生物圈，包括森林、沙漠、海洋等自然生态系统，以及农田、城市等人工生态系统。运用了大量的科学技术，包括仿生学、生态学、农业科学、工程技术等。特别是在环境控制方面，采用了高度自动化的系统，能够精确地调控温度、湿度、光照等环境参数。其目标是通过研究生物圈的运作，以加深人类对于生态系统和人类与自然之间相互作用的理解^[27]。



图2 “生物圈2号”一角
Fig. 2 A view of the Biosphere 2

随着人类空间站试验、登月和火星探索，关于太空领域环境模拟的需求丰富了气候环境模拟的内容。为了配合Apollo探月计划，20世纪60年代美国设计并建造了休斯敦约翰逊航天中心的太空环境模拟实

验室，具备太阳辐射、真空、冷黑环境的太空环境综合模拟能力^[28]。近年来，关于月尘的研究成为热点，1990年，NASA Lewis研究中心启动了月尘附着研究计划（Lunar Particle Adhesion Program）^[29]；2004年，NASA建设了一个月表尘埃环境模拟系统^[30]。关于火星等邻近星球的探索，催生了行星大气的数值模拟研究和相关环境模拟工程^[31]。

在科学环境模拟方面，中国气象局在多地建立了各种环境模拟舱，如上海物资管理处20 m能见度计量系统、新疆气象技术装备保障分中心12 m能见度计量系统、中国气象科学研究院绝热膨胀云雾舱系统等。随着我国太空探索活动的深入，关于空间站、月球和火星的气候环境模拟也在由相关机构建设中^[32-34]。

中国气象科学研究院绝热膨胀云雾舱系统（图3）主要用于人工影响天气作业中的云雾物理研究，通过模拟高空气象条件，提供必要的云雾物理特性的测量与试验环境，进一步推动气象预报和人工影响天气的科学研究。云雾舱系统包括试验舱、制冷系统、真空系统和控制系统。试验舱用于容纳云雾样本，制冷系统用于降低云雾样本的温度，真空系统则用于降低压力。三者共同作用，实现云雾的绝热膨胀。控制系统负责整个试验进程的稳定进行，包括温度、压力等关键参数的预设与控制。测量仪器则用于实时监测和记录试验过程中的各项数据，如云雾粒子的数量、大小及分布等。该系统的成功运行，不仅提高了中国气象局人工影响天气的研究能力，也为我国的气象预报和气候变化研究提供了强有力的支持，为我国在气象科学领域开展国际合作提供了重要平台^[35]。



图3 中国气象科学研究院绝热膨胀云雾舱系统
Fig. 3 The adiabatic expansion fog chamber system of Chinese Academy of Meteorological Sciences

国外气候环境模拟大致可分为三个阶段：第一阶段，20世纪20—50年代的初创阶段，环境模拟技术和设备相对简单，要素单一，模拟技术为仪表电气控

制,有环境主温湿度试验箱、低压试验箱、盐雾试验箱等,设备为有需求的产品生产商自主研制;第二阶段,20世纪50—70年代的发展阶段,随着对产品的环境适应性提出更高要求,以及航空航天和海洋技术的发展,设备制造和环境实验室模拟技术等都得到了显著提升,环境模拟由单一环境模拟到多因素环境模拟,环境模拟在结构设计和电气控制上都得到了长足的发展,自动控制技术是这一阶段的主要特点;第三阶段,20世纪70年代中后期至今为成熟阶段,环境试验设备和环境实验室的运用渗透到各个领域^[36],随着计算机技术的应用,环境模拟从环境因素信号采集到数据处理再到过程控制全面自动化,模拟的环境因素更加多元化,也更加复杂,模拟的精度也相应地大幅提高。

我国环境模拟设备和试验技术随着我国制造业的崛起和对环境模拟的需求得到迅速发展,经历了由单参数模拟到多参数模拟,从静态模拟到动态模拟,从产品试验到人机系统环境试验的发展过程。相比国外比较先进成熟的技术和设施,我国气候环境模拟已经具备了很强的技术实力和产业基础,但在大设施方面的技术差距还比较大^[37]。随着我国制造强国规划对环境模拟的需求加强,相关短板必将迅速填平,而且相关气候环境模拟的场景和技术将会有更多的突破和创新。

2 气候环境模拟要素和技术

2.1 气候环境模拟要素

2.1.1 温度、气压、湿度模拟

气候环境模拟实验室为了实现外界温度模拟,需要有相应的温控设备,即空调系统。在实验室围护结构保温设计良好的条件下,实验室内负荷主要是散热设备,通常包括制冷机、风冷式冷凝器、变风量送风机、除霜用加热器(兼作温度模拟加热器)。送风机由变频器驱动,实现风速可调,以控制进入试验区的冷量,实现变风量温度控制。压力控制需要大气压力发生器,大功率泵源采用真空泵、KNF压力泵;对于湿度控制,可在舱体变压时导入水汽,混合产生需要控制的水汽饱和比。其关键技术在于温度、气压、湿度的耦合及精密调控。

2.1.2 风速模拟

风速模拟也就是风洞模拟,是以人工的方式产生并且控制气流,用来模拟飞行器或实体周围气体的流动情况,对气流与实体的作用效果进行物理观测的一种管道状试验设备。通常采用风机来模拟自然环境风,回风管从回风风机后的静压箱伸出,连接至送风

风机的静压箱,形成闭合回路,它是进行空气动力试验最常用、最有效的工具。大型风洞是研究和发展航空航天领域先进飞行器和交通运输领域高速车辆的关键试验设备。我国大型风洞试验设备与国际同类设备在尺寸、性能上还有差距^[38];对于中小型精密气象测量风洞,气象行业部门有成熟规范的风洞建设和测量技术^[39]。

2.1.3 天气现象模拟

天气现象包括降水、凝结、视程障碍(云雾)、雷电等。降水模拟又称淋雨模拟,指用人工降雨装置模拟不同自然降雨,包括供水系统、支架、喷头、仪表等。其中,降雨喷头是人工模拟降雨装置的核心部分,它是控制雨量大小的主要部件,不同孔径喷头的组合可以获得不同降雨强度和雨滴大小的降雨^[40]。降水模拟还包括降雪模拟,涉及人工造雪系统及降雪控制;雾的模拟通常采用超声振荡技术的超微水雾发生系统;霾的模拟一般采用定制电点火燃烧烟剂产生颗粒物。

2.1.4 太阳辐射模拟

太阳模拟器是一种在地面上模拟太阳光辐照特性的试验与测试设备,提供具有一定光斑有效口径、稳定、均匀的太阳辐射源,可以根据需要设置辐照强度^[41]。从模拟对象来分,太阳辐射模拟分为空间和地面2种。国内太阳模拟器的试验研究主要用于航天领域、光伏发电领域及大气环境模拟方面。

2.1.5 特种要素模拟

特种要素模拟包括特定环境(如酸雨、冻融、空间粒子等)、海洋环境和空间环境等特定参数的模拟。空间环境通常包括高真空环境、冷黑环境、微重力环境、高能带电粒子环境、弱磁场环境、原子氧环境、微流星环境、空间碎片环境、等离子体环境和磁层亚暴环境等^[42]。随着太空探索的进行,一些航天器(空间站)和邻近星体(月球、火星)的模拟,如表面成分、流体环境(行星海洋和大气)要素等也运用实验室环境模拟和数值模式进行模拟研究^[43-44]。

2.2 气候环境模拟技术

2.2.1 气候环境模拟设计

根据用户的实际用途和检测指标需求,进行优化设计。首先是环境参数,包括实验室大小、温度范围和精度控制要求、湿度范围和精度控制要求、是否模拟风力和风速范围、是否模拟降雨降雪及大小、是否模拟沙尘天气及沙尘颗粒大小和沙尘占空气密度、是否模拟太阳辐射及辐射强度等;其次是考虑实验室使用因素,如所测试物品的最大尺寸和数量、测试物品

的进出方式、人员数量和进出方式、送风气流速度、温度均匀性、风速均匀性、是否检测过程产生有害气体或污染物需要排放或检测,照明要求等;最后是建筑场地因素:实验室所在的建筑平面图,是混凝土结构还是钢结构厂房,设备机房所在区域,是否已经有集中冷冻水源、热源等供应,模拟设备可安装场地,电源电压是否满足等。

2.2.2 实验室或气候环境模拟舱体

气候环境模拟舱体是针对不同的应用场景进行空间模拟。结构通常采用密闭式,以保持试验环境的稳定性和真实性,包括试验区、控制区、观测区等,以满足不同的试验需求。制作材料通常采用耐高温、耐腐蚀的材料,例如不锈钢、铝合金等,以确保其在高温、干燥的环境中能够正常工作。通过内部模拟从高空云雾到地面上的降雨、降雪、覆冰等各种气候环境,以及对应的物理特性测量,为气象、环境、工业等领域提供重要的技术支持^[45]。

2.2.3 测试控制系统和监控平台

测试控制系统分为控制系统、测试计量系统、供电保障系统,相关关键技术包括精密的气候环境测量技术和精准的工业调控技术。监控平台将试验舱内的标准器、检测设备、辅助设备以及被检设备等集成起来,在监控平台上通过软件系统集中控制管理,构建环境模拟的数字孪生平台^[46]。

2.2.4 IT技术在气候环境模拟中的深度应用

从气候环境模拟的发展来看,计算机和相应IT技术将会和气候环境模拟深度结合。一方面,复杂的工业控制需要计算机芯片技术的应用;另一方面,很多环境模拟将通过计算机利用数值模式进行描述,如我国地球系统数值模拟装置,就是基于高性能计算机技术构建的大科学设施。

气候环境模拟本质上是对现实物理世界的虚拟,因此未来VR(虚拟现实)和AR(增强现实)计算机技术将会得到更大的应用,它结合传统气候环境模拟应用场景技术,一方面,大大提高了气候环境模拟的效率,降低了建造复杂模拟设施的成本,另一方面,该技术通过提供沉浸式的体验,使人们能够更直观、更深入地了解气候环境模拟对生命及特定物体的环境适应性。

3 总结和展望

实验室气候环境模拟从20世纪出现以来具有越来越重要的科学技术应用价值,在航空航天、汽车交通、建筑、兵器、生物、农业、科学研究等方面应用广泛,如美国麦金利气候实验室、维也纳国际车辆

试验站、日本大和住宅工业公司建造的大型环境模拟室、美国阿波罗飞船环境模拟舱、德意法英云雾模拟舱等。特别是随着人类的太空探索,诸如空间站、月球、火星甚至太空更深处的气候模拟也开始进入气候环境模拟领域,大大丰富了气候环境模拟的场景和内容。气候环境模拟设备和试验技术经历了由单参数模拟到多参数模拟、从静态模拟到动态模拟、从产品试验到人机系统环境试验的发展过程。特别是近年来,为适应太空探索的应用,关于外太空和人类宜居环境模拟和研究成为气候环境模拟的前沿之一,探索环境模拟控制和人类生命支持系统对该领域提出了更高的要求 and 标准^[47-48]。未来气候环境模拟的发展有5个特征。

1) 建造大型环境实验室,发展具有综合试验能力的专用设备,提高精度的控制要求,逐步适应各行业的需要。

2) 逐渐融入先进的控制算法和计算机技术。融入集散式控制系统和现场总线技术,采用先进的控制算法和高速的数据传输方式,提高控制精度和控制智能化。

3) 制定新的标准,建立更加完善的环境规范,指导环境模拟试验技术的发展^[49]。

4) 将虚拟现实和增强现实技术应用于环境模拟试验,构建虚拟和现实相结合的试验环境,为环境试验提供新的方法,大大降低试验的能源浪费,提高试验效率和准确性。

5) 人类对于外太空的环境模拟和生命支持,将加强该领域的科学医学等交叉科学方面的研究。

参考文献

- [1] 张轩. 环境模拟技术[J]. 国际科技交流, 1993(5): 34.
- [2] 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.
- [3] 赵雁纪. 空气制冷与蒸气压缩制冷在气候环境模拟试验中应用的经济性分析[J]. 低温工程, 2000(3): 42-47, 60.
- [4] 科马罗夫, 李森科, 季米里亚捷夫, 等. 季米里亚捷夫选集: 第三卷[M]. 周邦立, 石绍棠, 译. 北京: 科学出版社, 1958.
- [5] 黄维南. 人工气候室的应用和发展[J]. 亚热带植物通讯, 1982(1): 6-21.
- [6] 赵丰, 孙津鸿, 牟连嵩, 等. 汽车环境风洞试验能力综述[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 104-109.
- [7] 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探讨[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 107-113.
- [8] 张燕, 李颖, 奚惠生, 等. 海洋大气环境下高耐候性涂层体系的研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 74-78.
- [9] 姜士勇. 威尔逊云室技术[J]. 物理实验, 1984, 4(2): 54-57.
- [10] 黄本诚, 陈金明. 空间真空环境与真空技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [11] 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.
- [12] Dwayne Bell J, 王艳艳, 陈亮. 麦金利气候实验室的冰冻试验(二)[J]. 装备环境工程, 2005(2): 90-93.
- [13] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

(下转75页)

- Mill H R, 1941. Meteorological memories[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 67(292): 315-326.
- Naylor S, 2019. Thermometer screens and the geographies of uniformity in nineteenth-century meteorology[J]. Notes and Records the Royal Society Journal of the History of Science, 73(2): 203-221.
- Newton H A, 1891. A Memoir of Elias Loomis[M]. Washington: Government Printing Office.
- Part 1 Summary, 1874. Report of the Meteorological Committee of the Royal Society, for the year ending 31st December 1873[R]. London: George E. Eyre and William Spottiswoode.
- Paul G J, 1900. Bartholomew's physical atlas: an atlas of meteorology. Vol. III J. G. Bartholomew, A. J. Herbertson[J]. The Journal of Geology, 8(6): 573-577.
- Rothenberg M, 2009. Cooperation at the Poles? Placing the first international polar year in the context of nineteenth-century scientific exploration and collaboration[M]//Krupnik I, Lang M A, Miller S E. Smithsonian at the Poles: Contributions to International Polar Year Science. Washington: Smithsonian Institution Scholarly Press.
- W E P, 1899. Atlas of meteorology[J]. Nature, 61(1573): 171-173.
- Wedderburn S E, 1948. The Scottish Meteorological Society[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 74(321/322): 233-242.

(作者单位: 陈倩, 山东中医药大学中医文献与文化研究院; 李蓓蓓, 南京信息工程大学科技史与气象文明研究院)

(编辑: 卢冰)

(上接52页)

- [14] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1-4.
- [15] ONERA. About ONERA: Identity[EB/OL]. [2024-02-25]. <https://www.onera.fr/en/identity>.
- [16] 中国科学院. 环境模拟实验室[EB/OL]. [2024-02-25]. <http://www.nssc.cas.cn/cd/zcbm-1/hms/>.
- [17] 毛红梅, 周晓峰, 毛云岭. 维也纳RTA气候实验室考察报告[J]. 国外铁道车辆, 2009, 46(5): 1-4.
- [18] Ali A H H. Performance assessment and gained operational experiences of a residential scale solar thermal driven adsorption cooling system installed in hot arid area[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 271-279.
- [19] Bishara N, Schulz T, Gecks J, et al. Thermal optimization and performance analysis of an innovative wooden radiant heating system made for room temperature control - Laboratory and numerical investigation of prototypes[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 569-578.
- [20] 徐科峰. 建筑环境学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [21] Georgescu M R, Meslem A, Nastase I, et al. Numerical and experimental study of the international space station crew quarters ventilation[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41: 102714.
- [22] Lamnatou C, Baig H, Chemisana D, et al. Dielectric-based 3D building-integrated concentrating photovoltaic modules: an environmental life-cycle assessment[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 514-525.
- [23] 谭宏新. 地空导弹装备环境适应性探究[J]. 军民两用技术与产品, 2017(2): 206.
- [24] 秦晓洲, 常文君. 自然环境试验与武器装备发展[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 7-10.
- [25] 尹德利. 威尔逊云室的发明及对物理学的贡献[J]. 物理通报, 2014(10): 115-117.
- [26] 张纪淮. 中型云室技术特点概要[J]. 应用气象学报, 1986, 1(2): 221-224.
- [27] 郭双生, 孙金鏢. 美国生物圈2号及其研究[J]. 中国航天, 1996(4): 29-32, 35.
- [28] Perko H. Effects of surface cleanliness on lunar regolith mechanics[C]//34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1996.
- [29] Gan H, Wang S J, Li X Y. Electrostatic transportation of lunar dust: a review[J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, 33(2): 135-142.
- [30] Castillo-Rogez J C, Durham W B, Heggy E, et al. Laboratory studies in support of planetary geophysics[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2012: 79-24.
- [31] Prasad K D, Murty S V S. Development of a chamber to simulate lunar surface environment[J]. Planetary and Space Science, 2020, 191: 105038.
- [32] 赵晨雨. 大型环境实验室结构设计关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [33] 石晓波, 李运泽, 黄勇, 等. 月球表面环境综合模拟系统的设想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(11): 48-52.
- [34] 顾苗. 火星表面环境模拟技术[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 35-42.
- [35] 苏正军, 郭学良, 诸葛杰, 等. 云雾物理膨胀云室研制及参数测试[J]. 应用气象学报, 2019, 30(6): 722-730.
- [36] Fisher T C, Mamer W J. The use of environmental test facilities for purposes beyond their original design[C]//21th Space Simulation Conference. Maryland, USA: Jet Propulsion Laboratory, 2000.
- [37] 王铁进, 朱孝业. “大型风洞研制及其关键技术研究”专刊简介[J]. 实验流体力学, 2022, 36(1): 1-2.
- [38] 陈振华, 刘宗政, 陈吉明, 等. 大型连续式跨声速风洞总体方案与关键技术研究[J]. 实验流体力学, 2022, 36(1): 62-68.
- [39] 中国人民解放军总装备部. 低速风洞和高速风洞流场品质要求 (GJB 1179A—2012)[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012.
- [40] 安徽工业经济职业技术学院. 一种实验用降水模拟装置: 208366997U[P]. 2019-01-11.
- [41] 魏秀东, 李柏霖, 赵宇航, 等. 基于自由曲面的聚焦型太阳模拟器设计[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(6): 1356-1364.
- [42] 张鑫. 整车全负荷复合环境模拟超大型试验舱体关键技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [43] Durga Prasad K. Thermophysical Behavior of the Lunar Surface[M]//Cudnik B. Encyclopedia of Lunar Science. Cham: Springer, 2020.
- [44] Grün E, Kochan H, Seidensticker K J. Laboratory simulation, a tool for comet research[J]. Geophysical Research Letters, 1991, 18(2): 245-248.
- [45] 蒋建军, 项湜伍. 智能控制的模拟自然环境研究[J]. 微计算机信息, 2006, 22(25): 135-137.
- [46] 朱旭东, 李卓群, 薛文初. 基于数字孪生的新能源智能温室控制系统设计[J]. 电子制作, 2023, 31(22): 55-59.
- [47] Owens A C, De Weck O L. How much testing is needed to manage supportability risks for beyond-LEO missions?[C]//49th International Conference on Environmental Systems (ICES 2019). Boston: International Conference on Environmental Systems (ICES), 2019.
- [48] Broyan Jr J L, Shaw L, McKinley M, et al. NASA environmental control and life support technology development for exploration: 2020 to 2021 overview[EB/OL]. (2021-07-15) [2024-02-25]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210010866>.
- [49] 孙威, 张磊, 肖京华, 等. 空间环境模拟设备标准体系建设研究[J]. 航天标准化, 2013(4): 10-13.

(编辑: 卢冰)