

低压超重复合环境实验平台的设计与验证

张 凯¹, 尚世龙², 任 逸¹, 李富柱¹, 肖艳华², 王健全², 祝 郁², 马红磊^{2*}

¹江苏大学机械学院, 江苏 镇江

²中国航天员科研训练中心, 北京

收稿日期: 2024年8月12日; 录用日期: 2024年10月9日; 发布日期: 2024年12月13日

摘 要

针对航空航天环境医学多因素耦合研究欠缺、复合环境模拟实验设备缺乏等问题, 本文基于模块化设计思想, 研制了低压舱, 并与已有的超重平台耦合, 搭建了低压超重复合实验平台。通过理论分析、仿真建模等方法, 对该低压舱的硬件、软件进行了设计与选型, 并对耦合低压舱的低压超重复合实验平台进行了测试。结果表明: 在低压舱体积为 0.09 m^3 、重量小于 20 kg 的约束条件下, 低压舱的结构安全系数为 1.2 ; 实验平台运行平稳, 稳定性不受超重过载影响, 仅受设定的压力值的轻微影响, 且在各个工况下压力的波动范围和相对误差有限。

关键词

低压, 超重, 复合环境, 模拟, 实验平台

Design and Validation of a Low-Pressure and Overload Integrated Environment Simulation Platform

Kai Zhang¹, Shilong Shang², Yi Ren¹, Fuzhu Li¹, Yanhua Xiao², Jianquan Wang², Yu Zhu², Honglei Ma^{2*}

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

²China Astronaut Research and Training Center, Beijing

Received: Aug. 12th, 2024; accepted: Oct. 9th, 2024; published: Dec. 13th, 2024

Abstract

This paper addresses the issues of insufficient multi-factor coupling research in space environmental

*通讯作者。

文章引用: 张凯, 尚世龙, 任逸, 李富柱, 肖艳华, 王健全, 祝郁, 马红磊. 低压超重复合环境实验平台的设计与验证[J]. 仪器与设备, 2024, 12(4): 535-545. DOI: 10.12677/iae.2024.124070

medicine and the lack of integrated environmental simulation equipment. Based on modular design principle, a low-pressure chamber was developed and integrated with an existing overload simulated platform to establish a low-pressure and overload integrated environment simulation platform. By theoretical analysis and simulation modeling, the hardware and software of the low-pressure chamber were designed and selected, and the performances of the low-pressure and overload integrated environment simulation platform were tested. The results show that under the constraints of the low-pressure chamber with a volume of 0.09 m^3 and a weight of less than 20 kg, the structural safety factor of the chamber is 1.2. And its stability was unaffected by overload conditions and just influenced by the given pressure values slightly, and the fluctuation ranges and relative errors of pressure were limited.

Keywords

Low-Pressure, Overload, Integrated Environment, Simulation, Experimental Platform

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着载人航天活动的日益频繁, 为了保障航天员在加速度、低气压、高辐射等极端太空物理环境中长期执行任务时的身体健康, 需要对航天环境的生理影响进行模拟实验。相关的实验设备不仅能够为航天医学提供可靠的数据和研究结果, 还为航天员的生命保障、心理素质评估以及航天新技术的研发奠定了重要基础和关键支撑[1]-[3]。但复杂环境、多工况综合因素对生理的影响机制尚不明确, 理论体系尚不完善, 其复合环境模拟设备不足。因此, 要深入开展复杂太空环境的航天医学研究, 进一步寻求和优化航天员的安全防护方法, 就必须首先研发模拟航天复合环境的实验设备[4]。

目前模拟航天环境的实验设备主要包括: 持续加速度作用的超重离心机[5]、冲击过载对人体耐力及其防护的冲击塔[6]、弹射过载生理反应的弹射塔[7]、前庭反应的转椅和慢转房[8]、振动对人体效应及耐力限度的振动台[9]、模拟高空的低压舱[10]、模拟太空出舱执行任务的中性浮力池[11]等实验设备及系统。其中, 超重离心机和低压舱作为航空医学研究中最为常用的设备, 正朝着多功能、高精度、智能化的方向发展[12]。这些设备所模拟的超重、低压环境, 要求具备控制持续时间和变化模式等功能, 以便准确复现预期的加速度和压力变化, 并与生理监测技术和虚拟现实技术相结合, 可开展超重、低压环境下的生理反应变化研究并复现逼真的训练环境。尽管目前在航天医学中, 超重和低压环境的地面模拟设备越来越先进和可靠, 但大多数研发的设备仍然主要针对单一因素进行模拟。联盟 11 号返回时航天员身体的损伤[13], 航天员在执行航天任务时面临的不是单一因素的航天环境, 而是复合航天环境和多因素的影响。然而, 目前在复合环境模拟设备的研发以及多因素航天环境对生理影响机制的研究方面仍存在不足, 这已制约了航天医学理论的发展[14]。鉴于支撑复合太空环境研究的设备研发周期长和成本高的问题, 本文以原有设备为基础, 研发了低成本、高可靠的低压超重复合环境模拟设备, 为研究低压超重复合环境对生理影响机制提供了实验条件, 并为丰富载人航天复杂环境航天医学新理论和新数据, 提供有利支撑和技术储备。

低压超重复合环境是航天医学中十分常见的环境, 为研究该环境下生理反应影响机制, 本文依托现有的动物数控交变离心机[15], 在重量和气流动平衡的要求下, 采用理论分析、数值模拟及实验检测等方

法,设计具有轻量化、双层密封式的压力可控高强度铝合金低压舱。进而基于模块化设计思想及动物数控离心机结构和性能,研发低压超重复合环境模拟设备,并对设备的性能进行实验测试,实现低压超重复合环境的再现。

2. 低压超重复合环境平台结构与低压舱设计

2.1. 总体设计

低压超重复合环境模拟旨在同时实现超重与低压两种航天环境,以研究低压超重复合环境对生理机能的影响。为此,需搭建低压超重复合环境实验平台,其主要指标应包括:舱内气压调控范围 101.3~55 kPa、过载加速度调控范围 1~15 G,并可按模拟需求设定低压与超重的变化曲线进行数字化调控,较为真实的模拟航天飞船在应急返回任务中所处的复合环境。鉴于已有的动物数控交变离心机和模块化设计思路,低压超重复合实验平台的总体结构示意图,如图 1 所示。

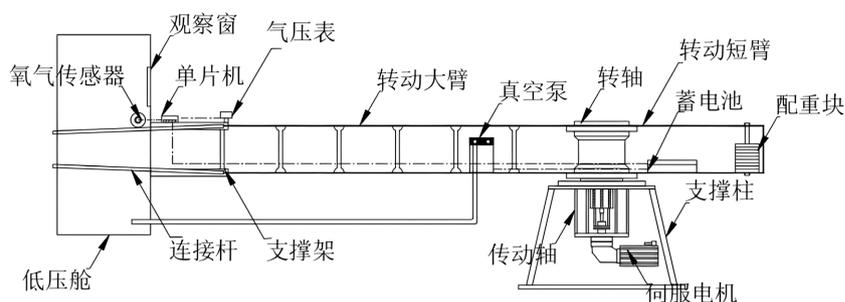


Figure 1. Schematic diagram of the low-pressure and overload integrated environment simulation platform
图 1. 低压超重复合环境实验平台结构示意图

2.2. 低压舱设计

低压舱是低压超重复合实验平台的关键部分,而低压舱在满足低压调控的基础上,其出气量与进气量需保持动态平衡关系。因此,设低压舱内气体质量为 m , 时间为 t , 进入、流出舱内的质量分别为 \dot{m}_{in} 、 \dot{m}_{out} , 那么, 低压舱内气体质量的平衡方程为:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (1)$$

假设低压舱内的气体为理想气体, 根据理想气体状态方程 $PV = nRT$ 及气体质量 $m = nM$, 其中, P 是压力、 V 是体积、 n 是物质的量、 R 是理想气体常数、 T 是温度、 M 为气体摩尔质量, 则有:

$$V \frac{d(P)}{dt} + P \frac{dV}{dt} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) RT \quad (2)$$

因低压舱体积不变, 则方程(2)简化为:

$$V \frac{d(P)}{dt} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) RT \quad (3)$$

考虑到低压舱与数控动物离心机的安装和后期实验, 低压舱设计为方形, 且受重量小于 20 kg、容纳 10 kg 动物后的有效体积 0.09 m³ 约束, 则在大气压 P_{atm} 和舱内压 P_{cab} 压差 ΔP 作用下, 低压舱最大弯曲应力为:

$$\delta_{max} = \frac{3\Delta Pa^2}{8t^2} \quad (4)$$

其中, δ_{\max} 是最大弯曲应力, ΔP 是压力差, a 是方形舱体的边长, t 是壁板厚度。

为了构建低压舱的总体框架,采用 6061 高强度铝合金作为材料,使用高强度铆接及密封胶进行密封。此外,在框架上开设了一个 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、厚度为 12 mm 的亚克力材质观察窗口。考虑到低压舱舱壁的强度,经过计算确定内壁厚度为 3 mm ,并设置了加强筋。采用 Ansys 进行建模,并对其进行结构强度有限元分析,得到的应力云图如图 2 所示。

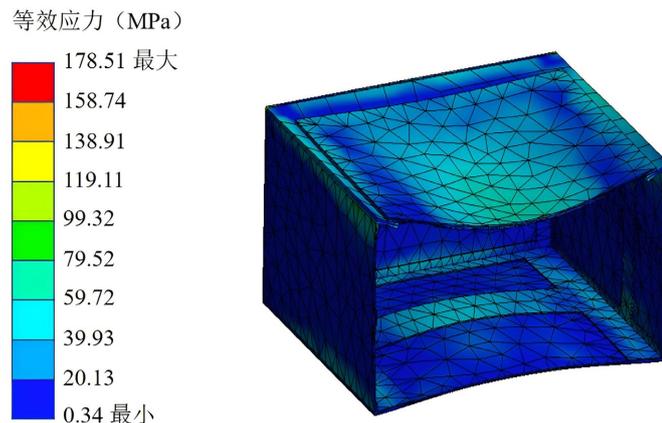


Figure 2. Equivalent stress distribution of the low-pressure chamber
图 2. 低压舱等效应力云图

由图 2 可知,低压舱壁面的最大等效应力 178.5 MPa 小于高强度铝合金的屈服强度 215 MPa ,安全系数为 1.2 ,可保证其安全性。

沿低压舱横向、纵向的形变和应力、应变变化,如图 3 所示。

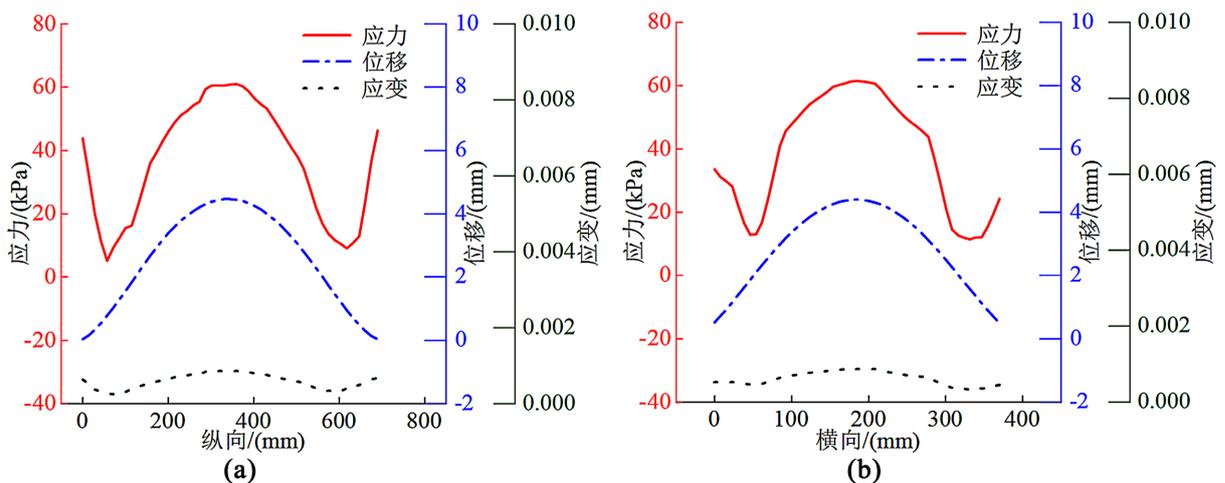


Figure 3. Transverse and longitudinal deformation, stress, and strain patterns of the low-pressure chamber. (a) transverse deformation, stress, and strain variations; (b) longitudinal deformation, stress, and strain variations

图 3. 低压舱沿其横向、纵向的形变、应力及应变变化规律。(a) 横向形变、应力及应变变化; (b) 纵向形变、应力及应变变化

由图 3 可知,所设计的低压舱的形变和应力、应变变化规律,总体上呈现对称情况,且低压舱壁面的中心处的变形最大可达 4.5 mm ,变形量较大。本设计在进一步优化低压舱整体结构上,低压舱中心采用厚加强筋、两边采用薄加强筋的方法,在低压舱重量、体积约束下,确保了低压舱的安全性。

3. 控制系统设计

3.1. 总体控制方案

为精确控制压力和超重等参数,确保实验准确性和安全性,控制系统主要包括可编程逻辑控制器(PLC)或工业控制计算机(IPC)作为核心控制器,实时检测各项参数的传感器和视觉检测器,以及触摸屏操作屏和数据处理、显示的计算机等。另外,低压超重复合实验平台是由低压舱和超重实验台两部分组成,其控制系统图,如图4所示。

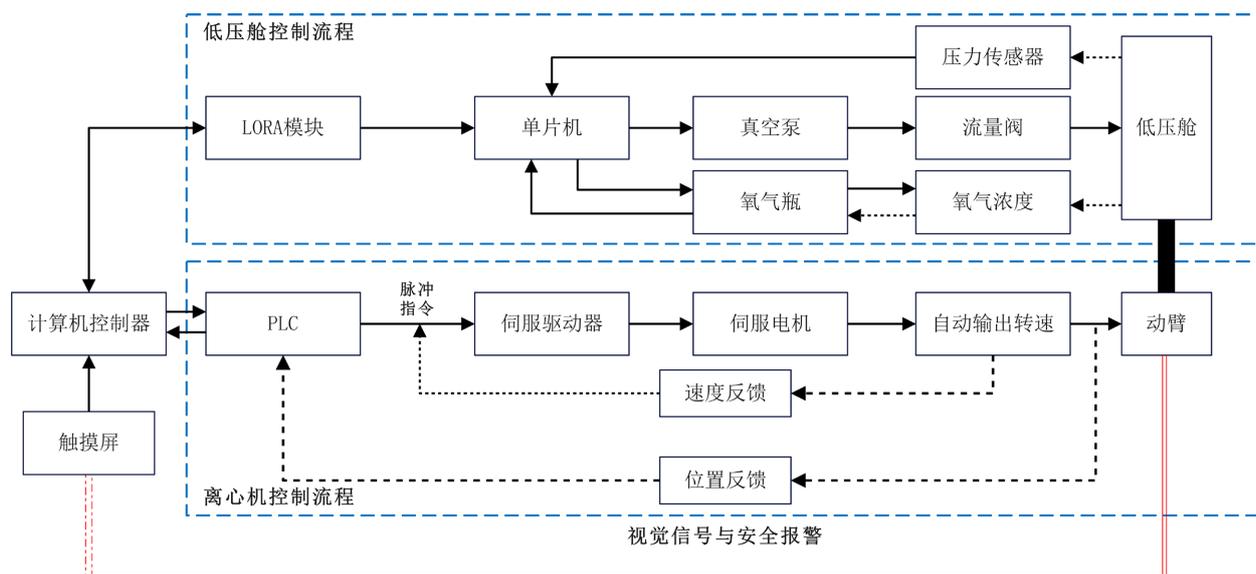


Figure 4. Control system of the low-pressure and overload integrated environment simulation platform

图4. 低压超重复合环境实验平台控制系统图

其中,低压超重复合环境实验平台的数控交变离心机控制系统,采用转速传感器实时监测离心机的实际转速,将实际转速与设定转速进行比较,通过模糊神经网络的PID控制算法对转速的精确控制,并保证加、减速速率的平稳性并基于离心机运行过程中的过载保护、紧急停止、安全连锁等监控、报警控制。安装在离心机上的低压舱,在合理调控抽气泵速率、流量阀的开度情况下,使用实时检测压力值与目标压力值,将压力误差作为反馈信号的闭环控制方法,兼顾低压舱内目标浓度,实时控制低压舱内氧气瓶的释放量,并在保证离心机大臂承载及设备安全运行的条件下,使用了远程监控和故障监测、报警。

3.2. 硬件选型

低压超重复合环境实验平台属于新型设备,实验的稳定性、准确性要求较高,所选电控系统硬件必须具备高可靠性、稳定性和准确性的原则。考虑到该实验平台的重复性和后期可扩展性,所有选择的电控系统各硬件具有良好的兼容性,同时备有足够的输入输出端口和通信接口。其中,选择的低压舱控制系统硬件如表1所示。

3.3. 主要电路设计

为最大限度减少电磁干扰、降低接电缆引起的信号反射,确保实现高数据速率与无差错数据传输,本系统采用了半双工收发器Max3485芯片。该芯片的选择符合工业标准,能够有效提高通信可靠性,适用于复杂的自动化控制环境。具体方案如图5所示。

低压舱通讯及参数设置的程序流程为图 7(a)所示,其上单片机模块与计算机端的交互是通过 Mthings 软件实现,设定了三种工作控制模式,自开始计时到结束,用于 PID 控制的目标压力值持续。图 7(b)为气压调节流程图,采集 4~20 mA 的模拟信号的压力传感器,在单片机内进行数据处理,随后进行低通滤波,进而调控真空泵的抽气量。

4. 低压超重复合实验平台

搭建的低压超重复合环境实验平台实物如图 8 所示。



Figure 8. Photo of the low-pressure and overload integrated environment simulation platform

图 8. 低压超重复合环境实验平台照片

其中,低压舱、观察窗、气压表、真空泵、连接杆、支撑架、蓄电池、压力传感器及氧气传感器等构成了低压舱硬件结构,转动大臂、平衡臂、配重块等构成了数控动物离心机旋转部分,而转动轴、伺服电机、支撑柱、转轴等组成了数控动物离心机支撑及传动部分。

本设计的低压舱是针对成年猕猴进行航天复合环境的实验,其中座椅的结构及其猕猴固定方式如图 9 所示。该低压舱座椅可针对不同实验动物进行改造扩展,以满足多样化需求。

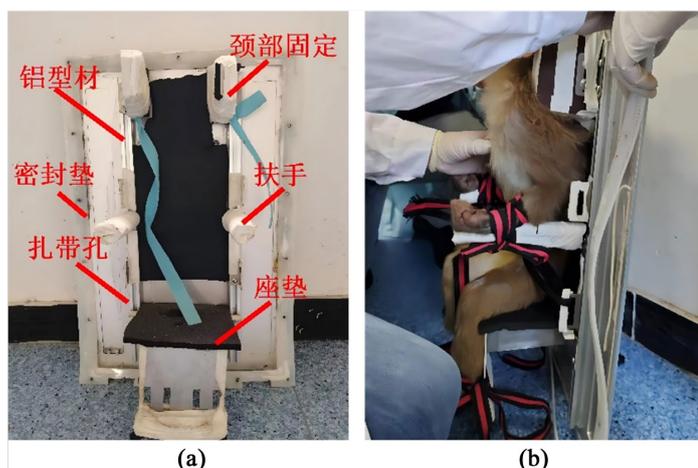


Figure 9. Seat for fixed macaque in the low-pressure chamber. (a) Seat structure of the low-pressure chamber; (b) Fixed mode of macaque

图 9. 低压舱内用于固定猕猴的座椅。(a) 低压舱座椅结构; (b) 猕猴固定方式

5. 实验平台测试

为验证低压超重实验装置是否满足航天复合环境实验条件及其运行的稳定性,在对单一低压实验及低压超重复合实验进行测试。

5.1. 单一低压实验测试

为模拟真实的应急返回低压环境,计划设定降压和复压时间为 360 s,模拟 85 kPa、70 kPa 和 55 kPa 三种低压环境。每种低压环境将进行三次重复试验,以测试低压舱工作效果,结果见表 2。

Table 2. Precision test of the single low-pressure condition

表 2. 单一低压工况精度测试

压力 设定值/kPa	降压时间 设定值/s	复压时间 设定值/s	实验号	降压时间 实际值/s	复压时间 实际值/s	稳定后均值 /kPa	气压均值相对 误差/%
85	360	360	1	347	373	84.65	-0.4
			2	346	373	84.60	-0.5
			3	362	370	84.68	-0.4
70	360	360	4	342	390	70.07	0.1
			5	378	398	70.05	0.1
			6	356	398	70.13	0.2
55	360	360	7	366	364	55.21	0.4
			8	360	334	55.54	0.1
			9	342	385	55.52	0.2

降压时间的实际值与设定值的最大误差为 18 s,复压时间的实际值与设定值之间最大误差为 38 s,存在压力滞后的情况,这主要是因为辅助泄压滞后于压降导致。但降压稳定后的均值与设定值之间相对误差,均低于 0.5%,这完全满足低压环境的模拟要求。其中,抽气泵气动初期的气体排量波动较大,即真空泵气动时工作曲线斜率大,因此,降压幅度越小,误差越大。

5.2. 低压超重复合实验测试

为验证超重负载下低压舱工作的稳定性、准确性及可靠性,模拟 85 kPa、70 kPa、55 kPa 压力分别与 5 G、7.5 G 及 10 G 的超重复合环境模拟实验为研究对象,获得的实验压力值结果如图 10 所示。

模拟环境实验结果表明,所有实验成功实现了在不同工况下的负压超重复合环境模拟,且设备运行稳定。在相同的压力设定值下,尽管超重过载工况不同,实际压力曲线的线型和波动幅度没有明显变化,这表明在本复合实验台进行环境模拟时,气压值的稳定性不受超重过载的影响。在不同的压力设定值下,实际压力曲线的波动幅度发生变化,变化情况与单一低压实验测试相似,进一步说明了气压值的稳定性不受超重过载影响,仅受气压设定值的轻微影响。

6. 结论

针对当前航天医学复合因素对生理机能的影响研究较少的问题,为开展相关实验研发了低压超重复合实验平台,以模拟低压超重复合的航天环境,为深入开展复杂环境、多重因素的航天医学研究奠定基础。本文依托已有的数控交变动物离心机,并考虑各种约束条件,进行了超重低压实验平台设计,主要

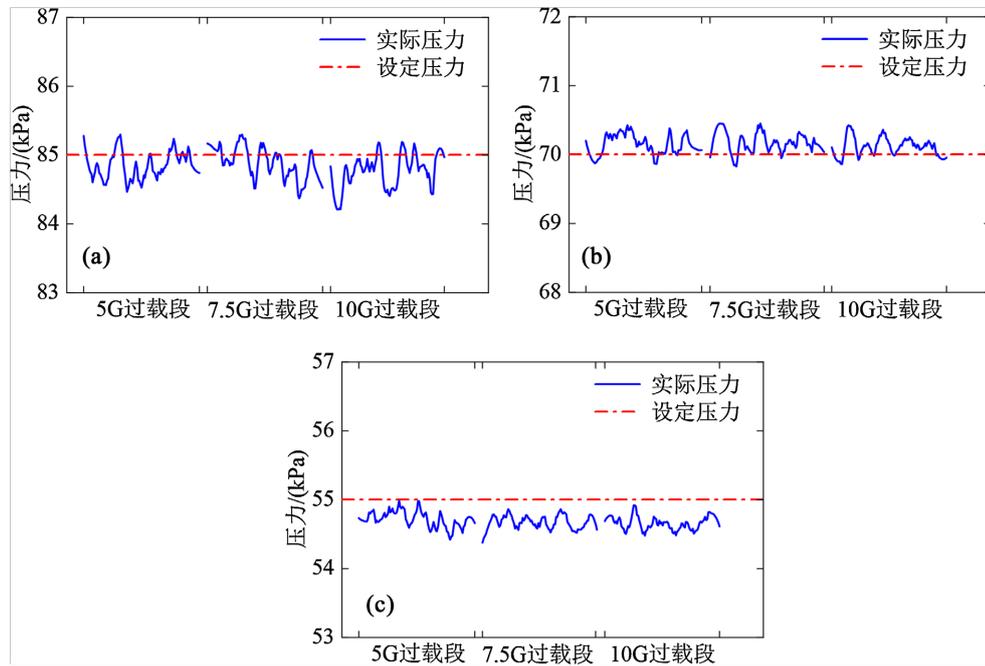


Figure 10. Test of low-pressure and overload integrated environment simulation. (a) Low-pressure of 85 kPa and overload integrated test; (b) Low-pressure of 70 kPa and overload integrated test; (c) Low-pressure of 50 kPa and overload integrated test

图 10. 低压超重复合环境模拟实验。(a) 85 kPa 时超重复合实验；(b) 70 kPa 时超重复合实验；(c) 50 kPa 时超重复合实验

结论如下：

1) 为深入研究复合航天环境对生理机能的影响，基于模块化设计思路，创新性地提出低压舱与离心机协同作用的低压超重复合环境模拟实验系统。

2) 低压超重复合实验平台的低压舱在体积为 0.09 m^3 、重量小于 20 kg 的约束下，在低压力 45 kPa 时，安全系数为 1.2，结构可靠。

3) 单一低压实验测试、低压超重复合实验测试均表明设备稳定性不受超重过载影响，仅受压力设定值的轻微影响，且在各个工况下气压波动范围和相对误差有限。

基金项目

自主科研基金项目(HQKY2201)。

参考文献

- [1] 羽佳, 夜空君, 卡壳吐司. 中国载人航天: 扬帆起航, 逐梦星辰大海[J]. 新世纪智能, 2024(42): 36-41.
- [2] Newman, D.G. (2021) Factors Contributing to Accidents during Aerobatic Flight Operations. *Aerospace Medicine and Human Performance*, **92**, 612-618. <https://doi.org/10.3357/amhp.5810.2021>
- [3] 何宇, 杨宏, 白明生. 空间实验室技术综述及发展战略[J]. 载人航天, 2009, 15(3): 10-18.
- [4] 唐帅. 人体复合训练设备结构优化及控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [5] Smith, B.J.H. and Usherwood, J.R. (2019) An Instrumented Centrifuge for Studying Mouse Locomotion and Behaviour under Hypergravity. *Biology Open*, **8**, bio043018. <https://doi.org/10.1242/bio.043018>
- [6] 董睿, 冯雪梅, 王珏, 等. 水刹车冲击塔结构及原理分析[J]. 强度与环境, 2015, 42(2): 38-44.
- [7] 宋润滋, 索双富, 刘跃, 等. 飞行员头颈部防护装置展开性能实验研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(6): 960-965.

-
- [8] Melek, W.W., Lu, Z.R., Kapps, A. and Cheung, B. (2002) Modeling of Dynamic Cardiovascular Responses during G-Transition-Induced Orthostatic Stress in Pitch and Roll Rotations. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **49**, 1481-1490. <https://doi.org/10.1109/tbme.2002.803555>
- [9] Zhu, S. and Zhu, L. (2012) Vibration Test Condition for Spacecraft Lift-Off Environment. *Science China Technological Sciences*, **55**, 1954-1959. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4868-8>
- [10] Mašek, J., Brožek, P. and Horák, M. (2017) Thermo-Vacuum Test Chamber Development for Heat Switch Testing in Simulated Martian Conditions. *23rd International Conference Engineering Mechanics*, Svratka, 15-18 May 2017, 622-625.
- [11] Neufeld, M.J. and Charles, J.B. (2017) The Invention and Diffusion of Neutral Buoyancy Training. In: Freeman, M., Ed., *History of Rocketry and Astronautics: Proceedings of the Forty-Ninth History Symposium of the International Academy of Astronautics*, Univelt Inc., 59-71.
- [12] 中国载人航天工程网. 航天技术试验领域: 为未来我国航天技术发展和空间应用提供有力的技术支撑[EB/OL]. 2023-08-19. https://www.cmse.gov.cn/xwzx/202308/t20230819_54184.html, 2024-08-30.
- [13] Barratt, M.R. and Pool, S.L. (2019) *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*. Springer.
- [14] Afshinnekoo, E., Scott, R.T., MacKay, M.J., Pariset, E., Cekanaviciute, E., Barker, R., *et al.* (2020) Fundamental Biological Features of Spaceflight: Advancing the Field to Enable Deep-Space Exploration. *Cell*, **183**, 1162-1184. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.10.050>
- [15] 任逸, 马博涵, 马红磊, 等. 基于离心机的超重旋转复合试验平台设计[J]. *航天器环境工程*, 2023, 40(3): 263-268.