



# 航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——· 中文核心期刊 中国科技核心期刊

## 基于离心机的超重旋转复合试验平台设计

任逸 马博涵 马红磊 肖艳华 尚世龙 王健全 祝郁 李富柱

## Design of a hypergravity and rotation composite test platform based on centrifuge

REN Yi, MA Bohan, MA Honglei, XIAO Yanhua, SHANG Shilong, WANG Jianquan, ZHU Yu, LI Fuzhu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2022129>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### [真空低温环境下红外笼移动装置设计及调试验证](#)

Design and validation of an infrared heating cage translator used in the simulated space cryogenic vacuum environment  
航天器环境工程. 2018, 35(2): 184–189 <https://doi.org/10.12126/see.2018.02.014>

#### [基于准零刚度技术的微重力模拟悬吊装置设计与试验研究](#)

Design and experiment of a suspension device based on quasi-zero-stiffness technology for microgravity simulation  
航天器环境工程. 2017, 34(2): 222–228 <https://doi.org/10.12126/see.2017.02.019>

#### [透明微穿孔吸声板设计与性能实试验证](#)

Structure, material, and process design of transparent micro-perforated sound absorbing panel with validation  
航天器环境工程. 2020, 37(1): 42–46 <https://doi.org/10.12126/see.2020.01.007>

#### [六自由度激励台精密高刚度铰链结构设计与试验应用](#)

Design and application of high-stiffness precision joint in 6-DOF excitation platform  
航天器环境工程. 2018, 35(1): 49–55 <https://doi.org/10.12126/see.2018.01.009>

#### [“嫦娥五号”月球探测器着陆姿态模拟装置设计](#)

Design of a landing attitude simulator for Chang'e-5 spacecraft  
航天器环境工程. 2020, 37(1): 65–72 <https://doi.org/10.12126/see.2020.01.011>

#### [航空航天用CQFP封装复杂集成电路振动夹具优化设计](#)

Optimized design of vibration fixture for CQFP packaged complex integrated circuit used in aerospace  
航天器环境工程. 2021, 38(6): 662–669 <https://doi.org/10.12126/see.2021.06.008>

# 基于离心机的超重旋转复合试验平台设计

任逸<sup>1</sup>, 马博涵<sup>2</sup>, 马红磊<sup>3</sup>, 肖艳华<sup>3</sup>, 尚世龙<sup>3</sup>, 王健全<sup>3</sup>, 祝郁<sup>3</sup>, 李富柱<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 机械学院, 镇江 212013; 2. 北京市八一学校, 北京 100080;

3. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

**摘要:** 为研发满足航空航天医学等研究要求的超重旋转复合运动模拟系统, 基于离心机的转臂式结构, 采用框架式的自转座椅替代传统的固定座椅, 并引入链传动作为自转驱动; 搭建 PC+可编程逻辑控制器 (PLC)+伺服电机+编码器的离心机控制系统, 以及 IPC+驱动器+步进电机的自转座椅控制系统; 在控制系统软件设计方面注重离心机实时运行监测及便携式自转座椅的稳定性控制。对所研发的超重旋转复合试验平台开展超重、旋转及超重旋转复合 3 种模拟工况的精度测试试验, 结果表明, 平台能够实现超重、旋转及超重旋转复合等环境模拟, 离心机与自转座椅均具有较高的控制精度, 运行过程安全平稳, 达到了预期要求, 可用于航空航天特因环境下生物体生理响应或设备测试等实验研究。

**关键词:** 航空航天; 模拟平台; 离心机; 结构设计; 控制系统

中图分类号: V414.19

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2023)03-0263-06

DOI: 10.12126/see.2022129

## Design of a hypergravity and rotation composite test platform based on centrifuge

REN Yi<sup>1</sup>, MA Bohan<sup>2</sup>, MA Honglei<sup>3</sup>, XIAO Yanhua<sup>3</sup>, SHANG Shilong<sup>3</sup>,  
WANG Jianquan<sup>3</sup>, ZHU Yu<sup>3</sup>, LI Fuzhu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Beijing Bayi High School, Beijing 100080, China; 3. Astronaut Center of China, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To develop an integrated motion simulation system for aerospace medical research, based on the rotating arm structure of a centrifuge, the frame type self-rotating seat was used to replace the traditional fixed seat, and a chain drive was introduced as the rotation drive. The centrifuge control system with PC, programmable logic controller (PLC), servo motor and encoder, as well as the self-rotating seat control system with IPC, driver and stepper motor was built. In terms of control system software design, attention was paid to the real-time operation monitoring of centrifuge and the stability control of portable self-rotating seat. The precision tests of three simulated environments of hypergravity, rotation and hypergravity rotation composite were carried out to the developed platform. The results show that the platform can achieve simulations of hypergravity, rotation and hypergravity rotation composite. Both the centrifuge and self-rotating seat have high control precision, and the operation process is safe and stable, meeting the expected requirements. The platform can be used for experimental research of biological physiological response or equipment testing in aerospace special environment.

**Keywords:** aerospace; simulation platform; centrifuge; structural design; control system

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2023-06-19

基金项目: 国家载人航天研究基金重点项目 (编号: 020101); 航天医学基础与应用国家重点实验室研究基金项目 (编号: SMFA20K07)

引用格式: 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

REN Y, MA B H, MA H L, et al. Design of a hypergravity and rotation composite test platform based on centrifuge[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(3): 263-268

## 0 引言

随着我国航空事业的迅猛发展,第四代战机列装部队对飞行人员的身体素质和飞行能力提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。机动飞行引起的力学环境改变会对人体的前庭反应和心血管功能产生影响<sup>[2-3]</sup>,如在完成大角度转弯、侧翻、旋转等多种失速机动动作时,常常会诱导空晕病、空间定向障碍及意识丧失等现象<sup>[1,4]</sup>。此外,载人航天器交会对接、应急返回等过程中也涉及复杂的动态载荷。因此,如何有效训练、评价人体前庭功能稳定性及过载耐受能力已成为目前航空航天医学领域的重点研究内容之一。

生物反馈训练可以有效减轻运动病的症状,但对地面模拟试验设备提出较高的要求<sup>[5-6]</sup>。目前针对航空航天环境地面模拟平台的研制已有许多成果,例如载人离心机作为地面模拟超重最有效的装备,可使受试者真切感受到飞行对人体生理、心理的影响,并且能够辅助检查并评估飞行人员的过载耐受能力<sup>[7-8]</sup>;转椅、转床等设备可实现对人体多方位的前庭刺激,用于评定人体前庭功能稳定性及心血管功能<sup>[2,6]</sup>。然而,航空航天任务涉及极为复杂的复合动力学环境,上述设备虽然安全稳定、参数精确可控、重复性强,但通常只能模拟单一的特定运动环境,无法模拟实际飞行过程中复杂运动耦合的情况。因此,亟需研制复合环境模拟试验平台。

超重旋转复合环境作为航空航天过程中常见的力学环境,目前国内外尚无相关的模拟设备或研究。本文基于超重旋转复合力学环境的特点开展试验平台的功能与结构设计,借助转臂式离心机及自转座椅模拟超重、旋转及超重旋转复合环境,重点围绕设备总体结构设计、硬件选型及连接、软件控制等方面展开论述,并开展精度测试验证。

## 1 主要结构与功能设计

转臂式离心机是模拟超重环境最主要的设备形式,可通过臂架旋转产生的离心力模拟超重,且可以调整末端座椅来改变超重加载的方向<sup>[9]</sup>。为设计超重旋转复合试验平台,在离心机的基础之上,采用框架式自转座椅替代传统的固定座椅,并且以链式传动作为座椅旋转的驱动方式,可在减小系统转动惯量的同时提高设备的安全性与稳定性。

超重旋转复合试验平台的总体结构如图1所

示,主要包括底座(含离心电机、减速器、支撑台架及传动结构等)、旋转支架(含转臂、平衡臂及配重块等)、自转座椅(含自转电机、传动链条、连接框架、座椅及蓄电池等)和控制柜(含可编程逻辑控制器 PLC、控制单元及功率单元等)。离心机与自转座椅各自采用单独的控制系統,离心机旋转支架由伺服电机驱动,自转座椅由步进电机通过链式传动来驱动,以确保在超重旋转过程中二者走线互不影响。

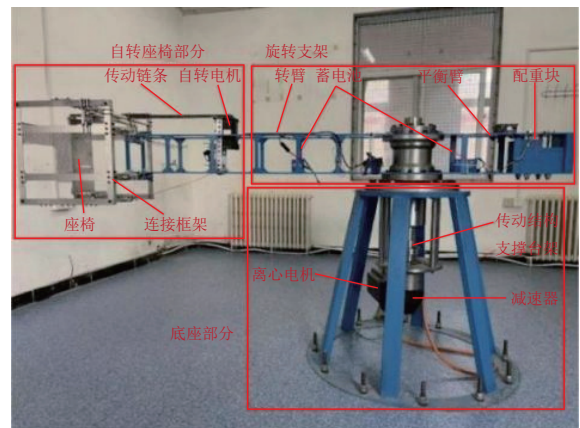


图1 超重旋转复合试验平台样机

Fig. 1 Prototype of the integrated hypergravity rotation test platform

结构及质量问题是航天产品研制过程中需要考量的重要因素<sup>[10]</sup>。图2为自转座椅结构,其框架采用3003铝合金材料,可在保证足够强度的同时减小设备整体质量;座椅的链式传动机构采用06B单排链轮及06B链条的组合,并在链条啮合处增加滑轮式防脱装置,机构的传动比为1:2。

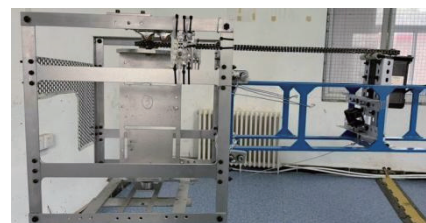


图2 自转座椅结构

Fig. 2 Structure of the self-rotating seat

本文所设计的超重旋转复合试验平台主要用于中小型动物及设备等的超重、旋转及超重旋转复合模拟试验,以检测不同空间环境下生物/设备的生理/工作状态。试验平台的主要技术指标为:离心机转臂半径1.8 m,最大转速100 r/min,加速时间不少于10 s,最大模拟过载20g(控制精度 $\pm 0.05g$ );自转座椅最大转速100 r/min,最大承重约12 kg。

## 2 控制系统设计

### 2.1 总体设计

为避免离心过程中臂架旋转对自转座椅的控制系统走线产生影响,对离心机与自转座椅采用单独的控制系統来驱动。离心机控制系统采用 PC+PLC+伺服电机+编码器的总体方案,系统框图如图 3 所示。该方案具有较强的灵活性与可扩展性,可确保紧凑设计下的高性能。其中,PC 负责人机交互,与 PLC 直接通信;PLC 借助 PID 控制器技

术对象和工程组态 SIMATIC STEP 7 Basic 中提供的支持编辑器进行控制回路组态;伺服电机采用位置控制模式的三闭环负反馈 PID 调节系统,反馈控制原理如图 4 所示。

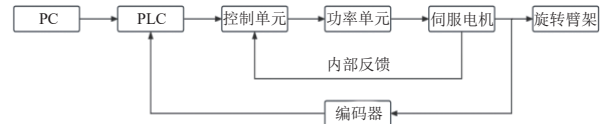


图 3 离心机控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of centrifuge control system

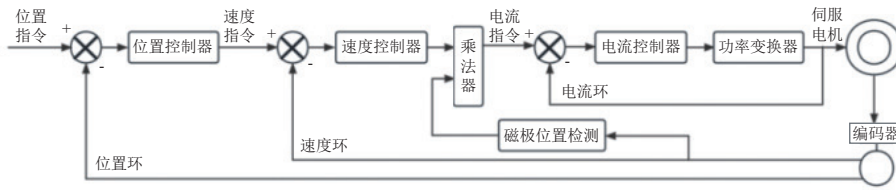


图 4 离心机控制系统伺服电机的反馈控制原理

Fig. 4 Feedback control principle of servo motor in centrifuge control system

自转座椅控制系统采用 IPC+驱动器+步进电机的总体方案,结构简单、控制可靠,整体走线沿臂架分布,能确保不受离心旋转的影响。IPC 与驱动器依靠 24 V 蓄电池供电,步进电机采用两相 86 型步进电机,由 IPC 直接发送脉冲信号控制。

### 2.2 硬件设计选型

离心机控制系统硬件参数如表 1 所示。伺服电机自带 AS24DQI 编码器以及滑键和抱闸;控制单元控制单轴驱动,带有 PROFINET 和 TTL/HTL 编码器的检测电路,承担与功率单元的通信、开/闭环控制以及与 PLC 的通信,并通过 FM-IF 接口与功率单元相连;功率单元为标准规格带集成进线滤波器;外接编码器集电极开路输出(PNP),与电机内置编码器协同构成三闭环负反馈 PID 控制;操作面板 BOP20 可设定参数、读取诊断信息(如报警和故障消息)并且确认故障;CF 卡固件版本为 V4.8。

自转座椅控制系统各硬件参数如表 2 所示。

表 1 离心机控制系统硬件参数

Table 1 Hardware parameters of the centrifuge control system

硬件名称	型号	参数名称	具体参数
PLC	SIMATIC S7-1200	模块	CPU 1215C
		板载数字量	16输入/10输出
		板载模拟量	2输入/2输出
		额定电压	24V DC或 120/230V AC

表 1 (续)

硬件名称	型号	参数名称	具体参数
伺服电机	SIMATIC 1FK7105-2AF71-1BB0	额定转速	3000 r/min
		额定功率	8.2 kW
		额定转矩	26 N·m
		额定电流	18 A
控制单元	CU310-2 PN	额定电压	24 V DC
		开关量	4
		可编程输入/输出量	4/4
编码器	E6B2-CWZ5B	电源电压	12~24 V DC
		分辨率	500 P/R
		输出相	A、B、Z
功率单元	PM240-2	额定功率	15 kW
		负载电流功率	11 kW

表 2 自转座椅控制系统硬件参数

Table 2 Hardware parameters of the self-rotating seat control system

硬件名称	型号	参数名称	具体参数
IPC	MC-20MR-6MT	总点数	26
		NPN输入	12路
		继电器输出	8路
		晶体管输出	6路
		供电电压/电流	24 V DC/3 A
步进电机	8618HB6402	额定电流	6 A
		步距角度	1.8°
		电机电压	24~80 V
		保持转矩	12 N·m
		相数	两相
驱动器	DMA860H	驱动电流	2.4~7.2 A
		驱动电压	24~110 V DC或 18~55 V AC
		脉冲电压	5~24 V
		脉冲细分	400~256 00

### 2.3 控制系统原理

离心机控制电路如图5所示,采用三相四线制, U、V、W为相线, N为零线。所用的信号连接线均为双绞线, 以避免信号间的相互干扰。电气柜中所有电气组件接地端子都使用12平黄绿线连接在接地母排PE上。信号线接地柱与强电接地柱间距4 m以上, 以抑制强电信号对弱电信号的干扰。

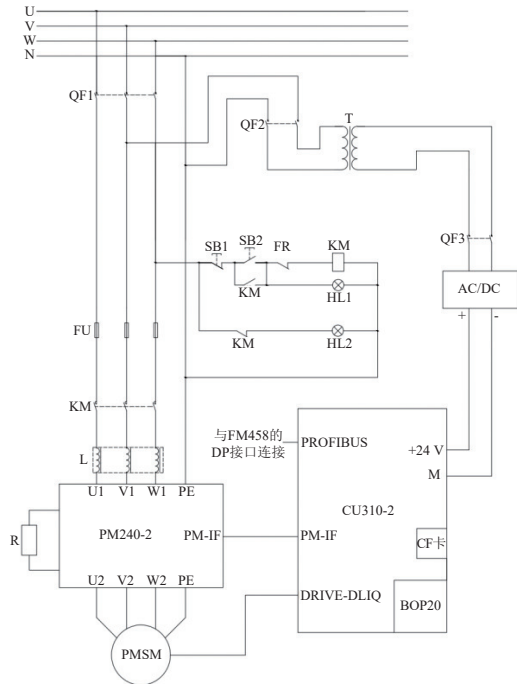


图5 离心机控制电路

Fig. 5 The centrifuge control circuit

自转座椅控制系统中, 采用24 V直流输出蓄电池给IPC与电机驱动器供电, 如图6所示。步进电机与驱动器组成开环控制系统, 通过脉冲输入直接控制电机动作, 控制可靠, 动态响应迅速。

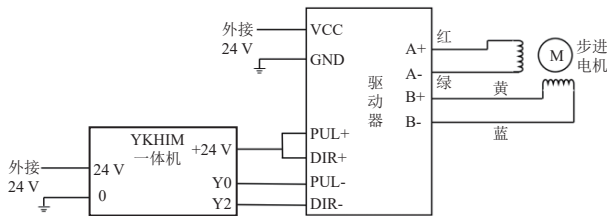


图6 自转座椅控制系统接线示意

Fig. 6 Wiring diagram of the self-rotating seat control system

### 3 软件控制

人机交互系统与PLC基于变量形式搭建人机界面(HMI)与控制过程之间的通信, I/O模块则是PLC与控制过程交流的桥梁。HMI利用变量读取或写入PLC的控制数据, 在PC上进行控制界面的

组态, 包括变量设置以及与PLC之间的链接。

#### 3.1 离心机控制界面

离心机控制系统采用SIMATIC TIA Portal V15.1作为编程与控制软件, 集PLC编程与wincc编程于一体。其主页面如图7所示, 包括参数设置区、参数显示区、控制按钮及状态显示区、实际运行状态显示区以及手动调速区等。其中, 参数设置区主要为离心参数的输入, 包括载荷曲线路径、旋转半径、数采周期与总数、载荷给定总数等; 参数显示区主要提示当前读取的载荷以及离心机实时的运行情况; 控制按钮及状态显示区可以控制离心机启/停、正/反转及手动/自动模式等; 实际运行状态显示区显示实际载荷的曲线。超重离心结束后, 载荷曲线会以数组的形式存放在wincc的HMI变量和PLC变量中, 读取结束后会自动生成Excel文件。

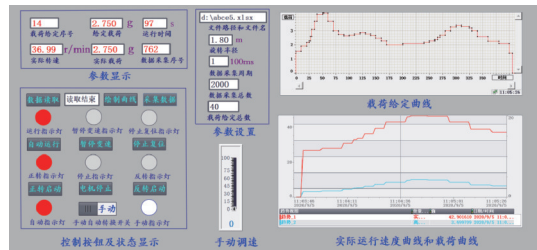
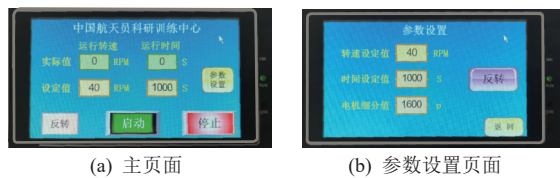


图7 离心机控制软件主页面

Fig. 7 Main interface of the centrifuge control software

#### 3.2 自转座椅控制界面

自转座椅控制系统采用三菱GX Works 2作为组态工具, 在进行软件系统设计时, 力求界面直观、简洁。其控制界面如图8所示, 输入参数主要为运行时间、座椅转速以及正/反转等。



(a) 主页面

(b) 参数设置页面

图8 自转座椅控制软件界面

Fig. 8 Interface of the self-rotating seat control software

### 4 测试验证

为测试超重旋转复合试验系统的运行稳定性, 设计精度测试方案, 包括单一超重精度测试、单一旋转精度测试及超重旋转复合精度测试, 分别选用2.5、5.0、10.0 kg重力替代物进行多运转水平模拟。

4.1 单一超重精度测试

为 1 s, 待离心机稳定运行后连续采集 100 个数据

此测试仪控制离心机运动, 设置数据采集周期

点并取平均值与输入参数对比, 记录结果见表 3。

表 3 单一超重精度测试记录表  
Table 3 Hypergravity accuracy test record sheet

输入转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	理论过载/g	重力替代 物质量/kg	实际测试记录		相对误差/%
			平均转速/(r·min <sup>-1</sup> )	平均过载/g	
20	0.806	2.5	19.999	0.803	-0.372
		5.0	19.990	0.805	-0.124
		10.0	19.995	0.805	0.124
50	5.036	2.5	49.994	5.034	-0.040
		5.0	49.992	5.034	-0.040
		10.0	49.986	5.033	-0.060
80	12.900	2.5	79.996	12.900	-0.000
		5.0	79.989	12.887	-0.101
		10.0	79.983	12.885	-0.116

4.2 单一旋转精度测试

仪等设备记录旋转一定圈数所需时间, 多次测量后

此测试仪控制自转座椅运动, 采用秒表、测角

取平均值, 记录结果如表 4 所示。

表 4 单一旋转精度测试记录表  
Table 4 Rotation accuracy test record sheet

重力替代物 质量/kg	输入转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	转 1 圈用时/s						转 1 圈平均 用时/s	平均转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	相对误差/ %
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6			
2.5	15	4.08	4.07	4.13	4.11	4.08	4.16	4.105	14.616	-2.56
	30	2.13	2.09	2.16	2.17	2.04	2.06	2.108	28.463	-5.12
	60	0.96	1.11	1.05	0.98	1.09	1.19	1.060	56.604	-5.66
5.0	15	4.12	4.08	4.02	3.98	4.11	3.96	4.045	14.833	-1.11
	30	2.15	2.04	2.09	2.13	1.97	2.06	2.073	28.944	-3.52
	60	1.09	1.13	1.16	0.95	1.07	1.12	1.087	55.198	-8.00
10.0	15	4.21	4.13	3.94	4.06	4.10	4.03	4.078	14.713	-1.91
	30	2.06	2.13	2.13	2.01	2.05	2.16	2.090	28.708	-4.30
	60	1.13	1.20	1.15	1.08	1.11	1.09	1.127	53.239	-11.27

4.3 超重旋转复合精度测试

表 5 (续)

此测试中同时控制离心机与自转座椅运动, 通过 Gopro 运动相机记录复合加载过程中自转座椅运动情况, 离心机运动状态仍通过实时采点取均值的方式进行监测, 记录复合加载下两系统运动情况, 记录结果如表 5 所示。

表 5 超重旋转复合精度测试记录表

Table 5 Hypergravity rotation composite accuracy test record sheet

重力 替代物 质量/kg	输入转速/ (r·min <sup>-1</sup> )		实际转速/ (r·min <sup>-1</sup> )		理论 过载/g	实际 过载/g
	离心机	自转座椅	离心机	自转座椅		
2.5	20	15	19.990	14.677	0.806	0.805
		30	19.992	28.751		0.805
		60	19.989	57.182		0.804
	50	15	49.996	14.793	5.036	5.035
		30	49.990	28.656		5.034
		60	49.989	56.395		5.034

重力 替代物 质量/kg	输入转速/ (r·min <sup>-1</sup> )		实际转速/ (r·min <sup>-1</sup> )		理论 过载/g	实际 过载/g	
	离心机	自转座椅	离心机	自转座椅			
2.5	80	15	79.995	14.758	12.900	12.890	
		30	79.988	28.688		12.888	
		60	79.993	55.286		12.889	
5.0	20	15	19.999	14.658	0.806	0.806	
		30	19.994	28.984		0.805	
		60	19.992	58.360		0.805	
	50	15	49.990	14.752	5.036	5.033	
		30	49.996	28.935		5.035	
		60	49.993	57.343		5.034	
10.0	20	15	79.988	14.586	12.900	12.887	
		30	79.996	28.386		12.890	
		60	79.999	54.583		12.891	
	10.0	20	15	19.996	14.598	0.806	0.805
			30	19.994	28.542		0.805
			60	19.993	55.634		0.805

表5(续)

重力替代物质量/kg	输入转速/ (r·min <sup>-1</sup> )		实际转速/ (r·min <sup>-1</sup> )		理论过载/g	实际过载/g
	离心机	自转座椅	离心机	自转座椅		
10.0	50	15	49.998	14.680	5.036	5.035
		30	49.996	28.658		5.035
		60	49.998	53.685		5.035
	80	15	79.995	14.756	12.900	12.889
		30	79.992	28.843		12.888
		60	79.996	54.695		12.890

通过各组测试结果发现:各运转水平下,离心机过载输出相对误差不超过0.5%;自转座椅由于引入链条传动及手工测试的原因,旋转相对误差略大,但均平稳完成测试。综合对比表3、表4和表5测试结果,离心机和自转座椅控制系统间无明显干扰,试验平台效果达到预期要求。

## 5 结束语

本文在基于离心机的超重旋转复合试验平台设计中,采用自转座椅代替传统固定座椅,分别搭建了独立的离心机控制系统及自转座椅控制系统,并开展了精度测试验证。结果表明,该平台可实现超重、旋转及超重旋转复合等环境模拟,控制系统方便稳定,运行可靠,能有效支撑相关模拟试验。

后期将进一步完善平台的结构,提高运行精度,用于航空航天特因环境下人体生理与防护技术的应用基础研究。

### 参考文献(References)

- [1] 潘益凯,张刘伟,杨涵,等.三维滚轮单轴向旋转测试在人体前庭功能稳定性和心血管功能评价中的应用[J].心脏杂志,2022,34(3):334-338  
PAN Y K, ZHANG L W, YANG H, et al. Application of 3D roller uniaxial rotation test in the evaluation of human vestibular stability and cardiovascular function[J]. Chinese Heart Journal, 2022, 34(3): 334-338
- [2] 孙弘丽,宋艳琪,高原,等.三维滚轮训练对人体前庭功能稳定性和心血管功能的影响[J].心脏杂志,2020,32(6):626-630  
SUN H L, SONG Y Q, GAO Y, et al. Effect of three dimensional roller vestibular function training on vestibular stability and cardiovascular function[J]. Chinese Heart Journal, 2020, 32(6): 626-630
- [3] 王林杰,魏金河,张丹,等.Z轴和偏心旋转对人体听觉认知过程的影响[J].中华航空航天医学杂志,2006,17(2):97-102  
WANG L J, WEI J H, ZHANG D, et al. Effects of Z-axis and off-vertical axis rotation on human auditory cognitive processing[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2006, 17(2): 97-102
- [4] 耿捷,孙喜庆,杨长斌,等.旋转床模拟推拉效应时心脏泵血功能变化特征[J].航天医学与医学工程,2007,20(3):157-160  
GENG J, SUN X Q, YANG C B, et al. Changes of cardiac pump function in push-pull effect simulated by tilt table[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2007, 20(3): 157-160
- [5] 李天印,赵锦荣,路贵友,等.适当体位旋转训练对人体前庭功能的影响[J].中华航空航天医学杂志,2004,15(2):22-24  
LI T Y, ZHAO J R, LU G Y, et al. Effect of special posture rotation exercise on vestibular function[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2004, 15(2): 22-24
- [6] 王林杰,魏金河,张丹,等.不同前庭刺激下人体心率变异性的变化特征[J].中华航空航天医学杂志,2004,15(1):22-25  
WANG L J, WEI J H, ZHANG D, et al. The characteristics of heart rate variability (HRV) under various vestibular stimuli[J]. Chinese Journal of Aerospace Medicine, 2004, 15(1): 22-25
- [7] 肖宝红,裴葆青,吴楠.基于运动控制器的载人离心机控制系统设计[J].航天医学与医学工程,2018,31(1):32-36  
XIAO B H, PEI B Q, WU N. Design of manned centrifuge control system based on motion controller[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(1): 32-36
- [8] 郭磊,裴葆青,武雪晴,等.短臂载人离心机的研制及+G<sub>x</sub>/-G<sub>z</sub>的过载生理研究[J].载人航天,2021,27(5):589-595  
GUO L, PEI B Q, WU X Q, et al. Development of a short-arm human centrifuge and physiological overload study under +G<sub>x</sub>/-G<sub>z</sub> acceleration[J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(5): 589-595
- [9] 刘巍,冯雪梅,邓金辉,等.载人离心机测控系统研制[J].航天医学与医学工程,2003,16(3):193-195  
LIU W, FENG X M, DENG J H, et al. Development of a measurement and control system of human centrifuge[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2003, 16(3): 193-195
- [10] 刘磊,刘洪英,马爱军,等.载人航天某装置人机交互式结构优化设计[J].航天器环境工程,2016,33(3):296-299  
LIU L, LIU H Y, MA A J, et al. Structural optimization using human-computer interaction for an aerospace assembly[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(3): 296-299

(编辑:冯露漪)

一作简介:任逸(1998—),男,硕士研究生,研究方向为生物力学。E-mail:renyi\_ujs@163.com。

指导教师:李富柱(1971—),男,博士学位,教授,研究方向为机电液一体化系统。E-mail:lifuzhu@uj.edu.cn。