

Design and control of a ground simulator for terminal subgrade

Bing Feng Yanwen Lu Shengpeng Wang Jizhuang Fan

Harbin Institute of Technology, Robot Research Institute, Harbin, Heilongjiang, 150080, China

Abstract

This paper designs a final-stage ground-based chiral rotation simulator for the microgravity environment in outer space. Through modeling and computational methods, the study conducts comprehensive simulation of the final stage, structural design optimization, zero-gravity levitation, and zero-friction rotation system design. Based on modeling results and issues identified during mass center and inertia matching, we developed a robust simulator structure, a simplified yet stable rotational axis system, and an adjustable pitch angle mechanism with precision control capabilities. The equipment has been successfully implemented in field applications, meeting operational requirements in both rotational accuracy and control performance.

Keywords

zero gravity; zero friction; chapter angle adjustment; Creo modeling; software control

末子级消旋地面模拟器的设计与控制研究

冯冰 鲁延文 汪胜鹏 樊继壮

哈尔滨工业大学机器人研究所, 中国 · 黑龙江 哈尔滨 150080

摘 要

本文设计了一种外太空失重环境下的末子级地面消旋模拟器结构, 采用建模和计算对末子级进行整体模拟、结构设计、零重力气浮和零摩擦旋转设计。根据建模结果以及末子级质心、惯量设计匹配中出现的问题, 设计出了强度可靠的模拟器结构、简洁稳定的旋转轴系结构和可调节倾角精度的章动角调节结构。本文设备在现场已得到了实际应用, 在旋转精度和控制能力方面均达到了使用要求。

关键词

零重力; 零摩擦; 章动角调节; Creo建模; 软件控制

1 引言

根据末子级消旋试验的需求, 利用大理石气浮台, 将末子级缩比模型放置于气浮装置上, 末子级缩比模型上配置消旋载荷, 用于验证消旋载荷对末子级的消旋能力, 系统由气浮装置、末子级缩比模型、消旋载荷组成。

末子级缩比模型以某一旋转轴, 以一定的角速度旋转, 模拟末子级在轨旋转特性, 消旋载荷根据缩比模型的质量特性及附着位置进行消旋控制, 消旋到一定程度后, 将相应的旋转速度作为机械臂抓捕操控半物理试验系统的输入参数, 继而可开展后续的机械臂维修救援操作试验。

2 末子级消旋装置结构设计

2.1 气浮单元的设计

气浮单元是整个气浮试验装的核心组件, 原理上采用空气悬浮结构。气浮单元整体尺寸: 长 * 宽 * 高 = 1675mm * 1675mm * 1175mm, 气浮单元质量: 396kg。

【作者简介】冯冰 (1991-), 男, 中国山东高塘人, 本科, 工程师, 从事机械工程研究。

本实验装置设计上选用的是气体作润滑剂的滑动轴承。此气足空气轴承是指借助于轴承滑动副表面之间形成的压力空气膜将负荷支撑起来的轴承, 工作时滑动副表面之间完全由气膜分开。空气轴承属于滑动轴承中之流体滑动轴承, 工作时为流体润滑, 其润滑介质为空气。

空气轴承的压力空气膜是由外部的压缩空气通过节流器导入滑动副表面之间形成, 如图所示。空气静压轴承需要洁净的外部气源。^[1]

1) 空气轴承特点

① 摩阻极低

由于气体粘度比液体低得多, 在室温下空气粘度仅为 10 号机械油的五分之一, 而轴承的摩阻与粘度成正比, 所以气体轴承的摩阻比液体润滑轴承低。

② 适用速度范围大

气体轴承的摩阻低, 温升低, 在转速高达 5 万转 / 分时, 其温升不超过 20~30℃, 转速甚至有高达 130 万转 / 分的。气体静压轴承还能用于极低的速度, 甚至零速。

③ 适用温度范围广

气体能在极大的温度范围内保持气态, 其粘度受温度

影响很小(温度升高时粘度还稍有增加,如温度从20℃升至100℃,空气粘度增加23%),因此,气体轴承的适用温度范围可达-265℃到1650℃。

④ 承载能力低

动压轴承的承载能力与粘度成正比,气体动压轴承的承载能力只有相同尺寸液体动压轴承的千分之几。由于气体的可压缩性,气体动压轴承的承载能力有极限值,一般单位投影面积上的载荷只能加到0.36兆帕。

⑤ 加工精度要求高

为提高气体轴承的承载能力和气膜刚度,通常采用比液体润滑轴承小的轴承间隙(小于0.015毫米),需要相应地提高零件精度^[2]。

2) 气浮计算

拟选择气浮滑块足型号: #200, 额定工作压力0.4Mpa, 排气量6L/min, 可悬浮最大负载200kg, 气膜厚度8μm。四组气浮足最大可悬浮800kg, 模拟器质量396kg, 满足试验要求。

气瓶选型: 高强度碳纤维复合气瓶, 容积12L, 工作压力30Mpa, 气瓶尺寸: 直径195mm, 长度595mm, 质量6.5kg。

根据气足排气量及气瓶压强、容积计算得, 单个气瓶给单个气足供气, 在额定0.4Mpa工作压力下, 气浮单元工作时长: 150min, 大于2小时。满足工作时长要求。

3) 结构质量、惯量及轴承摩擦力计算

气浮单元整体框架采用钢结构, 内部零部件采用铝合金材质整体质量约396kg(不包含安装螺钉及轴承等微小零部件)

气浮单元惯量如下(后期可选择配平质量块对气浮单元进行惯量匹配):

1、载荷舱绕Xh轴的转动惯量: $J_{wx}=98\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

2、载荷舱绕Yh轴的转动惯量: $J_{wy}=114\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

3、载荷舱绕Zh轴的转动惯量: $J_{wz}=119\text{kg}\cdot\text{m}^2$;

本气浮单元中空轴采用气浮轴承, 摩擦系数取

值0.00001, 气浮单元自重396kg, 单元悬浮与大理石台面理论摩擦力为0。

2.2 旋转驱动单元的设计

旋转单元位于整个装置的中心正上方, 主要由电机、减速机、气缸、直线轴承、接触法兰和一对啮合斜齿轮组成, 工作时减速机驱动齿轮啮合, 带动接触法兰与气浮装置一同旋转, 当达到一定转速时气缸收缩接触法兰与气浮装置脱离, 完成末端级缩比模拟件自旋转。

本气浮试验装置中轴处设计有转速反馈传感器, 传感器动盘与旋转万向轴承座连接, 静盘与中空固定走线轴连接。动盘旋转, 静盘通过光栅读取动盘转速信号, 工作中可实时反馈气浮试验装置消旋转速^[3]。

3 控制系统设计方案

3.1 控制系统架构

在本项目的试验装置中, 控制系统拟采用分散式控制

结构, 如图1所示, 并结合一台高性能工业控制计算机, 以实现更高效的设备控制和数据处理。这种架构将控制系统分为多个相对独立的子系统, 每个控制单元负责不同的功能模块, 通过通讯方式进行数据交换和协调, 从而降低系统的复杂性, 提高系统的可靠性。

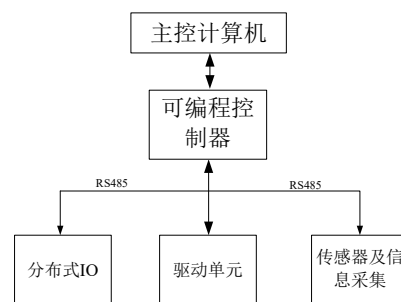


图1 控制系统结构框

高性能工业控制计算机主要负责设备的人机交互和数据处理, 实现以下功能:

①试验信息的采集显示: 通过连接传感器和数据采集模块, 实时采集试验数据并在计算机界面上显示。

②数据分析: 对采集到的数据进行分析处理, 提取关键信息并进行计算。

③数据存储: 将试验数据存储在计算机硬盘或数据库中, 以便后续查询和分析。

④数据打印: 将试验结果以报告或图表形式打印输出, 方便用户查阅和记录。

通过引入高性能工业控制计算机, 整个试验装置的控制系统变得更加灵活和智能化, 同时提高了数据处理的效率和准确性。计算机与其他控制单元之间通过通讯方式进行数据交换, 实现了各个功能模块之间的协同工作, 为试验装置的稳定运行和数据处理提供了有力支持^[4]。

3.2 控制系统功能

控制系统的整体硬件结构组成。首先在测控系统硬件选型上, 选用一台工业PC计算机作为设备监控、操作及数据处理核心系统, 其它硬件选型包括PLC及其相应模块, 驱动电机、电机驱动器、角度传感器、光电开关、无线通讯模块、移动电源等, 在保证满足技术要求性能指标的基础上, 均采用性能十分成熟产品, 以保证设备工作的可靠性;

在这个系统中, PLC起到了控制中枢的作用, 根据预定的程序控制各个执行元件的工作状态。电磁阀和驱动系统用于控制执行元件的运动, 实现设备的启停和运行。编码器和传感器则用于采集设备运行时的状态信息, 反馈给PLC进行实时监控和控制。

PC端作为上位机, 通过RS485与PLC进行数据交互, 实现对设备状态的监控和处理。同时, PC端也可以通过无线通讯与外部电气元件进行交互, 实现更加复杂的控制功能。

整个系统大致的运行流程如下:

- ①上位机人机交互界面设置运动参数，发送启动命令给 PLC；
- ② PLC 根据预定程序开始运行，通过无线模块发送控制命令给气足的控制电磁阀，使其气足充气，达到模拟体的气浮效果；
- ③ PLC 发送控制命令给电气驱动系统，驱动模拟体旋转，待模拟体达到设定的速度后，PLC 发送指令给驱动单元离合单元，使驱动单元与模拟体机构断开机构连接；
- ④ PLC 通过无线通讯，给模拟体内的控制模块发送指令，使其按照设定的通讯协议连接模拟体上的消 X 载荷控制单元，控制其开始按照设定的方式启动工作；
- ⑤ PLC 采集模拟体运动过程中编码器的数据，并实时记录模拟体的运动速度和相关传感器的数据^[5]；
- ⑥设备运行过程中，PC 端程序通过 PLC 对数据进行实时采集和监控及记录处理，并通过无线通讯与外部电气元件进行交互，发现异常及时停止设备运行。

3.3 测控系统的故障及保护措施

1) 测控系统的故障种类

测控系统的故障包括位置、速度伺服控制故障以及测控系统实时运行控制故障等，表 1 给出了测控系统的故障种类。

表 1 测控系统的故障列表

故障名称	描述
自检失败	当设备处于自检运行状态时，未按照自检程序达到预定的效果
电机驱动系统故障	如果伺服电机驱动系统发生故障，系统将被置于“任务退出”状态
速度运动指令超限	主机发出超出运动速度输出限制的控制指令，或有关事件的参数与分析不符，产生此故障并报警。
位置信号超限	如果位置信号超出正常工作范围，运动系统将“任务退出”。
电源故障	当系统供电发生故障时，发出报警
零位故障	当系统复位时无法回到设定的零初始位置，发出报警，并停机

2) 运动控制系统的故障保护措施

根据系统发生故障的种类及严重程度不同，将故障按轻重分为三类：声光报警、任务退出和紧急停车，根据不同的故障，采取下述三种保护措施^[6]。

声光报警：

此时实时控制计算机检测到如自检失败、电源故障时，控制系统将通过控制面板的指示灯和扬声器进行声光指示，但不采取任何措施。

任务退出：

当控制系统计算机检测角速度超限以及运动指令超限时，将立即执行任务退出的操作，控制系统声光报警并进入“退出”模式。在此情况下设备停止运行，但不断电，设备不接收任何其它指令。

紧急停车：

设备运行过程中有位置信号超限情况发生时，使设备紧急停车。此时，设备执行机构的供电电源将被切断，测量系统维持供电，以供操作者查询此时设备工作状态。也可以通过紧急停车按钮使设备紧急停车^[7]。

4 结论

通过对末子级消旋地面试验装置的设计与控制分析研究，验证了消旋载荷对末子级的消旋能力，模拟末子级在空间环境中的实际旋转工作状态，获取测试实验中的各种性能参数数据，通过分析以考核消旋机构的消旋作业性能，作为产品结构定型、及其他相应机构设计的依据。测控方案设计合理，可以满足空间模拟测控中提出的各项技术指标和性能要求。

本方案所采用的伺服驱动技术、信息采集和数据处理技术都是目前国内外成熟技术，其技术难点的解决途径也已明确，另外在测控系统所用的外购件选型上，在保证性能要求的前提下尽量选择性能价格比高、性能可靠、制造商信誉好的外购件，并借鉴以往的使用经验，以国内外知名厂商为货源，确保产品质量。依据现有的技术力量完全能够研制出符合任务书要求的设备测控系统。

参考文献

[1] 雍子豪,刘鹰,朱雄峰,崔朋,王铁兵,韩秋龙,郑琦.基于运载火箭末子级构建空间试验平台的有关思考[J],国际太空,2024,05(2):总第545期.

[2] 唐亮,刘辉,陈晨,黄春华,杜英霞,基于末子级应用的可重构通信载荷研究设想[J],空间电子技术,2017,14(01):1674-7135.

[3] 马红鹏,郭嘉,陈华伟,周天送,张毅博,小卫星分离机构微重力试验系统测试技术研究[A],宇航计测技术,2025,06(03).

[4] 张晓辉,魏玉章,汤晖,刘博,黄凌旻,彭俊彪,柔性连接的大行程、双驱同步气浮运动载台设计与研究[J/OL],机械科学与技术,2025,01(03).

[5] 曹国庆,陈雨,周青华,基于数字孪生系统的气浮平台设计与应用[A],人工智能,2025,01(006).

[6] 温众普,石照耀,谭久彬,吴剑威,崔海龙,超精密气浮关键技术及发展趋势[D]机械工程学报,2025.03.6.(05).

[7] 路艳辉,贾晨辉,贾硕,符瑞涛,申旭,静压气体轴承气浮间隙调节机构的设计与运动分析[B]润滑与密封,2024.08.08.