

天宫空间站在轨货物进出舱功能的设计与验证

孟 瑶¹, 柏合民¹, 韩 艳¹, 杨 旋², 季逸民¹, 刘嫫嫫¹, 张 元²

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘 要: 为增强空间站对舱外载荷的支持能力, 提升舱内外货物的进出效率, 减少航天员出舱次数, 降低航天员出舱风险, 空间站梦天实验舱设计了货物自动进出舱功能。本文从货物进出舱功能方案出发, 介绍了包括货物转运功能、外舱门功能、泄压、复压、气体复用功能在内的关键子功能的地面试验验证及在轨试验验证工作。地面及在轨试验验证结果对比表明: 货物进出舱方案设计合理, 地面验证结果和在轨数据一致性好, 产品性能稳定, 有效地提高了空间站货物进出舱效率。

关键词: 天宫空间站; 货物进出舱; 气闸舱; 设计; 验证

中图分类号: V 476.1

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.05.003

Design and Verification of In-Orbit Cargo Egress and Ingress Function of China Space Station

MENG Yao¹, BAI Hemin¹, HAN Yan¹, YANG Xuan², JI Yimin¹,

LIU Huahua¹, ZHANG Yuan²

(1. Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201109, China;

2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to enhance the China Space Station's ability to support extravehicular loads, improve the cargo entry and exit efficiency of China Space Station, and reduce the number and risk of astronauts' extravehicular activities. The China Space Station Mengtian Lab Module is designed with cargo automatic egress and ingress function. Based on the cargo automatic egress and ingress function, this article introduces the ground test verification and in-orbit test verification of the key sub functions, including cargo transfer function, outer hatch function, air reuse, repressurization and repressurization function. The comparison of experimental verification results between space and earth shows that the design of cargo automatic egress and ingress function is reasonable, the ground verification results are consistent with the in-orbit data, and the product performance is stable. Mengtian Lab Module can enhance the cargo entry and exit efficiency of China Space Station efficiently.

Key words: china space station; cargo egress and ingress; airlock module; design; verification

0 引言

周建平^[1]对空间站在轨需求进行了阐述, 空间站作为国家大型在轨实验室, 承担较多空间实验任务, 也带来了大量的舱内外货物交互需求。施金苗等^[2]指出依靠航天员出舱实现舱内外货物交互的方法, 存在质量、尺寸、任务执行频次、航天员出舱风险控制等多方面的约束。GU, GAO 等^[3-4]阐述了中國空间站未来在轨开展试验的情况, 其中舱外试验

的占比较大, 如何提高空间站的利用效率成为亟待解决的问题。

货物进出舱功能是提高空间站舱内外货物运输能力、降低航天员出舱风险的一项重要功能, 国内外均对此开展了大量的研究, 取得了较多成果。孟瑶^[5]对货物进出舱任务的工作流程、泄复压方案、进出舱模式等进行了设计。GB/T 42178—2022 空间站气闸舱进出货物接口要求^[6]对进出舱货物接口

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2023-08-29

作者简介: 孟 瑶(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为载人飞行器总体设计、货物进出舱设计。

进行了明确规定,保证了货物进出舱任务的顺利实施。楼俏等^[7]提出货物气闸舱构型方案,对舱内载荷转移机构、外舱门等设备的安装位置,安装形式进行了设计。张飞龙等^[8]设计了一种自适应调整的地面设备,在地面模拟载荷转移机构在轨受到的载荷,为载荷转移机构提供较为真实的等效空间载荷。气体复用技术的应用可有效减少密封舱内气体资源的损失,因此气体复用技术对空间站长期经济运行具有重要作用。MARMOLEJO、施晓毅、曹军等^[9-11]对气体复用带来的收益展开分析,对4.25 m³的气闸舱,在常温下将101 kPa的空气全部排放到外太空可造成约5.5 kg的资源浪费,如执行10次出舱活动,每次回收60%的气体,则可节约近33 kg的气体,是很可观的一部分气体资源。施晓毅等^[10]从环境的真实性、包容性、经济性、可实现性和产品的适应性出发,设计并给出地面可实现、较为经济合理的泄复压环境试验方法和试验条件。曹军等^[11]对载人航天器气闸舱气体复用技术现状及展望提出了气体复用的实现及地面验证方法。曹军^[12]调研了“国际空间站”气体复用技术,对气体复用系统组成、硬件设计及性能进行了阐述,分析了气体复用技术对试验条件的影响性。武岩等^[13]介绍了空间站、航天飞机上气闸舱及其舱门的大小和尺寸。例如,航天飞机上用于宇航员出入的舱门呈D字形,直径为1 m。文献[19]提出了一种有效提高舱门刚度,抑制其大变形的立筋。张涛涛等^[14]提出了舱门与舱体的一体化设计方案,可有效提高舱门的密封性能及结构的安全性。刘志全等^[15]提出了舱门的可靠性试验方法,包括试验方法选择、试验件状态及试验条件的确定、试验程序、故障判断和可靠性评估方法。希望号手册^[16-18]对目前国际空间站的希望号舱段,采用货物气闸的方案展开介绍,主要阐述了国际空间站货物气闸舱功能、利用

滑台转移货物、方案的实现方式及货物气闸舱的实用价值。

空间站梦天实验舱平台设计并验证了货物进出舱功能,提高了中国空间站整站舱内外货物交互能力,降低了航天员出舱频率,进而减少出舱风险。

1 货物进出舱功能方案概述

考虑到货物进出舱的气体复用、货物转移等需求,中国空间站梦天实验舱货物进出舱系统主要涉及货物气闸舱、载荷转移机构、内舱门、外舱门及1套可以实现气体复用的泄复压系统,具体情况如图1所示。

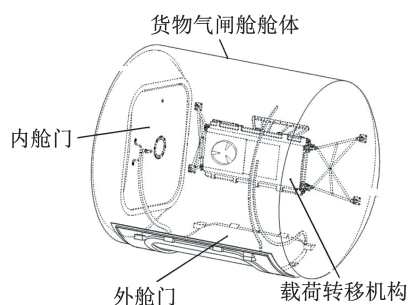


图1 货物气闸舱

Fig. 1 Sketch map of the cargo airlock module

整个货物进出舱功能方案涉及货物进舱方案和货物出舱方案2大部分。

1.1 货物出舱方案

货物出舱时,航天员需先将出舱货物安装至载荷转移机构,并关闭内舱门再进行货物气闸舱气体复用和泄压;泄压完成后,打开外舱门将载荷转移机构伸出舱外,并运用机械臂将出舱载荷抓取值目标位置;最后,靳宗向等^[20]设计的载荷转移机构缩回张涛涛等^[21]所述的货物气闸舱内并关闭外舱门,完成货物气闸舱复压。具体流程如图2所示。

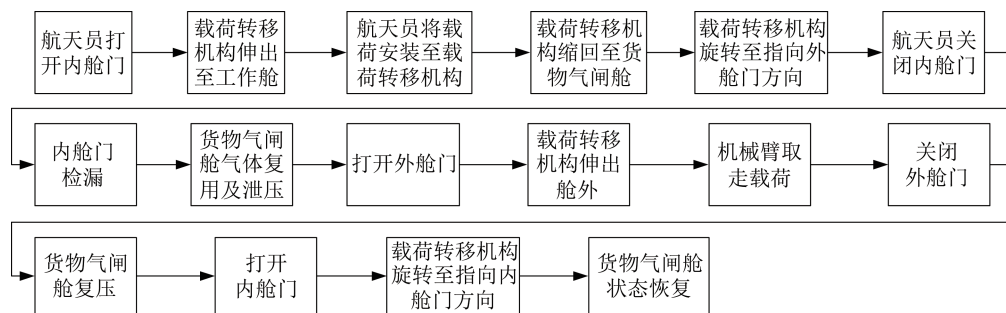


图2 货物出舱流程

Fig. 2 Diagram of the cargo ingress procedure

1.2 货物进舱方案

货物进舱时,航天员需先将进舱货物的相关工装安装至载荷转移机构,并关闭内舱门;再进行货物气闸舱气体复用和泄压;泄压完成后,打开外舱

门将载荷转移机构伸出舱外,并运用机械臂将需要进舱的货物安装至工装上;最后,载荷转移机构缩回货物气闸舱内,并关闭外舱门,完成货物气闸舱复压。具体流程如图 3 所示。

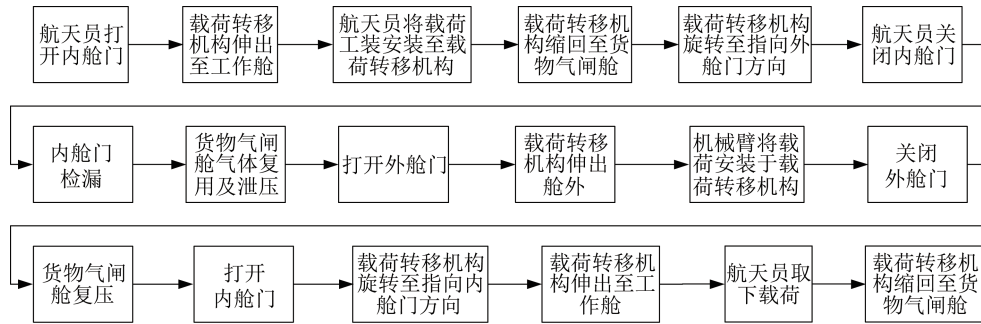


图 3 货物进舱流程

Fig. 3 Diagram of the cargo egress procedure

2 地面验证情况

载荷进出舱任务流程复杂,利用单一试验开展全流程验证工作存在一定难度。因此,针对载荷进出舱任务特点,空间站梦天实验舱采用分步骤验证的方法,分别对载荷转移机构运动功能、泄复压功能及外舱门开关键子功能进行了地面试验验证,具体情况如下。

2.1 货物转运功能地面试验情况

货物转运功能实现货物在舱内外的转移运动,主要由载荷转移机构执行。载荷转移机构具备伸缩、旋转、位置调整等功能。通过其伸缩功能实现货物直线方向运动;通过旋转功能改变载荷转移机构

伸缩方向朝向;通过调整机构提高对不同尺寸载荷的适应能力。载荷转移机构伸缩方向运动距离为 1 800 mm,旋转方向在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间往复运动,位置调整功能可以实现 0~500 mm 之间的多挡位调整。

考虑货物转运在轨实际的使用温度、微重力及载荷环境,该功能的地面试验主要包括载荷转移机构的运动试验和温度验证试验。

2.1.1 载荷转移机构运动试验

载荷转移机构的运动试验主要验证其动作执行时间、精度等情况。开展试验时,载荷转移机构采用平放的方式,减小重力载荷对机构运动的影响。整个试验包括载荷转移机构旋转、伸缩及载荷转移机构中的调整机构运动,试验结果见表 1。

表 1 载荷转移机构指标要求及地面验证情况

Tab. 1 Index requirements and ground verification results of the payload transfer mechanism

序号	测试项目	测试指标	测试结果
1	伸缩机构伸出	伸出精度/mm	0.9
2		伸出时间/s	119.0~121.0
3	旋转机构旋转	旋转精度	0° 位置定位精度:1.38' 90° 位置定位精度:—2.4'
4		旋转时间/s	94.0 s~94.3 s
5	位置调整机构运动	500 mm 运动精度/mm	500 mm 定位精度:<0.10
6		250 mm 运动精度/mm	250 mm 定位精度:<0.34
7		全过程运动时间/s	全程运动时间:49.7~50.5

2.1.2 载荷转移机构温度试验

载荷转移机构伸出方向为梦天实验舱对地方向,热控的加热起控温度为 0°C ,在轨最低温度出现

在空间站出影前、载荷转移机构伸出舱外的工况下。此时,该机构直接暴露在空间环境中,热量来源除自身设备发热外,主要为空间热辐射。考虑空

间站特性及载荷转移机构运动方式,利用梦天实验舱热平衡试验,在热真空罐内模拟空间真空环境和在轨温度环境,对载荷转移机构在轨温度进行模拟试验。试验结果表明,载荷转移机构在轨最低温度不低于3℃,满足所设计的最低许用温度指标,同时未达到载荷转移机构热控的起控温度。

2.2 气体复用、泄压和复压功能的地面验证情况

气体泄压、复压和复用功能主要实现货物进出舱时,气压环境从空间站舱内环境到舱外环境的转变,并减少货物出舱任务期间气体损耗。货物进出舱任务期间泄压分为气体复用和泄压2个过程。气体复用过程要求复用时间不超过30 min,气体复用率不小于70%,复用后货物气闸舱内残余压力不超过25.0 kPa。完成气体复用后开始泄压,时间不超过20 min,泄压后舱内残余压力不超过0.3 kPa。复压任务分为2个部分,共4个阶段开展:载荷转移机构从舱外回到货物气闸舱内后先进行回温;温度升高至-5℃后进行第1次复压,复压至30.0 kPa;然后进行第2次回温;当温度升高至12℃以上后进行第2次复压,直至与空间站舱内压差不超过0.3 kPa。

针对泄压、复压及气体复用功能,对气压控制能力及气体复用能力进行验证试验。实验在热真空罐中依据在轨实际流程,按先复用再泄压最后复压的流程开展。试验时,工作舱初始总压及货物气闸舱初始总压分别设置为92.2 kPa和90.4 kPa,真空罐内初始总压设置为 1.5×10^{-4} Pa,实验结果如下。

2.2.1 气体复用及泄压试验

完成初始状态设置后,开始气体复用及泄压试验。气体复用过程中货物气闸舱总压下降65.4~24.9 kPa,工作舱总压上升6.4~98.6 kPa,气体复用率不低于73%,复用期间耗时17 min;泄压过程中货物气闸舱总压从24.6 kPa下降至300.0 Pa,泄压耗时约17 min,气体复用及泄压功能正常。

2.2.2 气体复压试验

气体复压试验分为2阶段开展,复压开始时,工作舱总压为98.5 kPa、货物气闸舱总压为390.0 Pa。第1阶段货物气闸舱舱压上升至30.5 kPa,工作舱舱压下降至95.5 kPa,复压耗时约6 min,复压速率约5.2 kPa/min;第2阶段货物气闸舱舱压上升至89.6 kPa,工作舱舱压下降至90.0 kPa,复压耗时约18 min,复压速率约3.0 kPa/min,气体复压功能正常。

2.3 外舱门功能地面验证情况

外舱门功能主要实现货物进出舱期间的通道开闭及货物气闸舱的密封。外舱门采用了电动滑移至的开关方案,安装于货物气闸舱I象限,往II象限方向滑移打开,舱门通道近似为方形,有效通径为1 230 mm×1 250 mm,弧门边角处倒圆半径不大于R150 mm。

地面主要针对其开关功能及密封性开展验证试验。试验时,采用热真空罐模拟空间环境,真空度为 1.5×10^{-4} Pa;考虑地面重力影响,采用舱门直立的状态开展试验,实验结果见表2。

表2 舱门指标要求及地面验证情况

Tab. 2 Index requirements and ground verification results of the hatch

序号	测试项目	测试指标	测试结果
1	开外舱门	滑移电机电流/A	0.080
2		开门时间/s	340
3	关外舱门	滑移电机电流/A	0.050
4		关门时间/s	340
5		压紧电机电流/A	压紧电机1:0.070 压紧电机2:0.070
6		舱门漏率	$0.99 \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$

3 在轨验证情况

空间站梦天实验舱发射入轨并形成空间站三舱组合体后,执行立方星释放在轨专项验证和6次在轨出舱任务,通过遥测数据下行及地面监视计时的方法,测得所涉及到的关键子功能在轨验证情况(遥测数据的采样采用了向下取整的方式)。

的方法,测得所涉及到的关键子功能在轨验证情况(遥测数据的采样采用了向下取整的方式)。

3.1 货物转运功能在轨验证情况

货物转运功能指标在轨实验情况见表3。

表 3 载荷转移机构指标在轨实测情况

Tab. 3 In-orbit verification results of the payload transfer mechanism

序号	测试项目	测试指标	地面测试结果	在轨测试结果
1	伸缩机构伸出	伸出精度/mm	± 1	伸缩机构位置遥测信号:1 799.0
3	旋转机构旋转	旋转精度	0°位置定位精度:1.38' 90°位置定位精度:-2.4'	旋转机构旋转遥测信号:0°和 90°
5	位置调整机构运动	500 mm 运动精度/mm	<0.10	调整机构位置遥测信号:499
6		250 mm 运动精度/mm	<0.34	调整机构位置遥测信号:249
7	载荷转移机构最低温度/℃		3.09	0.02

由表 3 可知,货物转运功能在轨工作正常,各项指标与地面测试结果相比一致性好,载荷转移机构温度情况符合预期。

3.2 气体复用、泄压、复压功能在轨验证情况

气体复用、泄压和复压功能指标在轨实验情况见表 4 所示。

由表 4 可知,气体复用、泄压和复压功能在轨工作正常,各项指标与地面测试结果对比,一致性较好。在轨实验中,气体复用过程结束时,货物气闸舱气压为 25 kPa 并开始泄压;泄压完成后货物气闸舱余压为 300 Pa。货物出舱完毕后第 1 次复压后,货物气闸舱气压为 30 kPa;第 2 次复压后工作舱与

货物气闸舱气压平衡。

表 4 气体复用、泄压、复压功能指标在轨实测情况

Tab. 4 In-orbit verification results of the air reuse, pressure relief, and repressurization function indices

序号	测试项目	测试指标	地面测试结果	在轨测试结果
1	气体复用	气体复用时间/min	约 17	17~19
2		气体复用率/%	73.4	73.8~74.5
3	气体泄压	泄压时间/min	约 17	17.0~19.5
4	气体复压	第 1 次复压时间/min	约 6	5~6
5		第 2 次复压时间/min	约 18	18~20

3.3 外舱门功能在轨验证情况

外舱门功能指标在轨试验验证情况见表 5。

表 5 外舱门指标在轨实测情况

Tab. 5 In-orbit verification results of the outer hatch

序号	测试项目	测试指标	地面测试结果	在轨测试结果
1	开外舱门	滑梯电机电流	0.080 A	0.067~0.082 A
2		开门时间	5 min 40 s	6 min 3 s~6 min 5 s
3	关外舱门	滑梯电机电流	0.050 A	0.055~0.059 A
4		关门时间	5 min 40 s	6 min 3 s~6 min 5 s
5		压紧电机电流	压紧电机 1:0.070 A 压紧电机 2:0.070 A	压紧电机 1:0.063~0.067 A 压紧电机 2:0.059~0.063 A
6		舱门漏率	0.99 Pa·L·s ⁻¹	1.13~1.16 Pa·L·s ⁻¹

由表 5 可知,外舱门功能在轨工作正常,各项指标与地面测试结果对比,一致性较好。

3.4 结果分析

从地面试验验证和在轨试验验证情况分析可知,天地测试的数据的一致性良好,货物进出舱功能及其重要子功能设计合理,不仅可完成货物进出舱的在轨任务,同时可保证在任务执行过程中,产品性能的稳定性;证明地面测试方法有效,货物进出舱功能对不同环境有较强的适应性。

4 结束语

本文介绍了空间站梦天实验舱货物进功能任务主要子功能的设计和试验验证情况。其中,地面试验验证采用分步骤验证的方法,在轨试验采用遥测下行和地面实时计时的方法,监测验证结果。从试验验证结果可得出以下结论。

1) 空间站梦天实验舱货物进出舱功能及其重要子功能设计合理。

2) 空间站梦天实验舱货物进出舱功能及其重要子功能相关产品性能稳定。

3) 空间站梦天实验舱货物进出舱功能地面试验验证方法有效,货物进出舱功能对不同环境有较强的适应性。

4) 空间站梦天实验舱货物进出舱功能正常,可在轨完成货物进出舱任务。

参考文献

- [1] 周建平.我国空间站工程总体构想[J].载人航天,2013,19(2):1-10.
- [2] 施金苗,秦文波.载人航天的发展[J].上海航天,2003,20(6):1-8.
- [3] GU Y D, GAO M, ZHAO G H. Space research plan of China's Space Station[J].空间科学学报,2016(5):595-599.
- [4] GAO M, ZHAO G C, GU Y D. Recent Progress in Space Science and Applications of China's Space Station in 2020—2022[J].空间科学学报,2022,42(4):503-510.
- [5] 孟瑶.载荷进出舱方案研究[R].上海:航天国防科学技术报告,2016.
- [6] 全国载人航天标准化技术委员会.空间站气闸舱进出货物接口要求:GB/T 42178-2022.北京:国家市场监督管理总局国家标准化管理委员会.[2022-12-30].
- [7] 楼俏,杜泽弘,欧阳文,等.一种航天器的货物气闸舱的构型:CN107416230A[P].2017-12-01.
- [8] 张飞龙,贺云,李秋实,等.空间站载荷转移机构机器人的力加载控制方法[J].机器人,2018,40(2):249-256.
- [9] MARMOLEJO J A, LANDIS P A, SOMMERS M. Delivery of servicing & performance checkout equipment to the International Space Station joint airlock to support extravehicular activity[C]//32nd International Conference on Environmental Systems. Detroit: Engineering Society for Advancing Mobility and Land Sea Air and Space, 2002: 16-30.
- [10] 施晓毅,闫利.气闸舱泄复压环境试验技术条件探讨[J].载人航天,2006(3):5-8.
- [11] 曹军,卜珏珺,杨晓林,等.载人航天器气闸舱气体复用技术现状及展望[J].真空科学与技术学报,2014(2):111-118.
- [12] 曹军,卜珏珺,杨晓林,等.大型空间站气闸舱气体复用技术研究[J].航天器工程,2013(2):32-39.
- [13] 武岩.美国航天飞机气闸舱的设计与使用[J].国际太空,2006(12):19-20.
- [14] 张涛涛,张琳,夏祥东,等.航天器气闸舱方形货舱门与门框结构一体化设计[J].航天器工程,2020(4):74-79.
- [15] 刘志全,夏祥东.载人航天器密封舱门的可靠性验证试验方法[J].中国空间科学技术,2010(1):60-64.
- [16] 狄小鸣,肖武平.“国际空间站”日本“希望”号实验舱在轨应用[J].卫星应用,2013,(5):51-57.
- [17] 马援.即将飞升的“希望”——国际空间站日本实验舱段[J].国际航空,2007,(12):39.
- [18] 吴国兴.气闸舱概述[J].国际太空,2004(2):12-17.
- [19] 李宇峰,钟飞熊.一种抑制舱门大变形的立筋:CN204297050U[P].2015-04-29.
- [20] 靳宗向,高金忠,周杰,等.载人航天器的载荷转移机构:CN107458628A[P].2017-12-12.
- [21] 张涛涛,张琳,夏祥东,等.航天器气闸舱方形货舱门与门框结构一体化设计[J].航天器工程,2020(4):74-79.