



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

—— 中国科技核心期刊

空间飞行器重力卸载用弹力绳特性试验研究

王炜 杨帅 薛家宝 黄顺舟 黄圣姚 周建

Test study on the characteristics of flexible rope for gravity unloading of spacecraft

WANG Wei, YANG Shuai, XUE Jiabao, HUANG Shunzhou, HUANG Shengyao, ZHOU Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2024017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间相机地面装调重力卸载仿真优化方法

An optimization method for simulation of gravity unloading of ground-mounted space camera

航天器环境工程. 2021, 38(4): 401–406 <https://doi.org/10.12126/see.2021.04.004>

航天器多级自由边界模拟系统姿态平衡协调控制

Attitude equilibrium coordination control of multi-stage free boundary simulation system for spacecraft

航天器环境工程. 2024, 41(1): 101–108 <https://doi.org/10.12126/see.2023087>

基于重力梯度被动稳定的空间站微重力伴飞实验舱方案

A scheme for China Space Station microgravity accompanying flight experimental module based on gravity gradient passive stabilization

航天器环境工程. 2024, 41(3): 270–276 <https://doi.org/10.12126/see.2023137>

高真空低重力环境下液态工质排放地面模拟试验研究

Ground simulation test for the working fluid evacuation in high vacuum and low gravity environment

航天器环境工程. 2019, 36(3): 257–263 <https://doi.org/10.12126/see.2019.03.010>

微重力条件下上面级贮箱液体推进剂自由界面变形数值模拟研究

Numerical simulation of free interface deformation of liquid propellant in upper stage tank under microgravity condition

航天器环境工程. 2020, 37(2): 115–119 <https://doi.org/10.12126/see.2020.02.002>

重力差异导致的航天器设备安装精度变化量评估

Evaluation for the variation in installation precision of spacecraft equipment due to gravity differences

航天器环境工程. 2023, 40(6): 677–681 <https://doi.org/10.12126/see.2023039>

空间飞行器重力卸载用弹力绳特性试验研究

王 炜^{1,2}, 杨 帅^{1,3}, 薛家宝¹, 黄顺舟^{1,3*}, 黄圣姚¹, 周 建⁴

(1. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245; 2. 上海大学 机械与自动化学院, 上海 200444;
3. 上海航天工艺与装备工程技术研究中心, 上海 200245; 4. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

摘要: 在空间飞行器地面微重力模拟试验前需要测试弹力绳的特性, 以确定弹力绳是否满足重力卸载需求。文章提出弹力绳特性测试方法, 通过刚度、频率和蠕变测试, 获得其重力卸载特性, 并讨论了静态频率和动态频率不一致问题, 以及温度对弹力绳动态频率的影响。针对某型号微重力环境模拟需求, 对弹力绳选型进行了分析, 在满足总负载的前提下选择纵向频率低、单根负载质量大、空间需求小及蠕变稳定时间短的弹力绳。该研究可为地面微重力模拟试验中弹力绳的选用提供参考。

关键词: 重力卸载; 弹力绳; 蠕变; 空间飞行器; 地面微重力模拟试验

中图分类号: TN707; V416.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)05-0644-08

DOI: [10.12126/see.2024017](https://doi.org/10.12126/see.2024017)

Test study on the characteristics of flexible rope for gravity unloading of spacecraft

WANG Wei^{1,2}, YANG Shuai^{1,3}, XUE Jiabao¹, HUANG Shunzhou^{1,3*}, HUANG Shengyao¹, ZHOU Jian⁴

(1. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer, Shanghai 200245, China;

2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. Shanghai Engineering Research Center of Aerospace Process and Equipment, Shanghai 200245, China;

4. School of Astronautics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Before conducting the ground microgravity simulation test on spacecraft, it is necessary to test the characteristics of flexible ropes to determine whether they meet the requirements of gravity unloading. In this paper, a method for testing the characteristics of flexible ropes was proposed. By conducting stiffness, frequency, and creep tests, its gravity unloading characteristics were obtained. In addition, the inconsistency between static frequency and dynamic frequency, as well as the influence of temperature on its dynamic frequency were discussed. The selection of flexible ropes was analyzed according to the simulation requirements of a specified microgravity environment. While satisfying the total load weight, flexible ropes with low longitudinal frequency, large single-rope load capacity, low space requirement, and short creep stability time were selected. The proposed study may provide a reference for the selection of flexible ropes in ground microgravity simulation experiments.

Keywords: gravity unloading; flexible rope; creep; spacecraft; ground microgravity simulation experiment

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-09-25

基金项目: 上海市科委科技计划项目 (编号: 20DZ2280800)

引用格式: 王炜, 杨帅, 薛家宝, 等. 空间飞行器重力卸载用弹力绳特性试验研究[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(5): 644-651

WANG W, YANG S, XUE J B, et al. Test study on the characteristics of flexible rope for gravity unloading of spacecraft[J].

Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(5): 644-651

0 引言

在航天器地面微重力模拟试验中,常用悬吊法^[1]模拟载荷失重的自由状态,为了降低悬吊装置对载荷动力学性能的影响,提高模拟自由状态的精度,悬吊装置中如弹力绳等柔性元件要满足蠕变小和纵向频率低等要求^[2],因此须测试柔性元件的性能,以根据不同使用场景选择最适合的柔性元件。Hasselman 等^[3-4]使用3个悬索形成一个倒三角体连接到测试件上,配合扭簧实现对航天器的微重力模拟;还讨论了弹力绳阻尼和摩擦对三维微重力模拟系统的影响;Cooley 等^[5]认为随着空间机构的尺寸变大,模态频率变低,需要先进悬挂系统(ASD)进行地面测试,试验中弹力绳的纵向频率为0.1~0.25 Hz;Kienholz 等^[6]通过用2个纵向频率为0.1~0.2 Hz的弹簧制成准零刚度系统来卸载卫星的重力。以上方案可实现弹力绳纵向频率较低的要求,但对于大质量航天器的卸载,因弹力绳承载质量低而具有一定局限性,所以 Steire 等^[7]在微振动试验中采用4组并联的柔性弹簧模拟自由边界状态,Remedia 等^[8]使用了类似的四点悬吊方案。

我国学者在应用悬吊法进行空间载荷重力卸载时,多采用具有较低纵向频率的悬吊装置来实现载荷自由状态在地面的模拟。马超等^[9]在微重力模拟试验中,为避免悬吊装置的振动引入了上隔振器,选用纵向频率低于1 Hz的悬吊弹簧,并粘贴PVC胶带以增加其阻尼效果;姚科等^[10]在模态试验中,为充分模拟基频小于2 Hz的小型柔性可展开机构失重状态,用绳索和柔性弹簧进行重力卸载;吴松等^[11]通过悬吊法低频模态试验,建立了垂直和水平方向等效理论模型,认为悬吊法受附加质量块的影响,纵向频率测试值小于真实值;汤波等^[12]通过对火箭的模态试验分析,讨论了悬吊工装长度和线密度对振型和频率的影响;Lin 等^[13]采用柔性悬吊装置对载荷进行重力卸载,使用纵向频率为0.114 Hz的准零刚度系统进行了微振动测试。但是,目前未见重力卸载用弹力绳的造型,以及其刚度、重力卸载频率、蠕变与负载质量关系的相关研究。

本文针对空间飞行器重力卸载时所用弹力绳,基于经典的悬吊法设计了测试装置,以获得不同型

号弹力绳的重力卸载特性,为工程实践中弹力绳的选型提供参考。

1 弹力绳特性测试方法

1.1 弹力绳测试装置

使用悬吊法对弹力绳进行测试,测试装置由行车、吊钩、测力传感器、被测弹力绳、砝码和数据采集系统组成,如图1所示。其中:测力传感器为HBM公司的产品,其量程为1 kN,测量精度为1 N;砝码为5 kg和2.5 kg双钩标准砝码;数据采集系统由dSPACE系统和上位机组成。测试原理为:被测弹力绳通过转接工装悬挂于测力传感器下端,弹力绳下端连接砝码;通过增加砝码的重量来模拟弹力绳所提供的卸载力;由测力传感器测量弹力绳的动态拉力,该数据由数据采集系统采集并显示;与弹力绳并行悬挂一个测量长度为10 m、精度为1 mm的卷尺,用于测量弹力绳的伸长变形量。

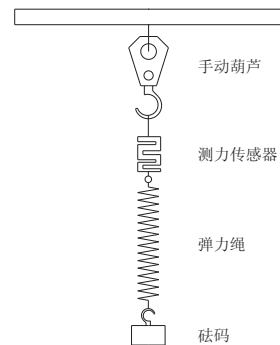


图1 弹力绳测试原理

Fig. 1 Principle of flexible rope testing

1.2 刚度与频率测试

橡胶材料的弹力绳其刚度具有非线性特性^[14-15],工程中可以采用试验的方法来选择合适的弹力绳。当承受一定质量的负载时,弹力绳通过伸长变形提供拉应力来实现重力卸载。在小扰动范围内,固定质量的弹力绳试验系统可认为是线性单自由度质量-弹簧系统;当多根弹力绳并联卸载重力时,负载质量在每根弹力绳上平均分配。设有 n 根弹力绳并联,并且每根弹力绳上分配的质量一致,则弹力绳的特性可表示为

$$k = \frac{\Delta m \cdot g}{\Delta l}, \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{nk}{nm}} = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi f. \quad (2)$$

式中: k 为弹力绳的平均静刚度; Δm 为测试中砝码变化质量; Δl 为弹力绳的长度变化量; ω 和 f 分别为弹力绳-负载质量单自由度振动系统的纵向角频率和纵向频率; m 为单根弹力绳的负载质量; n 为弹力绳的根数。

由以上理论可得, 如果单根弹力绳悬吊相应质量时的静态频率满足试验要求, 则采用同型弹力绳并联吊装后的静态频率同样满足要求。

刚度测试时, 先记录弹力绳的初始长度; 然后在自由端以 2.5 kg 或 5 kg 为步长悬挂载荷, 待 5 min 稳定后, 测量并记录载荷质量以及弹力绳的长度, 计算相邻两步力传感器的数据变化量及弹力绳长度变化量, 由此可以得到弹力绳在此质量下的平均静刚度。

弹力绳重力卸载的动态频率则是通过测量负载质量在自由振荡情况下的力传感器数据, 然后进行频谱分析的方法获得。将载荷下拉 10 mm 释放, 弹力绳将处于衰减振荡状态, 此时力传感器的时域输出数据如图 2(a) 所示; 对测得数据进行频谱分析, 如图 2(b) 所示, 可得到该负载下的纵向频率特性。每种尺寸弹力绳选用多根开展测试, 每根弹力绳的测试不少于 3 次, 将结果取平均值记录。

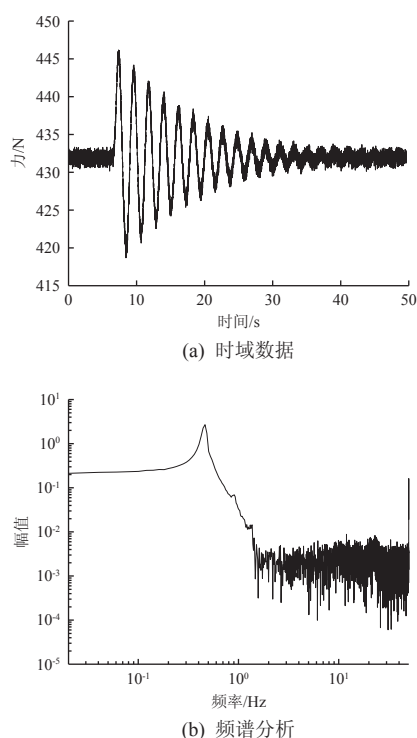


图2 力传感器采集数据

Fig. 2 Data acquisition by the force sensor

1.3 蠕变特性测试

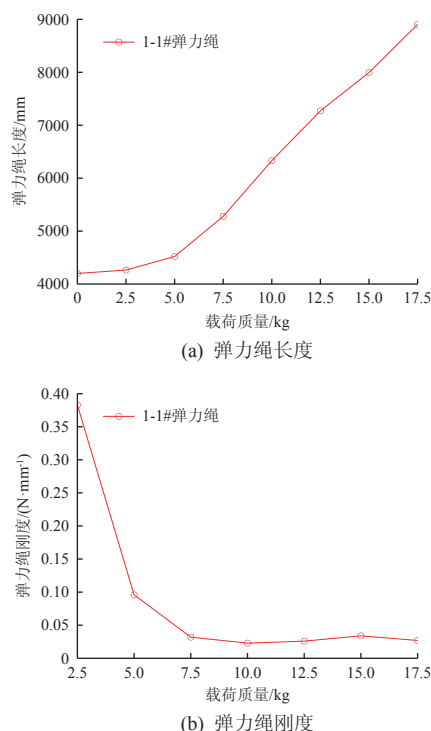
根据弹力绳刚度与频率测试的结果, 可以获得弹力绳纵向频率为最小值时的载荷质量, 将其视为重力卸载时弹力绳的承重; 将此载荷加载到弹力绳上, 然后记录弹力绳在不同时刻的长度, 从而获取弹力绳的蠕变性能; 同时选择某些时刻进行纵向频率测试, 可以获取弹力绳蠕变对纵向频率的影响。

2 弹力绳特性测试结果

2.1 刚度与频率

弹力绳材料为天然橡胶, 为对比研究不同直径和初始长度弹力绳的重力卸载特性, 且考虑试验现场的吊装高度, 本文选择 $\phi 10 \text{ mm} \times 4 \text{ m}$ 、 $\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ m}$ 、 $\phi 10 \text{ mm} \times 4 \text{ m}$ 对折、 $\phi 15 \text{ mm} \times 2 \text{ m}$ 、 $\phi 18 \text{ mm} \times 2 \text{ m}$ 、 $\phi 15 \text{ mm} \times 2.5 \text{ m}$ 和 $\phi 15 \text{ mm} \times 3 \text{ m}$ 共 7 种尺寸的弹力绳分 7 组进行试验。

图 3 为 $\phi 10 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的弹力绳 (编号为 1-1#) 的长度、刚度和频率测试结果。可见: 该种弹力绳在载荷质量为 10 kg 和 12.5 kg 时, 纵向频率可以达到 0.3 Hz; 在载荷质量为 17.5 kg 时的弹力绳总长度为 8906 mm, 说明弹力绳的刚度较弱。由于试验中单根弹力绳的卸载质量小, 卸载相同质量载荷时需要多根弹力绳, 有一定的局限性, 所以只做了一组试验。



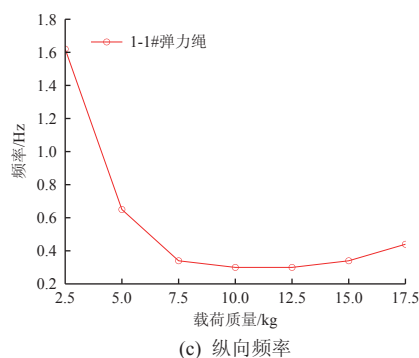
图3 $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ 弹力绳长度、刚度和频率测试结果Fig. 3 Testing results of length, stiffness and frequency of a $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ flexible rope

图4所示为3组 $\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 的弹力绳(编号分别为2-1#、2-2#和2-3#)的长度、刚度和频率测试结果。通过对比可以看出:3组弹力绳特性随载荷质量的变化规律基本一致;该种弹力绳在负载为10 kg时,刚度和纵向频率相对较小,最小纵向频率区间为0.40~0.43 Hz,总长度约3250 mm。

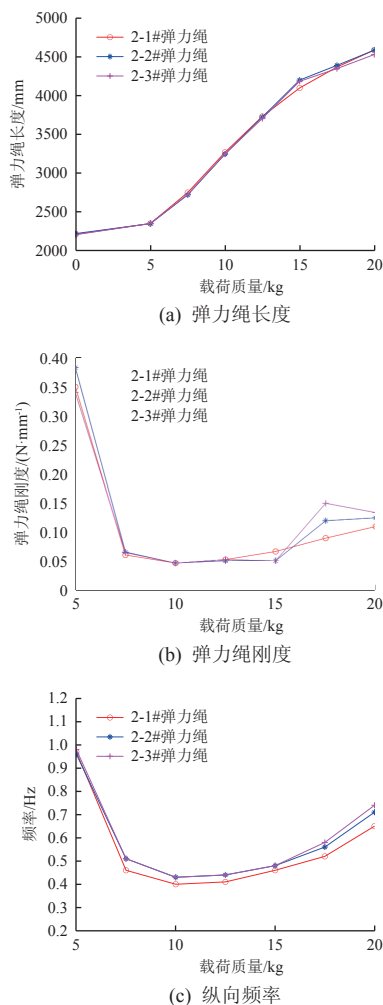
图4 $\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 弹力绳长度、刚度和频率测试结果Fig. 4 Testing results of length, stiffness and frequency of $\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ m}$ flexible ropes

图5所示为5组 $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ 对折的弹力绳(编号分别为3-1#、3-2#、3-3#、3-4#和3-5#)的长度、刚度和频率的测试结果。该种弹力绳为 $\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 类型的并联形式。由图可见:在负载20~22.5 kg时,弹力绳的刚度和纵向频率相对较小,最小纵向频率区间为0.42~0.43 Hz;在负载22.5 kg时弹力绳的总长度约3400 mm。

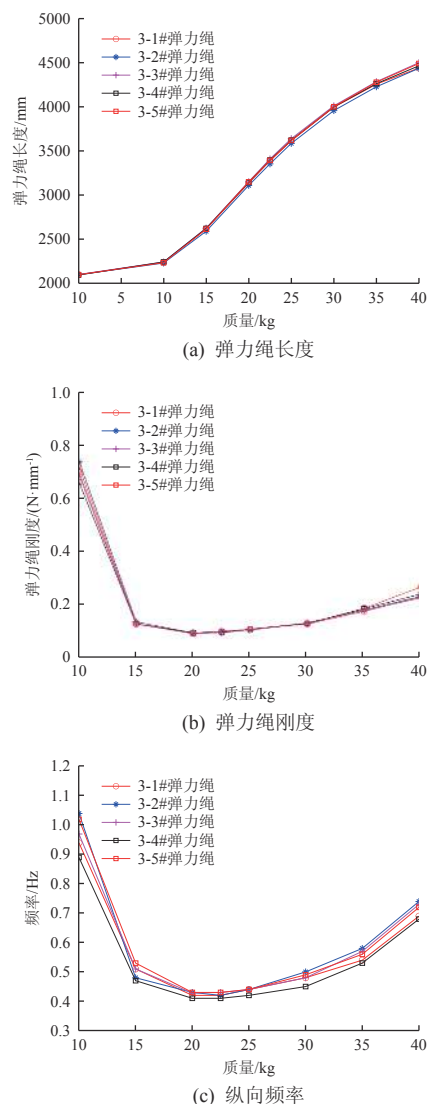
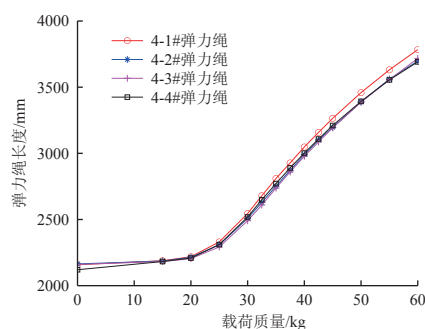
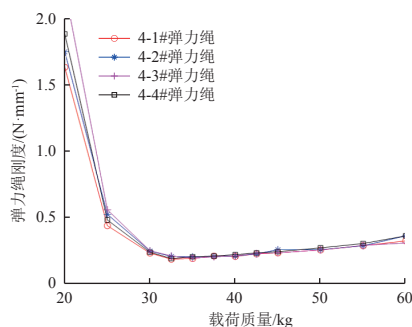
图5 $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ 对折弹力绳长度、刚度和频率测试结果Fig. 5 Testing results of length, stiffness and frequency of $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ flexible ropes folded in half

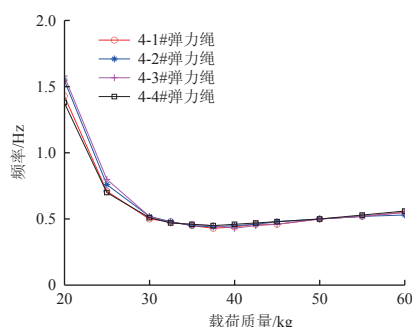
图6所示为4组 $\phi 15\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 的弹力绳(编号为4-1#、4-2#、4-3#和4-4#)的长度、刚度和频率测试结果。可见:该类型弹力绳在负载37.5~40 kg时,刚度和纵向频率相对较小,最小纵向频率区间为0.43~0.45 Hz;弹力绳在负载40 kg时的总长度约为3000 mm。



(a) 弹力绳长度



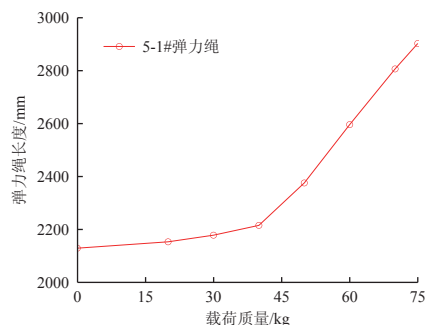
(b) 弹力绳刚度



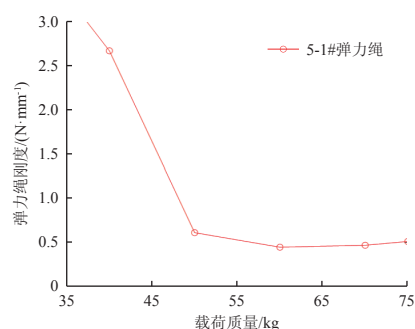
(c) 纵向频率

图6 $\phi 15\text{ mm} \times 2\text{ m}$ 弹力绳长度、刚度和频率测试结果
Fig. 6 Testing results of length, stiffness and frequency of $\phi 15\text{ mm} \times 2\text{ m}$ flexible ropes

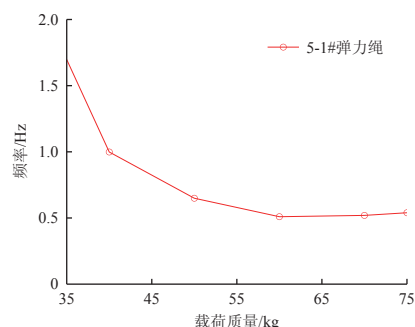
图7所示为1组 $\phi 18\text{ mm} \times 2\text{ m}$ 的弹力绳(编号为5-1#)的长度、刚度和频率测试结果。该类型弹力绳在60~70 kg负载的情况下,最小纵向频率区间范围在0.51~0.52 Hz,纵向频率偏大,因此只做一组测试,以与其他型号弹力绳测试结果对比。弹力绳在70 kg负载情况下的总长度约2806 mm。



(a) 弹力绳长度



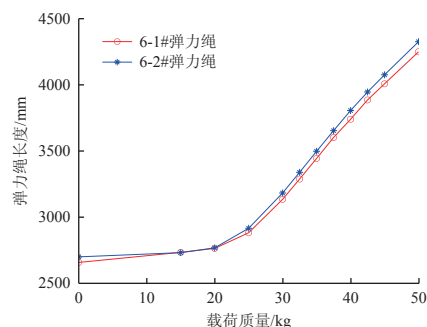
(b) 弹力绳刚度



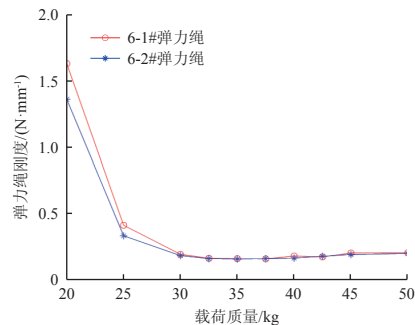
(c) 纵向频率

图7 $\phi 18\text{ mm} \times 2\text{ m}$ 弹力绳长度、刚度和频率测试结果
Fig. 7 Testing results of length, stiffness and frequency of a $\phi 18\text{ mm} \times 2\text{ m}$ flexible rope

图8所示为2组 $\phi 15\text{ mm} \times 2.5\text{ m}$ 的弹力绳(编号为6-1#、6-2#)的长度、刚度、频率测试结果。该类型弹力绳在负载为37.5~42.5 kg时的刚度和纵向频率相对较小,最小纵向频率为0.43 Hz。弹力绳在40 kg负载情况下的总长度约3800 mm。



(a) 弹力绳长度



(b) 弹力绳刚度

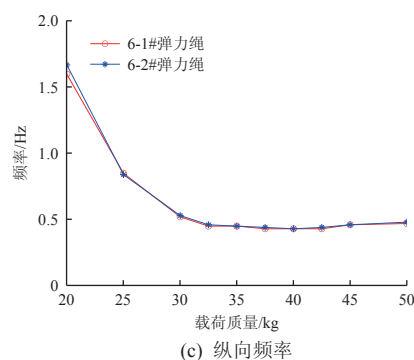


图8 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳长度、刚度和频率测试结果
Fig. 8 Testing results of length, stiffness and frequency of $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ flexible ropes

图9所示为1组 $\phi 15\text{ mm}\times 3\text{ m}$ 的弹力绳(编号为7-1#)的长度、刚度和频率测试结果。该种弹力绳在负载37.5~40 kg时的刚度和纵向频率相对较小,最小纵向频率为0.4 Hz;弹力绳在负载40 kg时的总长度约为4500 mm。

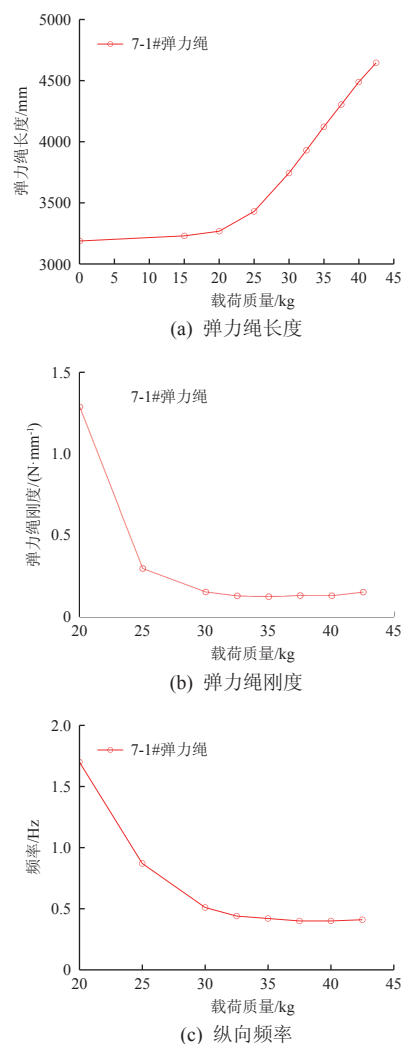


图9 $\phi 15\text{ mm}\times 3\text{ m}$ 弹力绳长度、刚度和频率测试结果
Fig. 9 Testing results of length, stiffness and frequency of a $\phi 15\text{ mm}\times 3\text{ m}$ flexible rope

7 种类型弹力绳在纵向频率最小时的负载质量、刚度和拉伸长度如表1所示。可以看出:在相同初始长度下,弹力绳的直径越大,其最大可卸载质量和最低纵向频率会增大;直径相同的弹力绳,其初始长度越长,则最低纵向频率越低,而其负载质量基本保持不变;对比 $\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 和 $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ 对折2组数据,弹力绳对折后其最大可卸载质量增加了2倍左右,承受的载荷相当于2个相同长度的弹力绳并联,但纵向频率基本一致。

表1 7种弹力绳的频率和刚度测试结果

Table 1 Frequency and stiffness testing results of seven kinds of flexible ropes

弹力绳型号	最低纵向频率/Hz	载荷/kg	刚度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	拉伸长度/mm
$\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$	0.30	10~12.5	0.026	8906
$\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ m}$	0.40~0.43	10	0.047	3250
$\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ 对折	0.42~0.43	22.5	0.097	3400
$\phi 15\text{ mm}\times 2\text{ m}$	0.43~0.45	40	0.209	3000
$\phi 18\text{ mm}\times 2\text{ m}$	0.51~0.52	60~70	0.456	2806
$\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$	0.43	37.5~42.5	0.169	3800
$\phi 15\text{ mm}\times 3\text{ m}$	0.40	37.5~40	0.133	4500

测试过程中发现,弹力绳的动态频率与静态频率有差别。表2给出了 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳在不同负载下的动态频率和静态频率数据,可以看出,相同质量负载下的动态频率要大于静态频率。这是因为动态频率是根据图2所示的力传感器数据分析得到,而静态频率是由静刚度与相对应的质量计算获得。产生这种差别的原因是橡胶分子间存在内摩擦力,使得弹力绳的应变相对于橡胶材料的内应力有一定的滞后^[16-17]。动态频率大于静态频率是橡胶材料本身的特性,与弹力绳的尺寸无关,通常动态、静态频率之比在1.2~1.6之间^[18]。本文测试的弹力绳的频率在该范围内。

表2 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳测试结果

Table 2 Testing results of a $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ flexible rope

负载/kg	刚度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	静态频率/Hz	动态频率/Hz
20	1.63	1.44	1.6
25	0.41	0.64	0.85
30	0.19	0.40	0.52
35	0.157	0.34	0.45
40	0.177	0.33	0.43
45	0.2	0.34	0.46

2.2 蠕变特性

$\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳的承载能力与刚度特性满足选型要求,结合厂房吊高便于测量的因素分

析,选取该型号弹力绳(编号为6-3#)做蠕变测试。负载40 kg时的测试结果如图10所示。可以看出:在开始阶段弹力绳的蠕变变化较快,100 min后蠕变量相对较小,蠕变稳定;在100 min左右的蠕变率为0.1~0.15 mm/min,可在蠕变稳定后开展后续的试验工作。

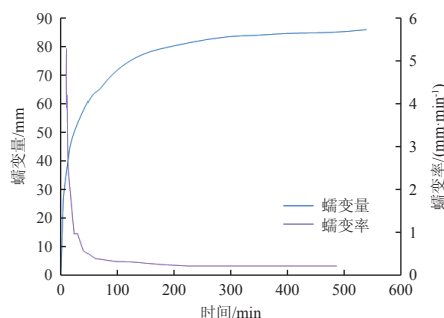


图10 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳蠕变特性曲线

Fig. 10 Creep characteristic curve of a $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ flexible rope

在弹力绳蠕变的过程中开展了纵向频率测试,结果见表3。可以看出,随蠕变时间的增长,弹力绳纵向频率会有少许升高,变化较小,在合理范围内。

表3 弹力绳动态频率随蠕变时间变化数据

Table 3 Dynamic frequency varies with creep time for the flexible rope

时间/min	25	45	75	115	255	475
动态频率/Hz	0.447	0.450	0.452	0.457	0.457	0.452

2.3 并联测试结果

选用3根 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳进行并联测试,总负载为120 kg,单根平均负载为40 kg,获得的频率为0.43 Hz。表4为单根弹力绳负载40 kg的测试数据。对比表2中数据可以看出,在并联时单根平均负载与单根测试负载一致的情况下,并联弹力绳的动态频率与单根弹力绳的动态频率一致。因此单根弹力绳的特性可以决定多根并联时的动态特性。

表4 3根 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳并联测试的频率和刚度数据

Table 4 Frequency and stiffness values of three $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ flexible ropes in parallel

编号	负载/kg	长度/mm	刚度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	频率/Hz
6-1#	40	3742	0.177	0.43
6-2#	40	3808	0.161	0.43

2.4 温度对弹力绳特性的影响

测试中发现,相同尺寸的弹力绳在不同时间段获得的纵向频率不一致。考虑到弹力绳是橡胶制

品,且所做测试跨越了夏季和秋季,夏季高温约为35℃,秋季低温约为15℃,故认为温度对弹力绳特性有影响。为此先采用温控箱对 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳进行温度控制,每种温度保持24 h,再将弹力绳取出进行频率测试。由于频率测试是在外部,弹力绳温度不能持久保持,无法进行不同质量负载的测试,所以只进行负载40 kg时的动态频率测试,如表5所示。可以看出,温度对弹力绳特性有较大的影响,弹力绳的动态频率随温度的升高而降低。

表5 $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 弹力绳动态频率随温度变化规律

Table 5 Dynamic frequency of a $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ flexible rope against temperature

温度/℃	15	20	25	30
频率/Hz	0.47	0.45	0.44	0.43

3 弹力绳的选型讨论

为了在地面模拟载荷处于微重力环境下的自由边界状态,单自由度悬吊系统的动态频率通常为载荷结构最低模态频率的1/4。某型号与工装总重达4 t,结构最低频率为1.8 Hz,则满足要求的弹力绳-负载系统的纵向频率应低于0.45 Hz;且受限于厂房的吊装高度,弹力绳伸长后的总长不能超过3.2 m。以此为技术要求讨论弹力绳选型。

由表1中数据可看出,除 $\phi 18\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 弹力绳外,其他6种弹力绳均可满足频率要求。但是, $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ 弹力绳在单根负载12.5 kg时,需要的弹力绳数量为320根,总伸长长度达到8 906 mm,需要弹力绳数量多且不满足长度要求, $\phi 10\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 和 $\phi 10\text{ mm}\times 4\text{ m}$ 对折两种型号弹力绳同样如此; $\phi 15\text{ mm}\times 2.5\text{ m}$ 和 $\phi 15\text{ mm}\times 3\text{ m}$ 弹力绳单根负载质量为40 kg时所需数量少,但长度不满足要求;只有 $\phi 15\text{ mm}\times 2\text{ m}$ 弹力绳在负载40 kg时既满足频率要求,又满足长度要求。

4 结束语

本文对空间飞行器微重力模拟试验中所需要的弹力绳进行测试,获得了弹力绳的静刚度、长度、动态频率与卸载重量的变化关系,重力卸载过程中弹力绳的蠕变量、蠕变率随时间的变化关系,以及蠕变后弹力绳动态频率的变化等重力卸载特性,可为后续地面微重力模拟试验的载荷重力卸载提供可靠依据。

参考文献 (References)

- [1] 从强. 空间机构地面重力补偿设备跟踪研究[J]. [航天器环境工程](#), 2012, 29(1): 92-99
CONG Q. An investigation into gravity compensation equipment for space mechanisms[J]. [Spacecraft Environmental Engineering](#), 2012, 29(1): 92-99
- [2] 路波. 零重力环境模拟气动悬挂系统的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 1-7
- [3] HASSELMAN T, QUARTARARO R. A suspension system for large-amplitude dynamic testing in a simulated weightless environment[C]//Smart Structures and Materials 1993: Smart Structures and Intelligent. 1993: 1063-1077
- [4] HASSELMAN T, ANDERSON M C. Development of a large amplitude 3D microgravity suspension system[C]//38th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Kissimmee, FL, USA, 1997: 1566. doi:10.2514/6.1997-1566
- [5] COOLEY V M, GIUNTA A A. Laboratory evaluation of two advanced suspension devices for ground vibration testing of large space structures[C]//33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Dallas, TX, USA, 1992: 2334
- [6] KIENHOLZ D A, CRAWLEY E F, HARVEY T J. Very low frequency suspension systems for dynamic testing[C]//30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Mobile, AL, USA, 1989: 1194
- [7] STEIRE F, RUNTE T, MONSKEY A, et al. Managing the microvibration impact on satellite performances[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 162(9): 461-468
- [8] REMEDIA M, AGLIETTI G S, RICHARDSON G, et al. Integrated Semiempirical Methodology for Microvibration Prediction[J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(5): 1236-1250
- [9] 马超, 刘磊, 杨鸿杰. 微重力模拟装置中悬吊弹簧局部模态动力学建模与试验研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(4): 279-285
MA C, LIU L, YANG H J. Research and experiment on local modal vibration of suspension spring of a microgravity simulation device[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(4): 279-285
- [10] 姚科, 韦娟芳, 徐明龙, 等. 星载柔性可展桁架结构的模态试验与分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(2): 327-332
YAO K, WEI J F, XU M L, et al. Improved wave cluster method for rotor fault diagnosis[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(2): 327-332
- [11] 吴松, 郭其威, 臧旭, 等. 悬吊式模态试验系统基频测试误差分析[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(19): 74-78
WU S, GUO Q W, ZANG X, et al. Error analysis for fundamental frequency measurement of a suspended modal test system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(19): 74-78
- [12] 汤波, 范瑞祥, 潘忠文, 等. 悬挂工装对运载火箭模态试验影响分析[J]. [宇航学报](#), 2017, 38(12): 1354-1360
TANG B, FAN R X, PAN Z W, et al. Effects of suspension rope on modal experiment of rockets[J]. [Journal of Astronautics](#), 2017, 38(12): 1354-1360
- [13] LIN L, LI Y, LI W, et al. Image motion and experimental study of a 0.1" space pointing measuring instrument for micro-vibration conditions[J]. [Chinese Journal of Aeronautics](#), 2023, 36(2): 191-200
- [14] 于海富. 橡胶材料本构方程的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 1-4
- [15] 唐利芳, 陈娜娜, 石荣海, 等. 拉伸方式对橡皮筋的弹力与伸长关系的影响[J]. *物理教师*, 2013, 34(4): 43-44
TANG L F, CHEN N N, SHI R H, et al. The influence of stretching mode on the relationship between elasticity and elongation of rubber band[J]. *Physics Teacher*, 2013, 34(4): 43-44
- [16] 李宇明, 彭威, 白鸿柏, 等. 金属橡胶材料宏观和细观力学模型[J]. [机械工程学报](#), 2005(9): 38-41
LI Y M, PENG W, BAI H B, et al. Mechanical model of metal rubber material in macro and micro level[J]. [Journal of Mechanical Engineering](#), 2005(9): 38-41
- [17] 李宇明, 郑坚, 白鸿柏. 金属橡胶材料的动态力学模型[J]. [材料研究学报](#), 2003(5): 499-504
LI Y M, ZHENG J, BAI H B. Dynamic mechanics model of metal-rubber materials[J]. [Chinese Journal of Materials Research](#), 2003(5): 499-504
- [18] 张文飞. 动力总成橡胶悬置本构关系与优化设计[D]. 北京: 清华大学, 2012

(编辑: 王 洋)

一作简介: 王 炜, 研究员, 研究方向为航天器制造与试验。

*通信作者: 黄顺舟, 研究员, 研究方向为航天器柔性智能制造装备研发。