

# 运输包装箱的多载荷减振设计研究

徐波涛<sup>1,2</sup>, 刘玉刚<sup>1,2</sup>, 方志开<sup>1,2</sup>, 吕景辉<sup>1,2</sup>, 喻新发<sup>1</sup>

(1.北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;  
2.北京市航天产品智能装配技术与装备工程技术研究中心, 北京 100094)

**摘要:** 目的 考虑降低成本, 提高效率, 面向卫星产品型谱的通用式包装箱设计势在必行。如何确定和选用一种适应于不同载荷特性的减振方案, 成为航天器运输减振设计的关键点和技术难点。**方法** 针对这一问题, 分析了目标产品的尺寸接口和质量特性, 对卫星不同舱段运输工况进行了振动特性分析和试验。**结果** 在此基础上设计了一种适用于3种卫星舱体、4种运输状态通用的包装箱减振分系统, 并对装载尺寸参数进行了优化。系统一阶垂向频率不高于5.8 Hz。**结论** 运输试验数据表明新型减振系统对航天产品的减振效果满足要求。

**关键词:** 运输; 包装箱; 减振设计; 兼容性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.007

**中图分类号:** V465 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)08-0045-06

## Vibration Damping Design for Multi-load Cargo Container

XU Bo-tao<sup>1,2</sup>, LIU Yu-gang<sup>1,2</sup>, FANG Zhi-kai<sup>1,2</sup>, LYU Jing-hui<sup>1,2</sup>, YU Xin-fa<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China; 2. Beijing Engineering Research Center of the Intelligent Assembly Technology and Equipment for Aerospace Product, Beijing 100094, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a kind of general container for satellite product to reduce cost and improve efficiency in view of how to determine and select a damping scheme suitable for different load characteristics has become the key point and technical difficulty in spacecraft transportation vibration damping design. Aiming at this problem, the size interface and weight of the target products were analyzed, and the vibration feature of different transporting conditions of the satellite was investigated and tested. On basis of this, a general shock absorption subsystem for three kinds of satellites and four kinds of transportation conditions was designed, and the loading size parameters were optimized. The first-order vertical fundamental frequency of the system was less than 5.8 Hz. The transportation test data show that the vibration damping effect of the new vibration damping system for aerospace products meets the requirements.

**KEY WORDS:** transportation; container; vibration damping; compatibility

收稿日期: 2019-11-10; 修订日期: 2019-12-16

**Received:** 2019-11-10; **Revised:** 2019-12-16

**基金项目:** 国防基础科研项目 (JCKY2018203B009)

**Fund:** National Defense Basic Scientific Research Project (JCKY2018203B009)

**作者简介:** 徐波涛 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器工艺装备设计技术。

**Biography:** XU Bo-tao(1982—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: spacecraft assembly, integration and test (AIT).

**通讯作者:** 刘玉刚 (1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为宇航设计及制造技术。

**Corresponding author:** LIU Yu-gang(1973—), Male, Senior engineer, Research focus: spacecraft assembly, integration and test (AIT).

运输是航天器寿命全周期的重要组成部分。当运输全频段中存在的稳态激励与卫星-包装箱的某一固有频率相等时,可能会出现共振现象,共振会损坏卫星上的振动敏感部件<sup>[1]</sup>。航天器运输经历的是连续力学载荷,这种载荷的特点是以随机振动为主(激励频率范围约为5~200 Hz),兼有周期性载荷。另外,个别的冲击超限载荷也不可避免<sup>[2]</sup>。参照卫星设计的力学环境条件,卫星界面处的振动激励一般要求不大于0.6 g,冲击激励不大于1.0 g,在实际公路运输中,振动要求一般都可满足,但往往会记录若干次超过1.0 g的冲击事件。

运载火箭发射飞行过程所产生的动力学环境是卫星结构设计的主要依据,而在卫星地面运输过程中受到振动载荷是卫星设计中容易被忽略的环节。为了避免运输载荷超限损伤航天器加速度敏感设备或元件,航天器运输时一般在包装箱内设置了减振装置。卫星包装箱系统因其可靠性、尺寸等方面的约束,一般采用固定基频的减振系统<sup>[3-4]</sup>。

随着型号数量的增长与型谱类型的增加,卫星包装箱种类和数量不可能无限制地同比例增加。考虑降低成本,面向卫星产品型谱的通用式包装箱设计势在必行。如何确定和选用一种适应于不同振动激励特性的减振方案,成为航天器运输减振设计的关键点和难点<sup>[5-6]</sup>。文中针对这一问题,分析了目标产品的尺寸接口和质量特性,对卫星不同舱段运输工况进行了振动特性分析和试验,在此基础上设计了一种适用于3种卫星舱体、4种运输状态通用的包

装箱减振分系统,并对装载尺寸参数进行了优化。试验数据表明,新型减振系统满足航天产品的运输设计要求。

## 1 承载接口设计

包装箱针对三类不同卫星的单个舱体进行设计,三类舱体运输的共同特点是均装有保持架,保持架的作用是保持舱体的结构强度和精度。保持架结构底部框架均为两排通孔,与包装箱承载面间使用紧固件连接,三类舱体保持架两排孔的尺寸均不相同。为了MEO\IGSO\GEO三类卫星保持架运输支撑接口在同一个适配器的兼容布置,需要精确设计适配器尺寸。为确保和拓展批产载荷舱包装箱的通用性,要求包装箱内的运载物承载适配器上必须配置通用化支撑接口,适应各类卫星运载物的力学约束条件,同时满足上述三类保持架运输支撑接口匹配要求,而且对于尺寸比较小的MEO舱体,任务要求既允许单个运输,又要能够两个一起运输。

在以上条件的基础上,适配器还应满足以下约束:

- 1) 尺寸不能超过运输限制;
- 2) 便于装配、拆卸操作;
- 3) 适配器整体刚度大于运载物低阶模态刚度。

另外,在减振装载台面尺寸较大的情况下,为使振动传感器准确表征系统整体减振后的加速度,传感器应布置于局部刚度较优的位置。满足以上条件的结构设计形式如图1所示。

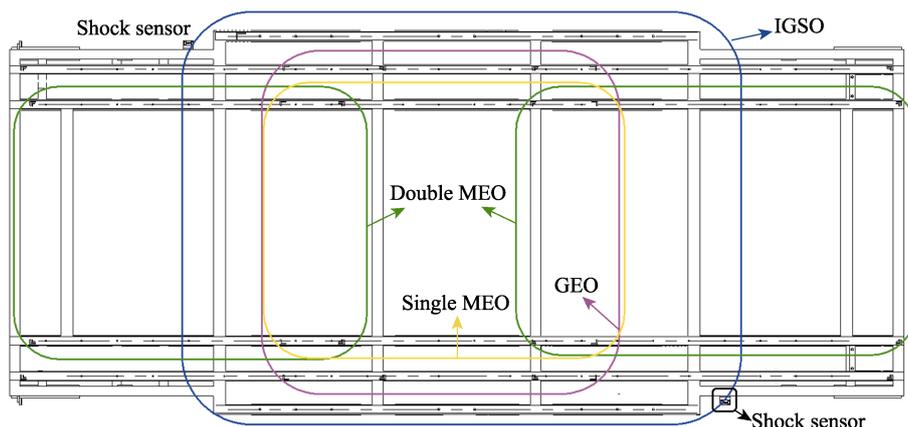


图1 兼容式运输支撑接口

Fig.1 Compatible transportation support interface

## 2 装载台静力分析

各类运输载荷外形基本参数见表1。

约束及载荷施加:固定约束在装载台下方六个区域,并在黑色区域内均匀加载合力1.6 t,如图2所示。

当约束在装载台六个区域时,1.6 t载荷加上装载台自身重力作用,分析结果如图3、图4所示。其中,图3为变形云图,最大变形量为0.12 mm,小于5 mm。图4为等效力云图,在上下台架部位最大应力为92.2 MPa,装载台所用钢材 $\sigma_b = 520$  MPa,装载台静力安全系数达到5.6。

表 1 各类运输载荷外形基本参数对照表  
Tab.1 Comparison of basic parameters of various transported loads

舱体类型	MEO	IGSO	GEO	双 MEO	包络值	
运输质量/kg	590	1450	650	1250	1500	
外形尺寸/mm	X	2506	3056	2630	5412	3056
	Y	1900	2428	1950	2428	2428
	Z	1942	2882	1870	1942	2882
横向孔距/mm	1470	2324	1910	1470	—	
纵向孔距/mm	200	200	200	200/400	200	
运输纵向基频/Hz	25.0	22.0	22.0	—	22.0	

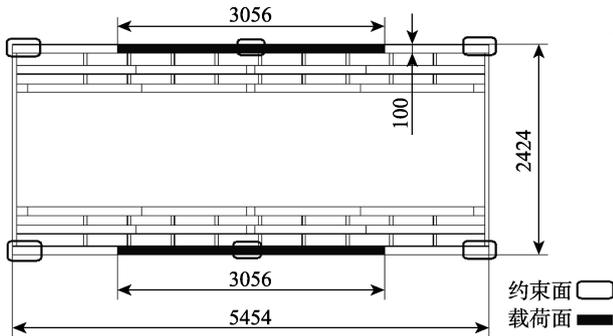


图 2 装载台力学分析约束及载荷示意

Fig.2 Mechanical analysis constraint and load indication of loading platform

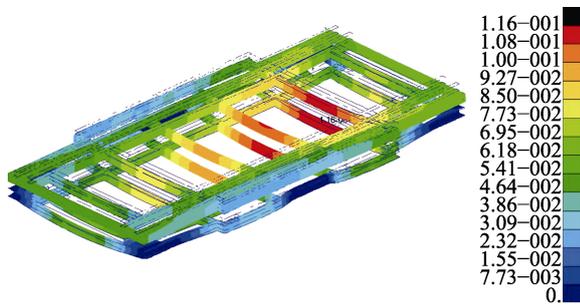


图 3 变形分析云图

Fig.3 Chart of deformation distribution



图 4 Von Mises 等效应力分布云图

Fig.4 Chart of von mises stress distribution

### 3 减振方案设计

为了减小运输过程振动冲击对产品造成的影响，

包装箱减振器的选择应避免接近产品的一阶基频，从而保证减振后，传递到产品的振动和冲击加速度满足既定要求。

在继承成熟减振方案的前提下，同时应考虑节省包装箱内空间，因此选用包装箱内部减振的方式。根据装载产品的不同配置，灵活调整减振模块数量。

航天产品公路运输的均方根加速度值 ( $g_{rms}$ ) 为 0~0.2，小于产品要求的损伤阈值。要评估运输振动对产品的影响，重点在运输中偶发的力学事件上，例如过铁路道口、减速带、减速提示标线等造成的输入<sup>[7]</sup>。从实地运输试验调查的冲击超限数据可以看出，冲击超限点全部发生在竖直方向（即 Z 向），数据见表 2。因此，运输减振方案优先考虑竖直方向的减振<sup>[8]</sup>。图 5 为航天器运输包装箱的方向示意，图 6 为本文选用的钢丝绳隔振器结构形式。

表 2 实测冲击超限数据 ( Shocklog RD298 )

Tab.2 Measured impact data (Shocklog RD298)

序号	采样率/Hz	X 向/g	Y 向/g	Z 向/g
1	256	0.246	0.366	1.05
2	32	0.84	0.48	1.36
3	64	0.201	0.366	1.13
4	256	0.402	0.456	1.72
5	256	0.231	0.291	1.22
6	128	0.21	0.357	1.19

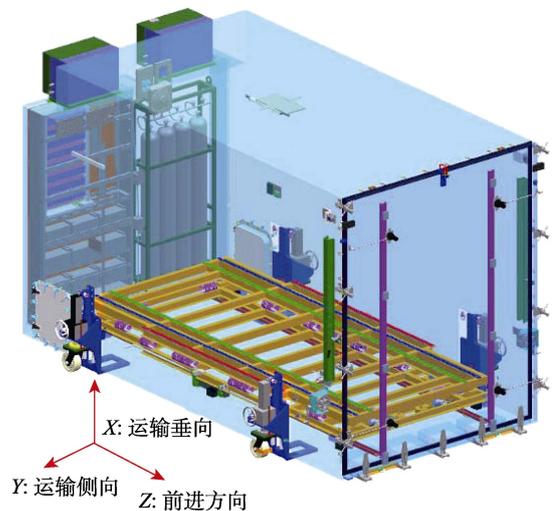


图 5 航天器运输包装箱的方向示意

Fig.5 Direction diagram of spacecraft transportation container

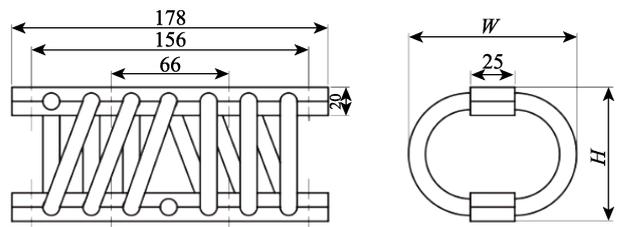


图 6 垂向优先型钢丝绳隔振器

Fig.6 Vertical priority wire rope vibration isolator

钢丝绳隔振器垂向一阶基频  $f_{nz}$  按照式(1)计算:

$$2\pi f_{nz} = \sqrt{k_z \cdot \alpha / M} \quad (1)$$

式中:  $k_z$ : 承载  $M$  下的静刚度, N/mm

$\alpha$ : 动刚度系数(平均动刚度系数  $\alpha=1.5$ )

$M$ : 每组装置承载质量, kg

由式(1)可知,在未达到最大变形量的前提下,增大  $M$  可以降低减振系统的一阶基频。因此,隔振器的实际使用负载一般大于标称负载。环状钢丝绳隔振器刚度与阻尼均非线性<sup>[9]</sup>,应引入动刚度系数修正静刚度,得到工作状态的动刚度进行一阶基频计算,如果直接使用平均静刚度将导致结果不准确<sup>[10]</sup>。

图4给出的运输支撑接口材料为高强度钢材,质量按 720 kg 计。减振器在装载台平面下布置,按图4构型应该对称布置,考虑到每个运输状态的每个舱体的减振效果应接近,由此提出两个备选方案,18个 GGT220-108 或 20个 GGT250-137。按最大包络计算,总质量  $m=2220$  kg。考虑工作状态时两种隔振器的静刚度,不考虑适配器弹性,又由  $M=m/n$  (其中,  $n$  为隔振器个数),可以分别得到两种方案一阶频,见表3。

表3 备选隔振器型号参数

Tab.3 Model parameters of alternative vibration isolators

隔振器型号	GGT220-108	GGT250-137
	方案	方案
方案数量/个	18	20
标称负载/kg	60	66
工作静刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )	190	100
最大动变形/mm	58	90
最大冲击力/kN	4.5	4.8
能容/J	220	250
高度/mm	108	137
计算一阶频/Hz	~10.6	~5.8

又有系统振动传递率:

$$T = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为振动频率比,  $\lambda=f_i/f_n$ ;

$f_i$  为路面干扰频率,  $f_i = \omega/(2\pi)$ ;

$f_n$  为隔振系统固有频率;

$\zeta$  为系统平均阻尼比,在 0.1 到 0.2 之间,取  $\zeta=0.15$ ;

$T$  为振动传递率。

从降低一阶纵向频率的角度<sup>[4]</sup>,选用方案2的减振适用性优于方案1。在方案2下,当  $\lambda \geq 1.4$  时(即输入激励大于 8.2 Hz),进入减振区域;当  $\lambda \geq 3$  时,即输入激励频率不低于 17.4 Hz 时,系统隔振效果在 80% 以上,系统振动隔离设计满足设计要求。在  $\lambda \leq 1.4$  时,即输入激励小于 8.2 Hz 时,路面激励会被隔

振器放大,此时应将运输传感器测得的峰值数据对比卫星随机振动试验的幅值控制条件,判断是否可能损伤卫星结构。

装载台在最大包络下的减振布置方案确定为:装载台通过 20 个钢丝绳减振器与包装箱连接,并装有两个实时监测加速度传感器,一个 ShockLog298 振动与冲击记录仪,监测产品运输全程的振动状态,如图7所示。

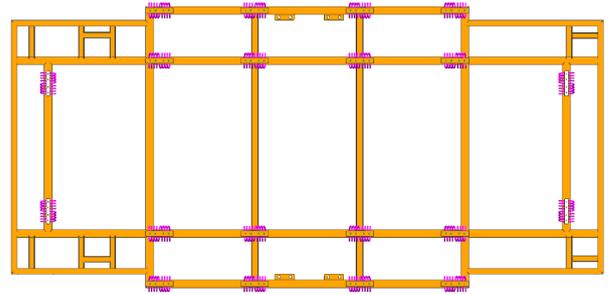


图7 包络减振布置方案

Fig.7 Envelope damping arrangement

参考静力分析一节中对系统施加的载荷和约束,对装载台上台面进行振动传递率分析,仿真结果表明系统振动传递率在路面激励频率在 15 Hz 左右时,系统隔振性能已达 80% 以上。其中,响应数据采用的是图4中振动测点处的响应。利用有限元仿真分析表明,减振系统竖直方向的一阶频在 5 Hz 左右,比表3中的计算结果(5.8)稍小,这主要是由于装载台的台面尺寸较大,刚度受到了削弱,在特定激励下,装载台面下的等效隔振器数量减少,从而使单个隔振器等效承载增加造成的。

根据以上计算,在最大当量减振载荷满足上述减振指标要求的基础上,考虑任务需求,按单 IGSO 装载、两 MEO 装载、单 GEO 以及单 MEO 装载四种典型装载模式快速便捷地设置调整隔振器布局,可以通过增减隔振器的数量来满足不同载荷下的减振要求。

对于双 MEO 和 IGSO,可以共用 20 个隔振器的方案,减少隔振器的重复拆卸工作;用于 GEO 单舱运输时,需要拆除内侧框架 8 处隔振器,采用 12 个隔振器安装于外导轨下的方案;用于 MEO 单舱运输时,需要拆除框架长度方向最外侧 8 处隔振器,采用 12 个隔振器安装于内导轨下方案。在常规任务中,MEO 单舱运输并不常见,所以 20 个隔振器方案的通用性得到了保证。

## 4 试验验证

ShockLog298 冲击记录仪采样率为 1000 Hz,记录运输过程中箱体内的力学环境参数。待运输结束后,把冲击记录仪中的数据导出,对采集的力学

环境进行分析,以超过 1 g 为限值,经包装箱系统减振前,3 次超出振动限值;经包装箱系统减振后,1 次超出振动限值。这说明减振系统工作有效,其中,减振后的超限点及其对应减振前波形如图 8 所示。

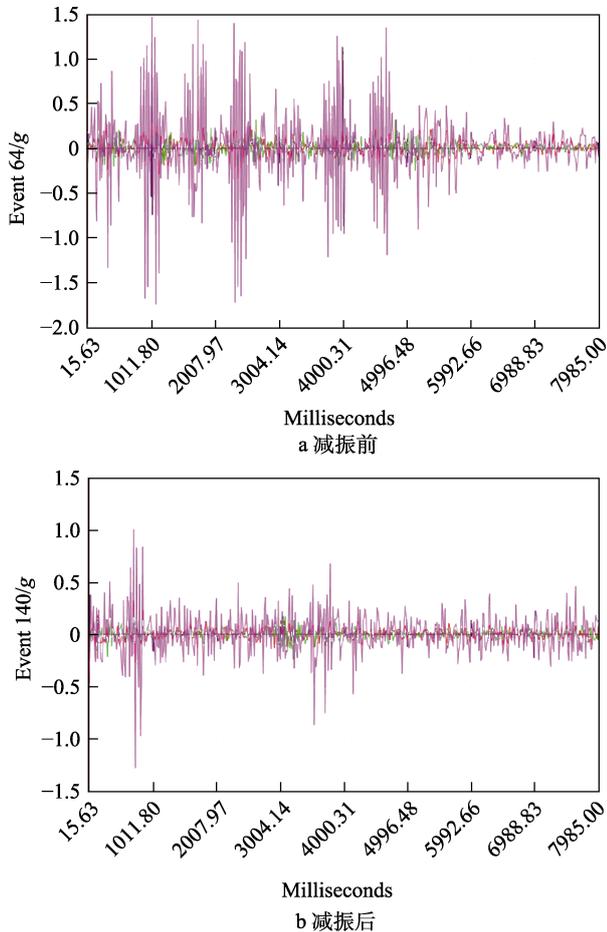


图 8 典型超限点时域信号图(8 s)

Fig.8 Time domain signal diagram of typical overrun point (8 s): a) before damping; b) after damping

根据振动超限瞬态信号特点,对运输超限点进行冲击响应谱变换,得出结论:经冲击响应谱分析,100 Hz 以下时,其等效正弦振动量级不大于 0.3585 g,小于整星试验量级 0.6 g;100 Hz 以上时,其等效正弦振动量级小于 4 g,小于星箭分离试验中的冲击响应,该振动信号对整星无影响。

## 5 结论

根据航天器运输环境特点,分析了目标产品的尺寸接口和质量特性,确定和选用了一种适应于不同载荷特性的减振方案。实现了一种适用于 3 种卫星舱体、4 种运输状态通用的包装箱减振分系统,系统垂向频率不高于 5.8 Hz。运输试验数据表明新型减振系统对航天产品的减振效果满足设计要求。

提出的减振系统可对 8.2 Hz 以上的输入频率实现有效隔振,对于更低频的振动信号,有必要进行进一步研究,通过运输载具滤波、车速控制等途径实现减振。

## 参考文献:

- [1] 肖刚, 郝文字, 张国芬, 等. 航天器空运包装箱的研制及其运输试验评价[J]. 航天器环境工程, 2010(6): 795-799.  
XIAO Gang, HAO Wen-yu, ZHANG Guo-fen, et al. The Development of Containers for Air Transport of Spacecraft and an Evaluation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010(6): 795-799.
- [2] 师立侠, 罗克, 窦仁超, 等. 航天器运输过程中诱发的动力学环境分析[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(3): 250-255.  
SHI Li-xia, LUO Ke, DOU Ren-chao, et al. The Development of Containers for Air Transport of Spacecraft and an Evaluation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(3): 250-255.
- [3] 王志伟, 林深伟. 随机振动下产品包装件动态响应的实验研究和有限元分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 223-229.  
WANG Zhi-wei, LIN Shen-wei. Tests and FE Analysis for Dynamic Responses of Packaged Products under Random Vibration Environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 223-229.
- [4] 范明伟, 魏强, 翁章卓. 一种基于钢丝绳隔振器和动力吸振器组合的隔振系统[J]. 船海工程, 2017, 46(4): 61-64.  
FAN Ming-wei, WEI Qiang, WENG Zhang-zhuo. An Vibration Isolation System Based on Steel Wire Isolator and Dynamic Vibration Absorber[J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46(4): 61-64.
- [5] 宣兆龙, 赵瑾, 刘亚超. 钢丝绳隔振器及其在弹药方舱中的应用[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 79-81.  
XUAN Zhao-long, ZHAO Jin, LIU Ya-chao. Wire Rope Isolator and its Application in Ammunition Shelter[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 79-81.
- [6] 杨强, 师永宁, 杨利. 某机载设备隔振安装设计分析与试验研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(9): 101-106.  
YANG Qiang, SHI Yong-ning, YANG Li. Design Analysis and Experimental Study on Vibration Isolation Installation of an Airborne Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(9): 101-106.
- [7] 董龙雷, 张静静, 赵建平. 基于冲击响应谱的高速火箭橇滑轨路谱分析[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(12): 1170-1174.  
DONG Long-lei, ZHANG Jing-jing, ZHAO Jian-ping. Road Spectrum Analysis of High-speed Rocket Sled Rail Based on Shock Response Spectrum[J]. Journal of

- Southwest Jiaotong University, 2015, 50(12): 1170-1174.
- [8] SRINIVAS P K S, RAIEEV C, SHREE N S, et al. Study of shock isolation by nonlinear wire rope isolators[C]//Proceeding of INCAM 2015, New Delhi: Narosa Publishing House, 2015.
- [9] 张业伟, 方勃, 李松, 等. 整星隔振平台的阻尼非线性对隔振性能影响的物理机理[J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 173-176.  
ZHANG Ye-wei, FANG Bo, LI Song, et al. Physical Mechanism for Effect of Nonlinear Damping of a Whole-spacecraft Vibration Isolation Platform on Its Vibration-isolation Behaviors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 173-176.
- [10] 任永锋, 严玲. 民用飞机机体连接结构动刚度计算分析及试验验证[J]. 装备环境工程, 2018, 15(9): 32-36.  
REN Yong-feng, YAN Ling. Calculation Analysis and Verification of Dynamic Stiffness of Civil Aircraft Fuselage Connecting Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(9): 32-36.