

# 运载火箭随机振动环境试验条件的变带宽设计方法\*

姜人伟<sup>1,2</sup>, 曾耀祥<sup>2</sup>, 潘忠文<sup>2</sup>, 李道奎<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国运载火箭技术研究院北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:**针对运载火箭随机振动环境试验条件提出了基于能量等效思想的变带宽设计方法,通过采用分数倍频程数据处理方法,并确保各个频带内的均方根值与原随机振动环境的均方根值相同,有效解决传统的等带宽随机振动环境试验条件总均方根过高的问题。为了验证所提方法的有效性,通过典型管路产品进行了随机振动响应计算。结果表明,该方法既能够有效地对产品进行考核,又不至于对产品造成过考核。所提变带宽设计方法可为运载火箭随机振动环境条件的合理设计与分析提供有效手段。

**关键词:**运载火箭;随机振动环境;环境试验条件;变带宽

中图分类号:V416 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2022)06-001-05



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Variable-bandwidth design method of the random vibration environmental test condition for launch vehicle

JIANG Renwei<sup>1,2</sup>, ZENG Yaoxiang<sup>2</sup>, PAN Zhongwen<sup>2</sup>, LI Daokui<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** A variable-bandwidth design method based on the principle of energy equivalence was proposed for the random vibration environmental test condition of launch vehicles. By adopting the fractional octave frequency band data processing method and keeping the RMS (root mean square) in every frequency band identical with the one of the original power spectral density, the exorbitant RMS problem of the traditional constant-bandwidth random vibration environmental test condition was avoided. To validate the capability of the method, the random vibration simulations of a typical pipeline were conducted. The results indicate that the method is able to assess the product effectively rather than excessively. The proposed variable-bandwidth design method offers an efficient alternative for the conditions design in the random-vibration environment test of launch vehicles.

**Keywords:** launch vehicle; random vibration environment; environmental test condition; variable-bandwidth

运载火箭在主动段飞行过程中需要承受恶劣的随机振动环境,其主要由两部分构成,一部分是由发动机的机械振动直接传递导致,另一部分是由气动噪声和发动机喷流噪声激起的结构振动。箭上各系统的仪器设备等产品在随机振动环境作用下极易发生破坏,进而导致发射失败。因此,工程师在火箭研制及设计过程中需根据运载火箭飞行随机振动环境遥测数据或地面试验数据制定随机振动环境条件,供各系统及单机开展地面随机振动考核试验,以验证产品对实际飞行过程中随机振动环境的适应性。

目前,运载火箭随机振动环境试验条件的制

定方法主要来自美军标 MIL-STD-1540 系列标准<sup>[1]</sup>以及国军标 GJB1027 等标准<sup>[2]</sup>。标准中规定,随机振动环境试验条件是以使用环境为依据经过平滑包络得到的试验条件,而使用环境均是以等带窄频方式表示的,例如:现阶段运载火箭的随机振动使用环境均是以 5 Hz 带宽表示,因此平滑包络得到的试验条件均为等带宽随机振动环境试验条件。等带宽随机振动环境试验条件的一个最大缺陷为,其总均方根加速度会远大于实际使用环境。主要原因为平滑包络过程中,为了使环境试验条件能够覆盖功率谱的每个峰值,需要不断地提高试验条件的量级,进而导致总均方根

\* 收稿日期:2021-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11902348)

作者简介:姜人伟(1991—),男,辽宁大连人,工程师,博士研究生,E-mail:jiangrw3114@126.com;

李道奎(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:lidaokui@nudt.edu.cn

加速度不断增大。

国内外在随机振动环境领域的相关研究主要集中在环境预示技术方面与随机振动作用对产品的影响分析方面。Shorter 等<sup>[3]</sup>在 2005 年首次提出了混合有限元 - 统计能量分析方法 (finite element - statistical energy analysis, FE-SEA) 用以预示航天器的声致随机振动环境。国内邹元杰等<sup>[4-5]</sup>也对 FE-SEA 混合方法进行了系统的研究,并应用到了实际的航天器随机振动环境预示中。在运载火箭领域,孙目<sup>[6]</sup>与曾耀祥<sup>[7]</sup>等分别将统计能量方法应用到了运载火箭仪器舱的随机振动环境预示中,并得到满足工程需要的结果。此外,针对运载火箭仪器舱的中频随机振动环境预示,王怀志等<sup>[8]</sup>又将能量有限元方法成功应用到实际工程中。对于随机振动作用对产品的影响分析,也有学者做了大量的工作。曹文利等<sup>[9]</sup>研究了火箭发动机舱内管路安装方式对管路疲劳寿命的影响,并开展了相关试验验证工作。张允涛等<sup>[10]</sup>基于小裂纹扩展分析方法,对某型液体火箭发动机管路接头的随机振动裂纹扩展寿命进行了分析。

以上研究中,关于随机振动环境试验条件设计方面的研究较少,王俊峰等<sup>[11]</sup>对重复使用航天器力学试验方法及试验条件设计进行了综述,但并未提出新的设计方法。本文在传统运载火箭随机振动环境试验条件设计方法的基础上,采用能量等效的思想,提出了随机振动环境试验条件的变带宽设计方法,解决了传统方法设计的环境试验条件总均方根过高的问题,为随机振动环境的分析及试验条件的合理设计提供了有效手段。

## 1 随机振动环境的变带宽计算方法

变带宽随机振动环境试验条件就是在传统的等带宽随机振动环境条件设计过程中,将随机振动环境的功率谱密度曲线在分数倍频程频带上进行处理,保证各个频带内的均方根值与原功率谱密度的均方根值相同,得到随机振动环境的分数倍频程功率谱密度曲线,再对其进行平滑包络而得到的试验条件。因此,变带宽随机振动环境试验条件设计方法的关键在于随机振动环境数据的分数倍频程处理。对于  $1/b$  倍频程,其频带主要依靠中心频率  $f_m$  及对应的上、下限截止频率  $f_m^U$  与  $f_m^L$  来表示。频带中心频率  $f_m$  计算公式为

$$f_m = \begin{cases} G^{\frac{x}{b}} f_r & b \text{ 为奇数} \\ G^{\frac{2x+1}{2b}} f_r & b \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $G$  为倍频程比,一般取以 2 为底的倍频程

底;  $f_r$  为参考频率,值为 1 000 Hz;  $x$  为任意整数。各频带中心频率对应的上、下限截止频率  $f_m^U$  与  $f_m^L$  计算公式为

$$f_m^U = G^{\frac{1}{2b}} f_m \quad (2)$$

$$f_m^L = G^{-\frac{1}{2b}} f_m \quad (3)$$

对于随机振动的功率谱密度曲线  $p(f)$ , 其在  $1/b$  倍频程频带各中心频率对应带宽内的总均方根值  $G_{\text{rms}}$  为

$$G_{\text{rms}} = \sqrt{\int_{f_m^L}^{f_m^U} p(f) df} \quad (4)$$

由此,可计算得到各中心频率对应带宽内的分数倍频程功率谱密度值  $p_{\text{eq}}(f_m)$  为

$$p_{\text{eq}}(f_m) = \frac{G_{\text{rms}}^2}{f_m^U - f_m^L} \quad (5)$$

## 2 计算算例

对于通过地面试验测量或飞行遥测获得的典型随机振动信号时间历程如图 1 所示。通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 及离散序列的功率谱密度 (power spectral density, PSD) 计算方法,即可得到该随机振动信号的 PSD 曲线,如图 2 所示。此时,该 PSD 曲线的频率分辨率  $\Delta f$  取决于随机振动信号的采样率和 FFT 计算使用的数据点数,例如本文所采用的典型随机振动信号的采样率为 5 120, FFT 计算使用的数据点数为 1 024, 则  $\Delta f = 5$  Hz, 即通过该方法所得到的 PSD 曲线为一个等带宽频带曲线<sup>[12]</sup>。

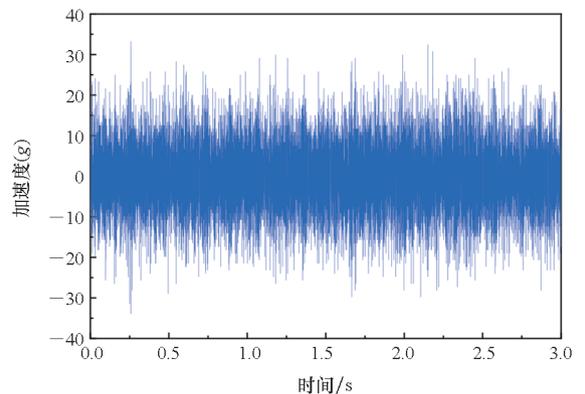


图 1 随机振动环境的时间历程数据

Fig. 1 Time history of random vibration environment

随机振动环境条件是以随机振动使用环境为依据经过平滑得到的试验条件,尤其是在数据子样较少的情况下,该试验条件需要通过能够完全包络随机振动信号的功率谱密度,如图 3 所示。其中环境试验条件曲线即为根据图 1 中随机振动信号所制定的随机振动环境试验条件。该试验条

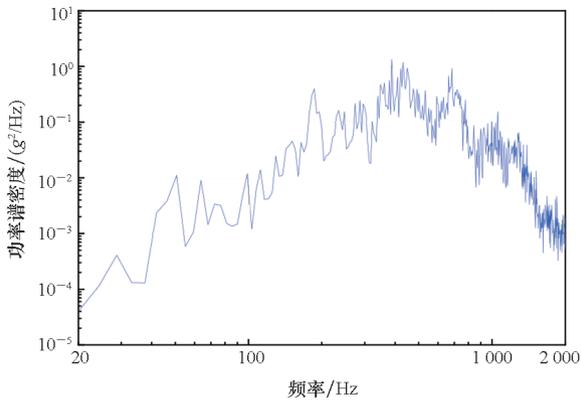


图2 等带宽随机振动环境的功率谱密度曲线

Fig. 2 Constant-bandwidth power spectral density of random vibration environment

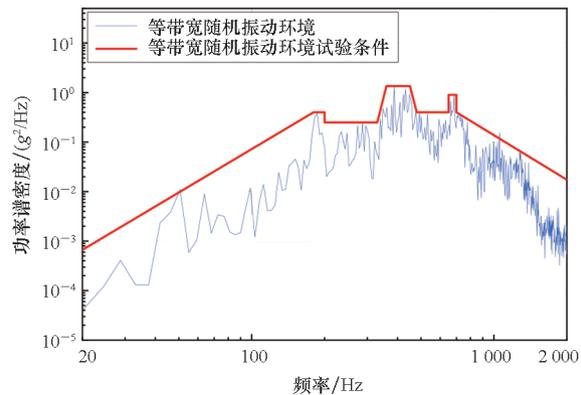


图3 等带宽随机振动环境试验条件

Fig. 3 Constant-bandwidth random vibration environmental test condition

件由于在各频段均能够覆盖随机振动环境的功率谱密度,因此通过该试验条件能够有效地考核运载火箭各系统及单机产品对实际飞行过程中随机振动环境的适应性。

以上过程即为传统的等带宽随机振动环境条件设计方法,该方法存在一个明显的缺点,即设计得到的随机振动环境条件的总均方根远大于实测随机振动环境的总均方根值,以前述算例为例,实测的随机振动环境信号在20~2000 Hz范围内的总均方根值为13.02g,但设计得到的随机振动环境条件的总均方根值为21.44g,因此对产品来说是处于一个过考核的状态。

以1/6倍频程频带为例,计算得到变带宽随机振动环境的功率谱密度曲线如图4所示,从图中可见,通过变带宽方法处理后的随机振动环境功率谱密度相比于传统的等带宽功率谱密度曲线更加平滑。此时,对变带宽随机振动环境的功率谱密度曲线进行平滑包络,得到的变带宽随机振动环境试验条件总均方根仅有15.07g,远小于等带宽随机振动环境试验条件的21.44g。

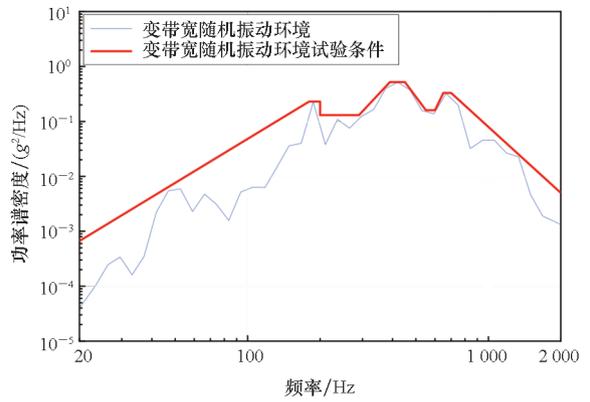


图4 变带宽随机振动环境试验条件

Fig. 4 Variable-bandwidth random vibration environmental test condition

### 3 仿真实验

以火箭上常用的管路产品为例,计算比较采用传统方法及本文提出方法所设计的随机振动环境试验条件下管路的随机振动响应的差异性<sup>[13-14]</sup>。

#### 3.1 模态分析

选取某常见管路产品作为计算对象,其材料属性为:弹性模量 $2.01 \times 10^{11}$  Pa,泊松比0.3,材料密度 $7800 \text{ kg/m}^3$ 。对该产品的几何模型进行网格划分,得到管路的有限元模型如图5所示,有限元模型共2993个单元。首先对该模型进行模态分析,计算过程中管路的两端及中间卡箍处设置固支边界条件,计算得到该管路在2000 Hz内的固有频率,如表1所示。可见该管路在2000 Hz以内共有5阶固有频率,其中前2阶为整体弯曲模态,后3阶为局部模态。

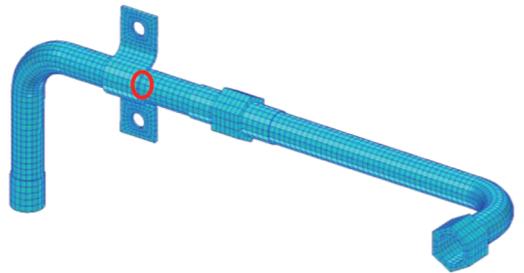


图5 应力输出位置

Fig. 5 Stress output location

#### 3.2 随机振动响应分析

火箭上管路产品的随机振动响应主要为基于低阶模态共振的分析方法,即管路产品在随机振动环境作用下的响应主要为低阶模态共振,因此对于高于低阶模态频率的激励,并不会引起管路较大的响应<sup>[15]</sup>。

对管路模型开展随机振动响应分析,施加

表 1 模态分析结果

Tab. 1 Results of model analysis

模态	频率/Hz	振型图
1 阶	571.88	
2 阶	685.95	
3 阶	1 777.99	
4 阶	1 800.11	
5 阶	1 906.79	

图 3 与图 4 中随机振动环境及等带宽方法与变带宽方法设计得到的环境试验条件,其中环境试验条件如表 2 所示,计算提取应力输出的位置见图 5 中红色圈所标,计算得到管路的随机振动响

表 2 环境试验条件

Tab. 2 Environmental test condition

试验条件类型	频率/Hz	功率谱密度	总均方根 (g)
等带宽环境试验条件	20 ~ 180	9 dB/Oct	21.44
	180 ~ 200	0.4g <sup>2</sup> /Hz	
	200 ~ 330	0.25g <sup>2</sup> /Hz	
	330 ~ 360	双对数线性	
	360 ~ 450	1.35g <sup>2</sup> /Hz	
	450 ~ 480	双对数线性	
	480 ~ 650	0.4g <sup>2</sup> /Hz	
	650 ~ 700	0.9g <sup>2</sup> /Hz	
	700	0.4g <sup>2</sup> /Hz	
700 ~ 2 000	-9 dB/Oct		
变带宽环境试验条件	20 ~ 180	9 dB/Oct	15.07
	180 ~ 200	0.23g <sup>2</sup> /Hz	
	200 ~ 290	0.13g <sup>2</sup> /Hz	
	290 ~ 390	双对数线性	
	390 ~ 450	0.52g <sup>2</sup> /Hz	
	450 ~ 550	双对数线性	
	550 ~ 600	0.16g <sup>2</sup> /Hz	
	600 ~ 650	双对数线性	
	650 ~ 700	0.33g <sup>2</sup> /Hz	
	700 ~ 2 000	双对数线性	
2 000	0.005g <sup>2</sup> /Hz		

应如图 6 所示。从图中可以看出,管路产品的应变响应主要在 572 Hz 与 686 Hz 处存在较大的放大,而这两个频率与模态分析得到的管路的前两阶模态频率一致,这也侧面说明了对于管路产品,其在随机振动下的响应主要由低阶整体模态共振所引起,而高阶局部模态对管路产品整体的随机振动应力响应贡献量相对较小。

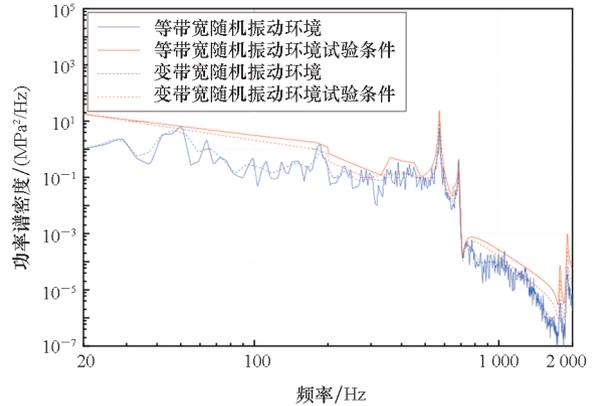


图 6 随机振动响应的功率谱密度

Fig. 6 Power spectral density of random vibration response

对图 6 中响应峰值附近频率进行局部放大,如图 7 所示,给出了 500 ~ 750 Hz 的局部随机振动响应曲线。从曲线中可以看出,在随机振动响应峰值最大对应频率处,产品在等带宽环境试验条件作用下的响应值要远大于产品在等带宽随机振动环境作用下的响应,说明等带宽环境试验条件对产品是过考核的,导致产品设计余量过大。而产品在变带宽环境试验条件的作用下计算得到的响应与变带宽随机振动环境的响应较一致,虽仍大于等带宽随机振动环境作用下的响应值,但相比传统的等带宽环境试验条件,已经减小了很多,意味着变带宽环境试验条件设计方法既能够有效地对产品进行考核,对产品保留一定的余量,同时又

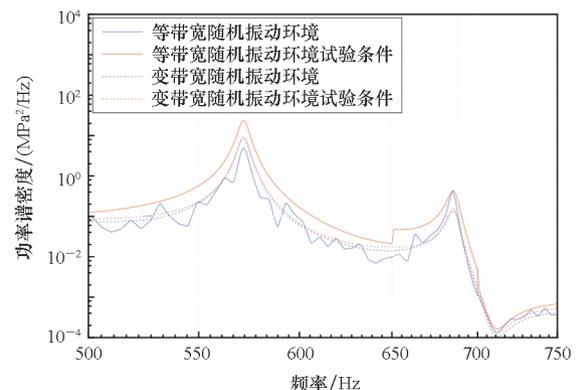


图 7 随机振动响应的功率谱密度(500 ~ 750 Hz)

Fig. 7 Power spectral density of random vibration response (500 ~ 750 Hz)

不至于对产品造成过考核,导致产品余量较大。

## 4 结论

本文提出了一种运载火箭随机振动环境试验条件的变带宽设计方法,采用1/6倍频程或其他分数倍频程频带,并保证各个频带内的均方根值与原随机振动环境的均方根值相同,以解决传统等带宽方法制定的环境条件总均方根过高的问题。为了验证本文提出方法的有效性,通过典型管路产品进行了计算对比,计算结果表明变带宽环境试验条件设计方法既能够有效地对产品进行考核,同时又不至于对产品造成过考核。本文所提出的方法可为运载火箭随机振动环境条件的合理设计与分析提供有效手段。

## 参考文献 (References)

- [1] U. S. Department of Defense. Product verification requirements for launch, upper stage, and space vehicles; MIL-STD - 1540D [S]. El Segundo: Space and Missile Systems Center, 1999.
- [2] 中国航天标准化研究所. 运载器、上面级和航天器试验要求: GJB 1027A - 2005 [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2005.  
China Aerospace Standardization Institute. Test requirements for launch, upper-stage, and space vehicles [S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the PRC, 2005. (in Chinese)
- [3] SHORTER P J, LANGLEY R S. Vibro-acoustic analysis of complex systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 288(3): 669 - 699.
- [4] 邹元杰, 韩增尧. 宽频带声激励作用下的卫星结构响应分析[C]//2007年全国结构动力学学术研讨会论文集, 2007.  
ZOU Y J, HAN Z Y. Vibration response of spacecraft with broad-band acoustic load[C]//Proceedings of 2007 National Symposium of Structural Dynamic, 2007. (in Chinese)
- [5] 邹元杰, 张瑾, 韩增尧. 基于FE-SEA方法的卫星部组件随机振动条件研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(4): 405, 456 - 461.  
ZOU Y J, ZHANG J, HAN Z Y. Random vibration specification for spacecraft components based on the hybrid FE-SEA method [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(4): 405, 456 - 461. (in Chinese)
- [6] 孙目, 王小军, 潘忠文, 等. 统计能量分析在飞行器动力学环境预示中的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(3): 11 - 14.  
SUN M, WANG X J, PAN Z W, et al. Applications of statistical energy analysis in prediction of flight dynamics environment [J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(3): 11 - 14. (in Chinese)
- [7] 曾耀祥, 潘忠文, 李东. 基于统计能量分析法的火箭仪器舱声振环境预示[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(4): 27 - 32.  
ZENG Y X, PAN Z W, LI D. Prediction for acoustic-vibration environment of the launch vehicle instrument cabin based on statistical energy analysis [J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(4): 27 - 32. (in Chinese)
- [8] 王怀志, 于开平, 张宗强, 等. 仪器舱结构的能量有限元中频声振环境预示[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 143 - 148.  
WANG H Z, YU K P, ZHANG Z Q, et al. Prediction of the acoustic-vibration environment of an instrument cabin by using the energy finite element method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(10): 143 - 148. (in Chinese)
- [9] 曹文利, 张萌, 薛立鹏, 等. 火箭发动机舱内管路安装改进分析与试验验证[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(2): 17 - 20, 35.  
CAO W L, ZHANG M, XUE L P, et al. Analysis and experimental verification of improvement of pipeline installation in rocket engine cabin [J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(2): 17 - 20, 35. (in Chinese)
- [10] 张允涛, 宋少伟, 王珺. 随机振动疲劳试验的小裂纹扩展分析方法[J]. 火箭推进, 2021, 47(2): 68 - 75.  
ZHANG Y T, SONG S W, WANG J. Study on analysis method of small crack growth in random vibration fatigue test [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(2): 68 - 75. (in Chinese)
- [11] 王俊峰, 韩增尧, 张玉梅, 等. 可重复使用航天器力学试验方法及试验条件设计综述[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(5): 464 - 472.  
WANG J F, HAN Z Y, ZHANG Y M, et al. Dynamic test method and design of test specifications for reusable spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(5): 464 - 472. (in Chinese)
- [12] 周芒, 刘敏, 郑建勇, 等. 导管随机振动响应分析与实验验证[J]. 强度与环境, 2013, 40(5): 30 - 36.  
ZHOU M, LIU M, ZHENG J Y, et al. The random vibration response analysis of catheter and experimental verification [J]. Structure & Environment Engineering, 2013, 40(5): 30 - 36. (in Chinese)
- [13] 韩增尧, 邹元杰, 朱卫红, 等. 航天器力学环境分析与试验技术研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(2): 6 - 22.  
HAN Z Y, ZOU Y J, ZHU W H, et al. Evolution of the spacecraft mechanical environment prediction & test technology [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2019, 49(2): 6 - 22. (in Chinese)
- [14] 张凌云, 周帅, 孟伟琪, 等. 记忆合金接头航空导管随机振动实验研究[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(2): 95 - 100.  
ZHANG L Y, ZHOU S, MENG W Q, et al. Experimental study on random vibration of aviation conduit with memory alloy joint [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2018, 16(2): 95 - 100. (in Chinese)
- [15] 杨新峰, 辛强, 单梯磊, 等. 激励频段对航天器随机振动载荷的影响[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(6): 581 - 588.  
YANG X F, XIN Q, SHAN T L, et al. The influence of frequency on the random vibration load of spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(6): 581 - 588. (in Chinese)