

航天器振动试验中的频率漂移现象研究

钱志英¹, 韩世泽², 马为佳¹, 余快¹, 王晓姝¹, 高行素¹

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 中国人民解放军 63723 部队, 忻州 036304)

摘要: 文章针对航天器振动试验中较为常见的频率漂移现象, 分析了其影响, 并结合工程案例讨论了可恢复和不可恢复频率漂移现象的产生机理。尤其针对蜂窝夹层板在振动试验中/后的频率漂移, 对两种典型的结构失效模式进行了分析。研究结果可为航天器振动试验中出现频率漂移时的原因分析和航天器结构设计提供参考。

关键词: 航天器; 振动试验; 频率漂移; 结构损伤; 结构失效模式

中图分类号: V416.5; O324

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2018)04-0342-06

DOI: [10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.006)

Natural frequency drift in the vibration test of spacecraft

QIAN Zhiying¹, HAN Shize², MA Weijia¹, YU Kuai¹, WANG Xiaoshu¹, GAO Xingsu¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 2. Unit 63723 of PLA, Xinzhou 036304, China)

Abstract: This paper analyzes the frequency drift in the spacecraft vibration test. The mechanisms of the restorable and non-restorable frequency drifts are discussed with practical engineering cases, focusing on the frequency drift caused by two kinds of structural damages of sandwich panels. The results can be used for the cause analysis of the frequency drift in the vibration test of the spacecraft, as well as for optimizing the structural design accordingly.

Key words: spacecraft; vibration test; natural frequency shift; structural damage; structural failure modes

收稿日期: 2018-02-24; 修回日期: 2018-07-11

引用格式: 钱志英, 韩世泽, 马为佳, 等. 航天器振动试验中的频率漂移现象研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 342-347
QIAN Z Y, HAN S Z, MA W J, et al. Natural frequency drift in the vibration test of spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(4): 342-347

0 引言

作为复杂的动力学系统,航天器结构中包含了各种各样的非线性特性结构。在振动载荷作用下,结构会出现螺栓松动、黏弹性材料的松弛、预紧面由不稳定状态变为稳定状态等。在振动试验中,结构的非线性往往会引发一些有别于线性系统的特殊现象,最为典型的是随着振动量级的增加或试验时间的延长,响应的共振峰会向下或向上“漂移”的现象,即频率漂移。例如,NASA于1997年发射的“卡西尼(Cassini)”土星探测器所搭载的“惠更斯(Huygens)”探测器^[1],在其模态试验中,随着激励载荷量级的逐步增加,探测器的纵向频率持续降低。而此阶频率与运载火箭二级点火载荷频率比较接近,若频率前漂15%将使得加速度条件(即结构实际受力)超过Huygens探测器设计载荷的50%,风险极大。

随着航天器结构向轻量化和柔性化发展以及多功能结构的日益增多,结构的非线性特性日益明显,在振动试验中经常发生频率漂移现象^[2]。频率漂移有的可恢复,有的不可恢复;有的量较小,有的较为显著。根据一般经验,不可恢复的较显著的频率漂移通常意味着结构特性发生了较大变化,存在结构破坏的可能。频率漂移现象较为复杂,诱因多种多样,给航天器的实际工程研制(包括试验)带来多种影响,需要从设计角度认识和解决。

本文首先分析了频率漂移对于航天器结构设计、振动试验实施等方面产生的影响;随后针对可恢复和不可恢复的频率漂移现象,分别给出了工程案例并分析其产生机理;最后,重点针对由结构损伤引起的频率漂移问题分析了典型的结构失效模式,旨在为航天器振动试验中出现频率漂移现象时的原因分析和航天器结构设计提供理论支持。

1 频率漂移所带来的问题

避免航天器与运载火箭之间以及航天器内部结构与设备之间的频率耦合是航天器结构设计的首要原则。一方面,航天器的主频应满足运载提出的最小频率要求,以避免航天器与运载控制系统以及主要载荷频率的耦合;另一方面,航天器大部件

或设备的频率应与航天器的主频实现错频设计,以避免大部件或设备与航天器之间因频率耦合而导致共振。如果航天器在振动试验中或振动试验后,其主要频率或大型部件、设备的频率出现较大的漂移,将会带来许多问题,主要表现在以下几个方面:

1)无论是航天器主频还是大型部件或设备的频率漂移均有可能突破设计阶段所遵循的频率隔离的设计原则,进而导致系统性共振,使得载荷的振动环境显著加剧。

2)航天器基频与控制系统频率关系密切,如果其频率漂移后低于要求的最低频率,会给控制系统的设计带来困难。

3)航天器振动试验一般都是通过低频正弦扫描获得的特性曲线推算试验件在高量级振动试验时的响应情况,并对峰值频率附近的试验条件进行下凹处理;如果在高量级试验中,结构主频出现显著漂移,并突破预设的下凹频带宽度,则会导致过试验,进而损伤试验件。

4)若振动试验后,试验件出现不可恢复的频率漂移,如何判断结构是否发生了影响其性能的结构损伤抑或是装配应力释放,是摆在设计师面前的主要难题。

2 频率漂移现象及原因分析

2.1 可恢复的频率漂移

可恢复的频率漂移通常是指结构频率在高量级振动环境下发生漂移,但在振动前后的低量级扫描时频率一致的情况。

图1为某航天机构产品的振动试验状态。

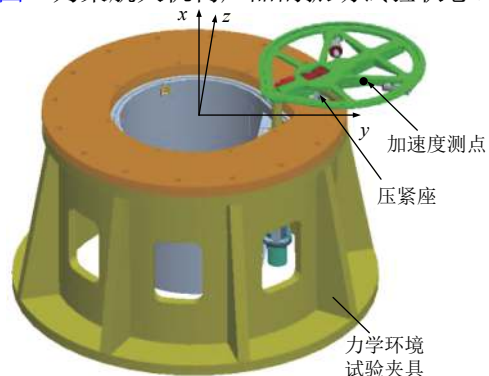


图1 某航天机构产品的振动试验状态
Fig. 1 A product in vibration test

图2为上述机构 x 向正弦振动试验中侧壁典型位置的加速度响应曲线。从图2可以看出,与前

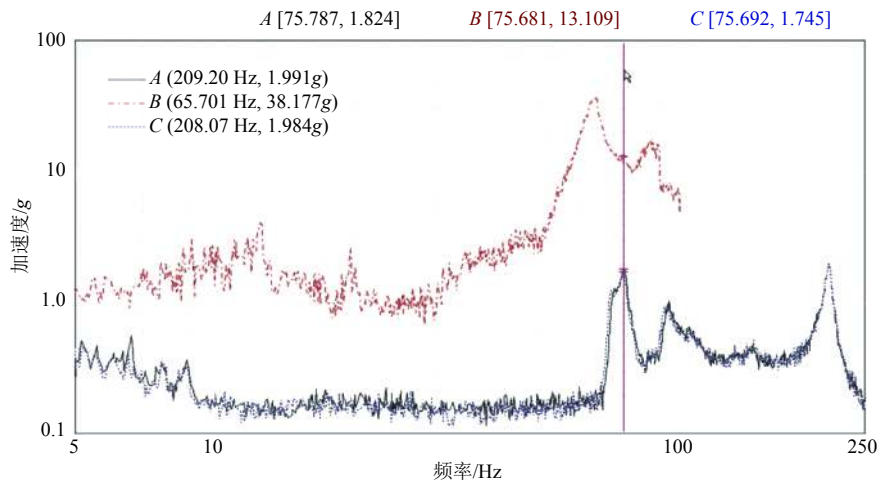


图2 某机构产品 x 向正弦振动试验特征点的加速度曲线

Fig. 2 The acceleration curves of the feature point of a mechanical product in x direction sinusoidal vibration test

可恢复的频率漂移是航天器结构非线性特性的典型表现。航天器结构的非线性主要包括结构件本身的非线性,以及结构间连接关系的非线性^[3-4]。随着航天器结构的轻量化,大量采用碳纤维复合材料,并且结构形式以蜂窝夹层结构和蒙皮加筋结构为主。除了复合材料本身的非线性特性外,蜂窝夹层结构和蒙皮加筋结构均采用结构胶复合成型,而胶本身也为非线性材料,因此在振动中以上结构件本身会表现出一定的非线性特性。另外,航天器是由多个结构件连接组成的复杂系统,常见的结构连接形式包括胶接、螺接、铆接等。尤其螺接这种连接形式,在高量级振动试验中,会表现出结构间位错量增加等非线性特征。对于图1所示的某型号样品舱与舱盖机构,其通过压紧释放装置与舱壁结构连接;而压紧释放装置由于预紧力设置和间隙等问题,通常会在振动试验中表现出较强的非线性特性,体现为结构的共振频率向前漂移,同时阻尼显著增大。

国内学者陈昌亚^[5]和王萍萍^[6]等通过研究认为,卫星振动频率随振动量级增加而下降主要是由于蜂窝板的非线性因素所致,并借“软弹簧”描述了结构的刚度变化,通过蜂窝夹层板的振动试验证实了这种非线性特性。何蕊等^[7]利用混沌理论,计算出铝蜂窝板振动数据的最大Lyapunov指数大于0,证明了振动中存在混沌现象,即铝蜂窝板具有非线性特性。卫洪涛等^[3]研究了非线性连接对卫星频率

后特征级相比,在鉴定级试验中此机构的一阶主频前漂了近10 Hz,非线性特性十分明显。

A [75.787, 1.824] B [75.681, 13.109] C [75.692, 1.745]

漂移的影响,并利用三自由度的振动模型对间隙参数、随机间隙和螺栓连接迟滞恢复力特性等对频率漂移的影响进行了分析,对比了螺栓连接和间隙非线性连接两者的频率漂移特点。

2.2 不可恢复的频率漂移

不可恢复的频率漂移是指结构频率在高量级振动环境下发生漂移后,在低量级扫描时频率亦不可恢复的情况。不可恢复的频率漂移通常都意味着结构状态(结构刚度)的改变。对于较小幅度的频率漂移(通常小于1 Hz或者频率的5%),一般认为其原因是结构应力释放,既包括复合材料结构在高温成型过程中的固化残余应力释放,也包括结构在装配过程中产生的装配应力释放;对于幅度较大的或随振动次数增加而不断增加的频率漂移,通常认为是由于结构件损伤或者连接环节松动而引起的结构刚度改变。

2.2.1 结构应力释放

王萍萍等^[6]通过研究认为,胶接的蜂窝夹层结构或者碳纤维复合材料结构在固化过程中产生的残余应力会形成结构的附加刚度,致使结构在低量级振动时表现为振动频率偏高;但经历高量级和宽频振动后,残余应力得到释放,表现为结构特征频率前漂。同理,在高量级或宽频振动后,各连接件的受力重新分布,消除了装配应力引起的附加刚度,表现为结构特征频率的小幅前漂。

图 3 给出了某卫星在验收级正弦振动和验收级随机振动试验前后, 特征级扫描时底板某位置的加速度响应曲线(图中: 黑色曲线 A 为验收级试验前; 红色曲线 B 为验收级正弦振动试验后;

蓝色曲线 C 为验收级随机振动试验后)。从图 3 可以看出: 经历验收级正弦振动, 卫星频率前漂 0.168 Hz; 再经历验收级随机振动后, 卫星频率又前漂 0.233 Hz。

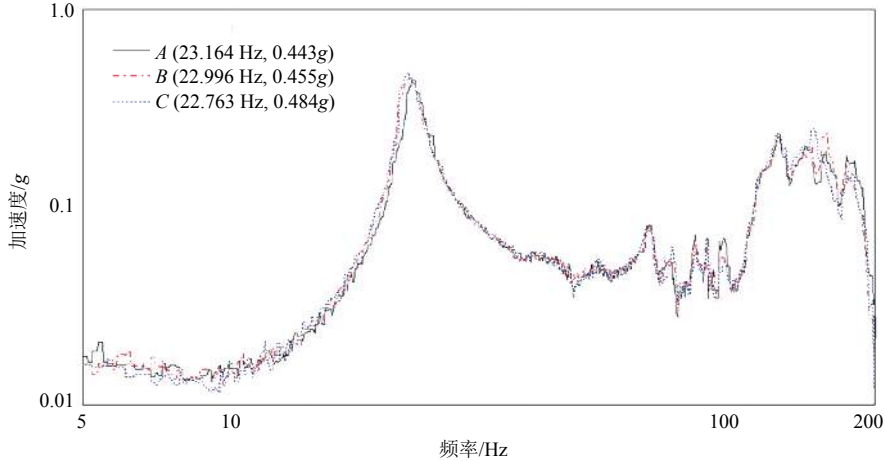


图 3 某卫星底板验收级振动试验前后特征级加速度响应曲线对比

Fig. 3 Comparison of the acceleration curves in characteristic level tests (before and after acceptance level test) at the feature point on the bottom deck of a satellite

2.2.2 典型的结构损伤模式

振动试验中, 若出现显著的不可恢复频率漂移, 通常都是由于结构损伤引起结构刚度降低导致的。蜂窝夹层结构由于其优异的刚度质量比, 在航天器结构设计中被广泛采用。以蜂窝夹层结构为例, 其在振动试验中的结构损伤主要包括: 结构的蜂窝芯子剪切失效, 埋件承载能力不足所导致的埋件周围结构破坏^[8-9], 螺钉剪切承载能力不足所导致的横向位错, 面板与蜂窝芯脱胶等。其中前 2 种失效模式最为常见。

1) 蜂窝芯子剪切失效

在蜂窝板中, 面板主要承受面内载荷, 蜂窝芯

子主要承受面外剪切载荷, 面板和蜂窝芯子共同支撑结构板的抗弯性能。蜂窝芯子剪切失效主要出现在较近的距离内结构板就承受作用方向相反的面外载荷进而需要蜂窝芯子承受剪切载荷的情况下。

某小卫星验收级随机振动试验中主频前漂 56.2 Hz, 经分析和实物检查认为底板蜂窝芯子剪切失效是出现频率漂移的主要原因。如图 4 所示, 在完成纵向验收级随机振动试验前后(图中: 黑色曲线 A 为试验前; 红色曲线 B 为试验后), 试验件的特征级加速度曲线纵向基频从 111.37 Hz 下降到 55.78 Hz, 显著前漂了 50%, 结构特性异常。

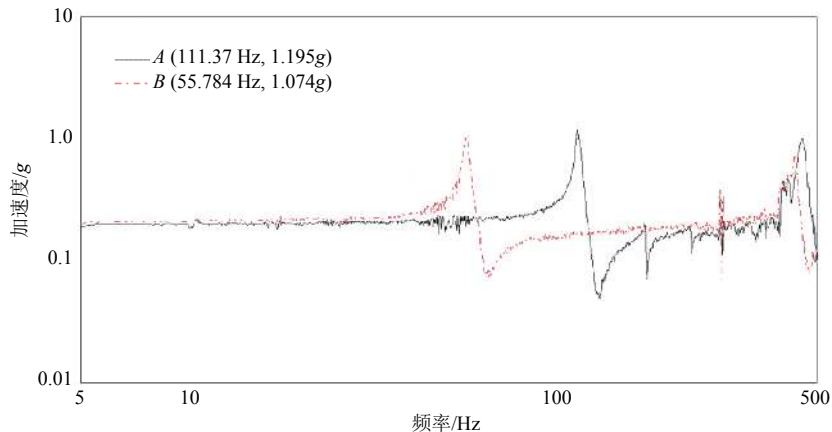
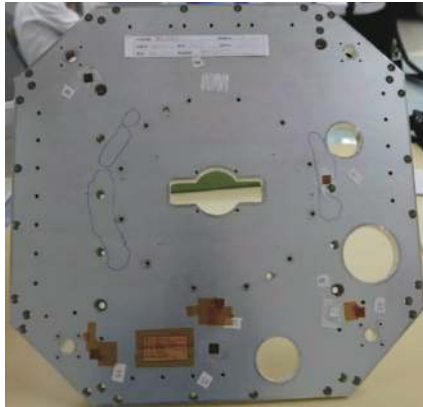


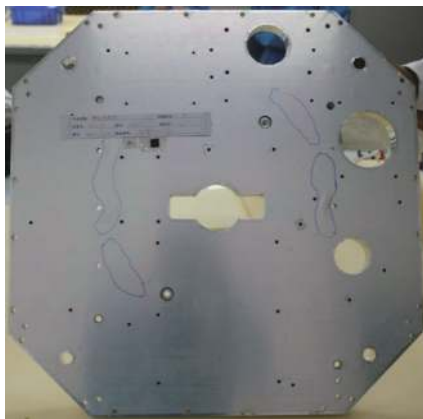
图 4 某小卫星底板 z 向验收级随机振动试验前后的特征级响应曲线对比

Fig. 4 Comparison of the acceleration curves in characteristic level tests (before and after acceptance level test) at the feature point on the bottom deck of a satellite in z direction random vibration test

通过故障树分析将故障定位为底板损伤, 其原因是: 底板与对接环和隔板连接点之间在纵向振动时需传递较大的剪切载荷, 且传力路径较短, 剪切载荷主要通过蜂窝芯子传递。经目视检查发现, 底板与隔板连接区域附近的铝面板出现凹坑, 进一步“啄木鸟”探伤发现相关区域出现较大面积损伤(见图 5), 揭开面板后可见蜂窝芯子剪切断裂(见图 6)。



(a) 底板-z面(星外)



(b) 底板+z面(星内)

图 5 底板探伤结果

Fig. 5 NDT results for the bottom deck

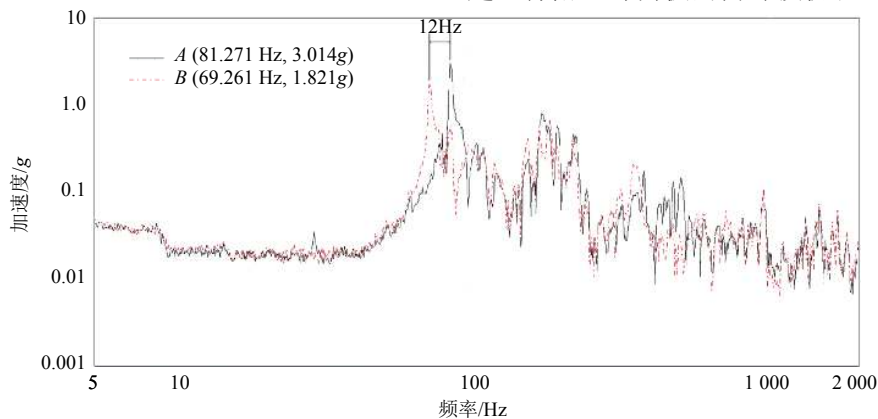


图 7 结构板某测点在鉴定级随机振动前后的特征级曲线比较

Fig. 7 Comparison of the acceleration curves in characteristic level tests (before and after qualification level test) at the feature point on structural panel in random vibration test

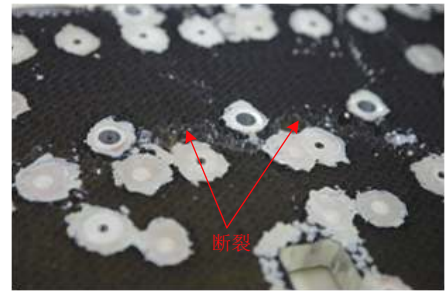


图 6 底板蜂窝芯子断裂情况

Fig. 6 The fracture of the honeycomb core in the bottom deck

2) 埋件承载能力不足

在航天器结构中, 蜂窝板一般通过埋置件(埋件)提供与设备或其他结构的连接点。因此, 当在振动试验中设备或其他结构连接点的受力超过埋件的承载能力时, 会发生埋件附近蜂窝板结构的破坏。

某小卫星完成纵向鉴定级随机振动试验后结构板局部频率前漂 12 Hz, 经分析认为设备连接埋件承载能力不足导致埋件周围结构损伤是产生频率漂移的主要原因。如图 7 所示, 某小卫星完成纵向鉴定级随机振动试验后(图中: 黑色曲线 A 为试验前; 红色曲线 B 为试验后), 发现结构板某加速度测点(测点位置见图 8)x 向特征级响应曲线出现显著频率漂移, 一阶频率由之前的 81.2 Hz 降低为 69.2 Hz, 显示结构板刚度变化异常。故障树分析认为: 加速度测点附近的 2 台设备(见图 9)均为狭长式构型且质心较高, 而整星纵向振动时振动方向恰与设备短边方向平行; 为平衡加速度引起的弯矩, 使得具有较窄安装面的设备连接点受到更大的拉拔载荷。连接点较少的设备 B 的拉拔载荷达到 1100 N 以上, 超出了埋件的承载能力范围, 进而引起埋件附近蜂窝板的内部损伤和连接刚度降低。

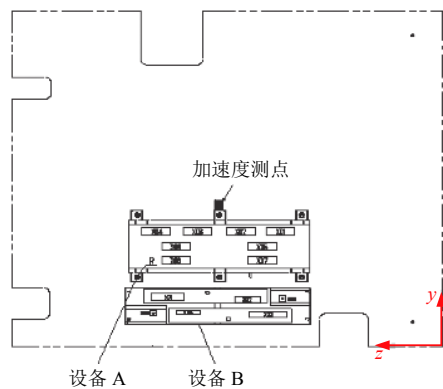


图8 加速度测点位置示意图

Fig. 8 Location of the acceleration measurement point

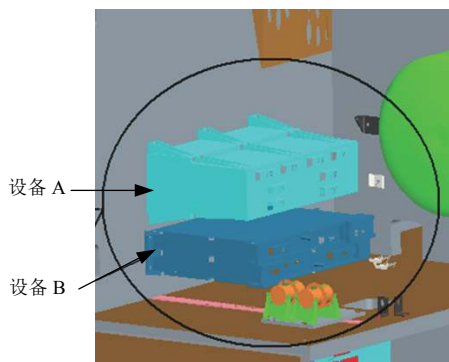


图9 测点附近设备构型示意

Fig. 9 The equipment near the acceleration measurement point

3 结论

在航天器振动试验中,频率漂移现象既可能反映结构自身的非线性特性,也可能预示着结构已经产生了损伤。本文通过对几种典型的航天器结构频率漂移现象和机理进行分析,得出以下结论:

1) 可恢复的频率漂移反映了结构自身的非线性特性。较大幅度的可恢复性频率漂移,对于机构类产品较为常见,需要在试验中考虑高量级振动时频率漂移对试验条件下凹的影响。

2) 较为显著的不可恢复性频率漂移通常是由结构损伤引起的。具体的结构损伤模式需要结合结构自身特性和受力特点开展有针对性的分析来确定。根据近些年的统计结果,蜂窝芯子剪切失效和埋件承载能力不足是最为常见的2种结构失效模式。为避免在振动试验中出现结构损伤,需要针对结构可能的损伤模式进行力学分析,并采取必要的加强设计措施。

参考文献 (References)

- [1] YUNIS C, SMITH, PENG. Nonlinear dynamic behavior in the Cassini spacecraft modal survey[C]//15th International Modal Analysis Conference. Orlando, 1997
- [2] 陈昌亚, 宋汉文, 王德禹, 等. 卫星振动试验中固有频率“漂移”现象初步研究[J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 23-25
CHEN C Y, SONG H W, WANG D Y, et al. Preliminary research on natural frequency drift in satellite vibration test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(4): 23-25
- [3] 卫洪涛, 孔宪仁, 王本利, 等. 非线性连接结构对一个典型卫星频率漂移的影响[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(3): 297-303
WEI H T, KONG X R, WANG B L, et al. Effect of nonlinearities in the joints on the amplitude-frequency response of a typical satellite structure[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(3): 297-303
- [4] 王东升, 周桐, 张志旭. 浅析振动试验中结构非线性引发的现象[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(5): 314-317
WANG D S, ZHOU T, ZHANG Z X. A simplified analysis of the nonlinear phenomena in vibration test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(5): 314-317
- [5] 陈昌亚, 王本利, 王德禹, 等. 随振动量级增加卫星结构频率下移的分析[J]. 上海航天, 2004, 21(3): 44-47
CHEN C Y, WANG B L, WANG D Y, et al. The preliminary research about natural frequency decrease in satellite vibration test when excitation level increased[J]. Aerospace Shanghai, 2004, 21(3): 44-47
- [6] 王萍萍, 陈昌亚, 罗文波, 等. 卫星振动试验中频率漂移现象分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(1): 74-80
WANG P P, CHEN C Y, LUO W B, et al. Analysis and test of the frequency shift for satellite with honeycomb sandwich[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(1): 74-80
- [7] 何蕊, 罗文波, 王本利, 等. 基于 Lyapunov 指数的铝蜂窝板频率漂移机理分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 463-467
HE R, LUO W B, WANG B L, et al. Natural frequency decrease analysis of aluminum honeycomb sandwich board based on Lyapunov exponent[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 463-467
- [8] 袁家军. 卫星结构设计与分析[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2004: 239-252
- [9] 陈烈民. 航天器结构与机构[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 222-232

(编辑: 张艳艳)

作者简介: 钱志英(1982—), 女, 硕士学位, 高级工程师, 主要从事航天器结构设计和分析工作。E-mail: qianzhiying@cast.cn.