隔振器过载振动复合环境试验研究

于韶明[1]，卫国[1]，芦田[1]，都京[1]，杨峰[1]，王挺[2]
（1. 北京强度环境研究所，北京 100076；2. 航天材料及工艺研究所，北京 100076）

摘要：目的 为了对试验产品的过载振动复合环境进行充分的考核，同时兼顾经济性和便捷性。**方法** 选取橡皮绳、振动台系统进行过载复合环境试验，并分析橡皮绳、振动台系统的可行性，讨论其应用范围。**结果** 从橡皮绳的拉伸曲线可以看出，橡皮绳的变形在5%以内刚度较大，变形超过5%刚度较小。在橡皮绳较小刚度区间，对隔振器进行振动试验，结果很好。**结论** 采用橡皮绳、振动台系统进行隔振器过载复合环境试验不仅能够节省成本，缩短试验周期，而且能够达到很好的试验效果。

关键词： 隔振器；过载振动；复合环境试验
DOI： 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.012
中图分类号： TJ7；O328 **文献标识码：** A
文章编号： 1672－9242(2015)06－0070－06

Research on Dampers' Acceleration-Vibration Environment Test

YU Shao-ming[1], *WEI Guo*[1], *LU Tian*[1], *DU Jing*[1], *YANG Feng*[1], *WANG Ting*[2]
(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;
2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Objective To fully test the acceleration-vibration environment economically and conveniently. **Methods** This paper used rubber ropes and a shaker to simulate the acceleration-vibration test, analyzed the feasibility of the method and discussed its application scope. **Results** Rubber rope's tension test showed that it had high rigidity with less than 5% strain and low rigidity with more than 5% strain. While rubber rope was in the region of low rigidity, damper's acceleration-vibration test had very good results. **Conclusion** The results proved that applying this method could reduce the test cost, shorten the test period and achieved the test goal.

KEY WORDS: damper; acceleration-vibration; composite environment test

火箭、导弹等航天器在主动段飞行、再入段飞行、变轨飞行等运行状态中，箭体本身及其搭载的产品均受到过载和振动的同时作用，过载振动复合环境在火箭、导弹等航天器的运行阶段普遍存在[1—9]。由于过载振动复合环境试验设备复杂，试验周期长，成本高，目前主要的试验方法是过载试验与振动试验分开进行，但对于隔振器等过载环境下振动特性会发生变化的产品将两种试验分开欠合理性。

1 隔振器过载振动复合环境试验的必要性

航天器在运行过程中会产生复杂的振动环境，为

收稿日期： 2015-07-12；**修订日期：** 2015-07-23
Received: 2015-07-12; **Revised:** 2015-07-23

作者简介： 于韶明(1986—)，男，硕士，工程师，主要研究方向为振动试验。
Biography: YU Shao-ming(1986—), Male, Master, Engineer, Research field: vibration test.

保证航天器中产品的正常运行,在航天器上广泛使用隔振器[10-14]。隔振器的减振效率、阻尼等各种参数在不同的振动环境中是有所差异的,因此隔振器一般都有其特定的使用环境[15-16]。隔振器的性能在过载振动复合环境下与单独的振动环境下是不同的。满足单独振动环境下要求的隔振器在过载复合环境下运行可能达不到设计需求的减振目的,从而导致产品的破坏,造成航天器在飞行过程中的失败,对国家经济财产带来巨大损失,对国家安全带来隐患。航天器在变轨运动时某个隔振器所处过载振动复合环境工况如图1所示。其中振动方向是往复的,当振动方向反向时,科里奥利力方向也反向。

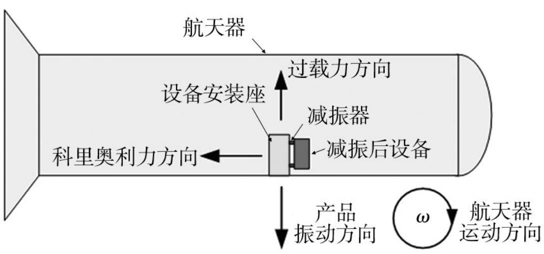


图1　航天器上隔振器过载振动复合环境工况

Fig.1　Spacecraft's damper in composite acceleration-vibration environment

隔振器在设计过程中一般都需要通过振动试验来验证、考核其性能,为了设计生产出能够满足过载振动复合环境的隔振器,需要进行过载振动复合环境试验。过载振动复合环境比较复杂,设计、试验人员采用多种方式进行模拟,对于过载振动复合环境中的振动,一般都采用振动台加载来实现。对于过载目前有多种实现方法,文中通过对几种方法进行比较,选取橡皮绳法作具体研究,并通过分析试验结果说明其准确性,为型号试验提供了经济、便捷、有效的试验方法。

2　振动试验中过载力模拟方法

过载试验的失效机理及效应主要有两种:失重效应和增重效应。失重效应使产品所受的重力减小,靠重力产生摩擦保持相对位置的产品,很难保持器相对位置;靠重力保持液面的液体,液面被破坏;靠重力进行对流的气体,散热效率下降。增重效应使得产品所受的重力增加,对于没有约束或弹性约束的产品,会对基座、壳体产生抛射作用;对于密封容器中的液体,会产生增压作用;对于结构材料,会产生增大压力、应变作用。

目前设计、试验人员经常采用四种过载振动复合环境试验方法。

1)采用离心机模拟过载力,在离心-振动设备模拟过载振动复合环境。1970年美国圣地亚国家实验室开发研制了“8.84 m离心-振动设备”,其后离心-振动设备逐步发展并在试验中使用。由于振动系统十分庞大、试验过程复杂、试验周期长、试验经费高昂等各种原因,隔振器的过载振动复合环境试验采用离心-振动设备的很少。

2)采用定频振动模拟过载力,即在原有振动环境条件中叠加一个定频振动,用定频代替过载力。这种方法的过载力不是恒力,而且定频点的选取可能对产品影响很大,对过载振动复合环境的模拟是否可靠有待继续探讨。另外,这种方法局限性很大,只能模拟振动方向与过载方向相同的工况。

3)采用电磁力模拟过载力,即用永磁铁作为隔振器的配重,用电磁铁进行过载力的加载,然后使用振动台进行振动试验。由于电磁力也是一种均布力,所以这种方法能够很好地模拟过载力,不足之处是由于电磁力对距离很敏感,振动试验过程中振动的位移对过载力影响很大。

4)采用橡皮绳模拟过载力,橡皮绳模拟过载力如图2所示。橡皮绳一端与连接配重质心,另一端与测力计连接。测力计与吊车连接,通过吊车升降控制橡皮绳的拉力。隔振器连接配重,并通过工装与振动台连接。通过橡皮绳、振动台系统模拟过载振动复合环境,通过橡皮绳的拉伸模拟过载作用,通过振动台进行振动的加载。由于振动过程中位移很小,对于橡皮绳拉力的变化影响很小,因此保证在振动过程中过载的量级基本稳定。为了很好模拟过载力,特别注意橡皮绳需要连接在配重的质心位置,通过作用在质心上的力代替均布力。

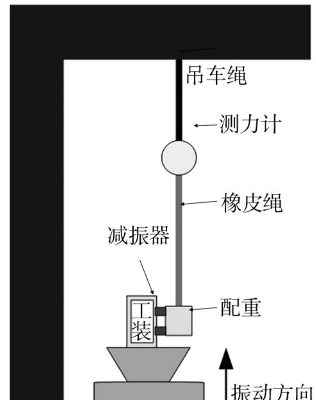


图2　橡皮绳与振动台模拟过载振动复合环境试验

Fig.2　Rubber rope and shaker in composite acceleration-vibration environment test (designing)

四种方法各有优缺点，表1对这四种方法的优缺点进行了对比，实践过程中，试验人员可以根据需要对四种方法进行取舍。

在火箭、导弹等飞行器上，隔振器普遍存在，过载振动复合环境更是比比皆是。为了型号的安全运行，隔振器过载振动复合环境试验需求很大，综合准确性、经济性、便捷性等多个指标，橡皮绳法是最有发展前景的试验方法。为了能够更好地使用橡皮绳法，对橡皮绳法从理论上、试验上进行深入的分析研究。

表1 振动试验中过载力模拟方法对比

Table 1 Comparison of stimulation methods of acceleration in vibration test

	优点	缺点
离心机	试验精细、误差小	设备少、成本高、周期长
定频试验	方法简单	只能模拟振动方向与过载方向相同的工况、过载力不是恒力
电磁力	能模拟均布力	振动位移对过载力影响较大
橡皮绳法	简单易行、振动过程中过载力变化小	用集中力代替均布力

3 橡皮绳、振动台系统分析

橡皮绳、振动台系统通过橡皮绳提供过载力，振动台进行振动加载，实现过载振动复合环境。这种方法的关键是橡皮绳与振动台相互影响小。

3.1 橡皮绳性能介绍

橡皮绳为包布橡皮筋，制作时将一捆橡皮筋预紧拉伸后外层包布而成，橡皮绳的这种制作方式使得橡皮绳有其独特的拉伸性能：变形在5%以内为大刚度弹性区；变形在5%～80%为小刚度弹性区；变形在80%以上又为大刚度弹性区。这是因为橡皮绳制作时，预紧拉伸后包布，因此变形5%以内的前段刚度较大；变形5%～80%段，基本为内层橡皮筋的刚度；变形80%以上，外层包布开始承受力，刚度再次变大。为了保证橡皮绳试验过程中不发生破坏，一般要求变形量不超过80%。使用橡皮绳时，根据具体需要选择橡皮绳粗细、长度等。

3.2 振动过程中过载力的变化

通过橡皮绳拉伸提供过载力，要求在振动过程中，过载力的变化在许可范围内。选取直径为12 mm的橡皮绳2 m，进行拉伸试验，变形量在50%以内，试验曲线如图3所示。

从图3可以看出，变形在5%(100 mm)以内刚度较大，变形大于5%刚度很低。分别对两端的点进行拟合，如图4所示。前段的刚度为1.114 11 kg/mm，后段的刚度为0.012 98 kg/mm，后段刚度约为前段刚度的1.2%。

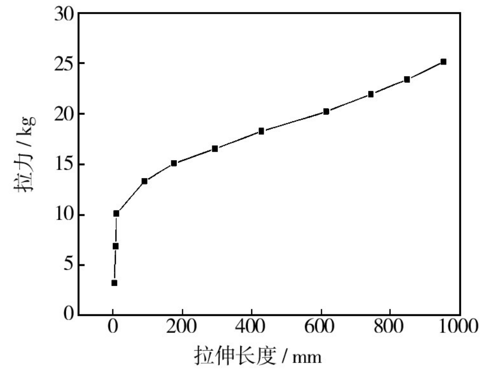
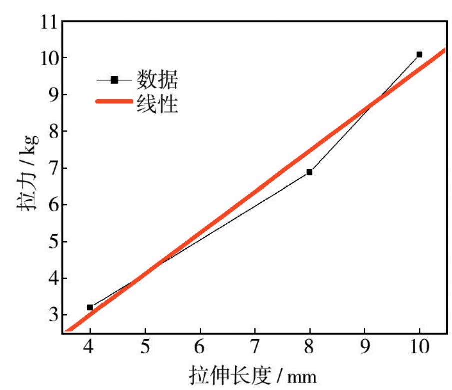
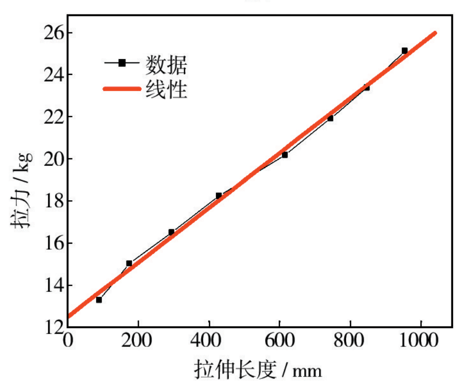


图3 橡皮绳拉伸试验曲线

Fig.3 Rubber rope's tensile test curve



a 前段



b 后段

图4 橡皮绳拉伸曲线拟合

Fig.4 Rubber rope' s tensile test curve fitting

对于不同的振动条件,振动过程中的位移是不同的,以表2的应力筛选条件为例,最大振幅为0.197 7 mm,最大速度为0.052 69 m/s。振动的位移变化会导致橡皮绳变化,前段大刚度区过载力变化的最大值为0.22 kg,后段小刚度区过载力变化的最大值为0.002 6 kg。可以根据实际需要选取橡皮绳刚度区,如果对过载力要求精度高,选取合适橡皮绳长度,使得满足过载力时,橡皮绳伸长量在5%~80%。

表2　环境应力筛选振动试验谱形

Table 2　Spectral shape of environmental stress screening test

频率范围/Hz	功率谱密度	总均方根加速度值	试验时间/min
20~80	+3 dB/oct		
80~350	0.04 g^2/Hz	6.06 g_{rms}	3
350~2000	−3 dB/oct		

3.3　振动过程中过载力的变化

航天器在变轨或圆周运动等过程中,对于航天器内运动(或者振动)的产品会受到科里奥利力的作用。主动段飞行等直线加速运动时,没有科里奥利力,这类试验用橡皮绳、振动台系统进行过载振动复合振动能够很好地满足要求。变轨等存在角速度时,若科里奥利力不大,也可以使用橡皮绳、振动台系统。

科里奥利力方向如图5所示,科里奥利力大小为:$F=2m\cdot v\times\omega$。v为振动速度,ω为航天器运动的角速度。仍然以表2的应力筛选条件为例,振动最大速度为0.052 69 m/s,科里奥利力的影响需要结合具体的航天器运动方式分析。

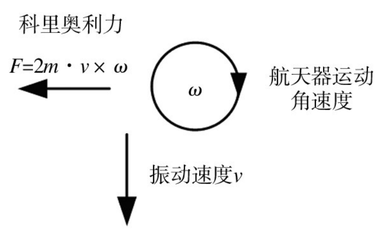


图5　科里奥利力示意

Fig.5　Coriolis force

4　隔振器过载振动复合环境试验

过载振动复合环境对隔振器性能的影响目前还没有清晰的认识,需要通过试验进行验证。选取88FD(鱼眼睛)隔振器进行过载振动复合环境试验,试验如图6所示。配重质量为0.91 kg,分别进行正弦扫描试验(20~2000 Hz,0.5g)和应力筛选随机振动试验(表2)。

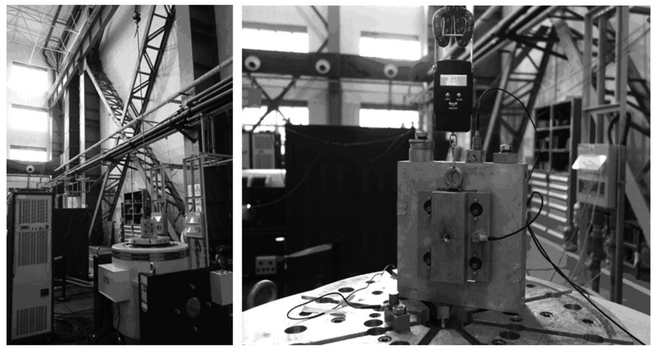


图6　橡皮绳与振动台模拟过载振动复合环境试验

Fig.6　Rubber rope and shaker in composite acceleration-vibration environment test (practicing)

在配重、工装上粘贴振动传感器,测量试验过程中减振前、后的振动试验数据,通过振动扫描试验比较不同过载力作用下隔振器谐振频率的变化以及谐振频率处放大倍数的变化,具体试验数据见表3。通过应力筛选随机振动试验比较不同过载力作用下隔振器减振效率的变化,具体试验数据见表4。

表3　隔振器过载正弦振动复合试验数据

Table 3　Data of Dampers' acceleration-vibration test (sine)

拉力/kg	谐振频率/Hz	放大倍数
9.6451	40.55	3.54
8.195	38.883	3.3729
7.435	37.962	3.281
6.455	37.062	3.1623

表4　隔振器过载随机振动复合试验数据

Table 4　Data of dampers' acceleration-vibration test (random)

拉力/kg	减振后响应 g_{rms}/g	减振前响应 g_{rms}/g	减振效率/%
9.6451	2.268	6.088	62.7
8.195	1.936	6.085	68.2
7.435	1.969	6.056	67.5
6.455	1.858	6.102	69.6

数据显示,随着过载力在增加,正弦扫描试验中,隔振器的谐振频率越来越高,放大倍数也越来越大;应力筛选随机振动试验中,减振效率越来越高。数据

与实际使用情况基本一致,试验结果说明采用橡皮绳法进行隔振器过载振动复合环境试验完全可行,试验结果可以作为型号判断依据的。

以前对过载振动复合环境不够重视,火箭、导弹上的产品,特别是对隔振器产品进行过载振动复合环境的试验也不多,对各型号火箭、导弹的运行带来安全隐患,甚至造成严重后果。过载振动复合环境试验的必要性已经得到普遍认可,不过由于型号进度、经济等多方面因素,过载振动复合环境试验开展难度较大,鉴于橡皮绳法具有便捷有效、成本低廉等多个优点,该方法可以并且应该得到广泛的推广,为各型号提供充分的地面试验。

5 结语

采用橡皮绳振动台系统进行过载振动复合环境试验的方法是可行的,能够同时满足过载跟振动的要求。橡皮绳振动台系统进行过载振动复合环境试验的优点是简单快捷,省时省力;缺点是有些振动产品在内部,无法使用橡皮绳。在实际型号试验中可以根据情况采用橡皮绳法进行过载振动复合环境试验,快速有效地完成试验,即时为型号提供可靠的地面试验数据。

参考文献:

[1] 方兵,沈润杰,何闻,等. 航天器元件多参数综合可靠性环境试验研究综述[J]. 中国机械工程,2009,20(22):2766—2772.
FANG Bing, SHEN Run-jie, HE Wen, et al. Research Summary of the Multiparameter Combined Environmental Test of Spacecraft Component Reliability[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22):2766—2772.

[2] 黄本诚. 我国航天器环境工程的发展历程[J]. 航天器环境工程,2005,22(1):5—8.
HUANG Ben-cheng. Evolution Spacecraft Environment Engineering in China[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(1):5—8.

[3] 张正平,王宇宏,朱曦全. 动力学综合环境试验技术现状和发展[J]. 装备环境工程,2006,3(4):7—11.
ZHANG Zheng-ping, WANG Yu-hong, ZHU Xi-quan. Current State and Developing Trend of Combined Dynamic Environmental Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4):7—11.

[4] 孙伟星,刘山尖,欧阳昕,等. 橡胶隔振器寿命预测及加速试验研究进展[J]. 装备环境工程,2013,10(1):57—60.
SUN Wei-xing, LIU Shan-jian, OUYANG Xin, et al. Advances in Fatigue Life Prediction and Accelerated Test of Rubber Vibration Isolator[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1):57—60.

[5] 何胜帅,陈立伟,强笑辉,等. 航空发动机叶片高应力振动疲劳试验技术研究[J]. 装备环境工程,2013,10(4):41—46.
HE Sheng-shuai, CHEN Li-wei, QIANG Xiao-hui, et al. High Stress Vibration Fatigue Test Technology of Aeroengine Blade[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4):41—46.

[6] 陈励. 正弦振动试验中的共振利用[J]. 装备环境工程,2013,10(2):48—51.
CHEN Li. Application of Resonance in Sine Vibration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2):48—51.

[7] 陈晓冬,杜向辉,徐宁. 空空导弹发射装置组合振动试验方法研究[J]. 装备环境工程,2014,11(6):153—158.
CHEN Xiao-dong, DU Xiang-hui, XU Ning. Research on Combined Vibration Test Method for the Launcher Equipment of Airborne Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6):153—158.

[8] 刘青林,朱学旺,张思箭. 考虑试件与夹具动力学特性的随机振动试验推力估算[J]. 装备环境工程,2013,10(2):52—55.
LIU Qing-lin, ZHU Xue-wang, ZHANG Si-jian. Pushing Force Estimation of Random Vibration Test Considering Dynamic Characteristics of Test Specimen and Fixture[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2):52—55.

[9] 朱玉琴,肖勇,苏艳. 装甲平台诱发环境振动数据处理技术与应用研究[J]. 装备环境工程,2013,10(3):72—76.
ZHU Yu-qin, XIAO Yong, SU Yan. Application Research of Vibration Data Processing Technology for Armed Vehicle Platform Induced Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3):72—76.

[10] 张针粒,李世其,朱文革,等. 新型近等强度高阻尼航天载荷隔振器研究[J]. 振动与冲击,2012,31(11):1—6.
ZHANG Zhen-li, LI Shi-qi, ZHU Wen-ge, et al. New Quasi-equal Strength and High Damping Isolator for Spacecraft Payload[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(11):1—6.

[11] 张业伟,方勃,李松. 整星隔振器动力学参数的原理性设计[J]. 哈尔滨工程大学学报,2010,31(12):1619—1625.
ZHANG Ye-wei, FANG Bo, LI Song. Schematic Design for dynamic Parameters of the Whole-spacecraft Vibration Isolator[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(12):1619—1625.

[12] 姜洪源,董春芳,敖宏瑞,等. 航空发动机用金属橡胶隔振器动静态性能的研究[J]. 航空学报,2004,25(2):140—142.
JIANG Hong-yuan, DONG Chun-fang, AO Hong-rui, et al. Research on Dynamic and Static Characteristics of Metal

Rubber Isolator Used in Aero-Engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 140—142.

[13] 任怀宇. 粘弹阻尼减振在导弹隔冲击结构中的应用[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1494—1499.
REN Huai-yu. The Application of Viscoelastic Damping Vibration Suppression for Shock-Isolation Structure of Multistage Missile[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1494—1499.

[14] 朱全忠. 飞航导弹弹上设备的阻尼减振技术[J]. 战术导弹技术, 1997(3): 7—12.
ZHU Quan-zhong. An Anti-vibration Damping Technique for Equipment on the Winged Missile[J]. Journal of Astronautics, 1997(3): 7—12.

[15] 李晓颜, 王建月, 赵云峰, 等. 某电子设备的阻尼减振设计[J]. 宇航材料工艺, 2013(1): 39—41.
LI Xiao-yan, WANG Jian-yue, ZHAO Yun-feng, et al. Damping Design for Electric Equipment[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013(1): 39—41.

[16] 赵云峰. 高性能黏弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2009(5): 1—6.
ZHAO Yun-feng. Properties and Application of Advanced Viscoelastic Damping Materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009(5): 1—6.

(上接第69页)

[7] 蔡健平. 环境工程与可靠性工程的关系初探[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 66—68.
CAI Jian-ping. On Relation between Environmental Engineering and Reliability Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 66—68.

[8] GJB 4239, 装备环境工程通用要求 [S].
GJB 4239, General Requirements for Materiel Environmental Engineering[S].

[9] 祝耀昌, 王涛. GJB 4239介绍与分析[J]. 军用标准化, 2002 (1): 20—22.
ZHU Yao-chang, WANG Tao. Analysis and Introduction of GJB 4239[J]. Military Standardization, 2002(1): 20—22.

[10] 张仁群, 岳涛. 环境工程与试验技术发展动态综述[J]. 环境技术, 2011(4): 38—40.
ZHANG Ren-qun, YUE Tao. The Introduction for Developing Trends of Environment Engineering and Test Technology[J]. Environmental Technology, 2011(4): 38—40.

[11] RAFAEL C, RICHARD E W. Digital Image Processing[M]. Third Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012

[12] 祝耀昌, 李明. 谈谈环境工程剪裁和环境试验剪裁[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 479—485.
ZHU Yao-chang, LI Ming. Environmental Engineering Tailoring and Environmental Test Tailoring[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(5): 479—485.

[13] KOSCHMIEDR H. Thoerie Der Horizontalen Sichtweite[J]. Beitr Phys Frei Atmos, 1924(12): 171—181.

[14] MIL-STD-810G, Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests Test[S].

[15] 沈卫东. 军事环境工程[M].重庆: 重庆通信学院出版社, 2006.
SHEN Wei-dong. Military Environmental Engineering[M]. Chongqing: Chongqing School of Communication, 2006.

[16] 邢天虎. 力学环境试验技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
XING Tian-hu. The mechanical environment test[M]. Xi′an: Northwestern Polytechnical University Publishing House, 2003.

[17] AN Ming-wei, GUO Zong-liang, LI Ji-bin, et al. Visibility Detection Based on Traffic Camera Imagery[C]// 2010 Third International Conference on Information Science and Interaction Science(ICIS), Chendu: ICIS, 2010: 411—414.

[18] 赵莹雪, 刘晖. 装备研制(改造)中加强环境试验与可靠性试验[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 75—78.
ZHAO Ying-xue, LIU Hui. Intensifying Environmental Test and Reliability Test in Equipment Development[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 75—78.

[19] 李春田. 标准化概论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
LI Chun-Tian. The Introduction to Standardization[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2010.

[20] 祝耀昌, 王丹. 武器装备环境适应性要求探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 416—422.
ZHU Yao-chang, WANG Dan. The Environmental Worthiness Requirements with Respect to Weapon Materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 416—422.