

大功率单刀双掷开关振动耐受性能试验研究

牟能文

(海军装备部驻重庆地区军事代表局, 重庆 400042)

摘要: **目的** 为保证某型大功率开关振动耐受性能满足应用环境的要求, 对该型大功率单刀双掷开关的振动耐受性能进行研究。**方法** 通过振动模拟试验, 对其实际工作能力及振动极限进行验证和摸底, 在实施开关直流信号随机振动试验和大功率射频信号随机振动试验的基础上, 首次实施开关直流信号步进振动试验、大功率射频信号步进振动试验。利用等效电路方法建立单刀双掷开关信号传输路径模型, 对开关振动瞬断所导致的射频传输性能影响进行理论分析。**结果** 在直流信号试验和大功率射频信号试验中, A开关在 x, y 向试验中出现了多次瞬断, 最长瞬断时间为 $63.6 \mu s$, B开关顺利通过所有试验。同一频率下, 寄生电容越小, 隔离度越高; 同一寄生电容下, 频率越高, 隔离度越小。**结论** 实现了开关振动性能的考核和摸底, 该研究为大功率开关的可靠性设计和系统的减振设计提供了数据支撑和解决途径。

关键词: 大功率开关; 振动; 单刀双掷

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.04.011

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)04-0066-06

Experimental Study on the Vibration-tolerance Performance of a High-power SPDT Switch

MU Neng-wen

(Military Representative Bureau of Naval Equipment Department in Chongqing Region, Chongqing 400042, China)

ABSTRACT: Objective In order to ensure that the high power switch vibration tolerance performance can meet the requirements of the application environment, the study on vibration tolerance performance for the high-power SPDT Switch was proposed in this paper. **Methods** Based on the implementation of switching DC signal random vibration test and high power RF signal random vibration test, the actual working ability and vibration limits were verified. The switching DC signal of step vibration test and high power RF signal of step vibration test were implemented for the first time. The SPDT transmission model established using the equivalent circuit method was applied for theoretical analysis on the effect of RF transmission transient fault caused by vibration. **Results** In DC signal and high power RF signal test, several short breaks occurred in the x and y direction for switch A, and the longest time of transient fault was $63.6 \mu s$, whereas switch B passed all tests. At the same frequency, smaller parasitic capacitance meant higher isolation degree. With the same parasitic capacitance, the higher the frequency, the smaller the isolation degree was. **Conclusion** This paper realized the assessment of the vibration performance of switches and provides data support and solving method for the reliability design of high-power switch and vibration isolation design of the system, and therefore gives a good guidance.

KEY WORDS: high-power switch; vibration; SPDT

收稿日期: 2016-01-02; 修订日期: 2016-02-16

Received: 2016-01-02; Revised: 2016-02-16

作者简介: 牟能文(1964—), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要研究方向为电子装备应用。

Biography: MU Neng-wen(1964—), Male, from Chongqing, Senior engineer, Research focus: applications of electronic equipment.

大功率开关作为一类非常重要的基础性电子元器件, 主要实现射频信号传输路径的选择功能, 被广泛应用于通信、电子对抗、辐射测量等众多系统中, 其长期工作的稳定性直接影响整个系统的可靠性。因此, 研究大功率开关的可靠性和寿命失效模式对保障系统的可靠性和设计质量具有重要的理论意义和现实价值^[1]。

大功率开关的振动耐受特性是反映其可靠性的重要性能之一^[2], 尤其是应用于航空航天等恶劣振动条件下, 开关的抗振性能将面临严酷的考验。目前的大功率单刀双掷开关的设计振动量级水平能达到 C 级水平, 但实际应用中开关的振动耐受性能未有相关的研究。

为了验证开关振动耐受性能的设计水平, 并探索其最大振动耐受能力, 文中针对某型大功率单刀双掷开关的振动耐受性能进行了试验研究。为保证该型大功率开关振动耐受性能满足应用环境的要求, 通过振动模拟试验对其实际工作能力及振动极限进行了验证和摸底, 在实施开关直流信号随机振动试验和大功率射频信号随机振动试验的基础上, 首次实施了开关直流信号步进振动试验、大功率射频信号步进振动试验。同时, 利用等效电路方法建立了单刀双掷开关信号传输路径模型, 对开关振动瞬断所导致的射频传输性能影响进行了理论分析^[3-5]。

1 大功率单刀双掷开关简介

1.1 工作原理

某型大功率开关主要是由接触系统和电磁系统两大部分组成, 原理如图 1 所示。

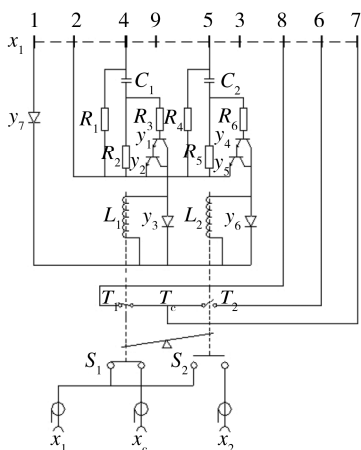


图 1 控制电路原理

Fig.1 The principle diagram of the control circuit

1.2 性能指标

该型大功率单刀双掷开关的具体性能指标: 工作带宽比为 80 : 1; 工作电压为 28 V; 质量 ≤ 250 g; 瞬断指标 (触点抖动) ≤ 10 μ s; 插损 ≤ 0.3 dB; 通道隔离 ≥ 60 dB; 切换时间 ≤ 20 ms; 驻波 ≤ 1.3 ; 相位一致性 $\leq \pm 2.5^\circ$; 承受功率 ≥ 240 W。其中, 瞬断指标对开关的振动耐受特性进行了量化。

1.3 设计特点

为保证单刀双掷开关的抗振性能, 该型开关在设计阶段进行了相应的优化。开关的射频输入输出设计采用 TNC 型连接器, 既满足大功率耐受要求, 又适当缩小了体积, 兼顾了系统安装空间限制。同时, 紧凑型的开关结构进一步提高了开关的振动耐受性能。增大了开关射频通道簧片的磁保持力, 减小了簧片受振动而抖动的风险。同时, 簧片触点压力增大, 对改善开关插损也有一定作用。通过合理选用触点材料, 并利用经验值确定触点面积, 在保证开关插损的同时, 优化了触点质量和硬度, 提高触点抗干扰能力。开关内部绝缘支撑材料选取了硬度合适、电性能和力学性能优良的产品, 满足了其强度, 在振动中不会产生缺损、裂纹和破碎^[6-8]。

2 振动耐受性能研究

为了掌握该型大功率开关振动的实际工作能力及耐受极限, 为后续系统减振方案和可靠性设计奠定基础, 对该型单刀双掷开关的振动耐受性能进行了试验研究。

2.1 试验条件

整个试验分为随机振动试验和步进振动试验, 前者模拟导弹、喷气机等产生的振动环境, 用于确定开关经受随机振动环境应力的适应性, 后者可以快速得到开关的振动耐受极限, 提供减振设计的边界条件。两种试验的条件如下:

1) 随机振动试验按照 GJB 360B—2009 方法 214 试验条件 I (C) 执行。

2) 步进振动试验。在 10 ~ 2000 Hz 频率范围内, 采用如图 2 所示的功率谱密度。试验方向选择 x , y , z 三轴向, 试验时间 ≥ 15 min/步进。初始步进试验取值可为 0.04 g^2 /Hz, 之后可按总均方值 5g

水平递增。步进量及加电情况如图3所示。当振动量值超过 15 Grms, 每个振动量级台阶结束后, 将振动量值降至 5 Grms, 维持 5 min, 以便发现高量级振动后出现的焊点断裂等异常情况^[7-8]。

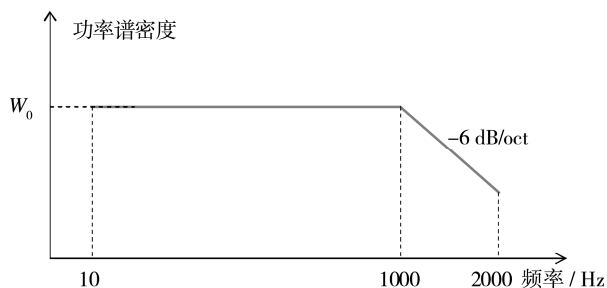


图2 功率谱密度控制

Fig.2 Power spectral density control

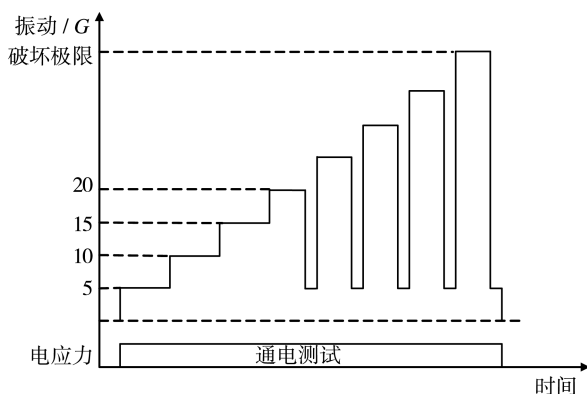


图3 步进量及加电状态

Fig.3 Step in and add the electrical state

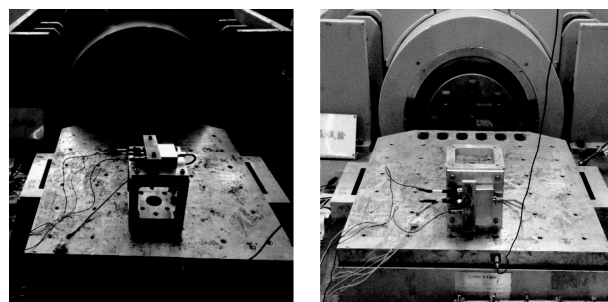
2.2 试验项目

考虑到设备在实际工作中是处于大功率状态, 因此, 为了更真实地模拟实际工作条件, 该型开关的振动耐受性能试验分别在直流信号和大功率射频信号两种条件下进行。共开展了 4 个项目的试验研究, 分别为直流信号随机振动试验(I(C)量级)、大功率射频信号随机振动试验(I(C)量级)、直流信号步进振动试验和大功率射频信号步进振动试验。根据开关性能指标, 当闭合触点抖动大于 $10 \mu\text{s}$, 便被认定发生了瞬断, 终止试验^[9]。

在试验中, 定义开关内部簧片的运动方向为振动敏感方向, 即 z 向。本次试验分 x , y , z 三个方向进行, 如图4所示^[10-11]。

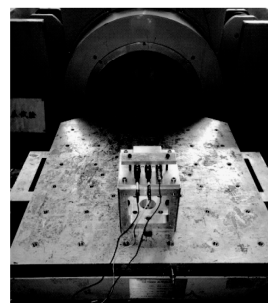
2.3 试验原理

试验分为直流信号试验和大功率射频信号试验两类, 其试验接线框图分别如图5、图6所示^[11]。



a x向振动

b y向振动



c z向振动

图4 试验实装

Fig.4 Test live-fire

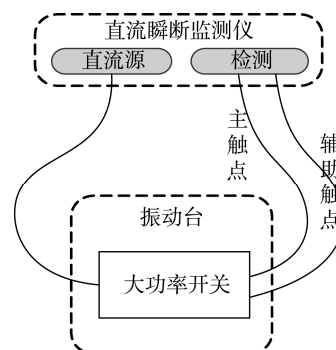


图5 直流信号试验

Fig.5 DC signal test

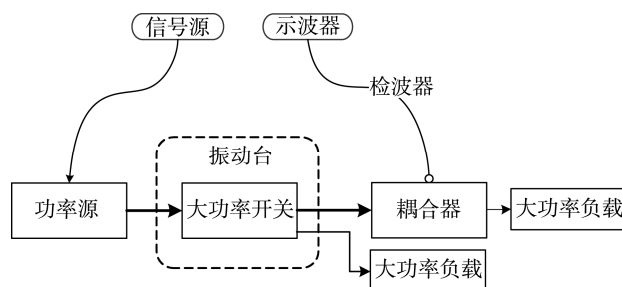


图6 大功率射频信号试验

Fig.6 High-power rf signal test

2.4 试验过程

该次试验使用了 A/B 两只开关。试验过程中, A 开关在 x 向试验中出现了多次瞬断, 最长瞬断时间为 $63.6 \mu\text{s}$, 更换到 y 向, 瞬断情况同样。B 开关

顺利通过所有试验。仅在试验中出现了毫秒级瞬断情况, 后经判断毫秒级的瞬断应是由于输入大功率射频信号源波动而产生的, 非开关触点出现瞬断(开关触点瞬断级别为微秒级)。

B 开关通过试验项目包括: $x/y/z$ 方向 1, 2 通道直流信号 I(C) 量级, 各 30 min 振动; $x/y/z$ 方向 1, 2 通道 200 W 大功率射频信号 6, 8 GHz 两个频率点的 I(C) 量级, 各 1 h 振动; $x/y/z$ 方向 1, 2 通道直流信号 7.5g@15 min—10.5g@15 min—15.08g@15 min 步进振动试验; $x/y/z$ 方向 1, 2 通道 200 W, 8 GHz 功率信号 10.5g@5 min—15.08g@10 min—7.5g@5 min—15.08g@10 min—7.5g@5 min 步进振动试验^[7-9]。

2.5 故障原因

在试验过程中, 出现了多个故障, 现将其原因分析如下。

1) A 开关直流信号随机振动试验中主触点出现瞬断, 其原因是由于 A 开关腔体和壳体为分体设计, 不在同一平面, 且腔体无固定点, 出现悬臂结构, 振动中腔体发生打壳, 导致主触点瞬断。

2) A 开关直流信号随机振动试验中, 在非振动敏感方向, 即 x/y 向出现瞬断。经测量, A 开关两通道力矩差较大, 是 B 开关两通道力矩差的两倍。因此, 力矩不平衡是造成 A 开关在非振动敏感方向, 即 x/y 向多次出现瞬断, 而 B 开关没有出现类似情况。

3) B 开关直流信号随机振动试验中辅助触点出现瞬断, 是由于 B 开关尾部控制信号接口接触不到位, 振动中出现接触不良, 导致辅助触点测试回路出现瞬断。

4) B 开关大功率随机振动、步进振动试验中, 主触点出现毫秒级瞬断。毫秒级瞬断出现后, 试验组用示波器接检波器直接测试功率源信号, 抓取了功率源毫秒级别的功率跌落, 如图 7 所示。由此判断毫秒级瞬断均由输入功率信号导致^[12-15]。

3 改进建议

根据试验情况, 做出以下建议: 在开关壳体尾端增加安装耳, 且安装底面设计齐平, 避免出现悬臂结构, 防止打壳; 装配中注意两通道的力矩参数平衡, 确保开关在设计振动量级内, 不会因通道不

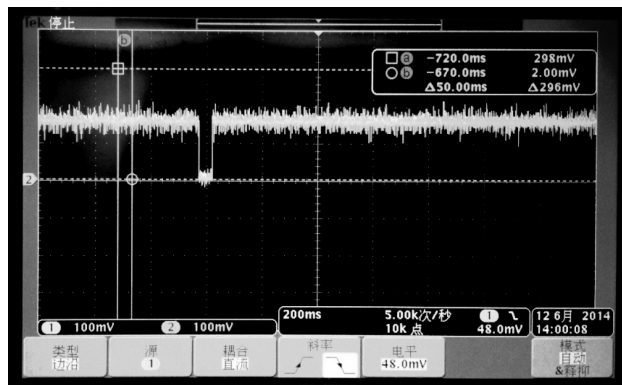


图 7 示波器显示

Fig.7 The oscilloscope display

平衡出现瞬断; 优化控制信号连接器设计, 保证辅助触点接口的可靠性。

4 仿真分析

单刀双掷开关的振动耐受性能试验中, 振动导致了器件的瞬断, 对其射频传输性能造成了影响, 下文将对其等效电路模型进行理论分析, 重点关注簧片和触头之间的寄生电容与开关隔离度的数值关系, 为实际工程分析提供理论支撑。

对于高频电磁开关而言, 动静触点之间存在寄生电容, 动静触点及微波通道与外壳之间存在一定的分布电容, 在触点切换直流信号或者低频信号时, 寄生电容的影响不明显。触点负载是高频信号时, 寄生电容的影响将非常明显, 当触点分断后, 触点间隙的寄生电容会持续通过高频信号, 直至触点间隙扩大到一定距离, 才能最终隔离该高频信号。动静触点在分开位置时, 两者间隙的距离通过技术要求中的隔离度进行明确, 文中开关隔离度 ≥ 60 dB^[16]。

本节将利用等效电路法建立的信号传输路径模型, 并利用模型分析动静触头之间寄生电容对信号传输的影响。

开关的信号传输路径由 BNC 接口及其相连接同轴结构内导体、静触头、动簧片组成, 通过动簧片的上下运动实现信号传输路径的导通与断开。

X1 通道闭合、X2 通道断开状态的等效电路如图 8 所示。1, 2 为 XC 输入 TNC 端子区, 3 为公共静触点区, 4 为 X1 通道动簧片, 5 为 X1 通道接触区, 6 为 X1 静触点区, 7, 8 为 X1 输出 TNC 端子区, 9 为 X2 通道动簧片, 10 为 X2 通道寄生电容, 11 为 X2 静触点区, 12, 13 为 X2 输出 TNC 端子区。

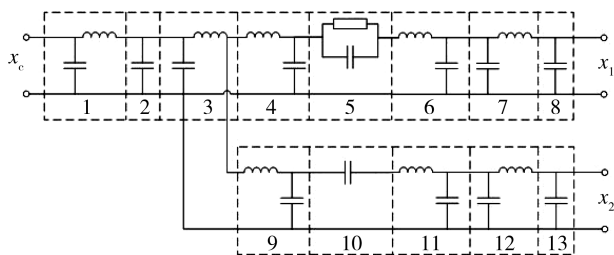


图8 开关等效电路

Fig.8 Equivalent circuit diagram of the switch

4.1 相关通道参数确定

相关通道参数的通过文献[4—8]计算如下： C_1 — C_{13} 分别为 0.125, 0.035, 0.051, 0.125, 1.362, 0.051, 0.125, 0.035, 0.125, 0.0002, 0.051, 0.125, 0.035 pF; $L_1, L_3, L_4, L_6, L_7, L_9, L_{11}, L_{12}$ 分别为 0.309, 0.067, 0.036, 0.067, 0.309, 0.036, 0.067, 0.309 nH; R_5 为 7.1 m Ω 。

利用这些参数,在 MATLAB 的 Simulink 环境中建立了如图 9 所示的分析模型,后面的分析均基于此模型。

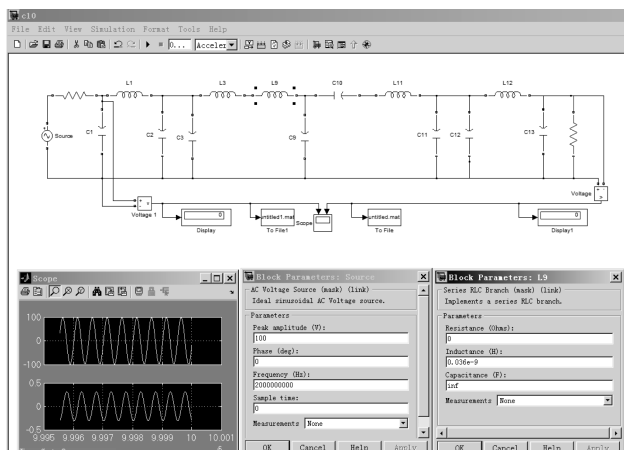


图9 MATLAB Simulink 建模

Fig.9 MATLAB Simulink modeling

4.2 隔离度分析

由上述等效电路模型可知,断开通道的隔离度与寄生电容 C_{10} 有直接关系。通过仿真计算,1~8 GHz 在不同寄生电容条件下的隔离度如图 10 所示。图 10 表明,同一频率下,寄生电容越小,隔离度越高;同一寄生电容下,频率越高,隔离度越小。

4.3 瞬断过程中高频信号的导通性分析

在确定簧片和静触头之间的寄生电容对隔离度的影响后,可用此理论展开对振动瞬断中高频信

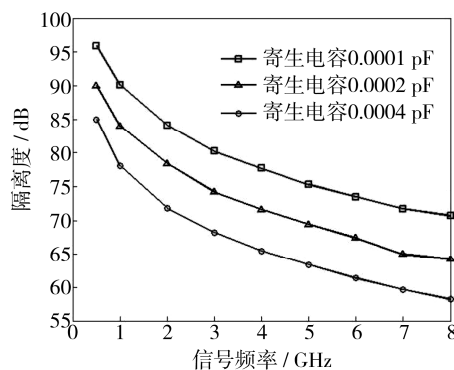


图10 寄生电容对隔离度的影响

Fig.10 Effect of parasitic capacitance on isolation degree

号的导通性分析。对于单刀双掷开关闭合导通的通道,在强烈的振动下会发生簧片和静触头之间的脱离,产生瞬断。瞬断一旦发生,簧片和静触头之间的寄生电容开始产生作用,而导通状态下的电阻/电容并联等效电路结构失效。在簧片和静触头间距非常小、寄生电容足够大的时候,高频信号仍可以通过该电容进行传导,信号通路未断开;当簧片和静触头间距变大、寄生电容变小时,高频信号通路上的阻抗增大,信号急剧衰减,无法传递^[18]。

针对 2 GHz 信号的瞬断过程导通性分析如图 11 所示。随着寄生电容数值变化,在 1.5 pF 时隔离度为 3 dB,即此时有 50%信号功率通过,之后寄生电容不断减少,隔离度上升,信号传输受阻。在假设簧片和静触头平整光滑、视在等效面积为半径 3 mm 圆形的情况下,1.5 pF 电容意味着两者间距为 0.167 mm^[19—20]。

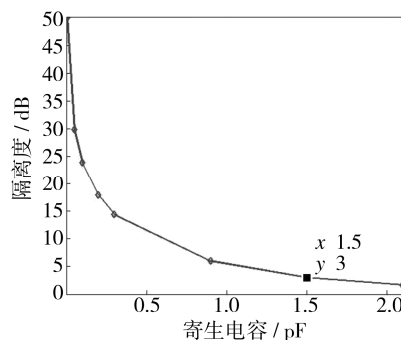


图11 瞬断过程信号导通性

Fig.11 Signal connectivity in transient breaking process

5 结语

通过对开关的随机振动试验和步进振动试验研究,实现了开关振动性能的考核和摸底。直流信号和大功率射频信号随机振动试验考核了开关的

技术性能要求。首次实施的步进振动试验摸底了开关最大振动耐受能力,为结构及开关组件的减振设计提供了参考依据。根据试验情况,展开了对开关建模数值分析的研究,重点分析了瞬断情况下信号通道的寄生电容对传输的影响,为实际工程分析提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 徐晖,高耀南,杨牧.小型电磁继电器衔铁系统抗振性研究[J].西安交通大学学报,1995,29(4):90—97.
XU Hui, GAO Yao-nan, YANG Mu. Study of Small Electromagnetic Relay Armature System Vibration Resistance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(4): 90—97.
- [2] 刘杨,胡彦平,张正平.环境应力筛选及工程应用[J].强度与环境,2008,35(2):50—56.
LIU Yang, HU Yan-ping, ZHANG Zheng-ping. Environment Stress Screen and Engineering Application[J]. Structure & Environment Engineering, 2008, 35(2): 50—56.
- [3] 张露,张熙川.环境应力筛选技术及其应用问题分析[J].装备环境工程,2006,3(4):62—65.
ZHANG Lu, ZHANG Xi-chuan. Analysis of Environmental Stress Screening Application[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 62—65.
- [4] 韩维航.电子产品环境应力筛选试验[J].装备环境工程,2009,6(2):40—43.
HAN Wei-hang. Environmental Stress Screening Test of Electronic Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 40—43.
- [5] 方书甲.海洋环境对海军装备性能的影响分析[J].舰船科学技术,2004,26(2):5—10.
FANG Shu-jia. Analysis of the Ocean Environment Influence on the Performance of the Navy Equipment[J]. Ship Science and Technology, 2004, 26(2): 5—10.
- [6] 靳哲峰.环境综合应力作用下航天电连接器可靠性分析和建模[D].杭州:浙江大学,2003.
JIN Zhe-feng. Failure Analysis and Reliability Modeling for Electrical Connector under Action of Combined Environmental Stresses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [7] GJB 150A, 军用装备实验室环境试验方法,第16部分:振动试验[S].
GJB 150A, Laboratory Environmental Test Method for Military Materiel—Part 16: Vibration Test[S].
- [8] GJB 10593.3, 电工电子产品环境参数测量方法——振动数据处理与归纳[S].
GJB 10593.3, Methods of Measuring Environmental Parameters for Electrical and Electronic Products—Treatment and Induction for Vibration Data[S].
- [9] 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.
- [10] 刘龙涛,李传日,马田,等.有限元仿真在振动结构疲劳分析中的应用[J].装备环境工程,2013,10(4):23—30.
LIU Long-tao, LI Chuan-ri, MA Tian, et al. Finite Element Simulation of the Vibration Analysis of Structural Fatigue[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 23—30.
- [11] 王珂,孙妍妍,毛志颖.振动试验夹具动力学设计的综合优化方法[J].振动、测试与诊断,2013,33(3):483—487.
WANG Ke, SUN Yan-yan, MAO Zhi-ying. Comprehensive Optimization Method for Dynamic Design of Fixture of Vibration Test[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3): 483—487.
- [12] 李朝锋,苏可鹏,朱琳.振动试验中常见问题的分析[J].环境技术,2012(4):11—14.
LI Chao-feng, SU Ke-peng, ZHU Lin. Analysis on Common Problems in the Vibration Test[J]. Environment Technology, 2012(4): 11—14.
- [13] 邢天虎.力学环境试验技术[M].西安:西安工业大学出版社,2003.
XING Tian-hu. Dynamics Environment Test Techniques [M]. Xi'an: Xi'an Technological University Press, 2003.
- [14] 刘习军,贾启芳,张文德.工程振动与测试技术[M].天津:天津大学出版社,1999.
LIU Xi-jun, JIA Qi-fang, ZHANG Wen-de. Engineering Vibration and Testing Technology[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999.
- [15] 穆立茂,黄海英,张靖,等.车载物资振动环境谱的数据处理与归纳[J].装备环境工程,2010,7(1):75—77.
MU Li-mao, HUANG Hai-ying, ZHANG Jing, et al. Data Processing and Induction of Vibration Environmental Spectrum for Commodity Carried on Truck[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(1): 75—77.
- [16] 姚国年,张卫东,赵辉,等.弹药公路运输随机振动特性分析[J].测控技术,2004,23(7):67—69.
YAO Guo-nian, ZHANG Wei-dong, ZHAO Hui, et al. Random Vibration Analysis of Vehicle in Ammunition Transportation[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(7): 67—69.
- [17] WHINNERY J R, JAMIESON H W, ROBBINS T E. Coaxial-line Discontinuities[C]// Proceedings of Institute Radio Engineers. New York, 1944.
- [18] RUEHLI A. Equivalent Circuit Models for Three Dimensional Multiconductor System[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1974, 22(3): 216—221.
- [19] MALUCCI R D. High Frequency Considerations for Multi-point Contact Interfaces[C]// IEEE Holm Conference on Electric Contacts. Montreal, 2001.
- [20] KWIATKOWSKI R, VLADIMIRESCU M, ZYBURA A, et al. High Contact Resistance Readings on Clean Microwave Mobile Contacts[C]// IEEE Holm Conference on Electric Contacts, Seattle, 2004.