

大尺寸结构振动试验系统浅析

魏英魁¹, 张晓颖², 胡彦平¹

(1.北京强度环境研究所, 北京 100076; 2.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 研究总结了大尺寸结构振动试验系统现状与振动试验方法, 解决随着振动试件尺寸的增大而出现的振动试验加载安装尺寸不足和单台振动台推力不足等问题。对国内外主要可靠性试验室针对大尺寸振动试验采取的方法和技术进行了研究和总结, 分析与比较不同技术和方法对于解决问题的优劣, 并介绍了采用不同方法进行大尺寸结构试件振动试验案例。总结并介绍了大尺寸结构产品振动试验系统, 并对未来大尺寸结构产品振动试验系统的发展进行了展望。

关键词: 振动试验; 大尺寸结构; 振动试验系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.015

中图分类号: TJ03; TB123

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0092-06

Vibration Test System for Large Dimension Structure

WEI Ying-kui¹, ZHANG Xiao-ying², HU Yan-ping¹

(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. Beijing Aerospace System Engineering Research Institute, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The work sums up and studies the methods of vibration test system for large dimension structure to solve the problems of deficiency for fixing test products and lack for single vibration table. It investigated and summarized the methods and technologies that were adopted by major reliability laboratories at home and abroad for vibration test of large dimension structure. It analyzed and compared the advantages and disadvantages of different technologies and methods and introduced cases by different methods. The paper summarizes and introduces the vibration test system for large dimension structure and describes its development prospect in future.

KEY WORDS: vibration test; large dimension structure; vibration test system

振动力学环境是飞机、火箭等飞行器、风电设备、轨道运输设备、电子产品等在服役或使用过程中最常遇到的力学环境, 只有经过振动试验, 才能完整地考核产品结构的可靠性及对于振动环境的适应性, 振动试验是考核产品可靠性试验的重要组成部分。

在振动试验过程中, 通常通过振动台给产品施

加振动载荷的方法来考核产品在振动环境下的可靠性^[1]。对于小尺寸试验件(试件最外围尺寸小于振动台面外围尺寸), 采用压板或连接孔直接和振动台相连; 中等尺寸试验件(试件最外围尺寸与振动台台面外围尺寸比小于3.5), 通常采取设计转接夹具的方法来实现与振动台的连接; 对于中小尺寸振动试验件采用的均为单台单轴振动试验系统,

收稿日期: 2016-04-02; 修订日期: 2016-05-20

Received: 2016-04-02; Revised: 2016-05-20

作者简介: 魏英魁(1986—), 男, 北京人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为可靠性与环境试验。

Biography: WEI Ying-kui(1986—), Male, from Beijing, Master, Engineer, Research focus: reliability and environmental test.

单台单轴振动试验方法在航天产品研制中发挥了重要作用,并衍生了大量的试验设备、试验方法和标准规范^[2-3]。对于大尺寸结构试件(尺寸比大于 3.5),若设计转接夹具,则因尺寸比过大导致所设计夹具斜面坡角过大,且夹具过高会导致夹具与试件安装面距离振动台面距离过大,振动传递性差。同时由于夹具面大,振动量级的均匀性受到较大影响,振动试验容易产生过试验或欠试验的问题^[4-5]。大尺寸试件一般质量较大,普通小推力振动台已不能满足振动试验要求。随着航天型号产品结构的大型化、复杂化、多样化,传统的单台单轴振动试验系统逐渐凸显其能力不足。

针对大尺寸结构振动试验件,国内外振动试验室通常采用以下两种措施解决振动载荷加载问题:采用台面尺寸更大、推力更大的振动台,振动台单台推力要达到 300 kN 及以上;采用双台并激或多台并激的方法,组成多台单轴振动试验系统,振动控制采用 MIMO 控制,解决单台振动台推力不足和均匀性等问题。

1 单台振动台试验系统

针对单台振动台推力不足的问题,美国与欧洲等发达国家积极推进大推力电动振动台的研制,大推力振动台具有更大的单台推力,空载单台振动台推力达到 300 kN 及以上。同时大推力振动台轴向和滑台面尺寸也更大,滑台尺寸为 2.5 m×2.5 m 及以上。美国 NASA 振动试验室的大推力振动试验系统如图 1 所示,该系统已顺利承担了美军与 NASA 各种型号产品的振动试验^[6-10]。对于大推力振动试验系统,世界上其他国家较著名的还有英国“菱”公司的 LDSV994、日本的 AKASHI EDS1354

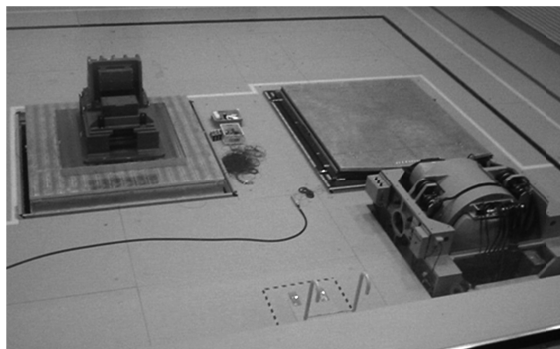


图 1 美国 NASA 水平大推力振动试验系统

Fig.1 Horizontal large thrust vibration test system of NASA in the United States

振动试验系统^[11-12]等。

电动振动台是力学环境试验的重要手段,广泛应用于卫星、飞机、船舶、高铁、汽车和电子等尖端产业的科研生产过程中。长期以来,西方发达国家在大推力电动振动台方面一直对我国实行禁运封锁,特别是 90 kN 推力以上的大型振动台更是严加管制,企图以此来限制我国国防事业的发展^[13]。

我国在大推力电动振动台研制方面较为突出的有北京强度环境研究所,其主要以军工技术为依托,研制生产各种规格的电动振动台,在大推力振动试验系统方面先后研制成功了 300, 350, 700 kN 电动振动台,并应用于各类试验中。其中 700 kN 电动振动台是目前为止世界上单台推力最大的电动振动台^[14],如图 2 所示。



图 2 我国成功研制的 700 kN 大推力电动振动台

Fig.2 The 70 kN big thrust electric vibration test system successfully developed by China

300 kN 与 350 kN 振动试验系统先后完成了多项航天与武器型号大尺寸结构产品的振动可靠性试验。300 kN 振动台系统进行的 CZ-3B 仪器舱、双星整流罩振动试验如图 3 所示,双星整流罩、仪器舱产品高 12 m,产品与工装总质量约 8.5 t,试验频率范围为 5~100 Hz,是当时全国最大规模的单振动台激励的振动试验。350 kN 振动台系统进行的通用电气(GE)公司机柜振动试验如图 4 所示,北京卫星环境工程研究所进行的某型号卫星镜头振动试验如图 5 所示。

单台振动台试验方法也有其局限性,电动振动台产生推力的主要部件是动圈,由于大推力振动台台体尺寸增大,导致动圈质量增加,其一阶固有频率减小,这样使得振动台系统推力输出增加,现有技术水平已很难将更大尺寸(大于 350 kN 电动振



图3 CZ-3B 仪器舱、双星整流罩振动试验

Fig.3 CZ-3B instrument module, binary fairing vibration test

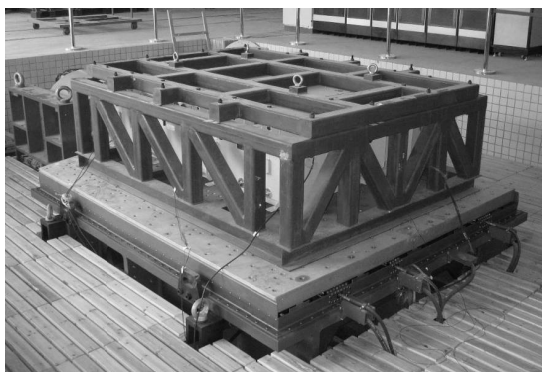


图4 通用电气 GE 公司机柜振动试验

Fig.4 Vibration test of the cabinet of general electric GE

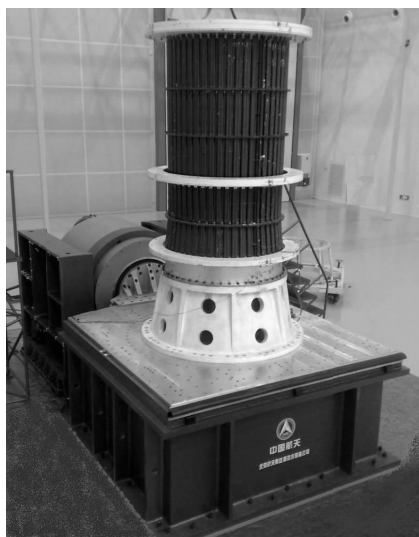


图5 某型号卫星镜头振动试验

Fig.5 Vibration test of a certain type of satellite lens

动台动圈尺寸) 动圈一阶固有频率达到 1700 Hz^[15-17]。同时, 由于适应大尺寸结构产品尺寸跨度大的特点, 大推力振动台滑台尺寸增大, 质量明显增加, 在横向试验时, 振动台台体输出功率造成

极大损耗。

2 多台单轴振动试验系统

多台单轴并激振动试验系统, 多个振动台并联沿同一方向同步激励或推拉同一个试件, 振动台间的相位相同, 可以解决单个振动台推力不够的难题。同时, 采用多个振动台, 振动台台面增多, 相当于振动台面积增大, 大尺寸结构产品可通过液压球头和振动夹具与振动台台面进行连接^[18-20]。多台单轴振动试验系统采用刚度大的整体夹具与试件进行连接, 整体夹具通过设计对接口与振动台面进行连接, 试件与夹具需由橡皮绳组成的悬吊系统进行保护, 同时需要与振动台数目相同的液压球头来进行解耦, 某典型细长大尺寸结构试验件双台同轴试验系统如图 6 所示。

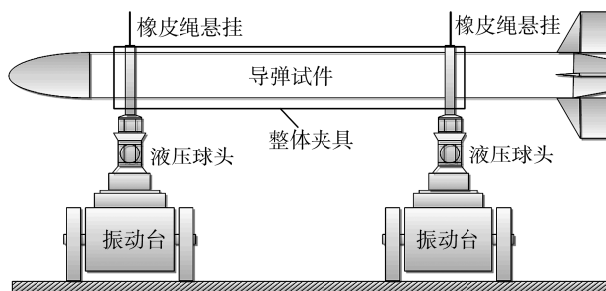


图6 典型细长大结构试件双台并同轴振动试验系统

Fig.6 Double stage and coaxial vibration test system for a typical slender structure

这种试验系统的优势在于: 对于细长体结构的振动试验, 使试件的振动载荷分布更加均匀、合理、真实, 减少单台激励带来的应力集中, 减轻局部欠试验或过试验程度; 使夹具设计更加灵活方便; 解决了单台振动台推力不足问题, 振动台推力和试验量级均得到了明显提升。可根据所做试验件的质量和试验量级来增加或者撤换相应的振动台。

对于多台单轴振动试验系统, 国外振动试验室分别建立了多台单轴横向和多台单轴垂向振动试验系统, 在多台单轴振动试验系统方面均进行了成功尝试^[21-23]。欧洲 ESTEC 试验室由 2 台 160 kN 电动振动台构成的一套大推力水平振动试验系统如图 7 所示, 正在进行某型火箭舱段的振动试验。欧洲 ESTEC 试验室 4 台 160 kN 电动振动台构成一套 640 kN 大推力垂直振动试验系统如图 8 所示。欧洲 IABG 试验室 4 个电动振动台构成一套大推力

横向振动试验系统图 9 所示, 正在进行火箭仪器舱振动试验和火箭储箱系统级的振动试验。国外振动试验室双台并激构成的“蓝宝石”系列导弹振动试验系统如图 10 所示, 用于测试导弹的飞行可靠性。

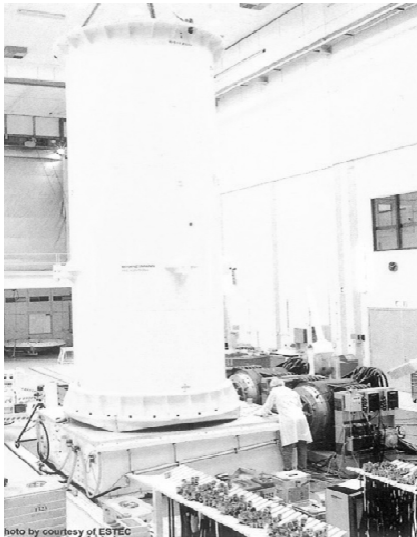


图 7 ESTEC 大尺寸结构舱段试验系统
Fig.7 ESTEC large size structure of cabin test system

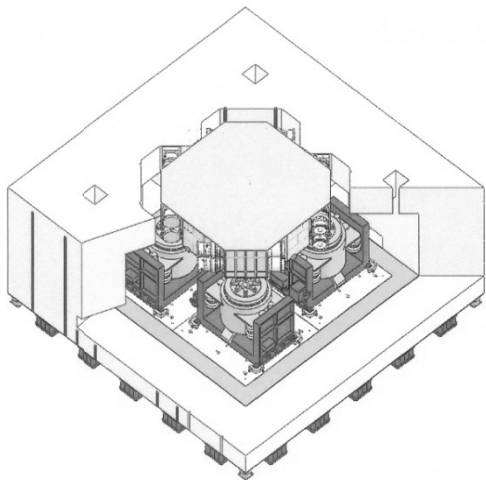
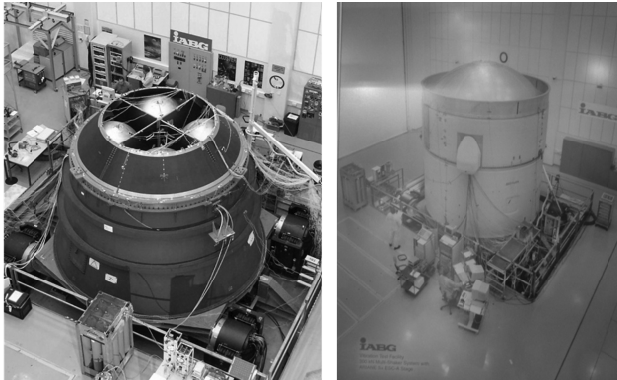


图 8 ESTEC 大推力垂直振动试验系统
Fig.8 ESTEC large thrust vertical vibration test system

国外振动试验室建立的大推力振动试验系统圆满地解决了大尺寸结构产品、大质量振动试验件的振动试验振动载荷加载问题, 为其国家的航天以及国防、科技事业的发展提供了强有力的试验技术保障。

国内在多台单轴振动试验系统方面也进行了成功探索与尝试, 北京强度环境研究所以军工产品环境可靠性试验为依托, 成功组建了多套多台同轴振动试验系统, 已完成多项大尺寸结构产品振动可靠性试验。根据振动试件产品尺寸、质量和振动试验



a 火箭仪器舱振动试验 b 火箭储箱系统级振动试验

图 9 IABG 试验室大推力水平振动试验系统

Fig.9 IABG horizontal vibration test system for large thrust:
a) Vibration test for instrument cabin of rocket; b) Systemic vibration test for reservoir of rocket



图 10 双台并激垂直向振动试验系统
Fig.10 Double platform and vibration test system

量级选择不同推力电动振动台组成单轴振动试验系统, 设计不同的振动夹具将振动试件与电动振动台连接, 圆满解决了单台振动台推力不足和大尺寸结构产品安装的问题^[24—25]。多台单轴振动试验系统已成功运用于 XX-5, XX8 等运载和武器型号大尺寸结构产品、大质量试件产品的振动试验。已成功完成振动环境可靠性试验的多台单轴振动试验系统, 如图 11 所示。

图 11 所示为 2 台 350 kN 电动振动台组成的双台并激振动试验系统, 所做试验件为某型号仪器舱, 直径长达 5 m, 是典型大尺寸结构振动试件, 该双台并轴试验系统圆满完成了某型号仪器舱振动环境试验考核。

多台单轴振动试验系统具有推力组合方式灵活、安装布置便捷等优势, 其劣势在于整个振动试验系统组装复杂, 其包含液压球头、力平衡系统、挂载保护系统等多套系统, 组装耗费时间长。同时实现多台同步和控制精度是该系统控制加载难题,

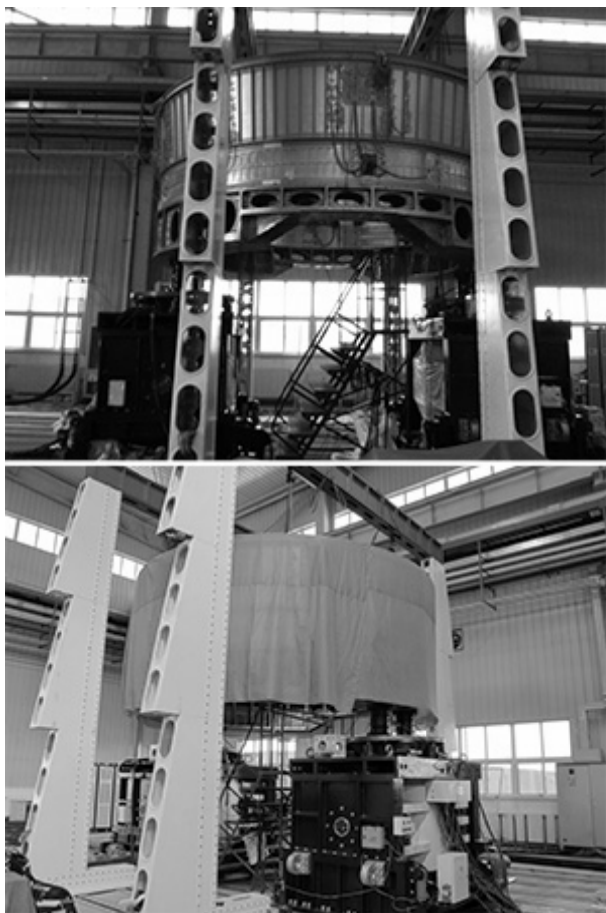


图 11 某型号仪器舱双台并激垂向振动试验

Fig.11 A model of the dual stage of the instrument cabin and the vibration test

在振动台台数大于 2 台的振动试验系统尤为突出, 如何实现完全同步和提高其控制精度是未来研究的重要方向^[26—27]。

3 结语

在经济、技术高速发展的今天, 产品的质量越来越得到人们的重视, 人们更加重视产品的环境可靠性问题。振动环境可靠性试验是环境可靠性试验的重要组成部分, 随着航天在研火箭型号和其他武器的结构尺寸逐渐增大, 振动试验量级逐步增加, 对振动载荷加载系统提出更高的要求, 振动试验系统需满足大尺寸结构试件安装和大质量试件载荷加载的要求, 这也是未来振动试验系统的发展趋势。

综合国内外环境可靠性试验室的方法, 目前均采用以下两种措施来解决大尺寸结构试件振动试验的难题: 研制更大台面尺寸、更大单台推力的电动振动台; 采用多台电动振动台组成多台单轴并激振动试验系统。两种方法各有优劣, 因单台振动台

推力有限, 多台单轴并激振动试验系统会成为解决大尺寸结构产品振动试验加载难题的主要措施, 如何提高其控制精度与同步性是未来振动试验技术发展的重要方向。

参考文献:

- [1] 王刚, 高贵福. 环境可靠性试验技术[M]. 北京: 宇航出版社, 2013: 102—106.
WANG Gang, GAO Gui-fu. Environmental Reliability Test Technology[M]. Beijing: Astronavigation Press, 2013: 102—106.
- [2] 唐千照, 黄文虎. 振动冲击手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 32—33.
TANG Qian-zhao, HUANG Wen-hu. Vibration and Shock Handbook[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 32—33.
- [3] 李千桦. 振动环境试验标准汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 41—46.
LI Qian-ye. Standard Assembly for Vibration Environment Test[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2013: 41—46.
- [4] 崔战团. 电动振动台台面加速度失真度的分析[J]. 环境技术, 2003, 4(1): 10—12.
CUI Zhan-tuan. Acceleration Distortion Analysis of the Electric Vibration Table[J]. Environmental Technology, 2003, 4(1): 10—12.
- [5] 夏天凉, 王金娥, 卢华强, 等. 电动振动台附加台面的结构分析及其优化设计[J]. 苏州大学学报(工科版), 2011, 31(3): 50—53.
XIA Tian-liang, WANG Jin-e, LU Hua-qiang, et al. Structural Analysis and Optimum Design of the Additional Table Top of Electric Vibration Table[J]. Journal of Suzhou University Engineering Science Edition, 2011, 31(3): 50—53.
- [6] MOTIL S M, LUDWICZAK D R, CAREK G A, et al. Capabilities, Design, Construction and Commissioning of New Vibration, Acoustic, and Electromagnetic Capabilities Added to the World's Largest Thermal Vacuum Chamber at NASA's Space Power Facility[C]// 62nd International Astronautical Congress 2011. 2011: 5485—5494.
- [7] NAKANO A, HIRAI Y, SUGANO K, et al. Rotational Motion Effect on Sensitivity Matrix of MEMS Three-axis Accelerometer for Realization of Concurrent Calibration Using Vibration Table[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). 2013: 645—648.
- [8] CHEN S F, HOU L Y, ZHANG S P. Dynamic Characteristic Analysis and Experiment of Piezoelectric Vibration Table of Industrialized Precision Seeding Device[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 249—250: 604—609.
- [9] RICCI S, PEETERS B, DEBILLE J, et al. Virtual Shaker Testing: A Novel Approach for Improving Vibration Test

- Performance[C]// International Conference on Noise and Vibration Engineering. Leuven: Katholieke University Leuven, 2008: 1767—1782.
- [10] YAMADA T, ARAYA F. Construction of Vibration Table in an Extended World for Safety Assessment of Nuclear Power Plants[J]. Case Reports in Obstetrics & Gynecology, 2014(6): 157030.
- [11] WANG C Y, HE W, SHEN R J. Research on Redress System of Vibration Table in Multi-parameter Combined Environment Test System[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 157—158(4): 925—929.
- [12] LIU Y, DONG L M, KONG X R, et al. Construction of Virtual Vibration Testing Platform for Spacecraft[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1258—1264.
- [13] 祝耀昌. 我国东菱公司自主研制成功 35 t 级电动振动试验系统[J]. 航天器环境工程, 2007, 10(5): 336—338.
- ZHU Yao-chang. The Independent Research and Development of the Donlim Company in China is a Successful Test System for 35 t Electric Vibration[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007, 10(5): 336—338.
- [14] 张巧寿, 秦亚明. 世界最大推力电动振动台问世[J]. 航天器环境工程, 2013, 8(1): 1—3.
- ZHANG Qiao-shou, QIN Ya-ming. The World's Largest Thrust Electric Vibration Table[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 8(1): 1—3.
- [15] 秦亚明, 张巧寿. 永磁振动台磁路计算与仿真[J]. 强度与环境, 2009, 12(6): 55—57.
- QIN Ya-ming, ZHANG Qiao-shou. Magnetic Circuit Calculation and Simulation of Permanent Magnet[J]. Strength and Environment, 2009, 12(6): 55—57.
- [16] 杨炳渊, 张声雷. 导弹运输环境的单轴振动台模拟试验技术[J]. 装备环境工程, 2014, 4(2): 64—66.
- YANG Bing-yuan, ZHANG Sheng-lei. Simulation Test Technology of Missile Transportation Environment with Single Axis Vibrating Platform[J]. Materiel Environmental Engineering, 2014, 4(2): 64—66.
- [17] 郭继峰, 任万滨. 电动振动台模型辨识方法及其应用的研究[J]. 振动与冲击, 2011, 7(7): 242—244.
- GUO Ji-feng, REN Wan-bin. Research on Model Identification Method and Its Application in Electric Vibration Table[J]. Vibration and Impact, 2011, 7(7): 242—244.
- [18] 严侠, 李晓琳. 运用正弦扫频实现电动振动台模型的频域辨识[J]. 装备环境工程, 2015, 2(2): 28—30.
- YAN Xia, LI Xiao-lin. Frequency Domain Identification of the Model of the Electric Vibration Table Using Sine Sweep Frequency[J]. Materiel Environmental Engineering, 2015, 2(2): 28—30.
- [19] 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, 8(4): 7—9.
- ZHANG Zheng-ping, WANG Yu-hong, ZHU Xi-quan. Current State and Developing Trend of Combined Dynamic Environmental Test[J]. Materiel Environmental Engineering, 2006, 8(4): 7—9.
- [20] 贺旭东, 陈怀海. 双振动台随机振动综合控制研究[J]. 振动工程学报, 2006, 6(2): 147—149.
- HE Xu-dong, CHEN Huai-hai. Study on Dual-shaker Random Vibration Test Control[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 6(2): 147—149.
- [21] JEAN C. New Vibration Equipment for Ariane IV Class Satellites[C]// 1988 Proceedings Institute of Environmental Sciences. 1988: 242—248.
- [22] HAMMA G A, STROUD R C, UNDERWOOD M A. A Review of Multi-axis/Multi-exciter Vibration Technology [J]. Sound and Vibration, 1996, 30(4): 20—27.
- [23] LAKE J. Force Controlled Vibration Tests Using Voltage Current Measurements[C]// 1996 Proceedings 2 Institute of Environmental Sciences. 1996: 323—328.
- [24] 刘晓燕, 姜晓光. 多台并激振动控制系统硬件的研制[J]. 工程与试验, 2010, 50(6): 39—42.
- LIU Xiao-yan, JIANG Xiao-guang. Development of Hardware for Multi Platform and Vibration Control System[J]. Engineering and Testing, 2010, 50(6): 39—42.
- [25] 夏树杰, 张巧寿. 北京强度环境研究所的振动台技术发展及应用情况[J]. 强度与环境, 2008, 13(4): 62—63.
- XIA Shu-jie, ZHANG Qiao-shou. The Development of Vibration Table Technology and Application in Beijing Environmental Research Institute strength[J]. Strength and Environment, 2008, 13(4): 62—63.
- [26] 陈章位, 陈家焱. 振动试验低频控制精度的研究[J]. 振动与冲击, 2010, 8(3): 53—56.
- CHEN Zhang-wei, CHEN Jia-yan. Study on Low Frequency Control Accuracy of Vibration Test[J]. Vibration and Impact, 2010, 8(3): 53—56.
- [27] 范文涛, 姜同敏. 基于电动振动台的非高斯随机振动控制技术的研究和实现[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 18—22.
- FAN Wen-tao, JIANG Tong-min. Research and Implementation of the Non Gauss Random Vibration Control Technology Based on the Electric Vibration Table[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(3): 18—22.