

文章编号 1004-924X(2013)05-1258-07

飞行器虚拟振动试验平台构建

刘 源¹,董立珉^{1*},孔宪仁¹,王日昆¹,李霖圣²

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 上海航天卫星总装试验部,上海 201109)

摘要:针对用振动台进行飞行器振动环境试验时存在试验周期长、耗费高及易发生过试验或欠试验等问题,采用虚拟现实技术建立了飞行器虚拟振动试验平台。采用系统仿真软件 LMS AMESim 建立了电振动台正弦振动控制仪模型;通过多学科系统仿真软件 LMS Virtual. Lab 建立了振动台的多体系统动力学模型,进行了振动台多体动力学模型与电磁作动系统模型的机电联合仿真;实现了振动控制系统、电磁作动系统、振动台与试件机械系统的闭环仿真,构建了飞行器虚拟振动试验平台。利用该虚拟振动试验平台系统进行了盒式试件的正弦振动试验。结果表明,采用机电耦合建模方法构建的虚拟振动试验平台综合考虑了试件、振动台机械系统、控制系统及电气系统的耦合效应,可为飞行器的试前分析和虚拟振动试验提供试验环境。

关键词:飞行器设计;振动试验;机电联合仿真;振动台

中图分类号:V416.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1258

Construction of virtual vibration testing platform for spacecraft

LIU Yuan¹, DONG Li-min^{1*}, KONG Xian-ren¹, WANG Ri-kun¹, LI Lin-sheng²

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shanghai Assembly Test Department of Aerospace Satellite, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail:1010520507@163.com

Abstract: As the spacecraft vibration testing based on a shaking table has some defects, such as long time cycle, high cost, easy to produce over-testing and under-testing, a virtual vibration testing platform was built based on virtual reality technology. A sine vibration controller model of the electrical vibration table was built by system simulation software LMS AMESim and a multi-body model for the vibration table was established based on the multi-body simulation software LMS Virtual. Lab Motion. Furthermore, the model of electromagnetic actuator in the vibration testing system was realized using the simulation software LMS AMESim, and the co-simulation of vibration testing system was carried out by uniting the multi-body model and LMS AMESim model. In combination of the vibration control system, electromagnetic actuation system and shaking table test mechanical system, the whole

收稿日期:2012-11-18;**修订日期:**2012-12-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60704020);中国博士后科学基金资助项目(No. 2012M510971);黑龙江省博士后基金资助项目(No. LBH-Z11185);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. HIT.NSRIF.2014027)

virtual vibration test system was implemented. Finally, a virtual sine vibration test for a box & thin specimen was performed by using the proposed system. Test results show that the virtual vibration testing platform based on the electrical and mechanical coupling modeling method can provide test environments for test analysis and virtual vibration test because it considers the coupling effect of the test-piece and the electrical vibration table.

Key words: spacecraft design; vibration test; mechatronic integrated simulation; vibrating table

1 引言

目前,飞行器产品的振动环境试验一般通过振动试验台完成,即通过对物理样机或实际产品进行直接的试验测试,直观地观察和评价实物在不同振动激励下的响应和表现,进而基于试验结果对设计方案进行改进。但是,基于振动台的振动环境试验也存在以下局限^[1-4]:(1)实施振动试验的周期长,耗费巨大;(2)试验台难以完全模拟真实的振动激励,易发生过试验或欠试验问题;(3)在试验台上难以模拟所有工况;(4)振动试验受传感器数量和安装位置的限制,能够获取的试验结果信息有限;(5)基于振动试验进行设计验证和改进有较大的局限性,只能通过试错方式进行设计改进,难以做到优化;(6)对于一些尺寸巨大的结构,全尺寸振动试验在现有设备上难以实施。针对上述问题,结合数值计算与试验的优点采用虚拟现实技术建立一套虚拟振动试验系统有其重要意义。

国外相关领域的研究机构已经进行过多年的虚拟振动试验研究,并且已经将相关成果应用于实际工程。虚拟振动试验开展的较有代表性的机构包括 NASA、Airbus、ESA 及 ESTC^[5-11]等。NASA 的结构环境强度实验室提出了航空航天产品测试的“KBT (Knowledge Based Testing)”方法并建立了“VETO (Virtual Environment for Test Optimization)”软件工具。Airbus 开发了飞机虚拟振动台系统并将其用于工程实际,其中有代表性的应用包括 A380 襟翼系统虚拟试验、A400M 垂尾虚拟试验、整机级虚拟 GVT 试验等。ESA 和 ESTEC 通过虚拟振动试验来检验航天器大型结构的抗振能力和振动敏感性等。国内对飞行器虚拟环境试验的研究起步较晚,相关研究多集中于采用有限元方法进行振动试验的虚拟仿真及数值验证,对于振动台的机电系统集成仿

真研究较少^[4,12-14]。

本文对电振动台的机电联合仿真技术进行了研究,分别建立了振动台机械系统、振动控制系统、电磁作动系统和试件柔性体的仿真模型,通过各系统间的联合仿真,建立了飞行器虚拟振动试验平台。在此基础上,利用该虚拟试验系统进行了试件的正弦振动试验。

2 虚拟振动试验平台结构

虚拟振动试验是指通过软件环境建立振动试验台模型和被测试件模型,在软件环境中基于振动试验台和被测试件的虚拟仿真模型完成与实际振动试验相同或类似的振动环境试验任务。

飞行器虚拟振动台系统的构建基于实际振动台的组成结构,即在软件环境内分别建立振动台台体机械系统、振动控制与激励系统及被测试件的模型,并将各部分集成,形成机电联合仿真环境。构建虚拟振动台系统有两种方式,一种是基于线性有限元方法的开环建模,主要是进行系统级振动分析;另一种是基于多体动力学和机电联合仿真的闭环建模,主要是进行机电耦合分析和刚柔耦合分析。采用机电综合分析方法建立飞行器虚拟振动试验系统,虚拟振动试验系统框图如图 1 所示。

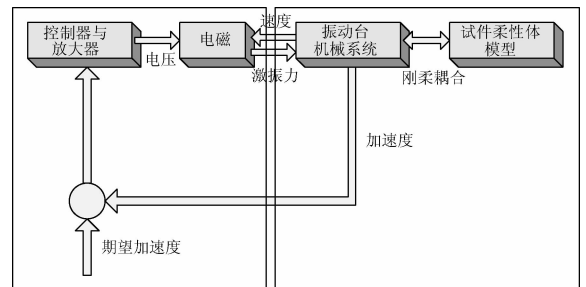


图 1 虚拟振动试验系统框图

Fig. 1 Block diagram of virtual vibration test system

通过集成多学科仿真,采用机电综合方法建立完整的振动台闭环模型。振动台的多体动力学模型与振动控制模型以及电磁模型集成时,一方面振动台模型将台面的加速度响应反馈给振动台的控制模型,与期望的加速度进行比较,经控制运算和放大后得到电压信号。电压信号进一步传递给电磁模型,从而产生相应的振动激励力。振动激励力通过接口传递到振动台机械系统多体模型,如此构成闭环。在机电综合方法中,试件的模型是柔性体模型,与振动台的多体模型在软件环境中进行装配和耦合分析。柔性体模型在进行机电联合仿真之前进行试验相关性分析和模型修正,以保证结果的精确性。该方法的优点是能够建立完整的振动台闭环模型,通过集成的多学科仿真,系统研究振动台机械结构设计、控制律和控制参数、电磁系统参数等。

3 虚拟振动试验平台建模

3.1 振动台台体多体动力学建模

电振动台是振动环境试验的重要设备,具有频率范围宽,波形失真小等优点。将其配合不同的振动控制系统可以完成各种规范的正弦、随机和瞬态振动试验,飞行器的振动试验大多使用这种振动台。从机械结构角度考虑,电振动台由动圈组合体部分与静圈部分构成。动圈组合体通过弹簧钢片悬挂在静圈上,静圈通过空气弹簧固定于地面,其中动圈组合体又由动圈骨架与线圈 2 部分构成。

以 Unholtz-Dickie T2000-44 电振动台为研究对象,对其台体机械系统进行建模。振动台除典型工作模态(动圈组合体相对于静圈运动)外,在低频段存在隔振模态,在高频段驱动线圈的模态会被激发。由于隔振模态与线圈模态对应的特征频率都远在振动台的工作频率之外,在振动台工作频率区间内,这两种模态对系统响应的影响很微小,在进行多体动力学建模时,不再考虑这两种模态,做出如下简化处理:动圈骨架与驱动线圈间视为刚性连接,也即视动圈组合体为一个刚性整体;忽略隔振装置(空气弹簧)的影响,即将静圈作为一个刚体直接固定于支撑结构上,由于支撑结构固定于安装基础(地基),静圈与支撑可以视

为一个固定于地面的刚体;动圈组合体与静圈间的 4 个板簧连接用一个等效的弹性阻尼连接代替。利用 LMS 公司的 Virtual. Lab Motion 建立振动台的多体动力学模型,分别建立动圈组合体、静圈、导向轴承的 CAD 模型并在 Virtual. Lab Motion 中完成各部分的装配,得到振动台装配体模型如图 2 所示。

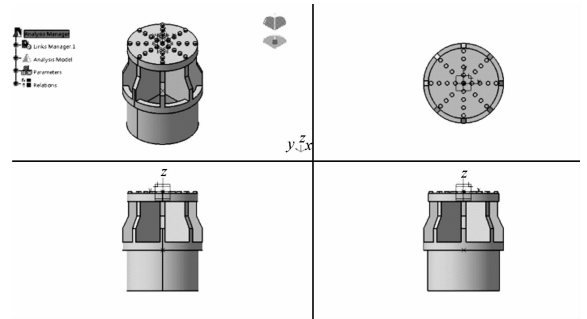


图 2 动圈组合体的 CAD 模型

Fig. 2 CAD model of moving coil combination

静圈固定于安装基础,在建模时将静圈固定于“大地坐标系”。动圈组合体相对于静圈(通过导向轴承)在竖直方向运动,利用“固定副”将导向轴承与动圈组合体固定,导向轴承与静圈间通过竖直方向的“滑动副”连接,用以模拟动圈组合体相对于静圈的运动。

当 2 个构件在工作过程中存在相互作用力时,Virtual. Lab Motion 通过“力”定义这种相互作用关系。前文已述及,动圈组合体与静圈间的板簧连接可用一个等效的弹簧阻尼连接代替,分别在动圈组合体与静圈中心轴线上建立各自的连接点,在 2 个连接点间建立一个“TSDA(Translational Spring-Damper-Actuator)”即可确立动圈组合体与静圈间的弹性阻尼连接关系。其中 TSDA 的刚度与阻尼系数可根据如下公式确定:

$$K = Mf_p^2, \quad (1)$$

$$C = 2\xi \sqrt{MK}, \quad (2)$$

其中, K 为弹性阻尼系统的刚度系数(m/s); C 为弹性阻尼系统的阻尼系数($N \cdot s/m$); M 为动圈组合体的质量(kg); f_p 为弹性阻尼系统的固有圆频率(rad/s); ξ 为弹性阻尼系统的阻尼比(无量纲)。

在 Virtual. Lab Motion 中利用运动副将各实体的 CAD 模型进行装配,并确定各实体间的连接关系,利用 Virtual. Lab 建立的振动台台体

多体动力学模型如图 3 所示。

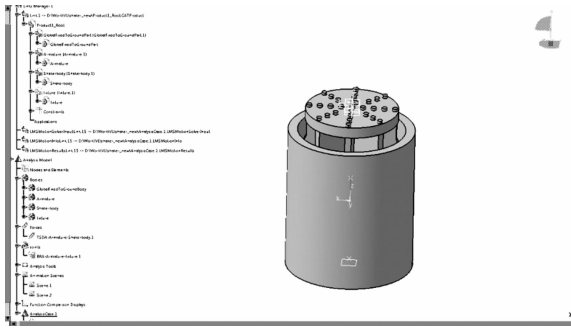


图 3 振动台台面多体动力学模型

Fig. 3 Multi-body dynamics model of vibro-bench

3.2 机电耦合的电振动台集中参数模型

由于动圈组合体中存在线圈回路,该三自由度机械系统又与振动台电磁回路系统相耦合。机械系统与电磁系统间的相互作用表现在两个方面。

一方面,动圈线圈会受到电磁力的作用,该电磁力可以通过安培定理确定:

$$F = Blni = K_f i, \quad (3)$$

其中, B 为磁场强度 (T); l 为单匝线圈的长度 (m); n 为线圈匝数; i 为线圈中流过的电流 (A)。

当动圈与静圈的相对运动幅度(位移)较小时, F 与 i 之间表现为线性关系,记其比例常数为 K_f , K_f 也称为电振动台的推力常数。

另一方面,当线圈在磁场中运动时,在线圈两端又会相应的产生感应电压,电压大小可由法拉第电磁感应定律确定:

$$E = Bln\dot{x} = K_f \dot{x}, \quad (4)$$

其中, \dot{x} 为线圈相对于磁场的运动速度。

对于线圈回路,其最小阻抗为线圈的电阻,然而,随着电流频率的增加,电路又会表现出一定的自感性,导致线圈的阻抗随频率的增加而增加。驱动线圈中的输入电压与电流满足如下方程:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + K_f(\dot{x}_c - \dot{x}_b) = e, \quad (5)$$

其中, R 为线圈电阻 (Ω); L 为线圈的自感系数 (H); e 为施加在线圈两端的电压 (V)。

由式(3)~式(5)可构成电振动台的电磁作动系统模型。利用 Imagine. Lab AMESim 的机械与电磁元件库建立振动台系统的机电耦合模型如图 4 所示。

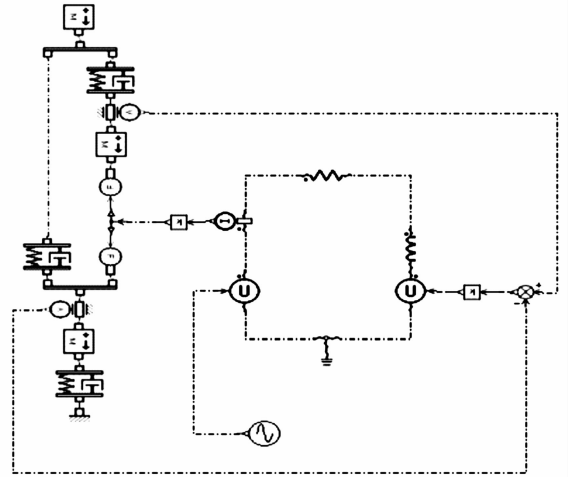


图 4 振动台系统的机电耦合模型

Fig. 4 Electromechanical coupling model of shaking table system

3.3 振动控制系统建模

振动控制系统本质是一个振动激励信号发生器,其可根据试验要求产生电压信号,该较小量级的电压信号经功率放大器放大后驱动振动台台面运动,使得控制点的响应信号(位移、速度、加速度)满足试验规定参考值。

在数字式正弦振动控制仪中,扫频信号通过中断程序依据不同的采样速率对正弦表进行采样,产生不同频率的正弦信号。数字式正弦振动控制仪采用的正弦表产生方式如下:根据 D/A 转换器的分辨率,产生一个整周期的正弦信号,该整周期正弦信号的点数受 D/A 转换器的分辨率限制,幅值为 D/A 转换器的最大刻度:

$$f = a \sin\left(2\pi \frac{q_i}{p}\right), \quad (6)$$

其中, p 为正弦表点数; q_i 取值为 $0, 1, 2, \dots, p$ 。

根据需要产生正弦信号频率,从正弦数表中读取数据的采样率由中断程序决定的,从正弦表中读取数据点发送至数据缓冲区,数据缓冲区的数据则通过 D/A 转换器以等频率的方式发送。改变采样率的大小,即可获得不同频率的正弦信号。采样率 s 可由如下公式计算:

$$f_1 = \frac{s \cdot f_c}{p}, \quad (7)$$

其中, f_1 为产生的正弦信号频率; f_c 为 D/A 转换器的信号发送频率; p 为正弦表点数。

进行振动控制系统的仿真时,正弦扫频信号可表达为:

$$x(t) = A(t)\sin(f(t) + \theta(t)), \quad (8)$$

其中, $\theta(t) = \int_{\tau=0}^t 2\pi f(\tau) d\tau$ 为正弦信号的相位, $f(t)$ 为正弦信号的频率。

为保证频率切换时相位连续,可通过累计相位的方法产生正弦扫频信号:

$$\theta(t_n) = 2\pi f(t_n)\Delta t + \theta(t_{(n-1)}), \quad (9)$$

其中, $t_{(n-1)}$ 为前一个采样时刻; t_n 为当前采样时刻; Δt 为采样时间间隔。

正弦振动控制仪的目标是实现响应信号幅值的控制,对正弦振动控制仪建模时,对于每一个给定的频率 ω_i ,系统在此频率下的传递函数如下:

$$H(\omega_i) = \frac{A_d(\omega_i)}{A_c(\omega_i)}, \quad (10)$$

其中, A_d 为响应信号的幅值; A_c 为驱动信号的幅值。

对于每一个频率点,记参考信号谱在当前频率下的幅值为 $A_{\text{ref}}(\omega_i)$,根据当前频率点响应信号的幅值与试验参考幅值确定下一个频率点系统的反传递函数,如式(11)所示:

$$\begin{cases} T(\omega_{i+1}) = T(\omega_i) \left(\frac{1+c}{e_i+c} \right) & e_i > 1 \\ T(\omega_{i+1}) = T(\omega_i) \left(\frac{1/e_i+c}{1+c} \right) & e_i < 1 \end{cases}, \quad (11)$$

其中, $e_i = \frac{A_{\text{ref}}(\omega_i)}{A_d(\omega_i)}$; T_i 为系统的反传递函数; c 为压缩因子。

进而,下一个频率点的驱动信号幅值可表示为:

$$A_d(\omega_{i+1}) = T(\omega_{i+1})A_{\text{ref}}(\omega_{i+1}). \quad (12)$$

4 正弦振动试验

根据以上建立的电振动台各部分数学模型,电振动台机械部分与电磁作动系统间的相互作用体现在两个方面:电磁作动系统输出的电磁力作用于振动台动圈,同时动圈的速度会影响电磁作动电路中电流的大小。Virtual Lab Motion 提供了对 AMESim 的 I/O 接口,两者在通讯步长上对各自模型进行求解并交互

数据,实现机械系统模型与电磁系统模型的联合仿真分析。

采用建立的虚拟振动试验平台进行试件振动试验,试验对象为一尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ 的盒式物体,材料为铝合金,利用改进的 Craig-Bampton 模态综合法与多体系统动力学混合建模法在 VL Motion 中建立试件与振动台的刚柔耦合模型。在 Virtual Lab Motion 中建立的盒式试件与振动台的刚柔耦合模型如图 5 所示。

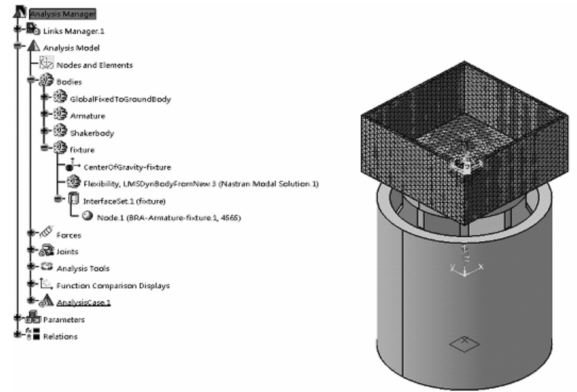


图 5 盒式试件与振动台的刚柔耦合模型

Fig. 5 Rigid-flexible coupled model of box & thin specimen and shaking table

以线性扫频方式进行盒式试件的虚拟正弦振动试验,扫频范围为 $10 \sim 35 \text{ Hz}$,扫描速率为 5 Hz/s ,仿真时间为 5 s ,扫描过程中保持驱动线圈电路的输入电压幅值恒定。振动台台面中心点轴向位移与加速度曲线分别如图 6 与图 7 所示。

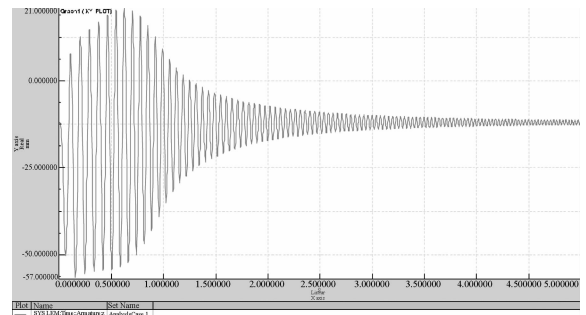


图 6 台面中心点的轴向位移曲线

Fig. 6 Axial displacement curve of shaking table center

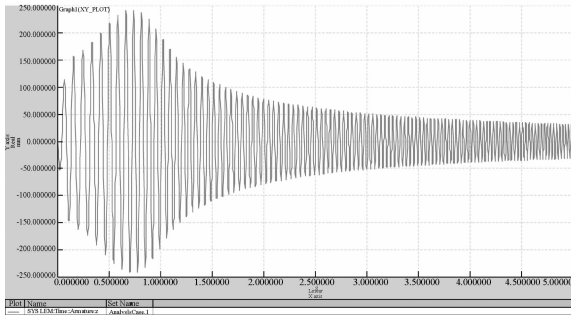


图 7 台面中心点的轴向加速度曲线

Fig. 7 Axial acceleration curve of shaking table center

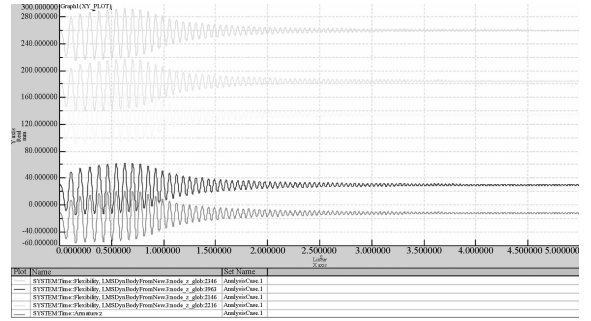


图 8 全局坐标系下测点及动圈的 Z 向位移曲线

Fig. 8 Z-axis displacement curves of testing points and moving coil in global coordinate system

对于柔性盒式试件,分别取顶点(节点 2 346)、底面中心位置附近一点(节点 3 963)、前面板中心位置附近一点(节点 2 146)及左面板上一点(节点 2 216)为测量点。在全局坐标系下,各测点以及动圈在竖直方向(Z 向)的位移曲线如图 8 所示。

5 结 论

本文分别建立了电振动台的振动控制系统、电磁作动系统和振动台台体机械系统的数学仿真模

型,在此基础上,构建了飞行器虚拟振动试验平台系统。以盒式试件为试验对象,利用建立的虚拟振动试验平台系统进行了试件的正弦振动试验,完成了虚拟振动试验平台系统的功能验证。试验结果表明,所建立的虚拟振动试验平台系统实现了飞行器振动试验系统的机电联合仿真,该虚拟振动试验平台可为飞行器的试前分析和虚拟振动试验提供试验环境。为实现飞行器产品的虚拟振动试验,动圈与飞行器产品连接夹具的非线性建模和飞行器的高精度建模将是下一步研究并解决的重点问题。

参考文献:

[1] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验 [M]. 北京:中国宇航出版社,1996:23-27.
KE SH Q. *Satellite Environment Engineering and Simulation Test* [M]. BeiJing: China's Space Press, 1996: 23-27. (in Chinese)

[2] 蒋明, 何小元. 振动轮式微机械陀螺动态特性的光学测试 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 295-299.
JIANG M, HE X Y. Optical testing of dynamic characteristic of vibrating wheel micromechanical gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 295-299. (in Chinese)

[3] 贾学志, 王栋, 张雷, 等. 轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1824-1831.
JIA X ZH, WANG D, ZHANG L, et al.. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera [J]. *Opt.*

Precision Eng., 2011, 19(8): 1824-1831. (in Chinese)

[4] 向树红, 于丹, 晏廷飞, 等. 卫星动力学虚拟试验的几个关键技术 [J]. 航天器环境工程, 2002(4): 13-22.
XIANG SH H, YU D, YAN T F, et al.. Some key techniques of dynamic virtual test for safellites [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2002(4): 13-22. (in Chinese)

[5] 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.

[6] RICCI S, PEETERS B. Virtual shaker testing for predicting and improving vibration test performance [C]. *Proceedings of the IMAC-XXVII, Orlando*, 2009: 1-16.

[7] BETTS E J, VANSANT K, PAULSON C, et al.. Smart testing using virtual vibration testing [C].

- Proceedings of the 24th Aerospace Testing Seminar (ATS), Manhattan Beach*, 2008; 103-111.
- [8] APPOLLONI M, COZZANI A. Use of advanced integrated CAE tools to provide an end-to-end simulation of payload testing on Hydra [C]. *Proceedings of Seminar on Integrated open CAD/CAE Platforms for Mechanical Engineering*, Noordwijk, 2005; 579-591.
- [9] KLENKE S E, BACA T. Structural dynamics test simulation and optimization for aerospace components [C]. *Proceedings of the Second Test and Evaluation International Aerospace Forum*, Washington, 1996; 82-89.
- [10] KLENKE S E, LAUFFER J P, GREGORY D L, et al.. *The Vibration Virtual Environment for Test Optimization* [M]. New Mexico: S. V. Symp, 1996; 67-76.
- [11] KLENKE S E, REESE G M, SCHOOF L A, et al.. Modal test optimization using VETO (Virtual Environment for Test Optimization) [R]. Sandia: Sandia Report SAND95-2591, 1996; 1-7.
- [12] 向树红, 晏廷飞, 邱吉宝. 40 吨振动台虚拟试验仿真技术研究 [J]. 宇航学报, 2004, 25(4): 375-381.
- XIANG SH H, YAN T F, QIU J B. Research on the computer simulate technology of vibration virtual environment for test about 40 t shaker [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(4): 375-381. (in Chinese)
- [13] 邱吉宝, 王建民. 航天器虚拟动态试验技术研究及展望 [J]. 航天器环境工程, 2007, 24(1): 1-14.
- QIU J B, WANG J M. A review on virtual dynamic test techniques for space vehicles [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(1): 1-14. (in Chinese)
- [14] 陈家焱, 王海东, 周建川, 等. 多点激励振动试验控制技术进展 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 69-73.
- CHEN J Y, WANG H D, ZHOU J CH, et al.. Progress in multi-exciter vibration testing control technology [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(3): 69-73.

作者简介:



刘 源(1981—),男,山东新泰人,博士后,讲师,2007年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事飞行器多学科集成设计及优化、飞行器虚拟试验技术的研究。E-mail: liuyuan_hit@hit.edu.cn



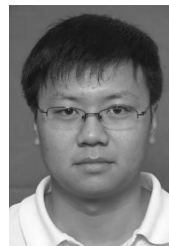
董立珉(1983—),男,黑龙江大庆人,博士,助理研究员,2007年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事卫星通信及卫星电子系统方面的研究。E-mail: 1010520507@163.com



孔宪仁(1961—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1983年、1986年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,现为哈尔滨工业大学卫星技术研究所副所长,主要从事固体动力学、飞行器热控技术等方面的研究。E-mail: kongxr@hit.edu.cn



王日昆(1971—),男,山东蓬莱人,工程师,2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要研究方向为飞行器的总体设计。E-mail: wrk@hit.edu.cn



李霖圣(1986—),男,河南信阳人,硕士,2008年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为虚拟试验及数字化制造技术。E-mail: farewe@126.com