

改变连接特性提高振动台冲击响应谱模拟能力

沈志强, 朱子宏, 郭建龙

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: **目的** 提高振动台冲击响应谱试验模拟能力。**方法** 分析影响振动台冲击响应谱模拟能力的原因, 提出通过改变连接特性提高振动台冲击响应谱模拟能力的方法, 并对该方法进行理论分析和试验验证。**结果** 利用具有谐振效应的台面能够将160 kN振动台冲击响应谱量级由原来的1000g提高至2000g, 并能够实现负载情况下1600g的冲击响应谱试验, 提高了振动台冲击响应谱模拟能力。**结论** 通过改变连接特性可以提高振动台冲击响应谱模拟能力, 同时应尽量避免使用振动试验夹具进行冲击试验, 针对产品试验要求设计冲击试验夹具, 能够获得更理想的冲击试验效果。

关键词: 夹具; 连接; 振动台; 冲击响应谱

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.006

中图分类号: TJ02; V41 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0030-04

Improvement of the Shock Response Level of Shaker by Changing Linking Characteristic

SHEN Zhi-qiang, ZHU Zi-hong, GUO Jian-long

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: Objective To improve the shock response level of shaker. **Methods** The reasons that influenced the shock response level of shaker were analyzed. Then the method to improve the shock response level of shaker by changing linking characteristic was put forward, while the theoretical analysis and the test demonstration were carried out. **Results** The SRS level with 160 kN shaker could be improved from 1000g to 2000g by using the table with harmonic response. The SRS level under load of 1600g could be conducted. The shock response was improved. **Conclusion** The shock response level of shaker can be improved by changing linking characteristic, at the same time, the fixture of vibration should be avoided. The effect of SRS can be better with the fixture of vibration which are designed as required.

KEY WORDS: fixture; linking characteristic; shaker; shock response spectrum

航天器产品在运输、发射、轨道运行或返回期间受到的各种瞬态动力学载荷, 称之为冲击环境。冲击环境可能引起产品结构及性能的损坏甚至失效, 因此

冲击试验成为检验和暴露航天器研制过程中存在的设计问题和加工缺陷的环境模拟试验项目之一。包括GJB 1027A在内的多个标准规定, 冲击试验所选用

收稿日期: 2015-11-08; 修订日期: 2015-11-28

Received: 2015-11-08; Revised: 2015-11-28

作者简介: 沈志强(1985—), 男, 江西人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天器动力学环境试验。

Biography: SHEN Zhi-qiang(1985—), Male, from Jiangxi, Master, Engineer, Research focus: dynamics of spacecraft environment test.

的试验方法应能用一瞬态载荷满足所要求的冲击响应谱,同时该瞬态过程的持续时间与飞行中预期的冲击环境试验相当^[1-3]。根据试验设备的不同,冲击响应谱试验方法可分为三种:火工品爆炸方法、机械撞击方法和电动振动台模拟方法^[4-7]。其中电动振动台模拟冲击响应谱试验方法具有重复性好、可控性高等优点,被广泛应用于航天器组件的冲击响应谱试验,但受到试验设备、位移和推力等性能的限制,能够实现的冲击试验量级有限。目前北京卫星环境工程研究所使用的LING公司生产的160 kN振动台能够实现垂直向空载1000g的冲击响应谱试验,已经是振动台能够实现的较高冲击试验量级,但是仍然不能满足型号产品的试验需求。

2011年中国航天员训练中心马爱军研究员提出利用谐振装置在50 kN振动台实现高g值冲击响应谱的方法,并通过有限元模拟的形式进行了谐振装置的分析,将原本250g的试验能力提高至500g^[8]。在此之前,国外学者GRAY提出使用谐振杆装置代替传统转接台面,利用谐振响应在振动台上实现高g值的冲击响应谱试验^[9]。以上两篇文章为提高振动台冲击响应谱模拟能力提供了思路,但是前者仅进行了有限元分析,未进行试验验证,后者的谐振杆固有频率较高,尽管提高了试验量级,但是难以实现低拐点的试验条件。

因此文中分析了影响振动台冲击试验的关键因素,提出通过改变连接特性提高振动台冲击响应谱模拟试验的方法,并对该方法进行了试验研究。

1 振动台冲击试验工作原理

振动台冲击试验系统一般由振动台、电荷放大器、控制系统、功率放大器、试验件、夹具和台面等几个部分组成。冲击响应谱试验过程中,控制系统将设置好的冲击谱转换成时域电压驱动谱,经缓冲存储器后由数模转换器将数字量变成模拟量,然后送入功率放大器激励振动台,生成一次脉冲运动。夹具上的控制传感器把采集到的脉冲响应信号经电荷放大器后送入控制系统,得到加速度时域波形。控制仪将时域谱处理成冲击谱。

从图1中可以发现,在振动台系统(含台体、控制仪、功率放大器、电荷放大器)不变的时候,影响试验件冲击试验能量传递的主要因素是台面特性和试验夹具特性。因此改变连接特性是提高振动台冲击响应谱模拟能力的重要途径^[10-13]。



图1 振动台冲击试验流程

Fig.1 The process of shock test with shaker

2 提高振动台冲击试验能力方法

2.1 连接特性对冲击响应谱合成的影响

为分析连接特性对冲击响应谱合成的影响,将振动台冲击响应系统简化为单自由度系统的冲击响应函数。物理模型如图2所示,该系统的数学方程为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

式中: m, c, k 分别为系统的质量、阻尼和刚度。设 $c/m=2f_n \xi$; $k/m=f_n^2$; $\ddot{f}_i = f(t)/m$; 则式(1)变形得:

$$\ddot{x}(t) + 2f_n \xi \dot{x}(t) + f_n^2 x(t) = \ddot{f}_i \quad (2)$$

式中: f_n 和 ξ 分别表示系统的固有频率和阻尼比。式(2)的通解为:

$$X(t) = -\frac{1}{2\pi f_n \sqrt{1-\xi^2}} \times \int_0^t \ddot{f}(\tau) \times e^{-2\pi f_n \xi (t-\tau)} \cdot \sin 2\pi f_n \sqrt{1-\xi^2} (t-\tau) d\tau \quad (3)$$

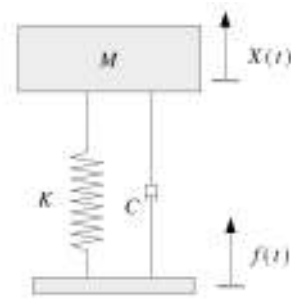


图2 冲击模型

Fig.2 Model of shock test

式(3)是系统的位移响应与时间 t 和固有频率 f_n 的关系式,表示为 $X(t, f_n)$,而常用的冲击响应谱是加速度和频率的关系式。对公式(3)求2阶导数后表示为 $\ddot{X}(t, f_n)$,经过计算可以得到一系列的最大加速度响

应值和固有频率 f_n 对应的点。将这些点光滑连接,就得到了一个冲击响应谱曲线^[14-16]。

由以上分析可知,冲击响应谱由一系列最大加速度值和固有频率对应点拟合而成,因此在一定的频率范围内,固有频率越多,响应值越大,则冲击效果越好。在产品和设备不变的情况下,影响冲击响应谱效果的是产品与振动台之间的连接特性,因此要提高振动台冲击试验模拟能力则需要改变振动台与产品连接的台面及夹具的特性。

2.2 改变台面特性

160 kN 振动台原有台面如图3所示,仅能实现空载 600g 的冲击响应谱值。因为该台面是为振动试验设计的,是实心结构,单位体积内质量大,不具备冲击放大效应,影响了冲击试验效果。因此笔者从减重和对台面进行结构优化等角度出发,设计了圆台型冲击试验台面,并将圆台型冲击试验台面(如图4所示)与旧台面进行对比。

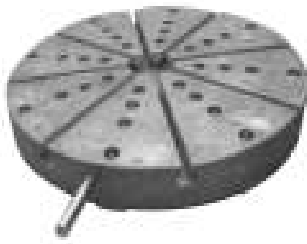


图3 旧台面

Fig.3 The former table board



图4 圆台型台面

Fig.4 The circular table board

2.2.1 有限元分析对比

通过有限元分析的方法对比了新旧台面的特性,圆台型台面的一阶固有频率低,而且3000 Hz 内的模态数多,放大倍数大,符合2.1节理论计算的效果。因此有限元模拟的结果表明,圆台型台面能够实现更大量级的冲击响应谱试验。

表1 新旧台面有限元计算结果对比

Table 1 Comparison of the results of finite element of former table board and circular table board

	质量/ kg	一阶固有 频率/Hz	3000 Hz 内 模态数	3000 Hz 内最 大品质因子
旧台面	62	2175	5	3.21
圆台型台面	51	458	39	20.8

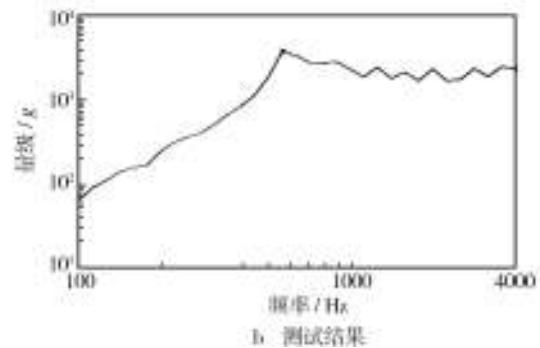
2.2.2 试验效果测试

对加工完成后的圆台型台面进行试验测试,如图

5所示。在空载情况下能够实现冲击响应谱的量级为2000g,在负载约40 kg的产品试验测试中,能够实现冲击响应谱的量级为1600g,远高于振动台空台测试的1000g冲击试验。测试结果表明:利用圆台型台面改变振动台与受试产品之间的连接特性能够提高振动台冲击试验模拟能力;通过降低台面的固有频率,能够实现500 Hz左右的低拐点冲击响应谱模拟试验。



a. 测试状态



b. 测试结果

图5 圆台型台面的冲击试验测试

Fig.5 Shock response test of circular table board

2.3 改变夹具特性提高冲击试验能力

表2分析对比了振动试验夹具与冲击试验夹具的不同,冲击试验要求夹具除了为产品提供接口外,还应具有放大效应。振动试验要求夹具尽可能的刚性,从机械传递的角度来看,对夹具的要求是固有频率要高,最好高于试验频率的上限,或者夹具的一阶固有频率至少高于试件一阶固有频率的2~3倍,以避免试件与夹具产生振动耦合而使其响应放大。其次夹具

表2 振动试验与冲击试验夹具的区别

Table 2 Difference of vibration fixture and shock fixture

类型	一阶固有频率	模态数	品质因子
振动试验夹具	越高越好,避开产品共振	越少越好	越小越好, $Q \leq 4$
冲击试验夹具	无特殊要求	越多越好,试验拐点附近有共振点	越大越好

的阻尼要尽可能大,其品质因子 $Q \leq 4$ 。冲击试验夹具的要求正好相反,其模态数多、品质因子大(最好接近10)才能够更好地实现冲击试验效果。现在大多数试验为了方便冲击试验夹具与振动试验夹具采用同一夹具,就会出现由于夹具性能不适合进行冲击试验而影响了产品冲击试验的效果。因此对于不满足冲击

试验效果的夹具应当舍弃,重新设计新的冲击试验夹具进行试验。

由于受振动台推力限制,振动台冲击试验夹具质量越轻越能够实现更高的冲击量级。图6、图7所示为嫦娥样品舱设计的振动试验夹具及冲击试验夹具。冲击试验结果如图8所示,满足冲击试验要求。



图6 样品舱振动试验

Fig.6 Vibration test of sample cabin



图7 样品舱冲击试验

Fig.7 Shock test of sample cabin

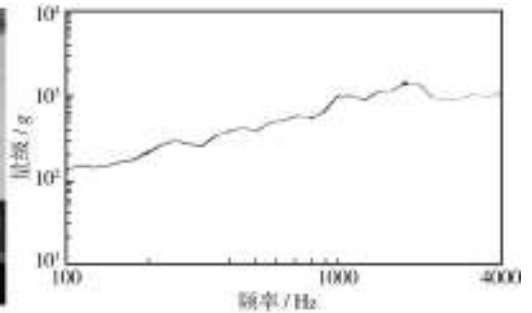


图8 样品舱冲击试验曲线

Fig.8 Curve of Shock test with sample cabin

3 结论

通过改变振动台与产品之间的连接特性,即台面特性和夹具特性,提高了振动台冲击响应谱模拟能力,并得出如下结论。

1) 在相同条件下,利用具有谐振效应的台面能够将160 kN振动台冲击响应谱量级由原来的1000g提高至2000g,并能够实现负载情况下1600g的冲击响应谱试验,提高了振动台冲击响应谱模拟能力。

2) 由于振动试验夹具与冲击试验夹具要求不同,尽量避免使用振动试验夹具进行冲击试验,针对产品试验要求设计冲击试验夹具,能够获得更理想的冲击试验效果。

参考文献:

- [1] NASA-STD-7003, Pyroshock Test Criteria[S].
- [2] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Laboratory Tests[S].
- [3] GJB 1027A—2005, 运载器、上面级和航天器试验要求[S]. GJB 1027A—2005, Test Requirements for Launch, Upper-stage and Space Vehicles[S].
- [4] BOTTA F, CERRI G. Shock Response Spectrum in Plates under Impulse Loads[J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 308(s3—s5): 563—578.
- [5] 张建华. 航天产品的爆炸冲击环境技术综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(3): 30—35

launch Vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(3): 30—35

- [6] 穆瑞忠, 张建华. 航天器的冲击谱模拟试验方法[J]. 强度与环境, 2008, 35(3): 32—37.
- MU Rui-zhong, ZHANG Jian-hua. Methods of SRS Simulation Testing for Space Hardware[J]. Structure & Environment Engineering, 2008, 35(3): 32—37.
- [7] 李树勇. 冲击谱中过试验与欠试验的控制[J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 41—43.
- LI Shu-yong. Control of Over-test and Short-test in Shock Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 41—43.
- [8] 马爱军, 石蒙, 刘洪英, 等. 应用谐振装置在电动振动台上实现高量级冲击响应谱的仿真研究[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(5): 427—430.
- MA Ai-jun, SHI Meng, LIU Hong-ying, et al. Simulations of High Level Shock Response Spectrum Test Using Resonant Fixture on an Electrodynamics Shaker[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(5): 427—430.
- [9] GRAY P J. Alternate Methods for High Level Pyrotechnic Shock Simulation[C]// Proceeding 37 ATM of IEST, 1991.
- [10] 徐鹏, 祖静, 范锦彪. 高g值加速度冲击试验技术研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 241—244.
- XU Peng, ZU Jing, FAN Jin-biao. Acceleration Shock Test Technology with Higher Values of g[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 241—244.
- [11] 王招霞, 王剑, 樊世超. 振动试验系统在冲击响应谱试验中的应用[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 137—139.
- WANG Zhao-xia, WANG Jian, FAN Shi-chao. Application of

(下转第62页)

35(1):36—39.

[9] YANGA X, VANGB C, TALLMANA D, et al. Weathering Degradation of a Polyurethane Coating[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 74:341—351.

[10] 袁宏辉,孙杏蕾,张恒. 氙灯老化与自然曝晒测试所得颜料耐候性的相关性[J]. 中国涂料, 2009, 24(12):35—38.
YUAN Hong-hui, SUN Xing-lei, ZHANG Heng. Correlation Of Weatherability Tested by Xenon Lamp Aging and Natural Exposure Method[J]. China Coatings, 2009, 24(12):35—38.

[11] 叶美琪,金晓鸿,陈乃红,等. 船舶涂料海洋环境与实验室加速试验相关性研究—海洋大气区用涂料体系[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2), 4—11.
YE Mei-qi, JIN Xiao-hong, CHEN Nai-hong, et al. Study on Correlation between Sanya Outdoor Environmental Test and Accelerated Tests in Laboratory for Ship Coatings—Coating Systems for Sanya Outdoor Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2):4—11.

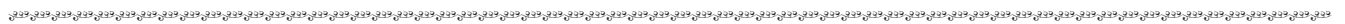
[12] ANTONIO R, FRANCISCOC. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion of Carbon Steel[J]. Corrosion Science, 1999, 41:75—89.

[13] 潘家亮,王佰森,张拴勤,等. 涂层光泽度影响因素理论分析研究[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(12):31—33.
PAN Jia-liang, WANG Bai-sen, ZHANG Suan-qin, et al. Study on Theory Analysis of Influencing Factors on Coatings Glossiness[J]. Modern Paint and Finishing, 2011, 14(12):31—33.

[14] YANGA X, VANGB C, TALLMANA D, et al. Weathering Degradation of a Polyurethane Coating[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 74:341—351.

[15] CHIAVARI C, BERNARDI E, MARTINI C, et al. Atmospheric Corrosion of Cor-Ten Steel with Different Surface Finish: Accelerated Ageing and Metal Release[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 136:477—486.

[16] WANG B B, WANG Z Y, HAN W, et al. Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloy 2024-T3 Exposed to Salt Lake Environment in Western China[J]. Corrosion Science, 2012, 59:63—70.



(上接第 33 页)

SRS Test by Shaker[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(2):137—139.

[12] 张华,吴斌. 航天器爆炸冲击环境模拟装置仿真研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(2):61—64.
ZHANG Hua, WU Bin. Simulation of the Testing Equipment used for Simulating Pyroshock Environment of Missiles and Launch Vehicles[J]. Computer Simulation, 2008, 25(2):61—64.

[13] 石蒙,马爱军,刘洪英,等. 一种实现谐振响应夹具设计仿真计算[J]. 强度与环境, 2011, 35(3):46—49.
SHI Meng, MA Ai-jun, LIU Hong-ying, et al. Simulation Study for a Resonant Fixture Design[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 35(3):46—49.

[14] BARRETT P, CORNFORD S L. Pyroshock Testing Using Large Resonant Plates and SRS Theory Using Time and Frequency Domain Methods[R]. JPL, 2002.

[15] 赵传宝,施冬梅,蔺波涛,等. 环境因子对新型延时起爆装置性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4):102—105.
ZHAO Chuan-bao, SHI Dong-mei, LIN Bo-tao, et al. Research on Effects of Environmental Factors on the Performance of a New Delay Detonation Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4):102—105.

[16] 晏廷飞,李晔,朱子宏. 振动台进行冲击响应谱试验控制参数优化方法[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3):33—36.
YAN Ting-fei, LI Ye, ZHU Zi-hong. Optimization Method of Control Parameters in SRS Test by Shaker[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3):33—36.