

电动振动台水平滑台正交方向响应分析及加强台面的设计

樊雪松, 苏文, 王晓耕

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 针对电动振动台进行整星水平振动试验时垂直方向响应过大这一普遍存在的问题, 文章提出了通过设计具有加强筋的加强台面提高滑台抗弯模量, 抑制响应。通过有限元方法分析了安装加强台面对水平滑台、水平滑台与振动花盆组成的振动工装系统、考虑卫星质量影响的振动工装系统等三种工况下模态振型的变化, 说明抗弯模量有明显提高。

关键词: 电动振动台; 模态分析; 垂向响应; 水平滑台; 加强台面

中图分类号: V416.2; O324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-1379 (2006) 02-0090-04

1 引言

电动振动台水平滑台一般为薄的矩形板材, 因此其垂直方向抗弯模量较低, 对于大质量试件的水平振动试验, 正交方向振动分量较大。要解决这种水平滑台普遍存在的问题, 需要设计加强台面, 提高其垂直方向的抗弯模量, 保护台体和试验试件。

2 水平滑台存在的问题

水平滑台^[1]一般为密度小、质量轻的铝镁合金材料, 上端面分布有螺孔, 下端由大理石基座支撑, 并与水平滑台上的静压轴承连接, 另外在水平滑台一端通过牛头与台体连接, 在台体推力作用下产生水平振动。由于台面较薄, 而且静压轴承的分布不能完全限制水平滑台垂向约束, 故在进行大质量试件水平振动试验时, 水平滑台不仅存在水平方向主振动, 还存在波浪型的抖动。尤其对于随机振动, 其垂直方向振动分量的总均方根加速度已经达到其主振动方向总均方根加速度的量级, 在某些情况下存在造成过试验的隐患, 而且对于台体自身, 会从水平滑台下端油腔中拍出很多油滴, 也会对试验产生影响。如图 1 是某卫星振动花盆水平方向振动调试试验时花盆上端

面的垂直方向响应^[2]。图 1 中控制曲线总均方根加速度为 $4.911g_{rms}$, 其中 5 通道(蓝色曲线)为花盆上端面的垂直方向响应曲线, 其总均方根加速度为 $9.296g_{rms}$, 已达到控制曲线总均方根加速度量值的两倍左右。所以需安装加强台面, 提高水平滑台垂向抗弯模量。

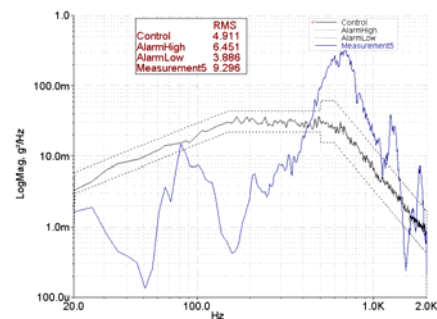


图 1 某卫星振动花盆水平振动试验花盆上端面垂直方向响应

Fig. 1 The vertical response of the top surface of the satellite's vibrating support

3 加强台面结构

加强台面一般选用铝板加工, 其质量相对较轻, 结构阻尼好, 而且取材容易, 便于加工。作为一种传力构件, 加强台台下端与水平滑台紧固连接, 上端与试验工装连接(比如卫星的振动花盆), 保证台体推力稳定传递到试件。故在加强台

收稿日期: 2006-02-20; 修回日期: 2006-03-16

作者简介: 樊雪松(1978-), 男, 硕士学位, 工程师, 主要从事航天器力学试验方面的研究工作。联系电话(010) 68744217。

面上需要布置有与水平滑台连接的阶梯孔及与振动工装连接的螺孔。为减少台体的推力损失, 必须减轻加强台面的质量, 一般其下端设计成加强筋结构。图 2 为 89kN 电动振动台水平滑台的加强台面下端加强筋分布图。

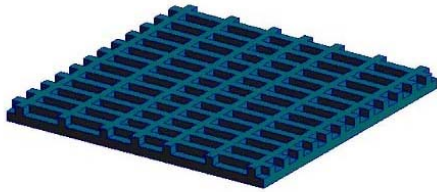


图2 89kN 电动台水平滑台加强台面下端加强筋分布图
Fig.2 Distribution of the ribs at the bottom of the reinforced panel of the slip table of the 89 kN shaker

4 加强台面校核计算

4.1 加强台面抗弯模量的分析、计算、选取

水平滑台与加强台面通过多个螺钉紧密连接, 彼此间可近似为无相对滑动, 在弯曲变形时可近似成一个整体。加强台面与水平滑台材料不同, 中性轴不过组合截面的形心, 根据两者的弹性模量的差异, 确定中性轴的位置, 再计算截面相对于中性轴的惯性矩及抗弯模量。图 3 为截面结构, 其中, h_1 为加强台面板厚, h_2 为筋高。

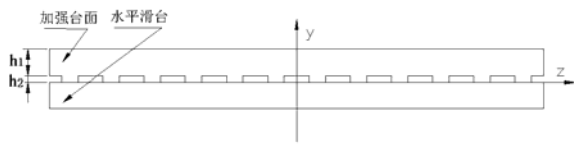


图3 抗弯模量计算坐标系
Fig.3 The coordinates used in calculation

由截面的惯性矩公式^[3]推出图 3 截面抗弯模量表达式, 并用 Matlab 编制了一个小程序, 计算 h_1 与 h_2 不同取值时截面对中性轴的抗弯模量。其变化规律曲线见图 4。图中 8 根平滑曲线表示不同高度的加强台面随筋高度变化时抗弯模量变化规律。从图中可以看出: 当加强台面高度确定后, 随筋高度的增大, 抗弯模量先增大, 上升到一定高度后会减小, 图中的折线标出了各曲线抗弯模量的最大值。

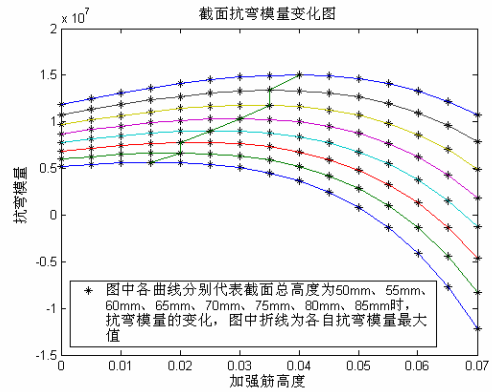


图4 截面抗弯模量分布规律曲线图
Fig.4 The bending rigidity curves

综合截面抗弯模量的分析结果, 再兼顾质量、刚度和台体推力损失的考虑, 决定加强台面的总高度、筋高度。

4.2 加强台面力学模型建立

整星振动试验时, 卫星安装于振动花盆上, 花盆再与加强台面连接。整个振动系统可简化为图 5(a)力学模型。在振动试验过程中, 卫星和花盆在各自质心处受惯性力作用, 在台面产生弯矩。

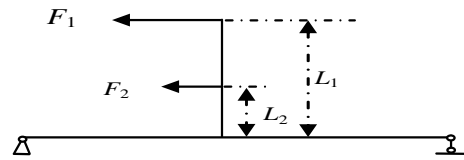


图5(a) 卫星振动工装系统力学简化模型
Fig. 5(a) The simplified mechanical model of satellite's vibrating support

图中 F_1 为卫星质心处惯性力, L_1 为卫星安装在振动花盆上的质心高度, F_2 为振动花盆质心处惯性力, L_2 为振动花盆安装在加强台面后的质心高度。对模型进一步简化为图 5(b), 图中 M_1 为卫星在惯性力作用下对台面产生的弯矩, M_2 为振动工装在惯性力作用下对台面产生的弯矩。

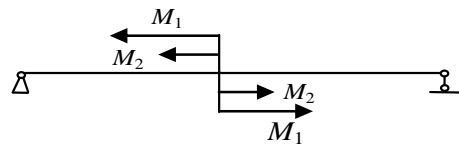


图5(b) 挠度求解简化模型
Fig.5(b) The simplified mechanical model for the deflection

水平滑台受到的总弯矩:

$$M = M_1 + M_2 = m_1 \cdot a_2 \cdot L_1 + m_2 \cdot a_2 \cdot L_2 ,$$

其挠度变形为:

$$Y = \frac{M}{6EI} [x^3 - x(l^2 - 3b^2)] ,$$

式中: M 为水平滑台受到的总弯矩; E 为弹性模量; I 为惯性矩; l 为力学模型简支梁的总长度; b 为振动花盆下端外缘半径。

对于某振动台水平滑台安装了总高度 75 mm、筋高 35 mm 的加强台面后, 截面抗弯模量提高了 13.6 倍, 台面最大挠度下降到原来的 7.5%。

5 加强台面的有限元计算

选用某 89 kN 电动振动台水平滑台的加强台面, 用 Pro/e^[4] 软件建立模型, 再用 MSC.Nastran^[5] 进行有限元计算。

5.1 水平滑台安装加强台面前后的模态分析^[6]

我们对安装加强台面后的水平滑台进行模态计算^[7]。模型所加约束为: 水平滑台端面固支、下底面垂向约束及下底面安装静压轴承处横向约束。我们分别计算了水平滑台及安装了加强台面的水平滑台两个模型。在此, 我们只列出安装了加强台面的水平滑台有限元模型(图 6)、前三阶模态振型(图 7~9)和两者的频率对照(见表 1)。

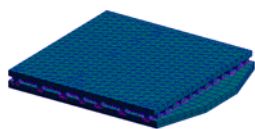


图 6 加强台面有限元模型
Fig. 6 the FEM mesh of the reinforced panel

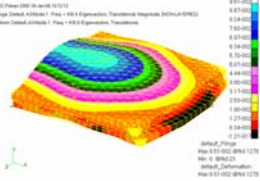


图 7 一阶振型
Fig. 7 The 1st mode

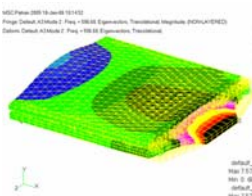


图 8 二阶振型
Fig. 8 The 2nd mode

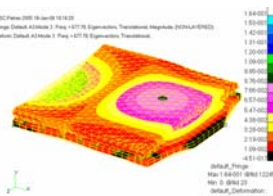


图 9 三阶振型
Fig. 9 The 3rd mode

表 1 安装加强台面前后滑台固有频率对照表
Table 1 The normal frequency of the slip table of the shaker with and without the reinforced panel

模态阶数	水平滑台固有频率 (未装加强台面)	水平滑台固有频率 (安装加强台面)
1	352.09 Hz	430.40 Hz
2	491.94 Hz	596.68 Hz
3	691.56 Hz	677.78 Hz

从以上计算结果可以看出: 水平滑台在安装加强了加强台面后, 一阶振型仍为台面垂向的翘曲, 但固有频率有较大提高, 从 352.09 Hz 提高到 430.40 Hz; 其二阶振型由原先的台面垂向翘曲变为整体水平方向运动的振型。这说明水平滑台安装了加强台面后, 抵制垂直方向弯曲的抗弯模量明显增大, 台面垂直方向变形能力得到抑制。

5.2 水平滑台与振动花盆的耦合计算

通过水平滑台与振动花盆的耦合计算, 来分析加强台面对卫星整个工装系统垂向模态的影响。模型所加约束与 5.1 节中的计算模型相同。同样, 我们分别计算了安装加强台面和未安装加强台面两个模型。在此, 我们只列出安装了加强台面的有限元模型(图 10)、前三阶振型(图 11~13)和两者的频率对照(见表 2)。

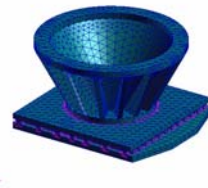


图 10 卫星工装系统有限元模型
Fig. 10 The FEM mesh of the vibrating support

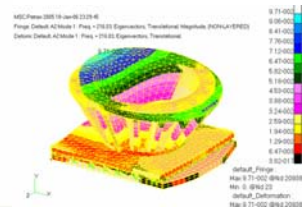


图 11 一阶振型
Fig. 11 The 1st mode

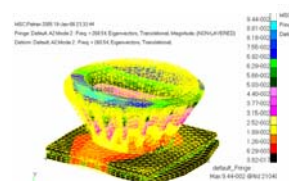


图 12 二阶振型
Fig. 12 The 2nd mode

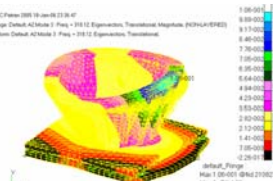


图 13 三阶振型
Fig. 13 The 3rd mode

表 2 振动工装系统固有频率
Table 2 The normal frequency of the vibrating support with and without the reinforced panel

模态阶数	工装系统固有频率 (未装加强台面)	工装系统固有频率 (安装加强台面)
1	113.45 Hz	216.03 Hz
2	149.48 Hz	260.54 Hz
3	184.55 Hz	318.12 Hz

从计算结果分析, 水平滑台安装加强台面后, 前三阶模态振型与未安装加强台面的振型基本相同: 一阶振型仍为振动花盆前后摇摆; 二阶振型为振动花盆左右摇摆; 三阶为工装系统垂直方向振动。但安装了加强台面后其一阶固有频率提高了 100 Hz, 这说明加强台面对水平滑台垂直方向变形起到明显抑制, 使整个工装系统垂直方向响

应明显减弱。

5.3 整星质量对水平滑台、加强台面及振动花盆所组成的工装系统模态的影响

将卫星在质心处等效成一个质量点，然后与花盆上端面刚性连接，分析整星质量对振动工装系统振型的影响。模型所加约束与 5.1 节中计算模型相同，卫星质量按 1 000 kg 计。我们分别计算了安装加强台面和未安装加强台面两个模型。在此，我们只列出安装了加强台面的有限元模型（图 14）、前三阶模态（图 15~17）和两者的频率对照（见表 3）。

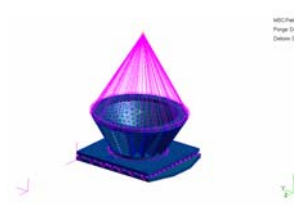


图 14 有限元模型
Fig.14 The FEM mesh of the vibrating support of the satellite

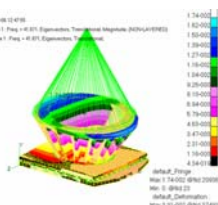


图 15 一阶振型
Fig. 15 The 1st mode

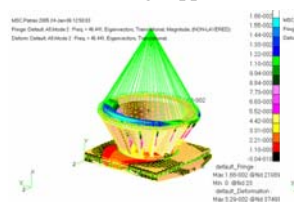


图 16 二阶振型
Fig. 16 The 2nd mode

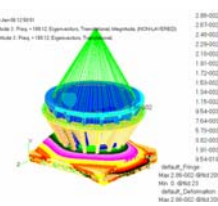


图 17 三阶振型
Fig. 17 The 3rd mode

表 3 振动工装系统模态频率

Table3 The normal frequency of the vibrating support

模态阶数	工装系统固有频率 (未装加强台面)	工装系统固有频率 (装加强台面)
1	20.002 Hz	41.871 Hz
2	24.891 Hz	44.441 Hz
3	103.32 Hz	189.12 Hz

从计算结果分析，将卫星等效成质点后，水平滑台(加强台面)、振动花盆组成的工装系统，其模态振型的变形方式变化不大，但安装了加强

台面后其垂直方向的前三阶振型：前后摇摆、左右摇摆、上下颠振的固有频率有较大提高。尽管振动花盆承载了卫星质量，但加强台面对水平滑台台面的垂向响应能明显抑制，整个系统的垂向响应主要是振动花盆和整星系统产生。

6 结论

安装加强台面可以明显提高振动台水平滑台的抗弯模量、抑制垂直方向响应、保护试验试件、同时还可以顺利地传递推力，但同时其质量会受到台体推力的限制，因为过重的台面质量会增加台体的推力损失，造成推力不足，因此，要根据实际情况权衡确定加强台面的高度和质量。

参考文献 (References)

- [1] DP 公司. 9 吨电动振动台台体操作手册[M]. 2004-12[DP COR. Operating manual of the 89 kN shaker[M]. 2004-12]
- [2] DP 公司. 数采系统操作手册[M]. 2004-12[DP COR. Operating manual of the data acquisition[M]. 2004-12]
- [3] 欧贵宝,等. 材料力学[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 1996[Ou Guibao, et al. Material mechanics[M]. Harbin Engineering University Press,1996]
- [4] David S Kelley. Pro/ENGINEER 2001 中文版实用教程[M]. 北京大学出版社, 2003-3[David S Kelley. Pro/ENGINEER 2001 applied tutorial (in Chinese)[M]. Beijing University Press, 2003-3]
- [5] MSC 公司. MSC PATRAN 基础培训教程[M], 2001-5[MSC COR. Basic training tutorial of MSC PATRAN[M]. 2001-5]
- [6] 刘习军,等. 工程振动与测试技术[M]. 天津大学出版社, 1999-9[Liu Xijun, et al. Engineering vibration and measuring technique[M]. Tianjin University Press, 1999-9]
- [7] 赵经文,等. 结构有限元分析[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2001-5[Zhao Jingwen, et al. Finite element analysis of the structure[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 2001-5]

The Vertical Response Analysis of the Slip Table of the Shaker and the Design of Reinforced Panel

FAN Xuesong, SU Wen, WANG Xiaogeng
(DFH Satellite Co. Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: It is proposed that a reinforced panel should be used to increase the bending rigidity of the slip table and to reduce the vertical response of the table in the horizontal direction vibration test of spacecraft. In addition, the modal analysis is made using FEA method in three working states: fixing the reinforced panel upon the slip table, the slip table and vibration fixture as a vibrating system, and considering the mass of satellite.

Key words: shaker; modal analysis; vertical response; slip table; reinforced panel