

振动台试验仿真方法

安梅岩 马爱军 刘洪英

(中国航天员科研训练中心)

摘要 利用振动台试验仿真技术不仅可以预估产品是否能够通过振动试验,而且可以帮助设计人员了解产品在振动试验时的响应,从而改进产品设计,提高产品设计质量;还可以帮助振动试验人员了解不同试验方式的差异,从而改进试验方法,提高试验质量。针对一种 5t 电动振动台,首先建立动圈、转接台面和产品的模型,然后施加合适的边界条件和激励力,最后采用合适的振动台试验仿真计算方法得到试验仿真结果,并通过仿真计算结果与试验结果的对比,验证振动台试验仿真方法的正确性。

关键词 电动振动台 有限元 仿真

1 引言

为了确保航天产品能够安全、可靠地运行,必须在地面对其进行必要的振动环境检验。目前,产品能否耐受航天振动环境多采用振动台试验验证为主,以是否能通过振动台试验作为验收产品的准则。振动台试验是对完成加工的真实产品进行振动环境适应性检验,如果产品不能通过振动台试验,就要重新考虑设计和加工。随着结构设计技术、计算机仿真技术的发展,振动台试验计算机仿真技术已逐渐成为新的应用研究前沿课题^[1]。

振动台试验仿真技术就是用计算机仿真产品模型在振动环境下的各种响应的试验技术。利用振动台试验仿真技术方法在产品阶段可以对产品的模型进行振动试验仿真,了解产品上的响应,确定产品是否能够通过振动试验,避免产品成型后不能通过振动试验而重新考虑设计所造成的浪费,从而指导产品的设计,缩短研制周期、节约研制和试验经费。而且,此项技术可以帮助产品设计人员全面了解产品任意部位(包括产品内部和表面)的动态响应,找到产品的薄弱点,改进产品设计,提高产品的质量和可靠性。此外,此项技术可以为试验人员提供复杂结构的振动台试验预示,为振动试验提供指导性认识,提高振动试验水平^[2]。因此,对振动台试验仿真方法进行深入研究并建立合理准确的仿真系统是非常

必要的。

本文针对一种 5t 电动振动台进行研究,以有限元软件 Patran 为平台,寻找建立其振动试验仿真系统的方法。

2 振动台试验仿真方法

一般来说,结构的动力学控制方程可以表述为:

$$[M]\{\ddot{X}\}+[C]\{\dot{X}\}+[K]\{X\}=\{F\} \quad (1)$$

其中, $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{F\}$ 和 $\{X\}$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、力向量和响应向量。

对(1)进行拉氏变换可得到:

$$(p^2[M]+p[C]+[K])\{X(p)\}=\{F(p)\} \quad (2)$$

经过符号替代,

$$[Z(p)]\{X(p)\}=\{F(p)\} \quad (3)$$

式中 $[Z(p)]$ 为动刚度矩阵。

公式变换和符号替代后,可得到

$$[H(p)]=\frac{\{F(p)\}}{\{X(p)\}}=[Z(p)]^{-1} \quad (4)$$

公式变换后,可得到

$$\{X(p)\}=[Z(p)]^{-1}\{F(p)\} \quad (5)^{[3]}$$

公式(4)是传递函数的计算公式。由以上推导过程可以得知,传递函数是由质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵决定的。在本研究中,模型结构是确定的,其材料也是确定的,因此质量矩阵和刚度矩阵是确定

的,只有阻尼矩阵无法直接测量确定。根据试验所得的传函曲线相应地多次修改阻尼矩阵后,使得计算所得的传函曲线和试验所得的传函曲线一致,最终得到的阻尼矩阵就是模型的准确阻尼矩阵。质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵确定后,模型就完全建立了^[4]。公式(5)是响应的计算公式,利用此公式即可求得任意激励下响应点的响应。以上过程的具体实现方法如下:

首先在零阻尼条件下,在控制节点上施加 10~2000Hz、幅值为 1 的激励信号,计算响应节点的响应幅值。由于控制节点的幅值为 1,因此响应节点的计算结果也就是响应节点相对于控制节点的传函曲线结果。计算得到的传函曲线如图 1。对应的振动台试验结果为图 2。然后根据计算结果与试验结果中的传函曲线的比对误差,相应地修正对应频率段的阻尼系数。若计算结果的放大倍数较大,则相应地加大此频率段

的阻尼系数,反之亦然。多次调整后,最终得到的计算结果如图 3,可以看出计算结果与试验结果的传函曲线较为吻合,这时得到的阻尼矩阵即为模型的真实阻尼矩阵。最后在控制节点施加任意振动试验条件,就可以得到在此振动试验条件下响应节点的响应。

3 模型建模以及边界条件和激励力的施加

需要建立三个模型:动圈模型、转接台面模型和产品模型。

通过对电动振动台的动圈进行测量,得到动圈的具体尺寸。然后在有限元软件 Patran 中建立动圈的有限元模型。采用直接建模的方法,先生成一系列关键点,由点生成线,由线生成面,由面生成实体。动圈模型见图 4。动圈通过 4 个 U 型弹簧连接在振动台的台体上,动圈模型中也要建立弹簧单元进行模拟。

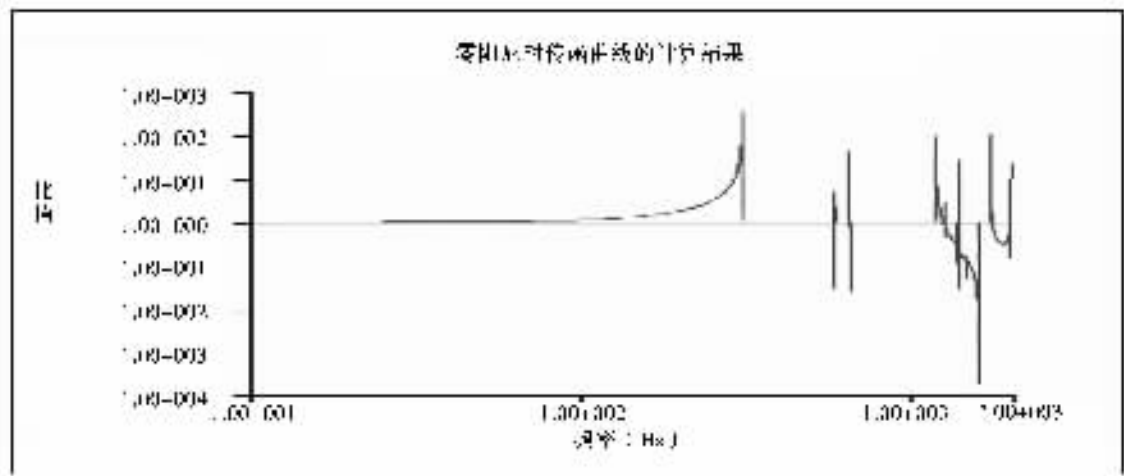


图 1 零阻尼时的传函图

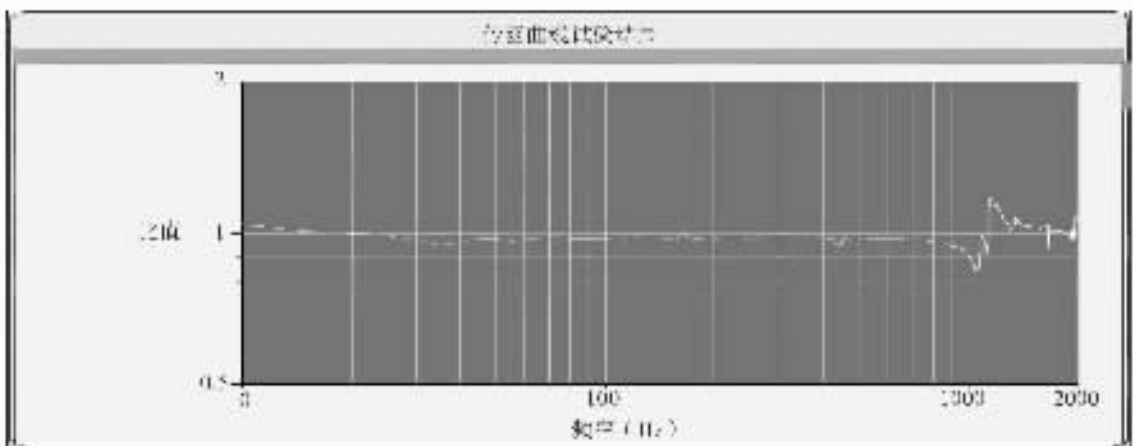


图 2 振动台试验传函图

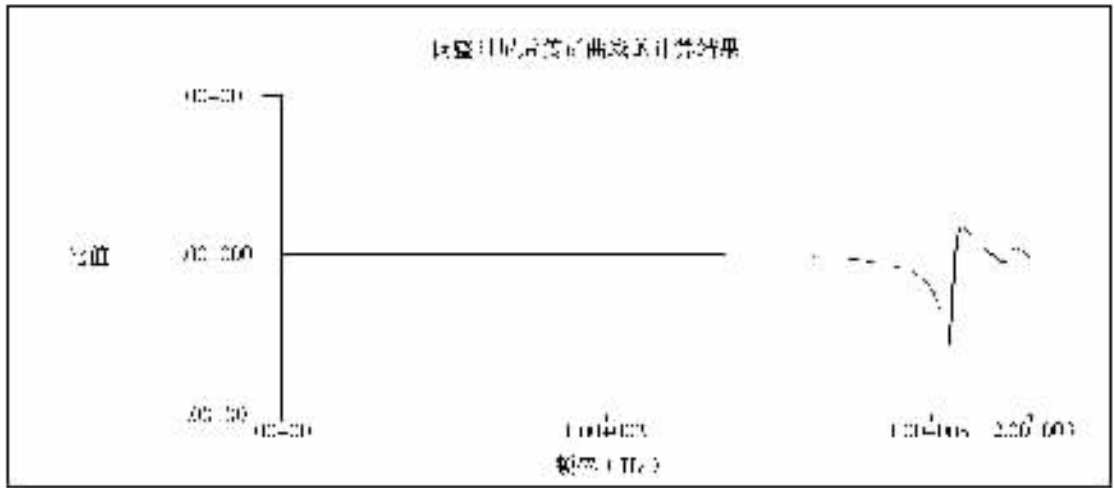


图 3 多次修正阻尼系数后计算所得传函图

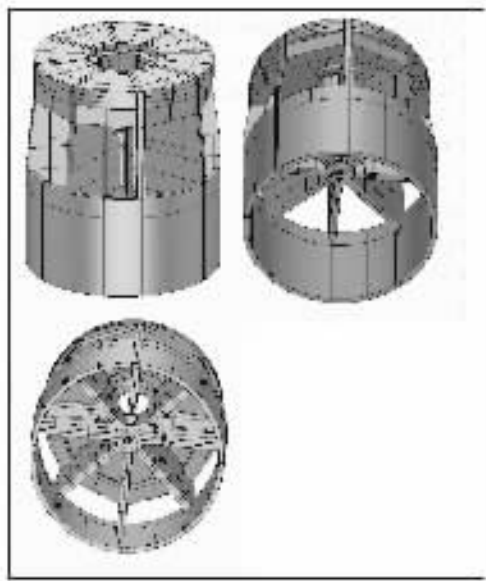


图 4 动圈模型

转接台面结构简单，模型的建立方法也比较容易。转接台面和动圈间是通过 16 根柱状螺套和螺栓进行连接，在模型中建立 16 根杆单元来模拟，通过这 16 根杆使得动圈模型和转接台面模型连接起来。

本文采用一圆柱型结构做为产品，用面单元对其进行建模。产品模型可单独建立并导出成文本文件存档。进行振动试验仿真时，只需在已完成的动圈和转接台面模型的基础上，导入此文件，即可引入产品模型。这样就实现了产品建模的模块化。产品模型划分网格时，要充分考虑转接台面模型和它的连接。具体是这样实现的：首先确定转接台面模型和产品模型进行连接的位置，然后查看转接台面模型在此

位置的一个或几个节点的坐标，根据这些点的坐标在产品模型上同样的坐标位置出生成硬点，这些硬点在产品模型进行网格划分后成为节点，这样就实现了转接台面和产品模型的连接。图 5 为动圈、转接台面和产品连接起来的模型。利用“硬点匹配”技术即可模拟产品模型的安装方式。

边界条件要模拟振动台的实际状况。振动台动圈通过 4 个 U 型弹簧与振动台台体连接，在动圈的底部中心位置通过一线性轴承使得动圈只能沿中心

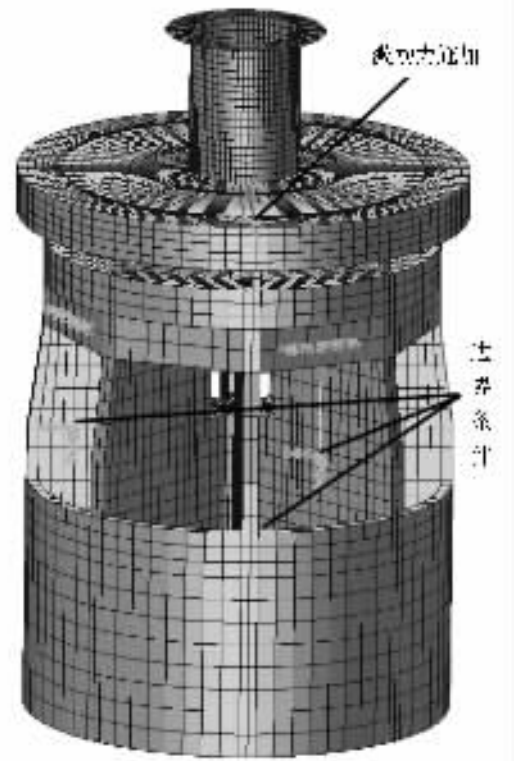


图 5 动圈、转接台面和产品模型

轴方向上下运动。因此本研究对动圈施加的边界条件是：固定弹簧单元远离动圈端的所有 6 个位移自由度，固定动圈模型底部中心位置除中心轴方向外的 4 个位移自由度。振动试验的目标是实现控制节点达到要求的试验条件。由此，激励力施加方式是：在控制节点上施加真实的振动条件。（边界条件和激励力的施加方式参看图 5）。

4 仿真结果与试验结果的比对

比对内容包括响应点相对于控制点的传函曲线以及正弦扫描试验结果和随机振动试验结果。比对采用的试验条件见表 4-1 和表 4-2。

比对结果如下：

4.1 传函曲线比对结果

表 4-1 正弦扫描试验条件

频率	幅值
10-17Hz	3.6g
17-60Hz	8g
60-100Hz	4g

表 4-2 随机振动试验条件

频率	幅值
10-250Hz	6dB/oct
250-1000Hz	0.006g ² /Hz
1000-2000Hz	-9dB/oct
总均方根加速度	2.556g

图 6 为动圈试验结果,图 7 为计算结果。

4.2 正弦扫描试验比对结果

图 8 为动圈试验结果,上半部分为控制点的曲线,下半部分为响应点的曲线。图 9 为计算结果,实

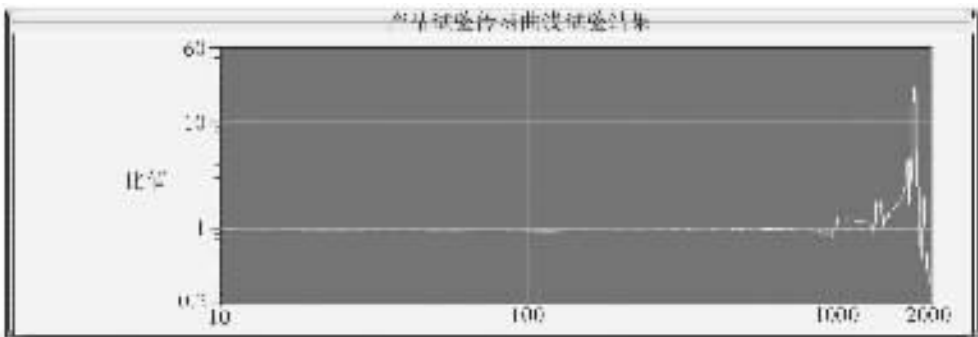


图 6 产品试验传函曲线



图 7 产品试验计算传函曲线

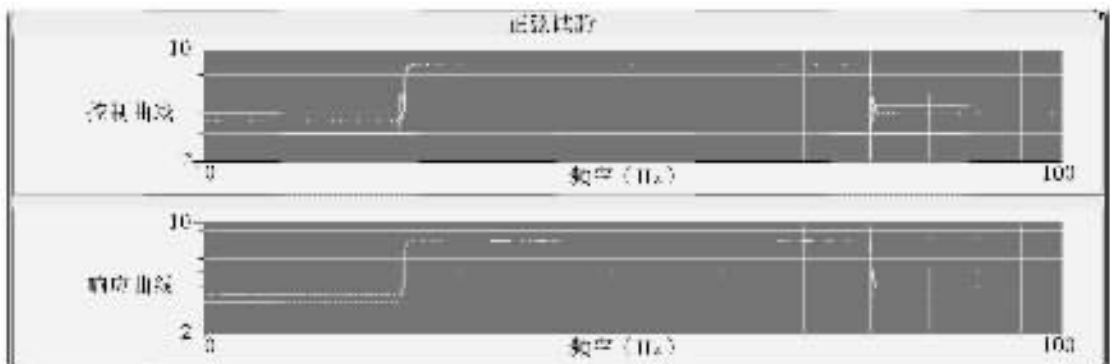


图 8 产品试验正弦扫描试验结果

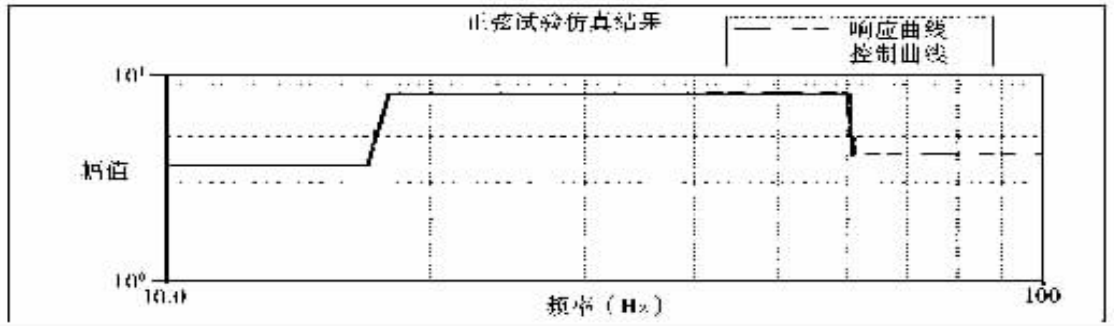


图 9 产品试验正弦扫描试验计算结果

线为控制点曲线,虚线为响应点的曲线。

4.3 随机振动试验比对结果

图 10 为产品试验结果,其控制点的总均方根加速度值为 2.568g,响应点的总均方根加速度值为

2.900g,放大系数(响应点/控制点)为 1.129;图 11 为计算结果,其控制点的总均方根加速度值为 2.694g,响应点的总均方根加速度值为 2.756g,放大系数(响应点/控制点)为 1.023。

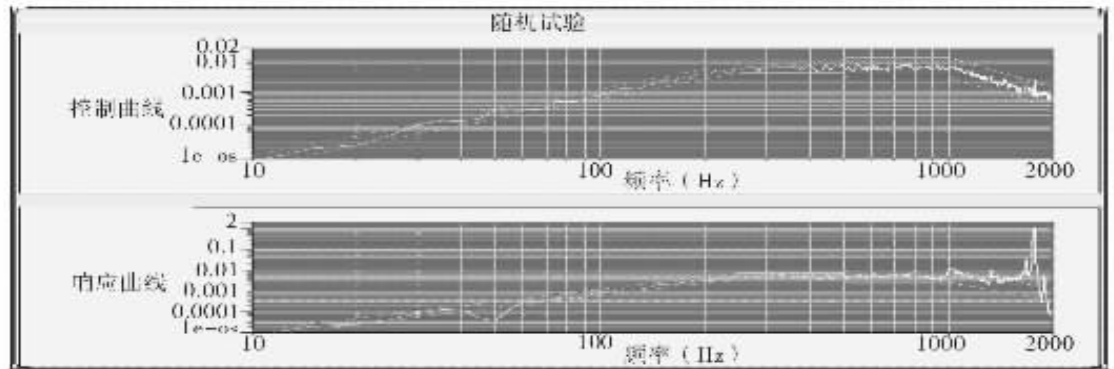


图 10 产品试验随机振动试验结果

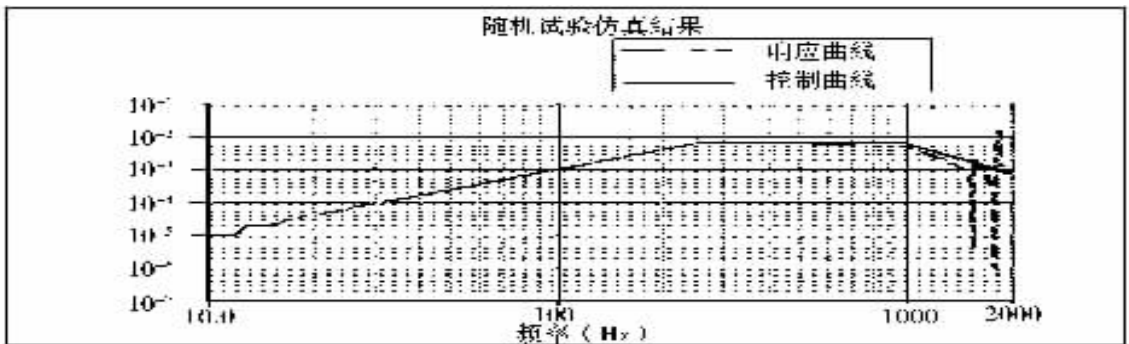


图 11 产品试验随机振动试验计算结果

5 结 论

从试验比对结果来看,计算结果与试验结果的传函曲线比较一致,正弦扫描曲线非常吻合,随机扫描试验曲线较为一致,总均方根加速度放大系数误差较小。因此,本文建立振动台试验仿真系统是可靠的,建模方法是可行的,并可以应用到其它类似的电动振动台的试验仿真系统的建立中。 ◇

参 考 文 献

- [1] 周远方. 虚拟振动环境试验的初步尝试. 航天器环境工程[J], 2002,19(4):27-30
- [2] 向树红, 于丹, 晏廷飞. 卫星动力学虚拟试验的几个关键技术[J], 2002,19(4):13-22
- [3] 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析. 北京:清华大学出版社,2004
- [4] 向树红, 晏廷飞, 邱吉宝. 40 吨振动台虚拟试验仿真技术研究. 中国航天第八专业信息网 2003 年度技术信息交流会,2003