

两点激励振动试验时结构模态对控制效果的影响分析

赵怀耘, 田光明, 钟继根

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:飞机外挂等细长体试件的两点激励振动试验方法在国内外已经开始较广泛应用。因试件动力学的复杂特性经常造成两点激励振动试验控制超差甚至无法控制,因此在试验前有必要对试件开展模态等动力学特性分析。针对某模拟外挂的试验件及试验夹具开展了有限元模态分析,在两点激励试验前对试验中容易出现控制超差的危险频率点进行了预判。随后开展的两点激励振动试验结果证明了预判的正确性以及试验前开展动力学分析的必要性。

关键词:两点激励振动试验;控制;模态;有限元

中图分类号: TG174.3; TG75 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)06-0051-03

Influence of Specimen's Modal Characteristics on Control Effect of Two-exciter Vibration Test

ZHAO Huai-yun, TIAN Guang-ming, ZHONG Ji-gen

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Two-exciter vibration testing method has been widely used for slender specimens such as aircraft store. Due to the complicated dynamic characteristics of the specimens, two-exciter vibration test is difficult to control or the vibration control overshoot will occurred. So it is necessary to do modal analysis before two-exciter vibration test. The critical frequency points in the vibration testing control were prejudged based on modal analysis of the specimen. The results of two-exciter vibration test showed that prejudgments of critical frequency points are exact.

Key words: two-exciter vibration test; control; modal; finite element

两(多)点激励振动试验通过使用两台或两台以上的振动台激励试件,不仅可以提供更大的推力,而且可以使试件的振动载荷分布更加均匀、合理、真实^[1-2],是力学环境试验技术的一个重大进步

和发展趋势。尤其对于那些飞机外挂等细长体结构,由于其长细比大、前后条件差异等特点也决定了两(多)点激励的试验方法更适合其振动试验^[3-5]。

两点激励的试验方法在国内外已经开始较为广

收稿日期: 2012-07-24

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目(H112012A002); 中物院实验室装备技术基础项目(11J102)

作者简介: 赵怀耘(1974—),山东成武县人,博士,高级工程师,主要从事环境振动及动力学分析。

泛的应用^[6-8],但由于外挂等试件自身动力学的复杂性,在实际应用过程中经常出现试验难以控制或振动控制超差等问题,严重情况下甚至会造成试件及振动台的损坏。因此,在试验开始前应首先对试件进行动力学特性的仿真分析,以求预先掌握试验中可能出现的问题^[9]。

1 试验件与试验夹具

针对某外挂产品及其悬挂设备设计了模拟试验件,试验件分为两部分:首先用一个平板结构来模拟外挂悬挂设备(挂架),包括模拟悬挂设备的质量、质心及一阶模态等;然后在平板下部设计了模拟外挂的配重结构,配重与平板结构的连接尺寸同外挂与悬挂设备的连接尺寸一致,配重与外挂的质量、质心等参数也保持一致。同时根据模拟试验件以及进行两点激励振动试验的振动台尺寸,设计了相应的试验夹具。试验夹具分为前后两部分,分别连接模拟试验件的平板结构与前后两台振动台,其中与平板结构的连

接位置与外挂悬挂设备在实际应用中的连接位置相同。最终的模拟试验件和试验夹具如图1所示。



图1 模拟试验件与试验夹具

Fig. 1 The specimen and fixture

2 模态分析

利用 ANSYS 软件建立了模拟试验件及试验夹具的有限元模型,并进行了模态分析计算,计算得到 1—10 阶模态的固有频率,见表 1。

表 1 试验件及夹具的固有频率

Table 1 Natural frequency of the specimen and fixture

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	31.57	42.02	78.56	84.07	92.99	96.62	155.24	193.34	221.45	313.10

在振动试验中,最容易被激发模态的是试验件在主振向的低阶模态。在上述 1—10 阶模态中,1 阶模态振型为试验件前部绕 x 轴扭转(坐标轴及方向定义如图 1 所示),在实际试验中很难被激发;前部绕 y 轴“点头”弯曲的第 2 阶模态(振型如图 2 所示)及试验件、夹具共同绕 y 轴弯曲的第 3 阶模态

(振型如图 3 所示)应是最容易被激发的模态振型,因此,这两阶模态的频率是两点激励振动试验中的“危险”频率点。可以预计在实际的两点激励振动试验中,当这两阶模态被激发后,将会对试验控制产生很大的影响。

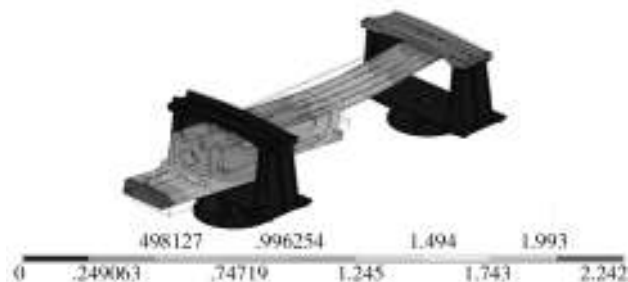


图2 试验件及夹具的第2阶振型

Fig. 2 The second modal shape

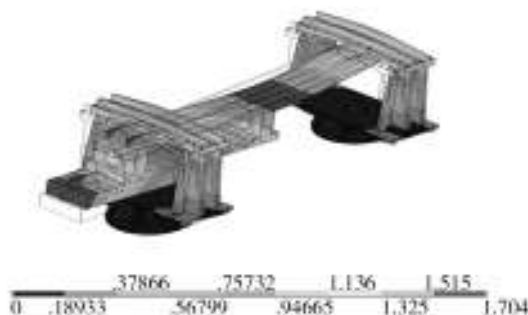


图3 试验件及夹具的第3阶振型

Fig. 3 The third modal shape

3 两点激励试验

3.1 试验条件

针对模拟试验件,利用两台电动振动台和MIMO控制系统,开展了两点激励振动试验。主要试验参数如下。

1) 采用两点激励模拟挂飞振动环境,在试验夹具与试验件连接的前、后挂点处各设置一个加速度控制点,振动试验采用两台激励单点控制方式。

2) 振动控制谱如图4所示,其中前挂点功率谱密度 $W_2=0.022g^2/Hz$, $W_1=0.02g^2/Hz$, $g_{rms}=3.17g$;后挂点功率谱密度 $W_2=0.044g^2/Hz$, $W_1=0.02g^2/Hz$, $g_{rms}=4.05g$ 。

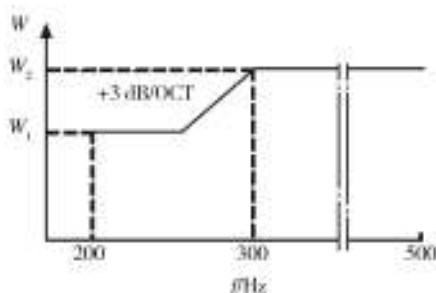


图4 振动试验功率谱密度标准谱

Fig. 4 The power spectral density of random vibration

3) 试验持续时间为3 min。

4) 试验方向为z向(方向定义如图1所示)。

3.2 试验过程及结果分析

试验开始后,首先按规定试验条件的-9 dB量级进行试验,在试验过程中记录各测点响应,观察试件运动状态,然后根据现场试验情况决定是否继续进行更高量级的试验。结果在-9~-3 dB的较低量级振动试验中,控制情况良好,前后两控制点控制谱均无超差(-6 dB时前后两控制点的控制谱如图5所示)。试验过程中可以观察到试件前端有较轻微的点头振动。这说明试验件的第2阶和第3阶模态有一定程度的激发,但由于振动量级较低,试验件的动力学响应不大,因此振动控制器可以将控制容差较好地控制在容差范围内。

当试验量级提高到0 dB后,试验件前端的点头振动明显加剧,同时前后两控制点的控制谱(如图6

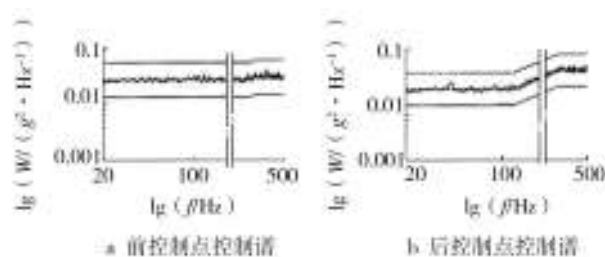


图5 -6 dB试验控制谱

Fig. 5 The control spectra at -6 dB

所示)均在40 Hz附近出现了上超差。这一频率正对应前面通过对试验件的模态分析,预先判断的第2阶模态“危险”频率点(计算得到的频率为42.02 Hz)。随着振动量级的增大,试验件的第2阶模态振动已完全被激发,从而影响试验件挂点附近的结构响应(主要是放大),造成控制点附近局部响应过大,最终使振动控制超差。

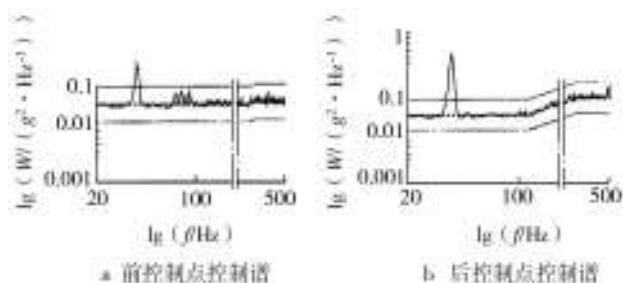


图6 0 dB试验控制谱

Fig. 6 The control spectra at 0 dB

至于在试验件模态分析中预判的第3阶模态对应“危险”频率点,虽然在-9~0 dB量级的两点激励振动试验中并未出现控制超差的现象,但由观察试验刚开始时的控制曲线(如图7所示)可以看出,除

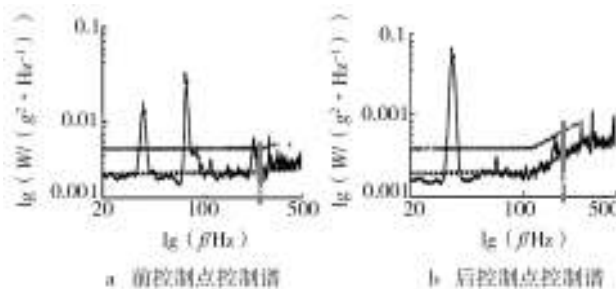


图7 控制开始时的控制谱超差情况

Fig. 7 The control overproof when experiment start

(下转第112页)

最优平滑参数值 α 为 0.320, 按照一次指数平滑预测的迭代公式 $S_t^{(1)} = 0.32x_t + 0.68S_{t-1}^{(1)}$, 可以逐步计算外推出下一期的维修备件需求量。

3 结论

采用指数平滑预测技术, 充分合理利用历史数据, 实现维修器材需求量的准确预测和资源的优化配置, 利用指数平滑法预测维修器材需求量是较为科学有效的。指数平滑技术能够较科学、客观地反映历史数据发展变化的趋势。然而, 运用指数平滑模型法进行预测时可能无法揭示研究对象的系统内部各影响因素之间的内在关系和因果关系, 它仅仅将时间作为预测目标的单一影响因素。因此, 对实

际问题进行预测时, 必须掌握所研究系统未来发展的主要影响因素, 在此后的研究中应结合其他方法进行预测才能达到更佳的效果。

参考文献:

- [1] 甘茂治, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 闫肃, 闫鹏程, 孙江生, 等. 边海防部队武器维修器材包装研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 143—145.
- [3] 单志伟. 装备综合保障工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 徐大江. 预测模型参数的指数平滑估计法及其应用的进一步研究[J]. 系统工程理论与实践, 1999(2): 25—30.
- [5] 王长江. 指数平滑法中平滑系数的选择研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2007(6): 25.

(上接第 53 页)

40 Hz 附近外, 在 75 Hz 附近前控制点也出现了控制超差。随着试验的进行, 控制器将控制超差又控制在容差范围内。因此, 在该频率点依然存在振动控制超差的危险, 同时由于第 3 阶模态是试验件前端与试验夹具的共同弯曲振动, 该阶模态完全可以通过增大夹具刚度来改变模态频率, 从而消除试验中由于该模态被激发而造成控制超差的可能。

4 结论

在两点激励振动试验中, 试验件的动力学特性会对控制结果造成很大的影响。当试验件的某个模态被激发后, 会造成试验件局部响应过大, 最终造成试验控制超差甚至根本无法控制的现象。因此, 在设计两点激励振动试验时, 有必要首先对试验件开展模态分析, 从而找出容易造成试验控制超差的模态频率。对由于试件本身的动力学特性所造成的可能控制超差“危险”频率点做到心中有数; 同时验证试验夹具的设计, 确保不会因为试验夹具原因带来新的控制超差“危险”频率点。

参考文献:

- [1] HAMMA G A. Multiple Vibration Exciter Control Replicates

the Real World in Your Laboratory[J]. STI Journal, 1989, 1(2): 1—4.

- [2] 冯咬齐. 多自由度振动试验技术及其应用[C]// 中国宇航学会结构强度与环境工程专业委员会暨中国航天第八专业信息网 2003 年度技术信息交流会论文集. 2003: 248—252.(余不详)
- [3] 徐明. 飞机外挂多输入多输出振动试验技术[C]// 首届全国航空航天领域中的力学问题学术研讨会论文集(下册). 2004: 259—262.(余不详)
- [4] 高贵福, 王刚, 赵保平. 细长体复杂结构双振动台振动试验方法标准编制若干问题研究[J]. 航天器环境工程, 2009(1): 116—117.
- [5] 陈家焱, 周建川, 陈章位, 等. 多点同步并激振动试验控制系统的设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 76—80.
- [6] SMALLWOOD D O. Multiple Shaker Random Control with Cross Coupling[C]// Proceedings of the IES. 1978: 341—347.(余不详)
- [7] SMALLWOOD D O. A Random Vibration Control System for Testing a Single Item with Multiple Inputs[R]. Albuquerque: SAE Transactions, 1983.
- [8] DAN Lehmann. A Dual-shaker Random Vibration Testing Control System [C]// Proceedings of the IES. 1985: 507—511.
- [9] 李蓓蓓. 振动分析的有效工具——功率谱密度[J]. 包装工程, 2004, 25(3): 46—47.