振动试验操作技术探讨

颜东升，王一飞，王元帅
（中国船舶重工集团公司第七二三研究所，江苏 扬州 225001）

摘要：振动试验结果与夹具、样品安装、传感器安装等试验技术密切相关，为了保证试验结果的有效性，需要采取合理的试验技术及控制方法。根据多年振动试验的经验积累，对振动试验中的技术应用进行了总结。

关键词：振动试验；试验控制；夹具；安装
中图分类号：TG174.3；TG75　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2012)06－0131－04

Discussion on Operation Technology of Vibration Test

YAN Dong-sheng, *WANG Yi-fei*, *WANG Yuan-shuai*
(No.723 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Yangzhou 225001, China)

Abstract: The result of vibration test depends on the clamp, installation of test sample, installation of sensors and other test techniques. Reasonable test control technique should be used for the validity of the test result. The application of vibration test techniques was introduced based on years of experience.

Key words: vibration test; test control; clamp; installation

在振动试验中，如果不关注试验控制的各方面细节，其结果会差别很大。就振动试验控制原理来说，试验人员在控制计算机设置标准试验曲线后，控制系统按照预设试验曲线来控制振动台进行试验，理论上试验曲线应完全符合预设的试验曲线。然而，由于试验夹具和样品的固有频率特性，在夹具和样品上，测量得到的信号曲线和设置的标准试验曲线相比较有着很大的差别。夹具和样品的固有频率又和设计制作以及安装密切相关，所以试验时一定要分析夹具和样品的安装状态是否合理，控制点的选择是否合理。只有认真合理地利用振动技术理论分析试验的全过程，才能确保试验结果真实有效。

1 夹具

1.1 夹具的频率响应特性

夹具的频率响应特性指夹具本身的工作频率范围特性，包括上下限工作频率、一阶固有频率、一阶固有频率的相位。夹具在振动试验过程中要模拟样品的实际使用环境，如果夹具本身谐振，会造成样品过试验或欠试验，这样的试验结果是不真实的。对

收稿日期：2012-07-30
作者简介：颜东升(1956—)，男，江苏扬州人，工程师，主要从事环境与可靠性试验方面的研究。

于振动试验设备，夹具固有频率产生的共振在共振频率反相位的情况下，可造成试验设备过载保护或损坏。

1.2 不同结构的夹具

1）平板夹具：一阶固有频率偏低，一般几百赫兹，厚度越厚频率越高；另外，固有频率和所用材料有关，如钢板和铝板相比，其一阶固有频率偏低。

2）箱型、半球型夹具：一阶固有频率较高，一般在1000~2000 Hz。

3）L型、三角形夹具：一阶固有频率较高，一般在1000 Hz以上。

4）框架型夹具：一阶固有频率较高，一般在1000 Hz左右；在框架管材内充填泡沫材料，可以增加材料阻尼特性，提高一阶固有频率。

1.3 夹具的结构强度特性

夹具的一阶固有频率随着夹具的质量降低而提高。根据力学原理，在夹具上采用筋板结构、蜂窝结构来提高结构强度特性，从而降低材料的厚度，使夹具质量降低，一阶固有频率提高。

在制造过程中，可以采用铸造工艺或者焊接工艺来最大限度提高夹具结构强度。对于螺接连接方式，因为连接面存在间隙，会产生谐振频率点，可能造成过试验或欠试验，一般不建议采用。

1.4 夹具与振动台的连接

应尽可能和台面的全部安装孔连接；连接面应光滑平整；为保证连接的可靠，应使各连接点受力均匀，尽量根据螺栓尺寸采用力矩扳手进行紧固，ϕ8螺栓选择力矩20~30 m/N，ϕ10螺栓选择力矩40~50 m/N，ϕ12螺栓选择力矩60~70 m/N。

2 样品的安装

1）样品与夹具的连接。样品与夹具的连接，一般采用螺杆连接，连接应紧固，不能松动。为保证连接的可靠，尽量采用力矩扳手，使各连接点受力均匀，否则容易造成试验结果不真实。

2）样品悬挂安装时的注意事项。样品悬挂安装时，安装点部位的结构强度较软，在水平方向振动时会造成安装点上方呈衰减特性，试验频率越高，衰减越强。对于这样的夹具应该进行局部结构强度加强处理，从而改善夹具的传递特性。

3）样品安装质心的要求。样品安装时应保证质心在台面中心。如果不在台面中心，会在试验过程中产生横向运动，除了对产品有损伤，也会对设备的静压轴承系统、隔振气囊系统、动圈悬挂系统以及直线轴承等造成损伤。

3 控制方式

3.1 单点控制

单点控制适用于刚性结构较好，体积较小的试验件。此时控制点的选择非常关键，关系到试验的成功与失败。单点控制有如下缺点：1）如果控制回路开环，系统会报警并停机，此时因大电流的作用，振动台功放及运动机械结构会受到强烈冲击；2）振动台台面尤其是大台面在振动时存在扁担效应，所以试验时必须考虑台面的频响特性，如果控制点选择不当，试验结果相差很大；3）样品若在某一频段出现反相谐振，控制仪的自动调整功能会使试验设备输出加大，造成样品控制点以外部位过试验；4）样品若在某一频段出现正相谐振，控制仪的自动调整作用会使试验设备输出减小，造成欠试验。

对于结构复杂的样品以及大台面振动台，禁止采用单点控制的控制方式。

3.2 平均值控制

对于结构刚性一般、体积较大的样品，宜采用多点平均控制。

3.3 极大值控制

若样品结构复杂，夹具结构刚性较差，且样品某一关键部位有着明确的试验条件要求，宜采用多点极大值控制方式。对于特殊的点，可使用测量传感器对振动参数进行监测。

3.4 极小值控制

适用于产品研制初期的摸底试验，根据样品关键部位的试验条件要求，采用多点极小值控制方

式。对于特殊的点,可使用测量传感器对振动参数进行监测。

3.5　控制点的选择

应遵守标准规定。一般来说,对于夹具结构刚性较高、台面连接较好并满足台面质心安装要求、样品质量小于动圈质量的1/2且刚性较好的情况,控制点可随意选取;若样品质量大于动圈质量的1/2,控制点尽可能选择在样品与夹具的连接处;若样品质量大于动圈质量的1/2且结构复杂,控制点尽可能选择在样品与夹具的连接部位并在样品关键部位安装监测传感器。

4　其它试验控制技术

1）共振峰滞后。正弦扫频时,共振峰一般都有滞后现象,所以正扫时测出的峰值频率偏高,反扫时偏低。一般取二者的平均值作为共振频率。

2）压缩率。当正弦扫频接近谐振点时,驱动必须减少,以保持加速度目标谱为常数,所以引入了压缩率,用于控制驱动修正的最大速率(dB/s),即压缩率控制驱动输出的变化率。在试验应用中,压缩速度的快慢,直接影响试验测量和试验控制的精度。试验测量反应慢,试验控制的修正就慢,试验控制的结果误差就偏大;压缩速度高,试验测量反应快,试验控制的修正就快,试验控制的结果误差就小,但容易造成系统不稳定。

3）传感器选择。一般原则是选择大灵敏度传感器测量低频信号,因为其分辨率高;低灵敏度传感器谐振频率高,更适合测高频信号。

4）传感器灵敏度归一化设置。设置不合理时,试验中会出现两种情况,选择的量程偏小,10 Hz以下的小量值试验会由于噪声淹没控制信号造成振动台启动困难;选择的量程偏大,大量值试验会造成控制信号削波,试验精度下降,或造成振动台过载保护。

5）传感器的连接方式。加速度试验量值在100 m/s^2以下,可以采用磁力连接头;加速度试验量值在500 m/s^2以下,可以采用粘接方式;加速度试验量值在500 m/s^2以上,采用螺栓连接方式。

6）小信号试验。此时传感器一定要安装绝缘片,可采用0.1 mm以下的胶木板,以减少噪声干扰。

7）振动台推力。对于样品结构复杂、夹具结构刚性较差的情况,因为振动台实际运行中会产生谐振、反谐振等问题,所以一般要求实际试验推力不能超过振动台最大推力的70%,位移不能超过台体最大位移的70%。

8）噪声。对于一些小样品的小幅振动,振动台往往难以启动。主要原因是控制器、振动台和功放发出噪声。此时应减小噪声干扰,可以试着在振动台台面上增加负载,消除噪声的影响。

9）控制线。随机振动时,尽量设定较多的控制线,其好处是分辨率高,能更准确地测量出共振峰;高控制线可以减少谱外能量,使其迅速衰减,一般相差约5%。

10）统计自由度。对于随机振动信号分析来讲,统计自由度越大,分析精度越高。随机振动的控制精度通常取决于统计自由度,通常“统计自由度不小于100时,精度在±1 dB内的概率不小于90%”。

11）削波因子。随机试验中,削波以有效值的倍数值限制驱动峰值,避免不必要的峰值电压。然而,削波对试验有一定的影响。例如2000 Hz时400谱线试验,采用3 σ 削波,驱动频率为13.8 Hz(5120 Hz × 0.27%),即每秒要削波十几次,相当于时域图上有几个毛刺,傅立叶变换(FFT)后频域上出现宽频带噪声。如果试验谱比较平缓,模拟试验对试验结果没有影响;如果试验谱不平缓,即动态范围较宽,功率谱密度(PSD)较低处就会有超差,影响试验结果。

12）振动台接地。振动台系统要求单点接地,并与其它地线分开。如果功放接地,控制器也接地,因为多点接地阻抗不一,产生接地回路,两个电位不一样,从功放输出的电磁场在这些回路里产生电压,形成了波纹噪声。噪声与信号电压相迭加并被功放放大后输入到动圈,对控制影响较大。为了减小这个问题,应在整个振动系统采取一点接地的方式,或者将控制器地悬浮起来。

5　结论

实验室振动试验是利用振动试验台产生的运动对样品经受的实际振动进行模拟的一个过程。影响其因素较多,这就需要进一步加强试验人员的文化素质和职业素质,加强对试验人员的培训及实验室

质量管理，更好地模拟样品实际状况，保证试验结果的真实有效。

参考文献：

[1] 汤姆逊 达利. 振动理论及应用[M]. 第5版，北京：清华大学出版社，2005.
[2] 欧珠光. 工程振动[M]. 武汉：武汉大学出版社，2003.
[3] 李晓雷. 机械振动基础[M]. 北京：北京理工大学出版社，2005.
[4] 朱位秋. 随机振动[M]. 北京：科学出版社，1998.
[5] 张阿舟. 振动环境工程[M]. 北京：航空工业出版社，1986.

（上接第90页）

较高，推进剂方坯存在一定的吸湿现象，贮存1 a后推进剂方坯的后固化反应基本完成，2 a后推进剂力学性能趋于稳定；贮存2，3 a的推进剂数据基本一致，没有明显变化。

3.3 发动机装药结构完整性

根据南方点贮存3 a后的推进剂方坯力学性能测试结果，计算装药结构安全系数。由于推进剂方坯力学性能下降幅度较大，需对速燃及缓燃药柱处的结构完整性进行校核，评估结果见表3。

表3 校核南方贮存3 a后发动机装药结构安全系数

Table 3 Checking safety factor of the engine charged structure after 3 years in southern storage

装药结构安全系数	温度/℃		
	+50	+20	−40
保温安全系数	20.29	7.13	3.50
点火安全系数	18.46	19.23	23.86
综合安全系数	9.66	5.20	3.05
保温安全系数	15.14	6.00	2.84
点火安全系数	13.31	15.62	18.75
综合安全系数	7.08	4.34	2.47

经过计算和分析，发动机在使用温度为−40 ℃时，其装药结构的综合安全系数最低。校核该发动机在极限情况下南方贮存3 a后发动机装药结构安全系数，低温下为2.47，该数值大于极限情况下发动机的最小安全系数，发动机的装药结构是可靠的，发动机可以进行后续的贮存试验。

4 发动机试车后结果

根据方坯性能下降情况分析发动机装药结构综合安全系数。发动机低温综合安全系数满足发动机装药完整性要求，南方户外的4台发动机（贮存2，3 a各2台）采用低温−40 ℃试车（2台）和高温+50 ℃试车（2台），4台试验均获成功。与零状态发动机高、低温试验后的总冲、推力、工作时间、点火延迟时间等内弹道性能测试数据进行对比，数据基本吻合，表明在南方贮存了2~3 a的药柱结构完整性理论校核在一定程度上验证了发动机的工作可靠性，推进剂药柱方坯力学性能的变化对发动机药柱结构完整性影响不大。

5 结论

发动机经过2，3 a南、北方点户外贮存，试片、试件测试结果除南、北方贮存的推进剂方坯力学性能变化较为明显外，其余零部组件与零状态基本一致，无明显变化。其中南方贮存2 a后推进剂方坯力学性能下降较为明显，3 a后趋于稳定；北方贮存的推进剂方坯力学性能变化趋势与南方相同，变化幅度小于南方。自然贮存使推进剂方坯力学性能产生变化，对装药的结构完整性有一定影响，通过药柱结构完整性计算证明了推进剂方坯力学性能的变化对发动机整体性能影响不大。经过南方自然贮存2，3 a后的发动机通过了高、低温静止试验考核，内弹道性能满足技术指标要求，发动机可以进行后续的贮存和试验。

参考文献：

[1] 孙庆峰. XX燃烧室装药南方储存点试验产品推进剂、绝热层、衬层配方分析报告[R]. 上海：上海航天动力技术研究所，2008.
[2] 孙庆峰. XX发动机用推进剂及绝热层南方贮存试验分析[R]. 上海：上海航天动力技术研究所，2009.
[3] 自然环境研究中心. XX发动机户外贮存试验报告[R]. 重庆：西南技术工程研究所，2006.
[4] 许敏. XX发动机贮存试验南方点（3年）装药结构完整性分析[R]. 上海：上海航天动力技术研究所，2009.