环境试验与评价

基于模态分析的某振动试验方法改进

刘龙涛,张保刚,于喆,张兴勇,俞刘建

(上海机电工程研究所,上海 201109)

摘要:目的 对该试验夹具进行改进设计,使试验夹具首阶模态频率大于 60 Hz。方法 基于模态分析方法, 分别采取改进夹具结构形式和改变夹具边界条件两种改进方式进行优化设计。结果 根据模态分析结果发 现,夹具结构形式改进对模态频率提高的效果不明显,改变边界条件能够显著提高夹具频率。改进后试验 夹具首阶模态频率为 69.5 Hz,大于试验输入载荷频率范围。结论 试验夹具的固有频率应避开振动试验输入 载荷频率范围,避免对试验结果造成影响。

关键词:模态分析;振动夹具;振动试验 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.010 中图分类号:TJ760 文献标识码:A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0066-05

Improvement of Vibration Testing Method Based on Modal Analyzing

LIU Long-tao, ZHANG Bao-gang, YU Zhe, ZHANG Xing-yong, YU Liu-jian (Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the design of test fixture and make the first order modal frequency of the test fixture be larger than 60 Hz. Two methods, namely improving the structure and changing boundary conditions, were adopted for optimization design based on modal analyzing. From the results of modal analysis, improving boundary condition was valid to improve the modal frequency; while changing the boundary condition can significantly improve the fixture frequency. The first order modal frequency of the improved fixture was 69.5 Hz, which was greater than the input load frequency range. The nature frequency of test fixture should avoid the input load frequency range of vibration testing, to avoid influences to the test result.

KEY WORDS: modal analysis; vibration fixture; vibration testing

产品在寿命周期内会历经运输、值班和工作等任务下的多种应力载荷,其中振动载荷是导致产品失效的一个重要因素^[1]。在产品研制阶段,通常采用试验室振动试验来模拟实际工况,评价产品的振动环境适应性、寿命和可靠性。振动夹具的作用是把振动台动载荷传递到试验试件上,使试件产生与要求振动谱形

相一致的强迫振动。试验夹具对试验结果有较大的影响,不合适的夹具设计,会导致试验不能模拟真实的 力学环境,存在"过试验"或"欠试验"现象^[2-3]。

文中针对某型导弹产品振动试验由于试验夹具 导致"过试验"问题,通过改进试验夹具设计,完善了 振动试验方法。

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2019-12-22

Received: 2019-11-08; Revised: 2019-12-22

作者简介:刘龙涛(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向为振动试验与模态试验。

Biography: LIU Long-tao (1988-), Male, Master, Engineer, Research focus: vibration test and modal test.

通讯作者:于喆(1985-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为结构设计及分析。

Corresponding author: YU Zhe (1985-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: structure design and analysis.

1 试验夹具对振动试验的影响

1.1 试验出现的故障现象

某型导弹与发射箱组合体(以下简称箱弹)按照 国军标要求^[4]进行舰船振动试验,试验条件:位移为 1 mm(1~16 Hz)、加速度为10 m/s²(16~60 Hz),在 1~60 Hz 进行扫频振动。采用加速度输入控制方法, 控制传感器布置在试验夹具上,同时在箱弹表面布置 监测传感器。扫频试验后,根据扫频试验结果,选择 第一阶谐振频率进行加速度量值为1g的2h耐久性 振动试验。

振动试验扫频过程中,发现在 1~60 Hz 范围内, 箱弹加速度传感器测试点出现谐振峰,其频率为 23 Hz。试验结束后,根据扫频试验测量的加速度频 域数据,确定正弦耐久试验的试验频率为23 Hz,进 行 2 h 量值为 1 g 的耐久试验。试验后, 检测发现导 弹某结构件出现断裂。进行静力学仿真分析和静力试 验验证,导弹结构件强度满足总体的力学环境要求。 通过模态试验,导弹产品频率均大于 60 Hz。首先分 别对导弹和发射箱进行模态试验,试验结果表明,导 弹和发射箱首阶模态频率均大于 60 Hz, 对导弹装箱 后,进行模态试验,结果也大于 60 Hz。箱弹与试验 夹具连接方式为: 在发射箱底部四角采用钢块压紧、 螺栓固定的方式,在发射箱顶部采用口框橡胶与夹具 顶部约束。导弹在发射箱中通过固弹机构、前后辅助 支撑约束固定。箱弹与夹具固定方式刚度足够,导致 箱弹出现60Hz以下谐振峰的原因是夹具的低频振动 特性。因此确定导致结构破坏的原因是动态载荷施加 方式不符合产品实际的试验要求,即耐久试验选取的 谐振频率不符合产品实际安装情况。

1.2 故障机理分析

安装在大型复杂夹具上的大型试件,如果试件和 夹具组合系统的固有频率试验落在激励频率带宽内, 就会产生谐振。当夹具和试件耦合共振时,出现了超 出试件实际工况的振动载荷。夹具的阻尼若较大,系 统的传递率则会减小。共振过大或阻尼过大,会在试 件的特定频率和特定位置上导致过试验或欠试验。因 此试验过程中需要进行合理设计,避免出现过试验或 欠试验^[5-7]。

在进行振动试验时,试件是通过夹具安装在振动 台面上,其力学模型如图 1 所示。m1 和 m2 分别为试 件和夹具的质量,k1、c1 分别为试件与夹具连接面的 刚度、阻尼,k2、c2 分别为夹具与激振台连接面的刚 度、阻尼。如果夹具由多个部件组成,则夹具就会有 多个质量、连接刚度和阻尼。为了简化分析,在此只 考虑夹具仅具有 1 个质量、连接刚度和阻尼的情况。



图 1 试件及夹具振动模型 Fig.1 Test piece and fixture vibration model

试件上典型的振动响应与激励的传递函数频域 特性曲线如图 2 所示,其中 f₁和 f₂分别为试件子系统 和夹具子系统的固有频率。在进行扫频或宽带随机振 动试验时,如果夹具子系统固有频率 f₂处于激励载荷 的频率范围内,试验过程中就会发生共振,响应谱在 f₂处出现尖峰。如果超过试件能承受的应力范围,则 会破坏试件,严重时会造成过试验。



在夹具设计时,尽可能使夹具的固有频率与试验 频率错开,常采用提高夹具固有频率点的方式。夹具 的固有频率公式为 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$,其中k为材料刚度, m为夹具质量。可以看出,要提高夹具的固有频率, 在保证夹具刚度的前提下,质量越轻,频率越高,但 不能过轻,否则会造成夹具结构强度不够。如果夹具 和试件的共振耦合不可避免,应考虑加速度限控制或 力限控制等特殊的振动控制方案。

1.3 原夹具模态分析

对箱弹振动试验的试验夹具进行有限元建模,如 图 3 所示。模型中立柱、框采用梁单元建模,底板采 用壳单元建模。夹具的材料为 Q235 铸铁,其材料参 数为:密度 p=7.858 g/cm³,弹性模量 E=196 000 N/mm², 泊松比 v=0.3。夹具模态分析工作从两方面考虑,首 先分析夹具在自由状态下的刚度特性,其次分析夹具 在底板处梁单元约束状态下的刚度。约束条件下的模 态分析结果如图 4 所示,夹具前四阶振型均为夹具顶 部弯曲振型,且频率均小于 60 Hz,见表 1。



Fig.4 Modal analysis of vibration fixture

模态分析结果表明,由矩形钢管拼接成长细比约为5的夹具,由于夹具长细比较大,且振动安装方式为夹 具底部与振动台采用螺栓固定,是典型的悬臂梁结构,因此试验夹具在60 Hz 以内有多阶弯曲模态。在扫频 试验中,选择试验夹具的低阶模态对振动试验结果带 来较大的影响,因此需要对试验夹具进行改进设计。

2 夹具改进设计

2.1 夹具结构形式更改

为提高试验夹具的固有频率,改进夹具结构形 式,提高夹具的刚度,在夹具结构端部和四根支柱之 间分别增加角撑和斜撑。改进后的有限元模型如图 5 所示,然后进行模态分析,结果见表 1。



采用加角撑和斜撑的改进方法后,试验夹具的结构特性仍然不能满足要求,又通过在外围加支撑框,进一步改进试验夹具。外围加支撑框的夹具三维模型如图6所示,模态分析结果见表1。



图 6 加外围支撑夹具模型 Fig.6 Model of fixture with peripheral support

通过上述分析,对比上述两种改进方法模态分析 结果可知,单纯地增加试验夹具的刚度无法满足试验 要求。

2.2 改变边界条件

通过 2.1 节分析可知,提高夹具刚度方法,无法 明显提高试验夹具的频率。箱弹产品实际装舰形式 为:箱弹在舰上装载时,安装于弹库内的垂直发射装 置中,发射装置安装在弹库内,高度上从3甲板一直 达到1甲板,其上端与舰艇的1甲板固定连接,下端 通过工字梁与弹库内的安装面进行连接。箱弹后端安 装于发射装置的压力室上,通过压紧机构进行连接, 使发射箱得到径向和轴向固定,压力室是用于导弹发 动机燃气排导用的空腔体。发射箱前端与发射装置通 过舱口固定装置使发射箱得到径向刚性约束。

根据箱弹在舰上的实际安装情况,开展了振动试 验夹具的改进设计工作,改进后的试验夹具如图7所 示。试验夹具由上夹具和下夹具两部分组成:上夹具 等效模拟发射箱前端与发射装置、发射装置与舰甲板 的安装形式,使发射箱得到径向刚性约束;下夹具等 效模拟发射箱后端与发射装置、发射装置压力室、发 射装置与舰上3甲板弹库安装面的安装形式或结构 形式,使发射箱得到径向和轴向固定。结合某型号导 弹发射方式垂直热发射,在舰载贮运、值班状态下箱 弹在发射架实际的约束方式,对夹具约束形式进行改 进,模拟箱弹实际约束方式。在进行垂向振动时,通 过增加水平口框和滚珠,在对箱弹端部水平方向位移 约束的同时,实现垂向自由位移,模拟了箱弹舰载实 际的边界条件。在此边界约束条件下,进行模态分析, 结果见表2。



图 7 夹具改进设计 Fig.8 Improvement design of fixture

	表 2	夹具模态分析
Tab.2	Mod	dal analysis of fixtures

垢刑	频率/Hz		
派室	原夹具	改进后	
一阶	11.874	69.5	
二阶	18.536	71.69	
三阶	35.445	74.627	
四阶	54.82	76.113	
五阶	72.15	82.498	

通过对夹具改进设计,提高夹具的基频至 69.5 Hz,大于试验载荷频率的上限。夹具基频与试验 频率范围的错开,避免了由于夹具引起低频段共振而 导致振动试验条件的选择不当、与产品实际经历的力学环境不符。

3 试验控制方法及传感器布局的改进

通常采用的振动控制方式有:输入加速度控制 方法、力限控制方法、加速度限控制方法、加速度 响应控制方法、开环波形控制方法。控制加速度传 感器的安装位置取决于振动试验所采用的振动控制 方式^[8-9]。加速度传感器应布置在刚度较强的区域, 才能正确地反映试件承受振动载荷的实际响应值。不 应布置在无支撑的蒙皮壁板或者其他相对刚度较小 的结构上,否则可能会被试件的局部模态振型导致响 应过大所误导。

试验夹具和箱弹组合成大型悬臂梁结构,振动试 验控制方法是加速度输入控制,通过在试验夹具底部 (与振动台面贴合处)粘接加速度传感器以控制振动 台的输出。由于产品长细比较大,对于试验控制方法 需要进一步完善。

根据振动试验加速度输入控制方法要求^[5],控制 信号可以是若干个安装在夹具或夹具界面上加速度 传感器输出信号的平均值。后续振动试验可以采用多 点控制方法,即通过在试验夹具上布置3个或3个以 上传感器,传感器布置位置为夹具与试件的界面处, 即夹具传递振动载荷的位置,例如夹具与发射箱底部 压紧块处、夹具靠近箱弹质心处、夹具顶部等。此外, 测试传感器应尽可能布置在刚度较强的位置,避免由 于局部模态特性影响试验结果。

此外可以通过采集箱弹产品在舰载贮运工况下 实际的振动响应,采用加速度响应控制方法。该方法 与实际真实工况载荷更接近,且载荷量值远比国军标 规定的量值小^[10]。

4 结语

文中针对某型号箱弹舰船振动试验中出现的问题,进行故障定位和故障分析,确定试验夹具的刚度 和模态特性对试验结果带来较大影响。对试验夹具进 行改进设计,采取结构形式改进和边界约束条件改进 两种方案,通过模态分析确定了边界约束条件方法与 实际产品工作情况更相符合,避免了由于夹具振动特 性导致的过试验,并对振动控制方法及传感器布局位 置进行了优化改进。

参考文献:

 [1] 邢天虎. 力学环境试验技术[M]. 西安: 西北工业大学 出版社, 2003.
 XING Tian-hu. Mechanical Environment Test Technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2003.

- [2] 马征,李东强,顾阳,等. 某异型结构振动夹具的设计 及试验验证[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 90-94.
 MA Zheng, LI Dong-qiang, GU Yang, et al. Design and Experimental Verification of a Special Shaped Vibration Fixture Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 90-94.
- [3] 范东林,张海伟,石剑平,等. 某型导弹前舱振动夹具 设计[J]. 机械工程师, 2013(11): 133-135.
 FAN Dong-lin, ZHANG Hai-wei, SHI Jian-ping, et al. Vibration Fixture Design of a Certain Missile Front-part[J]. Mechanical Engineer, 2013(11): 133-135.
- [4] GJB 150.16A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分: 振动试验[S].
 GJB 150.16A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel Part 16: Vibration Test[S].
- [5] 俞秋惠,陈剑.振动试验夹具的优化设计及模态试验
 [J].噪声与振动控制, 2010(12): 67-69.
 YU Qiu-hui, CHEN Jian. Optimization Design and Modal Test of Fixtures for Vibration Testing[J]. Noise and Vibration Control, 2010(12): 67-69.
- [6] 张志旭,朱学旺.振动夹具一阶共振频率的试验数据 识别[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(z1): 62-64.
 ZHANG Zhi-xu, ZHU Xue-wang. Test Data Identifica-

tion of the First Resonance Frequency of Vibration Fixture[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(z1): 62-64.

- [7] 朱姝,常志刚.振动冲击试验夹具设计技术研究与实践[J].环境技术,2009,27(3):14-19.
 ZHU Shu, CHANG Zhi-gang. Fixture Design Technology Research and Practice for Vibration and Shock Test[J].
 Environmental Technology, 2009, 27(3): 14-19.
- [8] 卢彩玲,康宁民,郑应强.对随机振动试验方法的探讨
 [J].环境技术,2010,31(6):22-26
 LU Cai-ling, KANG Ning-min, ZHENG Ying-qiang.
 Study on Experiment Method for Random Vibration[J].
 Environmental Technology, 2010, 31(6): 22-26
- [9] 李正举. 航天器振动试验力限条件设计技术研究[D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2010.
 LI Zheng-jv. Research on Design Technology of Force Limit Condition for Spacecraft Vibration Test[D]. Beijing: China Academy of Space Technology, 2010.
- [10] 蔡健平,张萌,赵婉. 装备典型舰载平台振动环境严酷 度分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 87-92. CAI Jian-ping, ZHANG Meng, ZHAO Wan. Severity Analysis of Typical Shipboard Vibration Environment for Materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 87-92.