

分体式天线座夹具 PSD 谱分析和实验研究*

袁新江,段勇军,姜 洋,程 亮

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210013)

摘 要:针对一种分体式天线座振动夹具的动态特性进行分析研究。利用 ANSYS 分析软件,对夹具进行有限元模态分析优化及 PSD 谱分析,并完成了随机振动试验。将有限元分析结果和随机振动实验结果进行了比对分析,验证了有限元分析结果的正确性。最后,根据实验结果对有限元计算参数的选取和边界条件的定义作了进一步的修正,完善了分析模型。

关键词:随机振动;夹具;模态分析;PSD

中图分类号:TP391.9;TG75 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-5300(2008)05-0051-04

The PSD Spectrum Analysis and Experiment Research on One Separated Antenna Pedestal Jig

YUAN Xin-jiang, DUAN Yong-jun, JIANG Yang, CHENG Liang

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: The paper studies and analyzes dynamic characteristics of a separated antenna pedestal jig. A finite element modal analysis and PSD analysis are done on the jig with ANSYS, a FEA (Finite Element Analysis) software program, and the random vibration test is also done. The result of finite element analysis is compared to the experiment result in the paper, it is validated that the result of finite element analysis is correct. In the end of the paper, according to the results of the experiment, the parameter and the boundary condition in the finite element analysis are modified, and the model is perfected.

Key words: random vibration; jig; modal analysis; PSD

0 引 言

振动是产品失效的主要环境因素之一,某分体式天线座的振动环境是随机振动。为了检验产品在真实环境下的工作情况,产品必须进行规定的随机振动试验,以考核产品在随机振动环境中工作的可靠性,有效地暴露产品的早期故障。对产品在设计阶段进行有限元随机振动 PSD 谱分析,可以指导和优化设计,提高产品的使用可靠性。

在随机振动试验中,振动台通过振动夹具将一定频率范围内的功率谱“能量”传递到试件上。在一个宽带频带的频带内,一般都很可能含盖了夹具、试件的固有频率,从而在这些频率点上激发共振,并造成这些频率点附近频带内的 PSD 值被放大,继而造成“能量”放大。这些放大的“能量”,对于夹具来讲,会造成试验的振动环境与真实振动环境产生较大的差别;对于

试件来讲,有可能会造成损坏;对于振动台来讲,有可能会造成失控,使试验无法进行^[1]。

目前,有限元模态分析法已被广泛应用到产品研发阶段,其仿真结果也逐渐通过试验验证^[2],并得到广泛的认可。利用 PSD 谱分析对产品进行随机振动研究的方法也逐渐被人们采用^[3]。

文中将主要针对某分体式天线座夹具利用 ANSYS 软件进行有限元 PSD 谱分析和实验研究。

1 夹具的设计要求

对振动夹具最完美的要求是:将振动激励不失真地传递给受试件。要做到完全的不失真,理论上就要求夹具在试验频带内无共振频率点。而机载雷达的振动环境是宽带(10 Hz ~ 2000 Hz)随机振动环境,完全没有共振点几乎是不可能的。

根据多自由度振动系统方程^[4]:

* 收稿日期:2008-05-14

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}$$

式中： $\{f(t)\}$ 为输入激励； $\{x(t)\}$ 为输出响应； $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵。

如果输入激励 $\{f(t)\}$ 一定,其他参数不变,输出响应 $\{x(t)\}$ 的位移与刚度成反比,速度与阻尼成反比,加速度与质量成反比。所以增大产品的质量、阻尼、刚度均可提高产品的抗振性能。但对于夹具来讲,质量增加将受到振动台的推力限制。所以较大型的夹具设计,一般都要尽量提高刚度和阻尼而减少质量。

传统设计的振动夹具结构形式有:L型、T型、盒式等。文中研究的对象是机载分体式天线座振动夹具,采用U型结构。夹具近三百公斤,属较大振动夹具。为了获得更好的性能,夹具采用铝合金整体铸造,易于提高结构谐振频率,增大阻尼,降低谐振时的振动传递率。

2 动态特性分析

2.1 有限元模态分析和结构优化

在进行夹具设计时,以尽量减轻重量、增加刚度、提高低阶固有频率为原则进行设计。在设计过程中,利用有限元软件进行模态分析,根据分析结果指导设计。开始设计的夹具外形如图1(a)所示,经过反复的结构优化,最终设计的夹具外形如图1(b)所示。结构优化效果见表1。

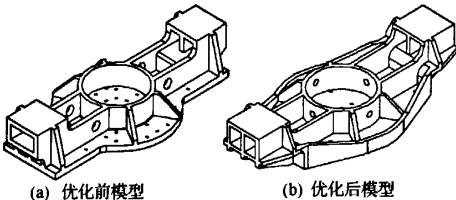


图1 U型夹具外形

表1 优化前后第一阶固有频率比较

方向	X向	Y向	Z向
优化前	166 Hz	196 Hz	289 Hz
优化后	202 Hz	323 Hz	400 Hz

在夹具的设计过程中不能单纯地依据提高结构固有频率的值来进行优化,因为根据某机载雷达的振动环境条件,随机振动功率谱并不是一条平直的谱线,而是在某些窄频带内出现功率谱密度的阶跃。这些窄带是由载机的发动机引起的,窄频带内的功率谱密度值比其他频带内的功率谱密度值的几十到几百倍。

在振动夹具结构优化的过程中,虽然在最终模型

的基础上加一些小加强筋还可以将固有频率提高一点,但却使夹具的第二阶固有频率落进发动机引起的窄带内。这会使该频率点响应的功率谱密度值非常大,可能会是其他点响应的功率谱密度值的上千倍,也同时带动“能量”增大。所以,夹具的结构固有频率要尽量避开发动机引起的峰值窄带。而该夹具要想进一步提高第二阶固有频率使其超过这个峰值窄带已很困难,所以放弃了进一步加固的措施,让第二阶固有频率回落到窄带之外。

振动实验时,由于振动台的限制,X、Y、Z三个方向与振动台的固定孔位均不同。这样,夹具在进行有限元模态分析时,三个方向的约束条件也均不相同。

机载雷达随机振动频带内的固有频率对响应影响较大,超出频带范围的更高阶固有频率对系统已没有太大的影响。文中主要针对X向的振动进行分析对比。对最终模型按X向振动的约束条件进行模态分析,计算得前三阶固有频率分别为:202 Hz、302 Hz、379 Hz。

2.2 传递特性分析

模态有限元分析结果能够得到直观的各阶振型和各阶固有频率值,但不能得到某个节点在某个固有频率点产生共振时响应的放大倍数。如果要进一步了解某个点的响应情况,还要对夹具进行PSD谱分析。为了便于比较各频率点的放大倍数,输入单位载荷的PSD谱线。在进行有限元PSD谱分析时,输入功率谱密度为0.0001 g²/Hz的平直谱,频率范围为10 Hz~2000 Hz,激励点的PSD均方根值A₀为4.37 m/s²。

并根据经验取初始的恒定阻尼比为0.02,夹具有限元PSD谱分析计算结果云图如图2所示。

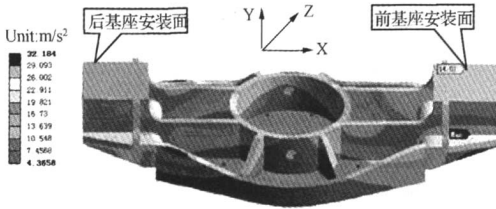


图2 PSD谱分析结果云图

PSD谱分析结果的云图粗略地显示了夹具上各点的“能量”放大情况。由于夹具的底部中间与振动台连接,故这部分能量放大较小,在靠近固定点处能量最小,即为激励“能量”。在前基座和后基座安装面^[5]处能量放大较多。再对前基座安装面处取一个节点(定义为1#节点)进行分析研究。云图上测得1#节点“能量”的均方根值A为14.01 m/s²,并可得到1#节点

PSD 响应谱如图 3 所示。

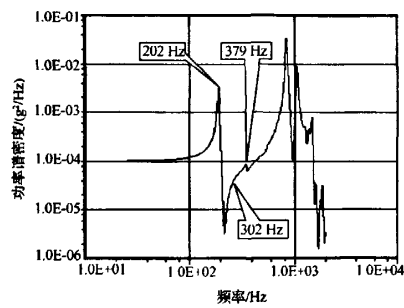


图 3 1*节点有限元 PSD 响应谱

可以估算1*节点的“能量”放大倍数为 $A/A_0 = 14.01/4.37 = 3.2$ 倍。

3 实验研究

对该夹具进行随机振动实验测试。X 向振动时, 夹具在振动台上的安装状态如图 4 所示。输入的激励信号是谱密度为 $0.0001\text{ g}^2/\text{Hz}$ 的随机平直谱。振动时夹具 1*节点处响应的 PSD 谱如图 5 所示。

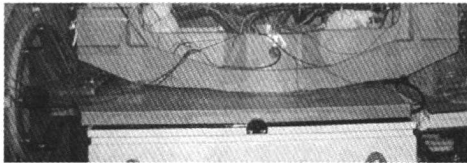


图 4 夹具在振动台上的安装状态

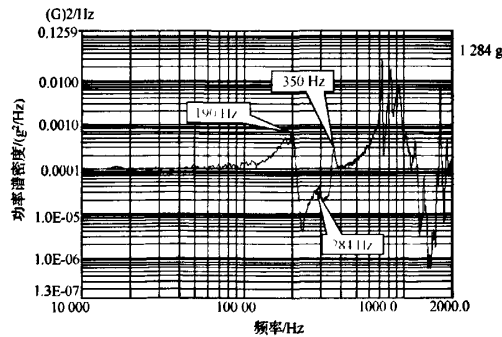


图 5 实测 1*节点处 PSD 响应谱

由实验得到的 PSD 响应谱可以直观的得到:1*节点响应的 PSD 均方根值 $A_1 = 1.284\text{ g} = 12.583\text{ m/s}^2$; 夹具的前三阶谐振频率分别约为:190 Hz, 284 Hz, 350 Hz。

实验得到响应的 PSD 均方根值和有限元分析结果吻合的较好。实验得到的前三阶固有频率值以及 PSD 响应谱的形状和有限元分析结果也基本吻合, 但稍有差异, 这将在第 4 节中作详细的对比分析。

4 有限元计算与实验结果比照分析及参数修正

由实验的结果来看, 夹具的前三阶固有频率值均较有限元分析结果偏低, 误差在 10% 以内。误差原因分析: 夹具与振动台实际固定时是通过螺栓联接的, 并非完全刚性的联接。而有限元分析时, 螺栓的联接处的沉孔台阶面相邻的节点是按完全刚性固定处理的, 从而导致系统刚度偏大, 固有频率偏大。为了能够更真实的模拟螺栓联接, 可以对固定点进行降低刚度处理。选取与螺栓孔口的线相邻的节点作为固定点。这样处理后固定的节点数目将减少, 实际固定区域减小, 从而达到降低约束刚度的目的。

按上述方法重新定义边界条件, 再对夹具进行有限元模态分析。得到前三阶固有频率:189 Hz、283 Hz、349 Hz, 与实验结果吻合较好。

在新模态分析的基础上, 选取不同阻尼比, 继续对夹具模型进行 PSD 谱分析。当选取阻尼比为 0.025 时, 1*节点的 PSD 均方根值与实验结果较好的吻合。1*节点的 PSD 响应谱如图 6 所示。

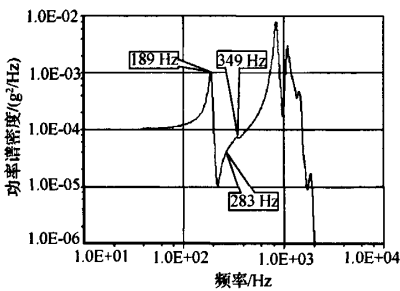


图 6 边界条件修正后 1*节点 PSD 响应谱

将图 6 和图 3 中的响应谱与图 5 实测的响应谱进行比较。无论是谐振频率点值还是谐振点功率谱密度的放大情况, 图 6 均较图 3 更接近实测的响应谱。

将图 6 中的响应谱和实测谱作进一步比较: 有限元分析 PSD 响应谱的第一阶固有频率点的功率谱密度值的放大倍数比实验结果大, 而高阶响应放大倍数比实验结果小。误差原因分析: 这与阻尼比的选取有较大的关系。选取较大的阻尼比可以降低谐振点的放大倍数, 反之将增加放大倍数。实验得到的一阶谐振点放大倍数小于有限元分析结果, 说明有限元分析时一阶振型选取的阻尼比偏小。如果将阻尼比修正到 0.03, 有限元分析的 PSD 响应谱第一阶放大倍数与实测第一阶放大倍数一致。但高阶的放大倍数也跟着降低, 明显低于实测结果。而且, “能量”值也跟着降低。

由此看来,单纯的修正恒定阻尼比无法让响应谱与实验结果完全吻合。这说明不同阶振型对应的阻尼比并不是恒定的,变化的大致趋势是低阶大、高阶小。有限元分析时可以通过输入振型阻尼的方法定义各阶阻尼比。但变阻尼的研究更为复杂,也更难准确确定,一般仍取近似的恒定阻尼比进行分析研究。修正后的阻尼比 0.025,从“能量”的角度来看,可以使有限元分析结果与实验结果一致。另从 PSD 响应谱来看,0.025 的阻尼比应该是介于低阶和高阶之间的。所以可以说选取恒定阻尼比为 0.025 是近似准确的。

将上述的计算与实验结果列表比较见表 2。

表 2 计算与实验结果比较

结果	对象			
	1 阶频率 (Hz)	2 阶频率 (Hz)	3 阶频率 (Hz)	1#点能量 (g)
初始计算值	202	302	379	1.43
实验测试值	190	284	350	1.284
修正计算值	189	283	349	1.28
初始值误差	6.3%	6.3%	8.2%	11.4%
修正值误差	0.5%	0.4%	0.3%	0.3%

5 结束语

初始边界条件下,夹具的模态分析结果与实验结果基本吻合。根据实际情况分析和实验结果对比,修正边界条件后,模态分析的前三阶固有频率与实验结果完全吻合。所以,边界条件的选取对模态分析结果的正确性影响较大。

夹具的 PSD 谱分析结果与实验结果也得到了较

好的吻合。PSD 谱分析是基于模态分析结果的,模态分析结果的正确性直接影响 PSD 谱分析结果。系统的阻尼对节点的 PSD 响应谱也有较大的影响,主要是影响谐振点 PSD 响应的放大倍数。阻尼增大,谐振点的放大倍数将减小,反之则增大,这也是夹具及多数设备要尽量提高阻尼的原因。

文中通过与实验结果的比对分析,验证了夹具有限元计算结果的正确性,并对有限元计算参数进行了分析和修正。文中的经验数据和处理方法可以为类似结构的产品进行有限元分析提供参考。

参考文献:

[1] 常 研. 随机振动试验的几个工程问题[J]. 电子机械工程,2002,18(2):46-48

[2] 张小安,张 艳. 天线座结构的试验模态与理论模态的分析比较[J]. 电子机械工程,2005,21(1):37-40

[3] 王长武,张幼安. 随机疲劳分析在机载设备疲劳寿命预测中的应用[J]. 中国机械工程,2004,15(21):1906-1908

[4] 庄表中,梁以德,张佑启. 结构随机振动[M]. 北京:国防工业出版社,1995

[5] 袁新江. 一种分体式天线座结构设计分析[J]. 电子机械工程,2007,23(1):35-38

作者简介:袁新江(1974-),男,高级工程师,主要从事机载雷达天线座设计工作。

(上接第 21 页)

参考文献:

[1] 段宝岩. 天线结构分析、优化和测量[M]. 陕西:西安电子科技大学,1986

[2] 成大先,等. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2003

[3] 叶尚辉. 天线结构设计[M]. 陕西:西安电子科技大学,1986

作者简介:程海平(1979-),男,本科,工程师。主要从事气象雷达结构总体设计工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>