

· 结构与工艺 ·

高精度星敏感器随机振动分析

吴 卫¹, 王 炜¹, 樊学武¹, 余舜京²

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 上海微小卫星工程中心, 上海 200050)

摘要:为了验证高精度星敏感器是否能承受飞行器发射过程中产生的随机振动载荷, 对其进行了随机振动分析. 从振动理论入手, 详细阐述了高精度星敏感器随机振动分析过程中功率谱密度的确定. 利用有限元分析软件 Patran 和 Nastran 对其进行随机振动分析, 结果表明发射过程中产生的随机振动对高精度星敏感器的影响非常小, 为其结构设计提供了依据.

关键词:星敏感器; 随机振动; 有限元

中图分类号: TP212; V448.22⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)01-0071-04

Random Vibration Analysis of High Accuracy Star Sensor

WU Wei¹, WANG Wei¹, FAN Xue-wu¹, YU Shun-jing²

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 200050, China)

Abstract: In order to verify if the high accuracy star sensor could resist against the random vibration produced by the air vehicle during launching, the random vibration was analyzed. First, the theory of vibration and power spectral density was presented. Then random vibration analysis was done by the finite element software Patran and Nastran. The results show that the effect of the random vibration is very small, which is useful to improve the structure design.

Key words: star sensor; random vibration; finite element

星敏感器是卫星和航天器姿态控制系统中不可或缺的重要组成部分. 它利用对星点目标的探测、与星表的匹配计算确定卫星和飞行器的姿态, 是航天设备中非常重要的组成部分. 航天器发射过程是一个非常严酷的环境, 这就要求像星敏感器这样的高精度仪器必须要有足够的稳定性. 在航天器发射过程中, 星敏感器受发动机工作噪声及气动力激振等因素影响, 将产生随机振动载荷, 这种振动载荷极有可能对星敏感器产生有害影响, 振动过程中的最大应力可能使星敏感器上的关键器件瞬时失灵, 或者导致连接螺栓的松脱甚至断裂. 因而需要通过随机振动分析与试验考核星敏感器承受随机振动环境的能力^[1], 提高产品的可靠性.

1 振动理论

振动可分为确定性振动和非确定性振动两类. 诸如简谐振动、周期振动和非周期振动这些可以用时间的确定函数来表达, 都属于确定性振动. 而另一类不能用确定函数来描述, 瞬时值不可知的振动属于非确定性振动. 这里主要研究非确定性振动即随机振动. 随机振动由于不能用确定性函数描述运动规律, 只能通过概率、统计方法表述随机过程的重要特征. 这种振动不可预测, 在相同的条件下也不重复, 具有明确的随机性. 随机振动分析是一种采用功率谱密度作为输入的谱分析, 是一种确定响应出现

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 国家 973 计划项目

作者简介: 吴卫(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为结构设计.

特定值的概率大小的分析方法。

测得的星敏感器随机振动信号往往是加速度一时间信号,一般不可能通过求得随机信号的傅氏变换而了解随机过程的频率组成. 解决这个问题的方法是利用相关函数和功率谱密度^[2]。

相关分析是在时域中研究随机信号的统计特性的一种方法,相关函数有自相关函数和互相关函数,这里以自相关函数为例. 一个时间函数 $x(t)$ 的自相关函数 $R_x(\tau)$ 定义为

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau) dt \quad (1)$$

式中, $E[x(t)x(t+\tau)]$ 表示求 $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 的数学期望。

相关分析在频域的对应该分析方法是功率谱密度分析. 自相关函数的傅氏变换是自功率谱密度函数. 假设 $x(f)$ 是 $x(t)$ 的傅氏变换, $G(f)$ 是单边功率谱密度, $S(f)$ 是双边功率谱密度. 则有

$$S(f) = 2 \int_0^{\infty} R(t) \cos 2\pi f t d\tau \quad (2)$$

$$G(f) = \begin{cases} S(f), & f=0 \\ 2S(f), & f>0 \end{cases} \quad (3)$$

$x(t)$ 的均方值 $\overline{x^2} = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) df$, 可见 $\overline{x^2}$ 的值可由功率谱密度曲线 $S(f) \sim f$ 下的面积给出. 对自相关函数做傅氏分析不会丢失过程的频域信息. 对于一个特定的时间域信号可以通过式(1)~式(3)得到信号的频域信息。

2 星敏感器随机振动分析

随机振动分析可以分为 2 种方法,一种方法是如文献[1]中给出的利用经典公式进行估算;另一种方法是利用有限元软件对随机振动试验进行仿真模拟,这种方法运算量大,但精度较之前一种高很多,这也是现在常用的一种方法. 星敏感器属于复杂结构,分析结果的精确度由结构模型的简化程度、网格划分的精度和加载条件等决定. 下面主要介绍利用 Patran 和 Nastran 有限元软件对星敏感器进行随机振动分析。

2.1 建立有限元分析模型

文中用于分析的星敏感器三维图如图 1 所示^[3-5]. 对星敏感器结构划分有限元网格,在建立有限元模型时由于结构本身比较复杂,在不影响分析结

果的前提下做了适当的简化,比如透镜和镜框全接触和透镜曲面以平面代替等. 建立的有限元模型如图 2 所示,共包含 15 791 个单元和 18 849 个节点。

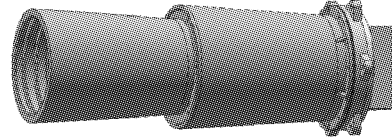


图 1 星敏感器结构三维图

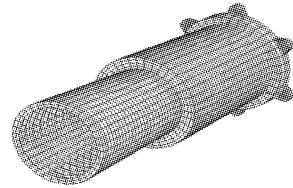


图 2 星敏感器有限元模型

2.2 功率谱密度的确定

功率谱密度实际上就是将对时间域的振动描述转化为对频率域的振动描述. 转化过程中利用式(1)~式(3)可以得出功率谱密度的表达式. 利用公式的计算过程比较复杂,在实际操作中可以简化:将所测得的加速度一时间信号分割成许多小的频率段,每段只含有一条很窄的频率段的加速度信息,当每个信号进入频率段后被平方,然后与前面的信号平均得到这个频率段的平均值,再除以频率段的宽度就得到了功率谱密度^[6]. 该分析中得到功率谱密度分布见表 1 所示。

表 1 星敏感器随机振动分析条件

频率范围/Hz	功率谱密度/(g ² /Hz)
20~190	+3 dB/oct
190~500	0.04
500~750	0.03
750~2 000	-9 dB/oct

表 2 频率和功率谱密度对应关系

频率/Hz	功率谱密度
f_1	p_1 (g ² /Hz)
$f_1 \sim f_2$	A(dB/oct)
f_2	p_2 (g ² /Hz)

为了计算频率为 20 Hz 和 2 000 Hz 时的功率谱密度,假设频率和功率谱密度有如下对应关系如表 2 所示,则满足式(4)

$$A = 10 \log(p_2/p_1) / \log_2(f_2/f_1) \quad (4)$$

代入数据可以得到 20 Hz 时对应的功率谱密度为 0.004 243 g²/Hz, 20 000 Hz 时对应的功率谱密度为

0.001 6 g²/Hz. 功率谱密度图纵轴单位为 g²/Hz, 横轴单位为 g²/Hz, g² 是频率带加速度均方值. 因此计算功率谱密度曲线下的面积所得的值代表了整个频率范围内的加速度均方值, 与第一节中的定义吻合, 将该值开根号所得到平均值即为均方根加速度值^[6]. 利用这个方法计算得到的本次分析均方根加速度值为 6.59 g.

2.3 随机振动分析

随机振动用于考虑结构在某种统计规律分布的载荷作用下的随机响应. 随机振动分析的基本步骤可分为 2 步, 第 1 步是进行频率响应分析; 第 2 步是用 MSC.Random 进行随机响应分析. 这里对星敏传感器沿 X 轴和 Y 轴 2 个方向施加载荷, 分别得出水平和竖直放置时的随机振动响应.

高精度星敏传感器随机振动被认为是线性、平稳、各态历经的随机物理过程. 对星敏传感器随机振动结果分析后提取了有限元模型中的 3 个特殊点: 反应输入加速度载荷的安装环上的固定节点 24 677; 遮光罩上加速度响应 RMS 值最大点即离固定点最远

的位于 Y 向边缘的节点 15 593; 镜框上加速度响应 RMS 值最大点即离固定点最远的位于 Y 向边缘的节点 4 073.

加速度响应如图 3 所示, 其中图 3a 是点 24 677 的加速度响应曲线; 图 3b 是 X 向加载时节点 15 593 和 4 073 的加速度响应曲线; 图 3c 是 Y 向加载时节点 15 593 和 4 073 的加速度响应曲线. 从图 3 中可以看出输入加速度与给定分析条件是吻合的, 加速度响应 RMS 值最大点都位于节点 4 073 处. 加速度放大倍数在 X 向加载时为 2.227, Y 向加载时为 1.023, 都在高精度星敏传感器要求的安全裕度内.

星敏传感器应力主要集中在光学镜头靠近固定点镜筒直径骤降的地方和安装环连接安装平台的固定点, 因此应力分布结果给出了这部分单元在频率变化范围内的应力变化曲线, 如图 4 所示, 图 4a 为 X 向加载时应力集中部部分单元应力分布曲线, 图 4b 为 Y 向加载时应力集中部部分单元应力分布曲线. 从结果可以知道应力最大值在安装环连接安装平台的固定点处. 从图 4 中可以看出, X 向和 Y 向加载两种情况下的应力值都是非常小的, 完全能满足设计要求.

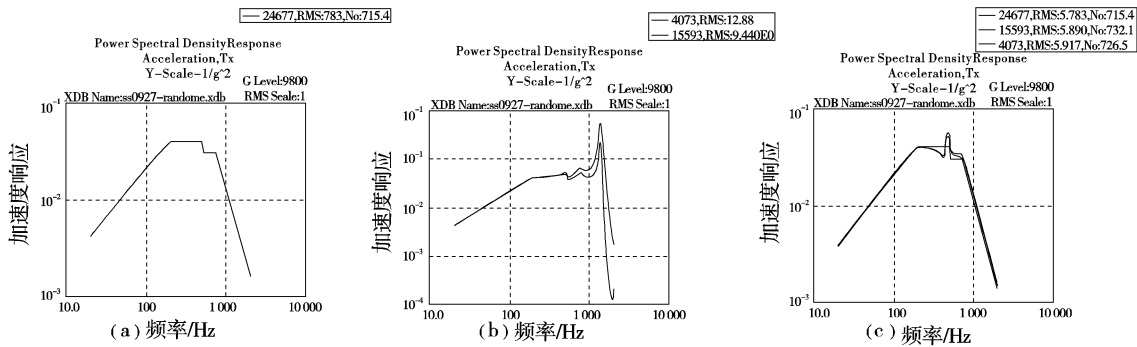


图 3 加速度响应曲线

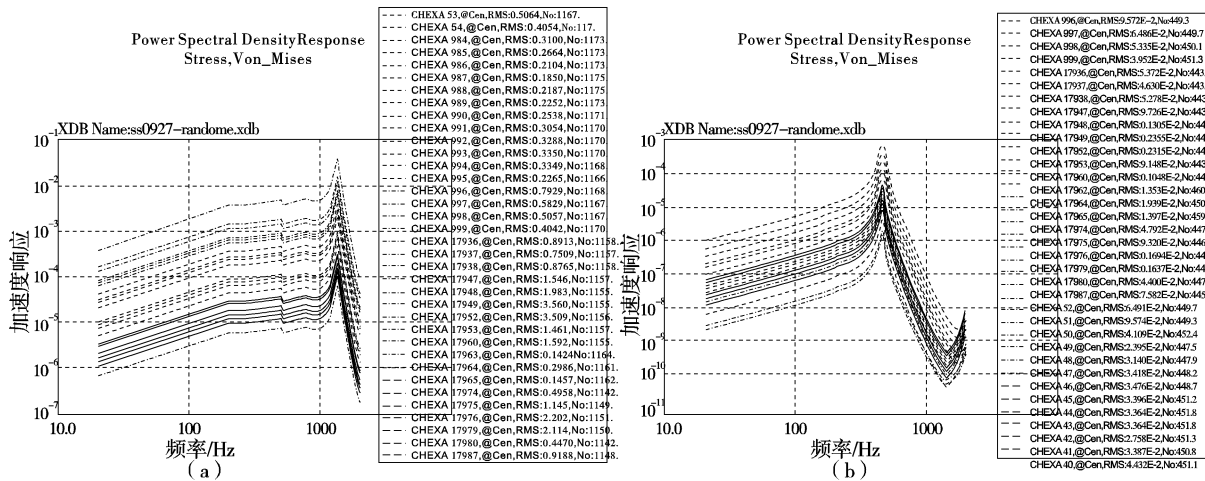


图 4 部分单元应力分布曲线

3 结束语

从振动理论入手,阐述了高精度星敏传感器随机振动的相关分析过程,包括功率谱密度的确定和振动分析的结果评价.由分析结果可知,航天器发射过程中产生的随机载荷对某高精度星敏传感器的影响非常小.不论是X向安装还是Y向安装,星敏传感器的最大加速度响应放大倍数都在安全裕度内,应力集中处应力值都远小于材料的许用值.接下来的工作是结合星敏传感器其他静态和动态指标,在满足要求的同时优化星敏传感器的结构.

参考文献

[1] 余成武,卢欣.有限元分析在航天器产品设计中的应

(上接第11页)

二是温度的固定档位预先设置.根据使用需求,预设多档固定温度值,研制温度预置设定器,以有效解决温度设定的输入与修改、辐射功率的自动调整以及与智能化测温控温仪的通讯接口等问题,使之满足使用要求.

3 结束语

对近距离红外辐射模拟技术,如高温度大口径目标红外辐射模拟技术、多功能高精度温度控制技术、红外辐射模拟的温度稳定控制等进行了初步探讨.通过模拟辐射源试验、温度控制的手动设置与计算机自动调节能力的检测、辐射口径变换功能的检

(上接第51页)

测.结果表明,该模拟辐射源功能较为全面,可以较好地模拟不同目标的红外特性,并且体积小、质量轻、操作使用简便,实用性强.

- 用[J].空间控制技术与应用,2008,34(4):28-32.
- [2] 李德葆,陆秋海.工程振动试验分析[M].北京:清华大学出版社,186-193.
- [3] Jeffrey W Percival, Kenneth H Nordsieck, Kurt P Jaehrig. The ST5000: a high-precision star tracker and attitude determination system [C] //Proceedings of SPIE, 2008, 7010: 70104H-1-70104H-6.
- [4] DAN Michaels, JAMES Speed. New Ball Aerospace star tracker achieves high tracking accuracy for a moving star field[C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5430: 43-52.
- [5] ROELOF W H, VAN Bezooijen. SIRTf autonomous star tracker[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4850: 108-121.
- [6] 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):46-50.

参考文献

- [1] 严衍禄.近红外技术基础及应用[M].北京:中国轻工业出版社,2005.
- [2] [美]A·R杰哈.红外技术应用——光电、光子器件及传感器[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [3] 宣益民,韩玉阁.目标与背景的红外辐射特性研究及应用[J].红外技术,2002,24(4):16-19.
- [4] 毛峡,李兴新,朱刚,等.目标红外辐射特性计算[J].电子测量技术,2003(5):19-20.
- [5] 华振斌,孟凡斌.红外辐射强度测量系统设计[J].光电技术应用,2009,24(2):10-12.

低,功能更强,特别是支持音频输入/输出.此外,为了使操作更加方便,必须增加对鼠标功能的支持.

参考文献

- [1] Techwell Inc. TW2824 4 channel video QUAD/MUX controller for security applications, datasheet Rev. 1.4 [DB/OL]. USA:Techwell Inc, 2004.
- [2] 赵建领.51系列单片机开发宝典[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 范庆辉,阳富民.基于TW2824的OSD技术研究与实现[J].计算机工程与设计,2007,28(10):2469-2474.