

遥感相机反射镜组件的随机振动分析

董得义

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 随机振动应力分析是有限元分析中的一个难点。本文在早期随机振动试验做法的基础上, 提出了随机振动峰值应力的计算方法, 并以铝板模型为研究对象对该方法进行了分析与试验验证。结果表明, 通过该方法计算的随机振动峰值应力与试验结果相比误差在 10% 以内。在此基础上, 对遥感相机的发射镜组件进行了试验前的随机振动峰值应力预示分析, 试验结果表明, 预示分析结论与试验结果相符。

关键词: 随机振动; 应力分析; 遥感相机

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102708.0036

FEA Study on Random Vibration to Reflect Mirror Set of Remote Cameras

DONG De-yi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Stress analysis of random vibration is a difficult point in FEA. An algorithm of analyzing random vibration peak stress value was got from primitive random vibration test. Aluminum sheet was analyzed and verified by test with the algorithm. The results showed that the difference between calculated peak stress values and test results was within 10%. On the basis of the results, the random vibration peak stress values predicted analysis was made for the major mirror set of optical remote sensor. The test results showed that there was consistency between predicted analysis conclusion and test results.

Keywords: random vibration; stress analysis; remote cameras

1 前言

在星上载荷^[1]的运输以及发射过程中,动力学环境可能会对其造成结构性的损坏,例如,导致电子元器件损伤,因电子线路断路或短路、接插件松动和支架断裂而使仪器设备发生故障,相机或镜头的支撑^[2]以及粘胶环节^[3]发生破坏或断裂等,这些故障的发生可能会导致星上载荷的光学传递函数下降甚至可能无法成像。据国外统计,卫星发射上天后第一天所出现的故障,有30%~60%是由动力学环境所引起的。因此,动力学环境对星上载荷工作可靠性的影响不能忽视。

由于星上载荷相对于卫星而言,体积小、重量轻、结构紧凑,基频也比卫星高得多;因此,频段范围较宽的随机振动是导致星上载荷发生故障的主要原因之一,对星上载荷的随机振动分析是光机结构在设计阶段的重要内容。

2 载荷随机振动简介

2.1 星上载荷随机振动的来源

星上载荷的随机振动主要来源于卫星所承受的随机激励,这是一种声致振动,主要来自两个方面:一个是起飞排气噪声;另一个是运载火箭跨声速飞行及高速飞行时引起的气动噪声,它是由卫星起飞和动力飞行过程中在卫星表面或整流罩上形成的空气脉动压力所引起的,这种空气脉动压力也称为噪声,它们通过卫星外壳(或整流罩)和飞行器结构传到卫星上,形成随机振动环境,作用到卫星的各部位,一般也称为声振环境^[4]。

起飞排气噪声是运载火箭发动机排气涡流产生的噪声,它将对卫星产生随机振动激励,其频率范围大约为20~2 000 Hz。气动噪声产生的随机振动激励比排气噪声产生的随机振动激励恶劣,频率可高达10 KHz。此外,地面运输环境也是一种频率较低的随机振动激励,其频率激励约为0.5~100 Hz。

2.2 MSC.Nastran 中的随机振动分析

MSC.Nastran 将随机响应分析当作频率响应的后处理来进行。也就是说,在进行随机振动分析之前,先要进行频率响应分析,频率响应分析的结果作为随机振动分析的一个输入条件。输入条件还包括用户以功率和相关谱密度形式提供的载荷情况^[5]。

输出结果为相应的功率谱密度、自相关函数、每单位时间的正斜率方向的零交点个数、以及响应的RMS值等。

3 随机振动峰值应力分析

MSC.Nastran 提供的随机振动分析模块的分析结果具有一定的局限性,在其分析结果中只给出了各部分应力响应的均方根值,却无法在结果文件中获得关心部位的应力峰值;而随机振动中的峰值应力又是设计人员非常关心的数据,因为通过大量的随机振动试验发现,在随机振动的试验中经常出现薄弱环节被振断的情况,例如,相机发射镜组件的柔结、相机偏流组件中的轴销等。为了尽可能地预防这种情况的再次发生,要求工程分析人员在试验前的预示分析中对这种情况做出预先判断,要给出组件中的薄弱环节是否会被振断或是否发生塑性变形的结论。因此,需要分析出随机振动中的峰值应力分布情况,通过比较计算结果与材料的抗拉强度后给出结论。

如何用 MSC.Nastran 计算随机振动的峰值应力响应情况呢?我们可以从早期的随机振动试验方法中获得启发。

3.1 早期随机振动试验的做法

在随机振动控制系统问世之前,绝大部分的随机振动试验都是由正弦扫描振动试验代替的。由于数字随机振动控制系统尚未完全普及应用,在某些试验中仍然规定了正弦与随机两种试验条件供选用。

模拟平稳随机振动环节的正弦扫描振动试验条件,是基于模拟随机和正弦激励的响应以及响应引起的破坏效果而得到的,也就是采用二者的响应峰

值等效准则和累计疲劳损伤等效准则。峰值等效准则决定了正弦扫描的试验量级,而累积疲劳损伤等效决定了试验持续时间。

由于 MSC.Nastran 中频响的应力响应是可以准确计算的,因此可以利用上文提到的峰值等效原则,将随机振动中的峰值应力响应转化成频响应力进行分析计算。

3.2 峰值等效原则

任何复杂的结构都可以看作由许多单自由度系统组成,因此可以从分析单自由度系统入手来确定等效的公式^[6]。

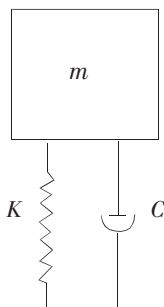


图1 基础激励单自由度系统

受基础激励的单自由度系统如图1所示,其运动方程为^[7]:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_0) + k(x - x_0) = 0 \quad (1)$$

式中: x_0 —基础激励位移; x —响应位移; m , C , K —质量, 阻尼, 刚度。

所谓峰值等效即是在共振频率处的加速度响应峰值等效。

对正弦振动,其响应的加速度峰值为:

$$\ddot{x}_{Smax} = Qa_s \quad (2)$$

式中: a_s —正弦激励的加速度峰值; Q —放大因子 ($Q = \frac{1}{2\zeta}$, ζ 为阻尼系数)。

对随机振动,其响应的加速度峰值为:

$$\ddot{x}_{Rmax} = N\sqrt{\frac{1}{2}\pi Q f_n G(f)} \quad (3)$$

式中: N —峰值等效系数,一般取3,代表 3σ 的概率上限,表示超过该响应的概率为0.26%; f_n —固有

频率; $G(f)$ —基础激励的加速度功率谱密度。

由正弦和随机响应峰值等效,即:

$$\ddot{x}_{Smax} = \ddot{x}_{Rmax} \quad (4)$$

而得出正弦激励的等效加速度峰值

$$a_s = \frac{\ddot{x}_{Rmax}}{Q} = N\sqrt{\frac{\pi}{2Q} f_n G(f)} \quad (5)$$

通过上述公式即可将随机振动的峰值应力分析转化为正弦振动的应力分析。

4 实例验证

4.1 试验概况

为了分析上述方法计算得到的随机振动峰值应力的正确性,以铝板组件为研究对象,对该方法的精度进行了试验验证。铝板组件如图2所示。

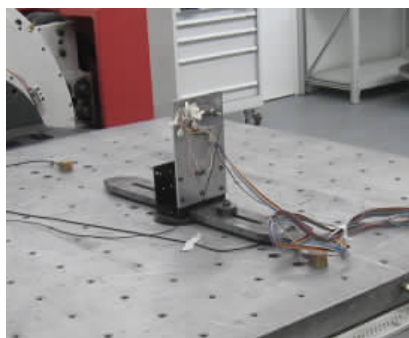


图2 铝板组件

在试验前,对该组件进行了预示分析,确定了在随机振动试验中应力最大的位置,根据分析结果,在铝板上粘贴了两片应变片,粘贴位置如图3所示。

为了确保有限元模型的准确性,保证有限元模型能够准确地反映铝板组件的力学特性,在进行随

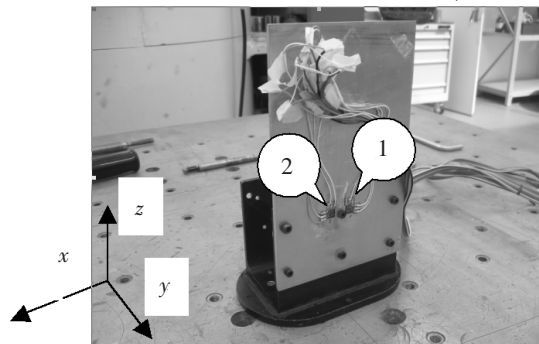


图3 应变片粘贴位置

机振动应力对比分析前,分别进行了铝板组件的基频对比分析及在随机振动中加速度响应均方根值的对比分析。

4.2 基频分析结果对比

铝板组件 y 向基频的有限元分析结果与试验结果的对比分析如表 1 所示。

表1 基频对比

坐标轴	试验结果 (Hz)	有限元分析结果 (Hz)	相对误差
y 向	157.2	156.4	-0.5%

y 向基频的有限元分析结果与试验结果的相对误差只有 0.5%,说明在有限元模型中,材料属性的选择与实际吻合,连接关系处理正确,分析中的边界条件施加合理。

4.3 随机振动加速度响应结果对比

铝板组件 y 向随机振动的加速度响应均方根值对比分析结果如表 2 所示。

表2 加速度响应均方根值对比

坐标轴	试验结果 (g)	有限元分析结果 (g)	相对误差
y	74.7	74.1	-1%

加速度响应均方根值分析结果与试验结果仅差 1%,说明在动力学分析中的结构阻尼选择准确。

4.5 随机振动峰值应力结果对比

图 4 为随机振动试验中贴点 2 的应变时域响应

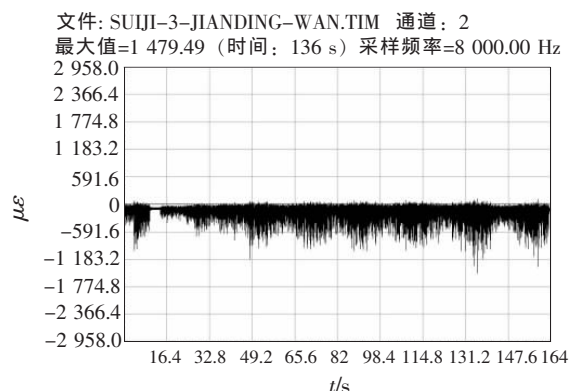


图4 应变曲线

曲线。

两个测点随机振动峰值应力的对比分析结果见表 3。

表3 峰值应力对比

测点编号	试验结果 (MPa)	有限元分析结果 (MPa)	相对误差
测点1	73.7	69.2	-6.1%
测点2	71.5	68.7	-3.9%

随机振动峰值应力分析结果与试验结果对比分析表明,通过该方法分析得到的随机振动峰值应力与试验结果吻合,可以将方法推广应用到遥感相机发射镜组件的随机振动试验前的预示分析中。

5 遥感相机发射镜组件的随机振动分析与试验

5.1 试验概况

发射镜组件是遥感相机中最重要的光学元件,发射镜组件的刚度及结构稳定性对遥感器的成像质量起着至关重要的作用。

发射镜组件主要由镜头、柔性支撑及三角板 3 部分组成。柔性支撑为该组件中的薄弱环节,在随机振动试验中存在着柔性支撑被震坏或发生塑性变形的可能性,因此在随机振动试验前,要对其应力响应进行预示分析,对其在随机振动试验中是否会被振坏或发生塑性变形给出明确的结论。

图 5 为遥感相机发射镜组件。发射镜组件的有限元模型如图 6 所示。



图5 发射镜组件及试验工装

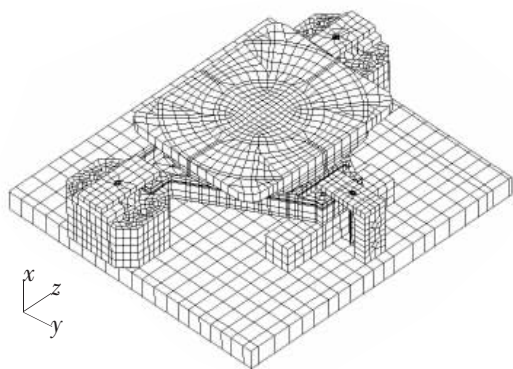


图6 发射镜组件有限元模型

5.2 随机振动峰值应力分析

通过等效加速度公式计算随机振动的峰值加速度为:

$$a_s = \frac{\ddot{x}_{Rmax}}{Q} = N \sqrt{\frac{\pi}{2Q} f_n G(f)} \quad (6)$$

式中, $N=3$

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{2 \times 0.007} = 71.4$$

$$f_n = 406 \text{ Hz}$$

$$G(f) = 0.15 \text{ g}^2/\text{Hz}$$

带入公式 (6), 计算得到: $a_s = 3.47 \text{ g}$

以 a_s 为输入条件, 进行共振点的频响分析, 结果如下: 柔结在 406 Hz 的随机振动峰值应力响应为

194 MPa; 通过查材料手册可知材料的抗拉强度为 470 MPa, 微屈服极限为 302 MPa, 都大于 194 MPa; 因此, 在振动中发射镜柔性支撑不会发生被振断或塑性变形等情况。

5.3 试验验证

由于柔性支撑处在发射镜与三角板之间, 在试验中无法在其应力集中部位粘贴应变片, 因此对分析结果与试验结果不能进行定量的对比分析, 只能对分析结果进行定性验证。

试验结果表明, 在随机振动后, 发射镜组件的柔性支撑完好无损, 与分析结果相符。

6 结 论

受到早期随机振动试验方法的启发, 本文提出了一种计算随机振动峰值应力响应的方法, 并以铝板组件为研究对象对这种方法的准确性进行了分析。有限元分析结果与试验结果的对比分析表明, 该方法计算得到的随机振动峰值应力与试验结果相差在 10% 以内。在此基础上, 对遥感相机发射镜组件进行了试验前的预示分析, 重点分析了发射镜组件中相对比较薄弱的柔性支撑上的应力响应情况, 对其是否会在随机振动中发生破坏或塑性变形给出了明确的结论。试验结果表明, 预示分析结果与试验结果相符。

参考文献

- [1] 辛宏伟, 董得义. 长焦距空间传感器支撑结构设计研究[J]. 光机电信息, 2009, 26(10): 28-33.
- [2] 张军强, 董得义, 颜昌翔. 空间成像光谱仪的主体支撑方式[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(10): 2450-2455.
- [3] 韩旭, 吴青文, 董得义, 等. 室温硫化胶建模在透镜结构分析中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 118-124.
- [4] 柯受全, 金恂叔. 卫星环境工程和模拟试验(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1996: 23-73.
- [5] 杨剑, 张璞, 陈火红. 新编 MD Nastran 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 43-96.
- [6] 张军, 谌勇. 卫星随机试验的振动响应分析[J]. 机械强度, 2006, 28(1): 16-19.
- [7] 牛晓明, 卢鐸. 空间光学仪器结构的动态特性分析及优化[J]. 光学 精密工程, 1995, 3(6): 99-105.

作者简介: 董得义 (1979-), 男, 汉族, 天津人, 硕士, 助理研究员, 2005 年于北京工业大学获得硕士学位, 主要从事有限元分析、力学试验与仿真等方面的研究。E-mail: s200201029@163.com