

某空间望远镜相关跟踪系统摆镜随机振动分析

王洪伟^{1,2}, 阮萍¹, 徐广州¹, 杨建峰¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:介绍了基础激励下机构随机振动响应的理论与分析方法. 利用有限元分析软件 ANSYS 建立了某空间望远镜相关跟踪系统摆镜的有限元模型, 并进行了随机振动响应分析. 通过分析考察了其承受动力学环境的能力. 对计算结果进行了分析. 指出了现有结构中的薄弱环节, 提出了改进方案, 为摆镜的设计提供了重要参考依据.

关键词:随机振动分析; 摆镜; 有限元

中图分类号:文献标识码: A **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3226-4

0 引言

相关跟踪系统摆镜是空间望远镜中一个高精度要求的光学装置, 为了保证相关跟踪系统的跟踪精度, 实时校正图像相对于参考图像的偏移, 实现高精度观测运动目标, 计算表明摆镜精度要达到 $\pm 1 \mu\text{rad}$. 由于摆镜在运输、安装和使用的过程中, 会有随机振动. 因此对摆镜提出了振动稳定性的要求.

本文针对空间望远镜相关跟踪系统摆镜振动台激励下的随机振动试验状况, 介绍了基础激励下随机振动响应的分析方法和途径, 利用有限元分析软件 ANSYS 对摆镜的有限元模型进行了模态分析和随机振动分析. 通过有限元计算, 研究了空间相关跟踪系统摆镜经受此动力学环境的能力, 找出了摆镜设计中的薄弱环节.

1 随机振动响应分析的基本原理

随机振动是指不能用确定性函数描述运动规律, 必须用概率、统计方法表述随机过程重要特征的一种振动^[1]. 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特定值的概率大小的分析方法.

1.1 基础激励随机振动响应

一个与时间无关的随机过程叫做一个平稳随机过程; 若一个平稳随机过程还满足集合平均等于时间平均, 即过程自相关等于时间相关, 则这个过程被称为各态经历的. 在工程计算中, 物理过程通常均被假定为线性、平稳、各态经历以及高斯型的^[2].

空间望远镜相关跟踪系统摆镜振动试验中机械

结构受到的随机振动我们便认为是线性、平稳、各态历经的随机物理过程. 动力学有限元基本方程如下

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中, $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{u\}$ 为位移向量; $\{F(t)\}$ 为作用力向量; t 为时间.

线性结构系统受到基础随机振动激励后运动方程(1)便化成为

$$\begin{bmatrix} [M_{ff}] & [M_{fr}] \\ [M_{rf}] & [M_{rr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_f\} \\ \{\ddot{u}_r\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ff}] & [C_{fr}] \\ [C_{rf}] & [C_{rr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_f\} \\ \{\dot{u}_r\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ff}] & [K_{fr}] \\ [K_{rf}] & [K_{rr}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_f\} \\ \{u_r\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 表示系统的质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{u} 、 \dot{u} 、 u 表示加速度、速度和位移向量; 角标 f 代表没被约束的自由度, r 代表被约束的自由度; F 代表外界的力激励.

自由位移 $\{u_f\}$ 可以分解为伪静态位移和动态位移两部分

$$\{u_f\} = \{u_s\} + \{u_d\} \quad (3)$$

其中伪静态位移可由方程(2)消去前面两项, 并用 u_s 代替 u_f 得

$$\{u_s\} = -[K_{ff}]^{-1}[K_{fr}]\{u_r\} = [A]\{u_r\} \quad (4)$$

将方程(2)、(3)代入方程(1)并忽略阻尼的影响, 可以得到

$$[M_{ff}]\{\ddot{u}_d\} + [C_{ff}]\{\dot{u}_d\} + [K_{ff}]\{u_d\} \approx \{f\} - ([M_{ff}][A] + [M_{fr}])\{u_r\} \quad (5)$$

在基础激励中 $F = 0$, \ddot{u}_r 、 \dot{u}_r 、 u_r 可用基础激励加速度 \ddot{u}_g , 基础激励速度 \dot{u}_g , 基础激励位移 u_g 代替, 则

$$[M_{ff}]\{u_d\} + [C_{ff}]\{\dot{u}_d\} + [K_{ff}]\{u_d\} = [M_{ff}][K_{ff}]^{-1}[K_{fr}]\{u_g\} - [M_{fr}]\{u_g\} \quad (6)$$

等式右侧相当于基础激励力. 对上式符号做一

些简化处理,确定性结构在基础激励下的动力学方程表示为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = MK^{-1}K_g\ddot{u}_g - M_g\ddot{u}_g \quad (7)$$

1.2 随机振动响应分析

通过频响应函数计算可以算出随机激励振动的统计特性,通过频率响应分析得结构的频响应函数 $H(\omega)$,然后求出响应的功率谱密度.

对于单点激励,输入的功率谱密度 $S_x(\omega)$ 与输出的功率谱密度 $S_y(\omega)$ 通过响应传递函数 $H(\omega)$ 有对应关系

$$S_y(\omega) = |H(\omega)|^2 S_x(\omega) \quad (8)$$

若多个激励 $x_1(\omega), x_2(\omega), x_3(\omega) \dots$ 互相独立不相关,则系统的总响应功率谱密度 $S(\omega)$ 等于各激励引起的系统响应功率谱密度之和,即

$$S(\omega) = \sum S_{yi}(\omega) = \sum |H_i(\omega)|^2 S_{xi}(\omega) \quad (9)$$

2 相关跟踪系统摆镜的模式分析

2.1 摆镜的有限元模型

为了分析能在 ANSYS 中顺利进行,对原有模型进行了简化^[3-4]. 考虑到模型本身的特点,有限元单元选用 SOLID45 以及 SOLID95. 为了在求解时降低计算机 CPU 和内存的开支,本模型采用了映射网格的划分方法^[5-6]. 对镜体进行网格划分后如图 1.

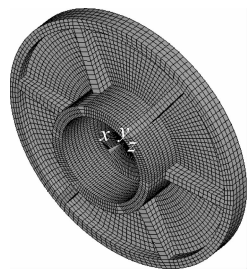


图 1 摆镜的有限元模型
Fig. 1 Finite element model of tip/tilt

由于 SiC 具有质量轻、弹性模量高、热变形系数小和比刚度高等特点,光学性能也非常出色,能达到很高的抛光精度. 所以选 SiC 作为镜体材料. 表 1 为 SiC 的材料特性数值.

表 1 材料特性

材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / Pa	泊松比 ν
SiC	3050	3.02×10^{11}	0.25

2.2 模态分析

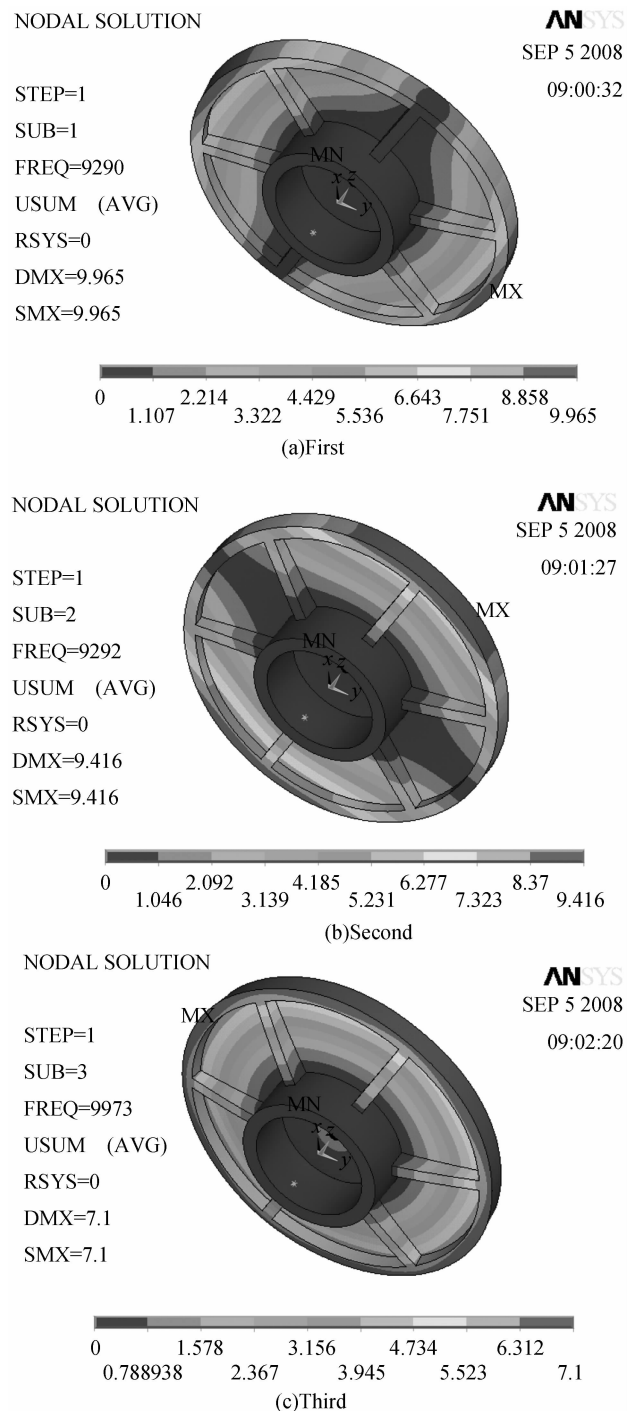
模态分析是确定结构振动特性的一种技术. 模态分析理论是基础,是随机振动分析的重要前期过程. 模态求解的方法很多,通常采用 Block Lanczos 法、Subspace 法、Reduced 法、PowerDynamics 法、Unsymmetric 法、Damped 法以及 QR Damped 法.

由于 Block Lanczos 法精度高,收敛速度快^[7-8]. 所以本文选用这种方法,采用一致质量矩阵,设置摆镜的边界条件,将摆镜接触面和摆动中心进行刚性连接,然后对刚性节点进行自由度约束. 然后进行模态分析,提取 20 阶模态,同时扩展 20 阶模态,计算完成后列出前 5 阶结果如表 2.

表 2 相关跟踪摆镜模态分析前五阶结果

模态阶数	1	2	3	4	5
频率/Hz	9 289.9	9 291.9	9 972.5	10 888	10 893

考虑到篇幅问题,图 2 列出前四阶模态下的变形云图.



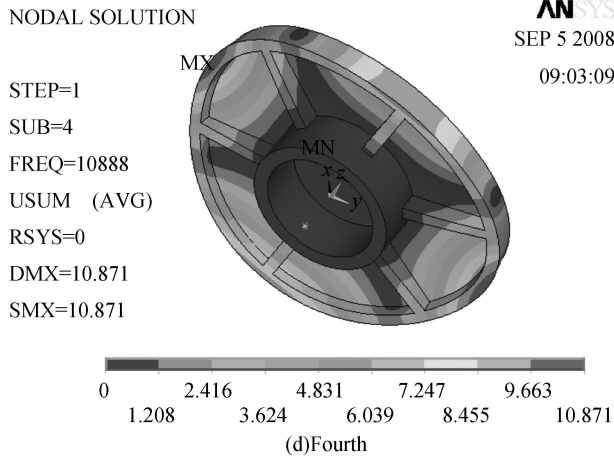


图2 1~4阶模态下的变形云图
Fig.2 Mode contours from the first to the fourth

3 相关跟踪系统摆镜的随机振动分析

3.1 随机振动的载荷谱

摆镜受到的随机振动激励为作用于底部三个螺纹孔位置的加速度激励,加速度激励的功率谱密度谱如表3.计算后的加速度功率谱密度谱曲线如图3.

表3 空间相关跟踪系统摆镜随机振动的加速度激励谱

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

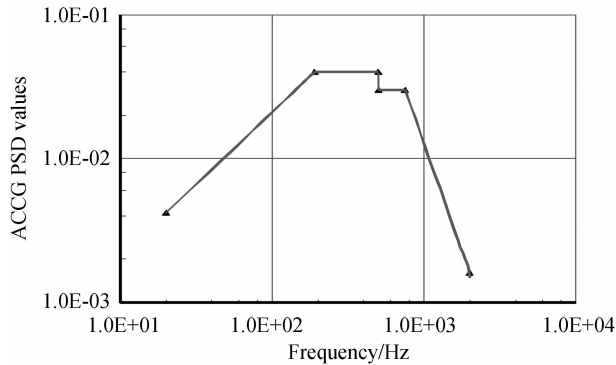


图3 随机振动加速度功率谱密度曲线
Fig.3 Curve of acceleration PSD

3.2 相关跟踪系统摆镜结构的随机响应计算

随机振动采用 ANSYS 中的谱分析中的 PSD 分析功能,是一种定性分析,输入输出的数据都只代表他们在一定特定值时发生的可能性.激励功率谱密度有位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速度功率谱密度、力功率谱密度等形式.本文以加速度功率谱密度为激励,输入给定的加速度功率谱.设定系统的阻尼比是3%,对摆镜振动中心进行位移约束,并施加轴向基础激励.

随机振动分析能够得到 1σ 位移解、1σ 速度解、1σ 加速度解以及单元的应力解.经分析求解后轴向随机

振动的 1σ 的等效应力云图如图4.图5是轴向随机振动的 1σ 的等效应力沿着筋方向从外到内的等效应力的变化图.径向随机振动的 1σ 的等效应力云图如图6.

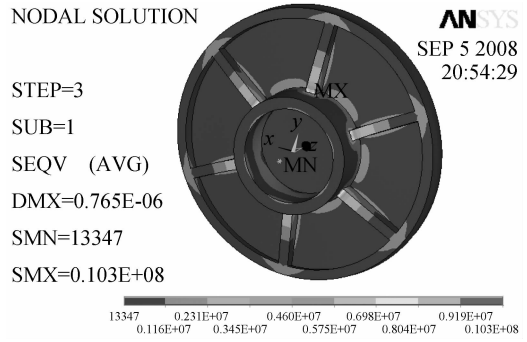


图4 摆镜轴向随机振动 1σ 等效应力云图
Fig.4 The 1σ von mises stress in axial direction

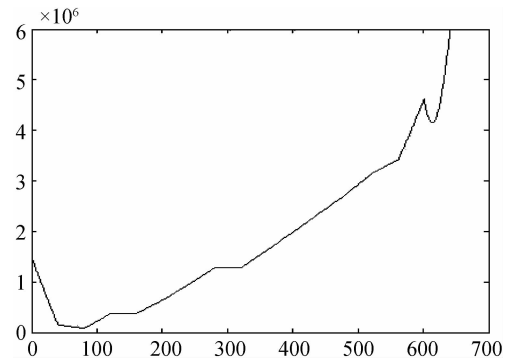


图5 等效应力沿筋板方向变化曲线
Fig.5 Course of von mises stress along reinforcing plate direction

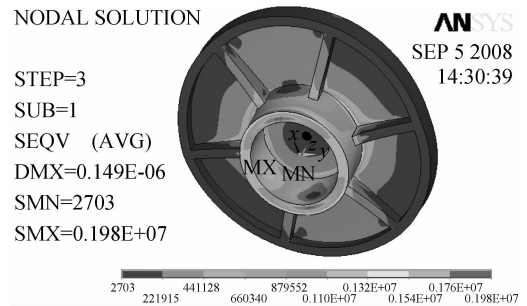


图6 摆镜径向随机振动 1σ 等效应力云图
Fig.6 The 1σ von mises stress in radial direction

4 结果分析

从随机振动的分析结果中可以看出,轴向最大 1σ 应力为 9.035 6 MP,径向最大 1σ 应力为 1.967 7 MP.那么最大 3σ 应力为 27.106 8 MP.也就是说在随机振动中材料所受的最大应力大于 27.106 8 MP 的概率为 0.3%.远低于材料的屈服极限.摆镜所受的最大应力主要集中在筋板和中间圆环交界处,因为此处产生了应力集中.建议此处增加倒角.这样既能减少应力集中,又增加了连接强度.

5 结论

通过对某空间望远镜相关跟踪系统摆镜的随机

振动分析,说明设计方案可行.并根据分析结果提出了改进方案.对今后摆镜结构的改进具有重要的指导意义.由此看出有限元动力学模型建立所提出的方法对于工程实际中的摆镜随机振动分析具有一定参考价值,可以使工程设计人员在设计阶段考虑得更加深入,以期提高摆镜的抗振性能.

参考文献

- [1] NEULANN D E. Introduction of random vibration and spectrum analysis [M]. Beijing:China Meshine Press,1980.
D. E. 纽兰. 随机振动与谱分析概论[M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [2] CHENG Wei, HE Tie-ning. New calculation method for calculating structural response to random vibrations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2002,**34**(10):102-104.
成伟,何铁宁. 随机振动响应计算在 ANSYS 中的一种实现方法[J]. 西南交通大学学报,**34**(10):102-104.
- [3] HUANG Hong-bin, LI Jing-zhen, SUN Feng-shan, *et al.* Numerical simulation on static property for rotating tree-faced mirror of ultra-high speed photography [J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,**36**(7):1364-1367.
黄虹宾,李景镇,孙凤山,等. 超高速摄影中三面体转镜力学特性的计算机仿真[J]. 光子学报,2007,**36**(7):1364-1367.
- [4] HUANG Hong-bin, CHAI Jin-long, GONG Xiang-dong, *et al.* Advance deforming mirror faces of rotating mirror for streak camera[J]. *Acta Photonica Sinica*,2008,**37**(5):1015-1018.

- 黄虹宾,柴金龙,龚向东,等. 扫描式超高速摄影中转镜镜面变形量的几何补偿[J]. 光子学报,2008,**37**(5):1015-1018.
- [5] WANG Guo-fu, SHANG Xiao-mei, CHEN Bing-yan, *et al.* Finite element analysis of the main structure for space-borne theodolite[J]. *Acta Photonica Sinica*,2008,**37**(7):1450-1453.
王国富,尚小梅,陈丙炎,等. 星载经纬仪主要结构件的有限元分析[J]. 光子学报,2008,**37**(7):1450-1453.
- [6] CHEN Yong-cong, HU Yong-ming, LI Ying-cai, *et al.* Displacement analyzing and support position optimizing of the main mirror with backside support[J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,**36**(9):1730-1732.
陈永聪,胡永明,李英才,等. 背部支撑主反射镜的而形分析与支撑点优化[J]. 光子学报,2007,**36**(9):1730-1732.
- [7] YU Xu-dong, LONG Xing-wu, TANG Jian-xun. Random vibration analysis of mechanically dithered ring laser gyroscope [J]. *Optics and Precision Engineering*,2007,**15**(11):1760-1766.
于旭东,龙兴武,汤建勋. 机械抖动激光陀螺的随机振动响应分析[J]. 光学精密工程,2007,**15**(11):1760-1766.
- [8] FENG Bin, ZHOU Yi, ZHANG Jun-wei, *et al.* Analysis on ground random vibration response of large-scale precision mirror mount [J]. *Optics and Precision Engineering*,2007,**15**(3):384-389.
冯斌,周忆,张伟军,等. 大型精密镜架地面随机微振动响应分析[J]. 光学精密工程,2007,**15**(3):384-389.

Random Vibration Analysis of Tip/Tilt Mirror in a Space Telescope Correlation Tracking System

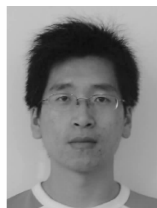
WANG Hong-wei^{1,2}, RUAN Ping¹, XU Guang-zhou¹, YANG Jian-feng¹

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

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The analysis method of structural random vibration response by the base excitation is described. The finite element model of tip/tilt mirror is established and its vibration analysis is performed by the finite element software ANSYS. So that the performance of tip/tilt mirror against the dynamic environment is studied. The results have been analyzed. By analyzing the weakness of the present structure, an anti-vibration suggestion is put forward, which is useful to improve the structure, and reform for the further development of tip/tilt mirror.

Key words: Random vibration analysis; Tip/tilt mirror; Finite element



WANG Hong-wei was born in 1982. He is pursuing the M. S. degree, and his research interests focus on finite element analysis.