

文章编号: 1672-8785(2013)12-0010-04

空间光学遥感器的光学元件 组件的频率设计

袁 涛

(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: 空间光学遥感器的光学元件的光学参数通常是设计经验来选定的。建立了空间光学遥感器的全阻尼动态分析模型, 得到了光学元件动态响应的表达式。从工程的实际条件出发, 当阻尼比为 0.03、质量比为 0.2 时, 通过 MATLAB 编程对光学元件的动态响应进行了数值分析。结果表明, 为了尽可能地降低光学元件的动态响应, 应该选择合理的动态频率, 而不是一味地提高光学元件组件的动态频率。

关键词: 空间光学遥感器; 频率设计; 频率比

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.12.002

Frequency Design of Optical Component Subassembly for Space Optical Remote Sensor

YUAN Tao

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

Abstract: The optical parameters of optical components for a space optical remote sensor are usually determined by the experience of a designer. By establishing a full damping dynamic analysis model for a space optical remote sensor, the expressions of dynamic response of optical components are obtained. In view of the actual engineering condition, the dynamic response of the optical components is analyzed numerically through MATLAB programming when a damp ratio is 0.03 and a mass ratio is 0.2. The result shows that to keep the dynamic response of an optical component as low as possible, a reasonable frequency should be selected rather than increasing the dynamic response of the optical component subassembly blindly.

Key words: space optical remote sensor; frequency design; frequency ratio

0 引言

在实际工作中, 设计人员通常是设计根据光学参数^[1,2]、结构参数^[3,4]以及经验来进行光学元件设计和确定制造光学元件的材料^[5,6]。通过这种方法制作的光学元件的质量未经过严格的质量分配设计, 难以达到动态响应最小化的效

果。实际上, 在光学元件的设计已经确定时, 通过设计光学元件组件的频率特性, 可以使光学元件组件的动态响应最小化。

本文根据空间光学遥感器的一般结构建立全阻尼动态分析模型, 为频率的设计提供理论参考。

收稿日期: 2013-09-13

作者简介: 袁涛(1980-), 男, 安徽阜阳人, 博士, 副研究员, 主要从事空间光学遥感器的结构设计和动力学减振研究。E-mail: ytcy426@sohu.com

1 动力学模型的建立

将底部支撑和框架简化为动力学系统 S_1 : m_1 、 c_1 、 k_1 , 将光学元件组件简化为动力学系统 S_2 : m_2 、 c_2 、 k_2 , 并建立由两个独立的动力学系统组成的动力学模型, 如图 1 所示。各系统的动态特性由式 (1) 至式 (6) 表示。

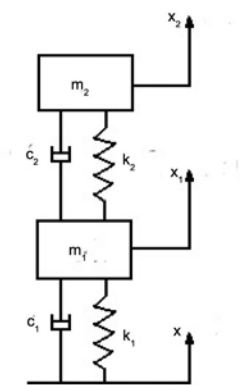


图 1 动力学模型

对于动力学系统 S_1 : m_1 、 c_1 、 k_1 , 有:

$$\omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1} \quad (1)$$

$$\zeta_1 = \frac{c_1}{2m_1\omega_1} \quad (2)$$

$$\lambda_1 = \frac{\omega}{\omega_1} \quad (3)$$

对于动力学系统 S_2 : m_2 、 c_2 、 k_2 , 有:

$$\omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (4)$$

$$\zeta_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2} \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{\omega}{\omega_2} \quad (6)$$

另设参数

$$\alpha = \frac{m_2}{m_1} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (8)$$

2 动力学响应的求解

动力学模型的力学分析如图 2 所示。

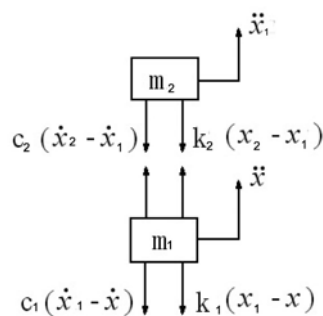


图 2 力学分析模型

根据牛顿定律, 系统的动力学微分方程为

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}) + k_1(x_1 - x) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) = 0 \\ m_2\ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

整理并表示为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1\dot{x} + k_1x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

假设激励为

$$x = Fe^{i\omega t} \quad (11)$$

系统的稳态响应的表达式为

$$x_1 = A_1 e^{i\omega t} \quad (12)$$

$$x_2 = A_2 e^{i\omega t} \quad (13)$$

将式 (11)、式 (12) 和式 (13) 代入式 (10), 可得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -m_1\omega^2 + i\omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2) & -ic_2\omega - k_2 \\ -ic_2\omega - k_2 & -m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F(ic_1\omega + k_1) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{\begin{bmatrix} -m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2 & ic_2\omega + k_2 \\ ic_2\omega + k_2 & -m_1\omega^2 + i\omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F(ic_1\omega + k_1) \\ 0 \end{bmatrix}}{[-m_1\omega^2 + i(c_1 + c_2)\omega + (k_1 + k_2)][-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2] - (ic_2\omega + k_2)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

令

$$\begin{aligned} M &= [-m_1\omega^2 + i\omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2)][-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2] - (ic_2\omega + k_2)^2 \\ &= (-m_1\omega^2 + ic_1\omega + k_1)(-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2) - m_2\omega^2(ic_2\omega + k_2) \end{aligned} \quad (15)$$

则有系统 S_1 和系统 S_2 的动力放大系数:

$$\frac{A_1}{F} = \frac{(-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)}{M} \quad (16)$$

$$\frac{A_2}{F} = \frac{(ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)}{M} \quad (17)$$

当 $\zeta_1 \neq 0$, $\zeta_2 \neq 0$ 时, 即底部支撑和光学元件组件都具有阻尼特性时, 光学元件的动态放大系数可表示为

$$\frac{A_2}{F} = \frac{(ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)}{M} = \frac{(1 + 2i\zeta_2\lambda_2)(1 + 2i\beta\zeta_1\lambda_2)}{[(1 - \beta^2\lambda_2^2) + 2i\beta\zeta_1\lambda_2][(1 - \lambda_2^2) + 2i\zeta_2\lambda_2] - \alpha\beta^2\lambda_2^2(1 + 2i\zeta_2\lambda_2)} \quad (18)$$

光学元件的幅值放大系数可表示为

$$\left| \frac{A_2}{F} \right| = \sqrt{\frac{(1 - 4\beta\zeta_1\zeta_2\lambda_2^2)^2 + \lambda_2^2(2\beta\zeta_1 + 2\zeta_2)^2}{[\beta^2\lambda_2^4 - (1 + \beta^2 + \alpha\beta^2 + 4\beta\zeta_1\zeta_2)\lambda_2^2 + 1]^2 + \lambda_2^2[(2\beta\zeta_1 + 2\zeta_2) - \lambda_2^2(2\beta\zeta_1 + 2\beta^2\zeta_2 + 2\alpha\beta^2\zeta_2)]^2}} \quad (19)$$

3 数值算例

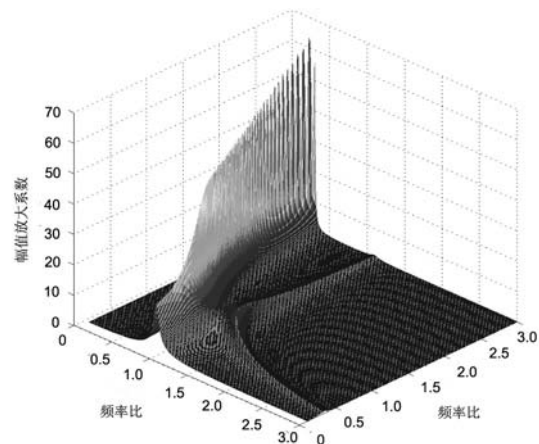
空间光学遥感器结构的阻尼特性可通过模态试验和动力学试验等方式获得。光机结构中的质量比大多在 0.03 至 0.05 之间。质量比的取值随着轻量化技术和支撑技术的发展而变化^[7]。根据上述条件及幅值放大系数的表达式 (19), 可获得不同条件下的幅值放大图。

当阻尼比为 0.03、质量比为 0.2、步长为 0.01 时, 频率比 β 、频率比 λ_2 与幅值放大系数的关系如图 3 所示。从图 3 可获得使光学元件响应峰值最小的频率比的值。

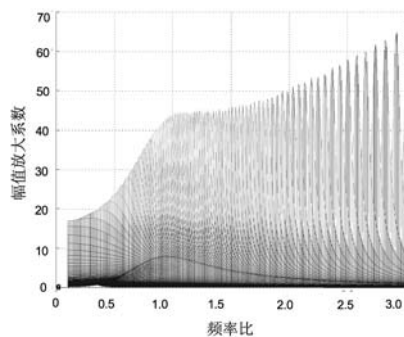
根据式 (19), 通过编程计算可显示其他条件下的幅值放大系数。

由图 3(a) 可知, 对于任一频率比, 都存在两阶共振峰。由图 3(b) 可知, 二阶共振峰在频率

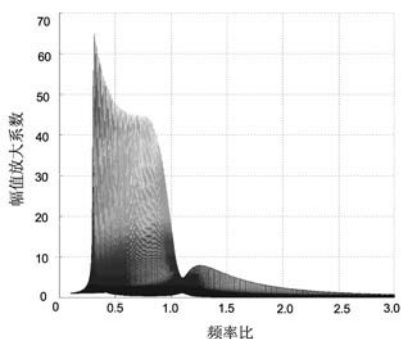
比的变化范围内存在最大值; 一阶共振峰在频率比最小时取最小值, 在频率比最大时取最大值。在最大值和最小值之间, 峰值的变化不是线



(a)



(b)



(c)

图 3 幅值放大系数

性的, 前半段随着频率比的增大而较快地增大, 后半段随着频率比的增大而较慢地增大。

4 结论

光机结构中的频率比通常大于 1, 光学元件

组件的频率相对较高。因此, 在满足支撑结构的面型精度和位置精度要求和避开正弦振动频带的条件下, 为了获得较小的动态响应, 应尽量降低光学元件组件的频率。

通过建立动力学模型, 获得了光学元件的动态响应表达式。根据该表达式进行计算机编程图解, 可以直观地判断光学元件组件频率的合理设计范围。

参考文献

- [1] 李欢, 向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(3): 500-503.
- [2] 汪明强, 李林, 黄一帆. 三反射镜空间遥感器的光学设计 [J]. *光学技术*, 2007, **33**(2): 170-172.
- [3] 王智, 李朝辉. 月基极紫外相机光机结构设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2427-2433.
- [4] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2485-2490.
- [5] 张德珂, 曹英斌, 刘荣军, 等. C/SiC 复合材料空间光机结构的研究进展与展望 [J]. *材料导报*, 2012, **26**(7): 7-11.
- [6] 吴清文, 王领华, 杨献伟, 等. 炭 / 炭复合材料在空间光学遥感器热控制中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(9): 1984-1990.
- [7] Stahl H P. JWST Mirror Technology Development Results [C]. *SPIE*, 2007, **6671**: 667102.

新闻动态 News

美国航空航天局开展 HypsIRI 卫星任务的前期机载试验

据 www.vision-systems.com 网站报道, 美国航空航天局 (NASA) 最近用 ER-2 型高空飞机对其高光谱红外成像仪 (HypsIRI) 项目进行了 2013 年秋季飞行试验, 获得了一组颇具价值的反射波长数据, 可以帮助人们更多地了解地球生态系统。

ER-2 型高空飞机上搭载了一台机载可见光 / 红外成像光谱仪 (AVIRIS) 和一台分辨率成

像光谱仪 (MODIS) 机载模拟器 (MAS)。这两台仪器负责为将来的 HypsIRI 卫星任务采集前期数据集。在将来进入低地球轨道以后, HypsIRI 卫星将会对全球生态系统展开监测, 并为人们提供关于自然灾害的重要信息。

NASA 是在无云 / 日照条件下同时用 AVIRIS 和 MAS 对美国加利福尼亚州的 6 块区域进行数据采集的。这项工作分别于 2013 年和 2014 年的春夏秋三季展开, 以帮助人们了解地球生态系统是如何运行并随季节发生变化的。

□ 岳桢千