

文章编号: 1672-8785(2013)09-0009-04

空间光学遥感器质量分配设计

袁 涛 何 欣*

(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: 为了使光学元件的动态响应变得尽可能小并满足质量指标, 需要对空间光学遥感器的质量进行分配。通过建立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。根据该表达式讨论了不同动力学系统的动态放大特点。然后从实际工程条件出发, 通过 MATLAB 编程进行了数值分析, 讨论了使光学元件响应尽量小的质量分配条件。结果表明, 当阻尼比均为 0.03、频率比 β 为 1.3、质量比为 0.51 时, 光学元件的动态响应接近最小值。本文依据理论公式提出的这种方法可通过图形判读结果, 因此具有结果可靠、简单便捷等特点。

关键词: 空间光学; 遥感器; 质量分配; 质量比

中图分类号: V19 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.09.002

Design of Mass Distribution of Space Remote Sensor

YUAN Tao, HE Xin *

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

Abstract: To make optical components have their dynamic response as small as possible and meet the required mass specifications, the mass of a space optical remote sensor should be distributed. By establishing a full damping dynamic analysis model for the space optical remote sensor, the expression for the dynamic response of the optical components is obtained. The dynamic amplification characteristics of different dynamic systems are discussed according to the expression. Then, in view of the actual engineering condition, numerical analysis is made via MATLAB programming and the mass distribution condition under which the response of the optical components can be made as small as possible is discussed. The result shows that the optical components have their dynamic response close to the minimum value for a damp ratio of 0.03, a frequency ratio β of 1.3 and a mass ratio of 0.51. Because the method proposed according to the theoretical formula can interpret the result in the formation of chart, it is reliable and easy to use.

Key words: space optics; remote sensor; mass distribution; mass ratio

0 引言

一般说来, 空间光学遥感器由框架体、光

学元件、底部支撑以及电子学组件等部分组成^[1-5]。同时, 空间光学遥感器的设计受到质量指标的限制^[6-7]。因此, 人们有必要研究如何在

收稿日期: 2013-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60538020)

作者简介: 袁涛 (1980-), 男, 安徽阜阳人, 副研究员, 博士, 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: yt.icepoint@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 何欣 (1970-), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail: hexinxp@yahoo.com.cn

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>

INFRARED (MONTHLY)/VOL.34, No.9, SEP 2013

给定的质量指标内对光机质量进行分配。

陈新发^[8]采用正交多项式响应面方法,以水平系数为变量,建立了再入飞行器质量分配的二次响应面模型。本文则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,从而为质量分配设计提供理论参考。

1 建立动力学模型

空间遥感器的底部支撑和框架可简化为动力学系统 $S_1: m_1, c_1, k_1$, 光学元件组件可简化为动力学系统 $S_2: m_2, c_2, k_2$, 因此动力学模型便由两个独立的动力学系统组成。图 1 所示为根据上述简化方法建立的动力学模型。各系统的动力学特性由下列公式表示。

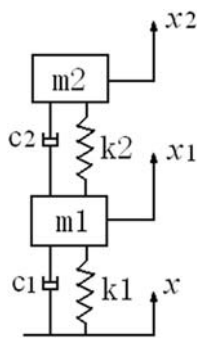


图 1 动力学模型

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 动态响应的求解

图 2 所示为动力学模型的力学分析。

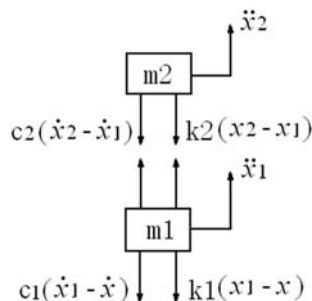


图 2 力学分析模型

根据牛顿定律,可获得系统的动力学微分方程:

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

将其整理并表示为矩阵形式:

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

假设激励为

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

则有

$$\dot{x} = iF\omega e^{i\omega t} \quad (12)$$

假设系统的稳态响应为

$$x_1 = A_1 e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$x_2 = A_2 e^{i\omega t} \quad (14)$$

则有

$$\dot{x}_1 = iA_1\omega e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$\ddot{x}_1 = -A_1\omega^2 e^{i\omega t} \quad (16)$$

$$\dot{x}_2 = iA_2\omega e^{i\omega t} \quad (17)$$

$$\ddot{x}_2 = -A_2\omega^2 e^{i\omega t} \quad (18)$$

将激励和系统响应的表达式代入式 (10), 可以得到:

$$\begin{bmatrix} -m_1\omega^2 + i\omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2) & -ic_2\omega - k_2 \\ -ic_2\omega - k_2 & -m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(ic_1\omega + k_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

因此

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -m_1\omega^2 + i\omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2) & -ic_2\omega - k_2 \\ -ic_2\omega - k_2 & -m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F(ic_1\omega + k_1) \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{\begin{bmatrix} -m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2 & ic_2\omega + k_2 \\ ic_2\omega + k_2 & -m_1\omega^2 + i\omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F(ic_1\omega + k_1) \\ 0 \end{bmatrix}}{[-m_1\omega^2 + i(c_1 + c_2)\omega + (k_1 + k_2)][-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2] - (ic_2\omega + k_2)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

令

$$\begin{aligned} M &= [-m_1\omega^2 + i\omega(c_1 + c_2) + (k_1 + k_2)][-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2] - (ic_2\omega + k_2)^2 \\ &= (-m_1\omega^2 + ic_1\omega + k_1)(-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2) - m_2\omega^2(ic_2\omega + k_2) \end{aligned} \quad (21)$$

则有

$$A_1 = F(-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)/M \quad (22)$$

$$A_2 = F(ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)/M \quad (23)$$

3 结果分析

由上述分析可知, 系统 S_1 和系统 S_2 的动力学放大系数为

$$\frac{A_1}{F} = \frac{(-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)}{M} \quad (24)$$

$$\frac{A_2}{F} = \frac{(ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)}{M} \quad (25)$$

系统 S_1 至系统 S_2 的传递函数为

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{ic_2\omega + k_2}{-m_2\omega^2 + ic_2\omega + k_2} = \frac{1 + 2i\zeta_2\lambda_2}{(1 - \lambda_2^2) + 2i\zeta_2\lambda_2} \quad (26)$$

幅值放大系数为

$$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = \sqrt{\frac{1 + 4\zeta_2^2\lambda_2^2}{(1 - \lambda_2^2)^2 + 4\zeta_2^2\lambda_2^2}} \quad (27)$$

从式 (27) 中可以看出, 从框架到光学元件的幅值放大系数只受光学元件组件自身动态参数的影响, 而与底部支撑与框架组成系统的动态参数无关。而框架的动力学放大倍率同时会受到动力系统 S_1 和 S_2 的动态参数的影响。

当 $\zeta_1 \neq 0$ 且 $\zeta_2 \neq 0$, 即底部支撑和光学组件都具有阻尼特性时, 光学元件的响应放大系数可以表示为

$$\begin{aligned} \frac{A_2}{F} &= \frac{(ic_2\omega + k_2)(ic_1\omega + k_1)}{M} = (1 + 2i\zeta_2\lambda_2) \\ &\times (1 + 2i\beta\zeta_1\lambda_2) / \left\{ [(1 - \beta^2\lambda_2^2) + 2i\beta\zeta_1\lambda_2][(1 - \lambda_2^2) + 2i\zeta_2\lambda_2] - \alpha\beta^2\lambda_2^2(1 + 2i\zeta_2\lambda_2) \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

4 实际应用

系统结构的阻尼比可以通过模态测试等方式获得, 其在光机结构中常处于 0.03 ~ 0.05 之间。同时, 为了避免共振, 光机结构通常被设计成隔振系统, β 值常在 1.3 以上。根据上述条件及式 (28), 可以获得不同条件下的幅值放大图。

当阻尼比均为 0.03、频率比 β 为 1.3、步长均为 0.01 时, 质量比 α 、频率比 λ_2 与幅值放大系数的关系见图 3。根据计算机数值分析的特点, 由图 3 可以判断出使光学元件响应峰值减至最小的质量比的值 (在 0.51 附近)。

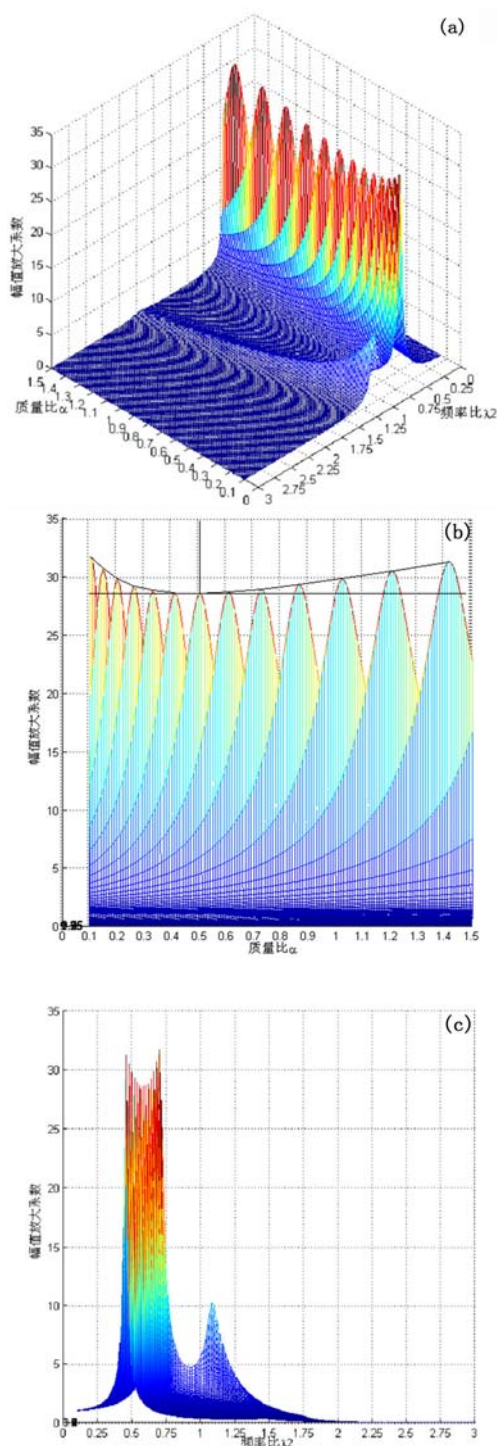


图3 幅值放大系数图

我们可以根据式 (28) 进行编程计算, 并显示其他条件下的幅值放大系数。

由图 3(a) 可知, 二阶峰值响应会随着质量比的增大而减小; 在一阶共振频率范围内, 对于任一频率, 峰值响应都会随着质量比的变化而存在波峰。

由图 3(b) 和图 3(c) 可知, 一阶峰值响应会随着质量比的变化而变化, 并且存在最小值。该质量比可通过图片判读。

5 结束语

综上所述, 质量分配设计是空间光学遥感器设计中的重要先行工作。本文通过建立动力学模型, 获得了光学元件的动态响应表达式, 然后根据该表达式进行了计算机编程求解, 最后判读出了可将光学元件响应减至最小的质量比的值。本文提出的质量分配设计方法可以为空间光学遥感器的设计提供有益的理论依据。

参考文献

- [1] 李志来. 长焦距空间相机主次镜间桁架支撑结构设计 [J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 89–93.
- [2] 翟岩. 航天相机框架轻量化研究 [J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 77–80.
- [3] 韩娟. 大口径非球面主反射镜的装调方法研究 [J]. 应用光学, 2012, 33(3): 490–495.
- [4] 李炳强, 何欣, 袁涛. 空间光学遥感器运动学支撑方案设计与分析 [J]. 光学仪器, 2013, 35(1): 54–59.
- [5] 刘磊, 曹国华. 大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1939–1944.
- [6] 朱毅麟. 中国空间技术研究院的标准化卫星平台 [J]. 航天器工程, 2007, 16(1): 10–17.
- [7] 刘洋, 杨洪波, 刘勺斌, 等. 空间主反射镜轻量化及柔性支撑设计与分析 [J]. 计算机仿真, 2007, 25(7): 314–316.
- [8] 陈新发. 一种再入飞行器质量指标分配的方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2006, 23(5): 8–12.