

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.009

反射镜柔性支撑结构的模态参数分析*

张丽敏,安其昌,杨 飞

(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:为解决全面、准确地检测反射镜柔性支撑结构的柔度参数的问题,将参数辨识技术应用到柔度测试领域中。开展了在频域中基于模态参数辨识理论分析柔性支撑结构柔度参数的分析。首先,对于串联弹簧-质量-阻尼系统的传递函数及其性质进行了推导,建立了一种对于串联模型端子系统参数进行辨识的方法;然后,利用计算机进行了数值仿真,以验证上述理论推导的准确性;最后,针对某小型反射镜的柔性支撑结构Bipod进行了实验验证。实验结果表明,该测试方法与传统的测量方法相比误差小于5%,证明了该方法的可行性,对其他柔性部件的检测分析都有较好的指导意义。

关键词: 模态参数辨识;传递函数;柔性支撑;柔度参数

中图分类号: TH751 文献标志码: A

文章编号:1001-4551(2014)12-1555-04

Modal analysis of flexural support system for reflect mirrors

ZHANG Li-min, AN Qi-chang, YANG Fei

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

Abstract: Aiming at the problems of measuring comprehensively and exactly the flexibility parameters of the flexural support system for reflect mirror, the parameter identification was investigated and the modal parameter identification theory was introduced in the frequency domain to analyze the flexibility parameters of the flexural support system. Firstly, the spring-mass-dumping modal in series was built to study the flexural support system in certain direction and get the methods approach to the parameter of the free side sub-system by the transfer matrix of the overall system. Then, after the analysis of numerical emulation, the correctness of the research mentioned above was evaluated. At the last, it was tested by use of the special flexural support system, Bipod for instance, for small reflect mirrors. The experimental results indicate that compared with experiment error between researched method and traditional way are smaller than 5%, which indicate that it is rational and accurate, can act as the reference of the measurement and analysis for other flexible system.

Key words: modal parameter identification; transfer function; flexural support; flexibility parameters

0 引 言

随着光电探测设备的发展,各种口径的反射镜在系统中有着越来越广泛的应用。但是,反射镜镜面在重力作用下以及环境温度变化时都会不可避免地发生变形,这些变形都会导致成像质量下降。因此需要对反射镜的支撑结构进行合理地设计。反射镜的支撑是在对反射镜进行有效定位的同时卸载它的自重,

并且减小热应力和装配应力对反射镜的影响以达到减小镜面变形的目的。在这种力的传递过程中,应尽量避免较大集中力的产生,使力尽量均匀地传递。同时需要反射镜组件具有良好的动态适应性,能够承受外界环境产生的冲击和振动,最终实现反射镜的镜面变形最小,成像质量最好^[1-10]。

柔性结构可以在一定程度上释放应力,在温度变化时反射镜可以自由膨胀或收缩,从而保持反射面上各点的球面性或平面性,以减小对镜面面形的影响,

收稿日期: 2014-05-13

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(20130102018JC)

作者简介: 张丽敏(1981-),女,山西朔州人,博士,副研究员,主要从事精密机械方面的研究. E-mail: zhangtqx@163.com

但是支撑结构需要在保持良好的热稳定性的同时,提供较高的支撑刚度,以降低外界动态载荷对反射镜面形的影响。以 Bipod 支撑的柔性镜座为例,其具有轴向刚度大、适应环境能力强等特点。美国 SOAR 望远镜的三镜,即采用了 Bipod 被动支撑。Bipod 结构一般整体加工,以避免不对称性对反射镜造成影响,它可以通过 3 个衬垫粘接在反射镜的边缘,对于稍大的反射镜可以通过弹性套筒粘接于反射镜的底部^[11]。

对于实际使用的反射镜柔性支撑结构,其主要的参数为系统质量、柔度以及阻尼,由于材料与加工的原因,实际的参数与设计值存在着偏差,这对于系统整体的静态误差修正、动态响应以及控制系统建模都有着非常不利的影 响,故对于柔性支撑结构,柔度参数分析就显得十分必要。

传统上使用的静态柔度法,原理简单、结果直观,但存在各个方向自由度耦合、测量步骤繁琐以及没有动态特性的缺点;同时随着被支撑的反射镜尺寸加大,测量量程也会随之增加,若要在扩大测量范围的同时保持测量精度,实验成本就会大幅提高^[12]。

模态参数辨识是上个世纪针对飞机等大结构件的内部参数识别所提出来的,已经有了较好的发展,但是如果直接将其应用于柔性支撑结构柔度参数分

析,由于实验环境的其他物体的质量对于柔性反射镜不可忽略,检测结果峰值众多,难以得出理想的结果^[13-14]。

本研究在频域之中,基于模态参数辨识理论,利用串联弹簧-质量-阻尼系统,提出一种分析柔性支撑结构柔度参数的方法。通过对于传递函数及其性质进行推导,得出一种对于串联模型端部子系统参数进行辨识的方法,在进行数值仿真验证后,针对某小型反射镜 Bipod 柔性支撑结构进行实验验证,分别利用本研究的方法以及传统的测量方法得出相近的结论。

1 弹簧-质量-阻尼系统

本研究利用牛顿第二定理分析一端固定一端自由的串联弹簧-质量-阻尼系统,其运动微分方程式如下式所示:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P \tag{1}$$

式中: M —质量矩阵,对角阵; K —刚度阵,雅克比矩阵; C —阻尼阵,雅克比矩阵。

利用复振动的相关理论,假设系统力输入服从 $P = P_0 e^{i\omega}$, 位移输出形式为 $B = B_0 e^{i\omega}$ 。

其传递函数可以表示为:

$$H = \begin{bmatrix} k_1 - \omega^2 m_1 - j\omega c_1 & -k_1 - j\omega c_1 & 0 & \dots & 0 \\ -k_1 - j\omega c_1 & k_1 + k_2 - \omega^2 m_2 - j\omega(c_1 + c_2) & -k_2 - j\omega c_2 & \vdots & 0 \\ 0 & -k_2 - j\omega c_2 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -k_{n-1} - j\omega c_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & -k_{n-1} - j\omega c_{n-1} & k_{n-1} + k_n - \omega^2 m_n - j\omega(c_{n-1} + c_n) \end{bmatrix}^{-1} \tag{2}$$

对于速度或者加速度输出,只需利用复振动基本性质,将传递函数改写为 $H_v = H_s/\omega$ 以及 $H_a = H_s/\omega^2$ 即可。

下面考虑,由最靠近固定端的质量点处输入激励的情况,输入的复振动向量为: $P = [0 \ 0 \ \dots \ P_{0N} e^{i\omega}]^T$ 。那么,以最靠近自由端的质量点的位移为输出量,设其传函为 $H_{N1} = B_1/P_{0N} = H(1,N)$, 同理,次靠近自由端质量点的传递函数为: $H_{N2} = B_2/P_{0N} = H(2,N)$, 两者之比为 $\alpha = H(1,N)/H(2,N)$ 。之后利用矩阵求逆公式 $A^{-1} = A^*/|A|$, 可得下式:

$$\alpha = \frac{H_{N1}}{H_{N2}} = \frac{-k_1 - j\omega c_1}{k_1 - \omega^2 m_1 - j\omega c_1} \tag{3}$$

式(3)中只含有最靠近自由端子系统的参数,即利用靠近自由端的两级子系统的传函,可以将顶端的系统分离出来,对于速度或者加速度输出,由于做商的原因,表达式的结果相同;假设顶端子系统质量已

知,进而利用系统参数辨识理论拟合子系统参数,如下式所示,利用线性最小二乘法,可以得到子系统参数 c_1 、 k_1 :

$$\begin{bmatrix} \alpha k_1 - \alpha j\omega c_1 + k_1 + j\omega c_1 \\ \alpha_1 + 1 \\ \vdots \\ \alpha_n + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \omega^2 m_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \omega^2 m_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

利用本研究的方法,可以直接完成系统模态参数辨识中的拟合阶数定标过程,在实际的测量时,如果直接测量自由端子系统的传函,不可避免地会被下方的系统干扰,造成对于系统谐振峰估计不准的情况;而本研究的方法,尤其是在自由端子系统传函测得比较接近谐振峰的情况下,其效果更加明显。

2 仿真分析

对于实际的柔性支撑系统,在进行测试时,都会

连接在质量较大的实验平台上。一般来说,平台可以看作只通过阻尼与固定端相连。利用弹簧-质量-阻尼模型简化一般的柔性支撑检测系统如图1所示。

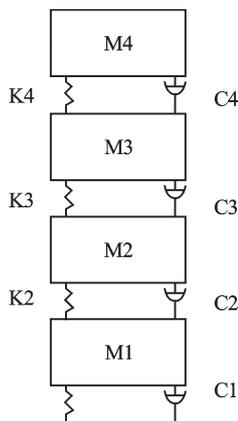


图1 检测系统模型

M1—气浮台;M2—支座;M3—柔性支撑系统;M4—反射镜

为了保证结论的普遍性,本研究利用计算机随机生成一组系统参数,之后以M1处为输入,分别计算M3到M4的输出,计算得到系统传递函数。

利用第1节所提出的方法,本研究分别将M4与M3所对应传函相除以及利用式(3)直接计算,其结果对比如图2所示。由图2可知,理论计算与仿真结果十分的接近,证明了该方法的正确性,子系统的谐振峰被很好地分离了出来,从某种意义上来说,进行以上的算法相当于对于结果进行了一次滤波,使需要的结果更加突出,而下部系统的干扰在做商的过程中受到了抑制;对于式(3),理论上只需进行两次测量就可以得到系统参数,在实际的测量工作中,由于噪声等因素,不可能得到图2中如此理想的结果,需要利用式(4)进行最小二乘拟合。

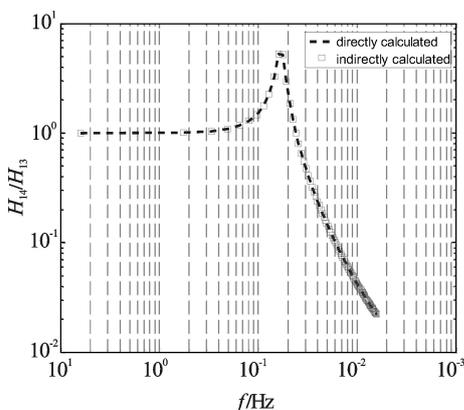


图2 理论与仿真对比图

3 实验及结果分析

为了更好地验证本研究的理论,笔者利用Bipod

柔性镜座进行了实际的模态参数辨识实验。实验之中使用的传感器为加速度传感器,系统输入由力锤提供,以上各部分都已集成于LMS公司生产的模态分析仪中,分析软件为商用POLYMAX。

实验中使用的柔性反射镜座及传感器如图3所示。镜体为微晶玻璃,3组反射镜柔性支撑镜座是通过特殊工艺加工而成的Bipod,材料为钢钢4J32,底部为刚度较高的支撑座。

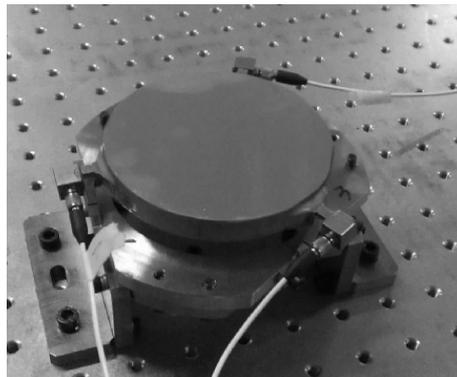


图3 模态测试装置

本研究将图3中的传感器分别布置在左侧的胶垫、支座左侧平面以及支座与气浮台连接处的凸台的左面,将系统简化为某个方向上的类似于图1的4阶串联系统,经过若干次初始测试发现,由于气浮台的质量比柔性镜座大很多,在对镜座进行激励时,贴近气浮台的传感器几乎采集不到信号,导致测量信噪比过低,故将系统简化为3阶系统。

反射镜与镜座的传函测量结果如图4所示。由图4可知,虽然在图4中可以明显地分辨出若干谐振峰,但是由于其对应关系不明确,不能很好地得到子系统本身的性质,即谐振峰可能是子系统本身造成的也可能是由于下部系统的影响而产生的;另一方面,重新考虑式(3),假设仪器测量传函时的信噪比为定值,那么,两个传函相除,可以将测量噪声的影响去除,实际上只要两次测量的质量相似,对于信噪比都会有一定

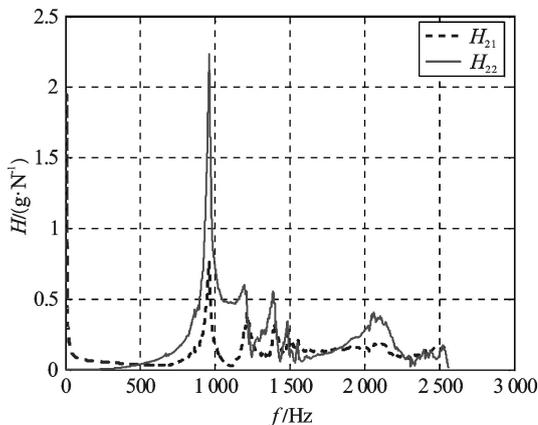


图4 系统传递函数

程度的提高。

利用本研究的方法得到的子系统传函及利用式(4),结合线性最小二乘法,可以得到子系统参数 c_1 、 k_1 如图5所示,质量作为已知量,式(3)表达为:

$$\frac{H_{N1}}{H_{N2}} = \frac{-1.2 \times 10^7 - j\omega 90}{1.2 \times 10^7 - \omega^2 0.25 - j\omega 90} \quad (4)$$

其中:刚度的单位为 N/m,质量的单位为 kg,阻尼的单位为 NS/m。

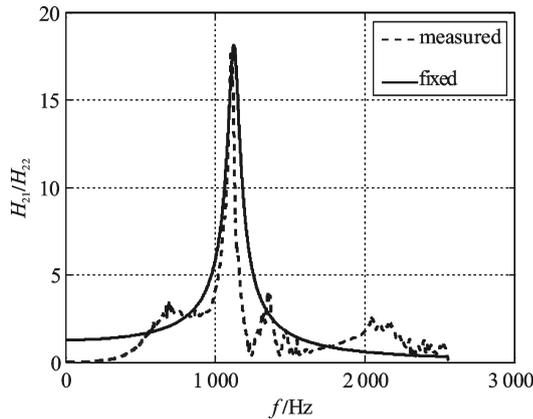


图5 子系统传函及其拟合值

利用本研究方法,使用数学软件 Matlab,测得的刚度为 1.2×10^7 N/m,利用静态柔度法,即施加测量位移的方法得到 Bipod 镜座刚度如图6所示,为了比较本研究方法与传统方法的效果,笔者将其平均值 1.18×10^7 N/m 作为最终测量值,也在图6中进行表示。

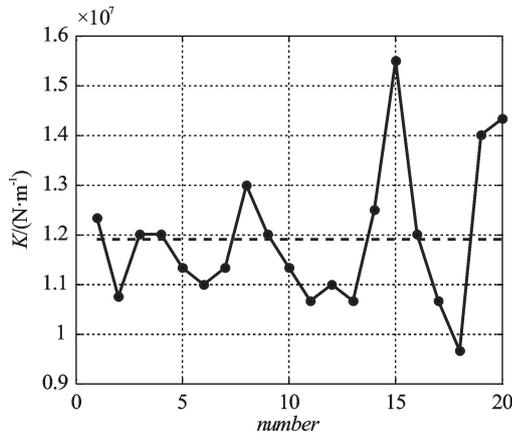


图6 静态柔度法测量结果

以上实验说明本研究简化的正确性与方法的可行性;另一方面,由于阻尼对于机械系统的动力学特性以及控制模型都有较大的影响,通过本研究的方法,

不仅可以得到系统的柔度参数,同时可以得到阻尼参数,为系统的设计与分析提供指导。

4 结束语

本研究利用串联弹簧-质量-阻尼系统,提出了一种利用传递函数及其性质分析柔性支撑结构柔度参数的方法,进而利用二者的倒数关系,可以得到系统刚度参数,对于串联模型端部子系统参数进行辨识。

本研究方法的优点在于可以分离待测系统、实验器材简单,不需要额外的辅助工装而且可以测量任意方向的柔度参数;另一方面,由于模态参数辨识本身的特性,在得到柔度参数的同时,还可以得到阻尼性质,对于系统的分析与控制都有较好的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 薛 军,扈海滨,宋汉忠. 光学反射镜挠性支撑结构研究[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2009,30(4):457-461.
- [2] 郭 疆,何 欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. 光学精密工程,2008,16(9):1642-1647.
- [3] 孙路伟,武秀东,吕琼莹,等. 新型球式稳定平台内框架的模态分析与优化[J]. 机电工程,2014,31(3):350-353.
- [4] BELY P Y. The design and construction of large optical telescopes[M]. Berlin:Springer-Verlag,2003.
- [5] PAUL R, YODER J R. 光机系统设计[M]. 3版:北京:机械工业出版社,2008.
- [6] 黄 真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [7] 安其昌,张景旭,张丽敏. 小型反射镜柔性镜座柔度分析[J]. 激光与红外,2013(7):785-789.
- [8] 郭新胜,陈洪彩,党 力,等. 上反射镜稳定系统机械谐振分析[J]. 兵工自动化,2011(8):85-88.
- [9] 于靖军,刘辛军,丁希仑,等. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [10] 辛宏伟,关英俊,柴方茂. 离轴空间传感器主支撑结构设计[J]. 光学精密工程,2012,20(6):1257-1264.
- [11] 倪明阳,巩 岩. 光刻投影物镜光学元件运动学支撑结构的设计与分析[J]. 中国光学,2012,5(5):476-483.
- [12] 王汝冬,王 平,田 伟,等. 大口径光学元件重力变形补偿的设计分析[J]. 中国光学,2011,4(3):259-263.
- [13] 赵宏超,张景旭,杨 飞,等. 预紧式八翼梁次镜支撑结构动力学分析[J]. 光学精密工程,2013,21(5):1199-1204.
- [14] 李中付,宋汉文,华宏星,等. 一种白噪声环境激励下模态参数辨识方法[J]. 振动工程学报,2002,15(1):52-56.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

张丽敏,安其昌,杨 飞. 反射镜柔性支撑结构的模态参数分析[J]. 机电工程,2014,31(12):1555-1558.

ZHANG Li-min, AN Qi-chang, YANG Fei. Modal analysis of flexural support system for reflect mirrors[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(12): 1555-1558.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>