

文章编号 1004-924X(2015)02-0438-06

Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用

张丽敏^{1*}, 王富国¹, 安其昌^{1,2}, 杨 飞¹, 王 志¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 大学, 北京 100039)

摘要:设计了一种由 3 组 Bipod 组成的柔性支撑结构,用于提高在实际工作条件下小型反射镜的面形精度。首先,利用伴随变换建立了 Bipod 及由其组成的支撑结构的柔度矩阵;利用 MATLAB 优化 Bipod 的结构参数,以满足径向刚度最小时轴向刚度最大的要求。然后,对优化后的支撑结构施加力和热载荷进行了仿真验证。最后,利用 zygo 干涉仪验证该支撑结构的热稳定性。结果表明,Bipod 柔性支撑结构在保证反射镜良好热稳定性的同时,可以有效降低外界动态载荷对反射镜的影响;不仅具有良好的动态特性,且能在力热耦合载荷下保持较好的面形。分析显示其 1 阶固有频率达到 1 781.7 Hz,与理论计算相比,相对误差约为 1%。

关键词:小型反射镜;Bipod;柔性支撑结构;柔度矩阵;优化设计

中图分类号:TH703;TH112.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152302.0438

Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector

ZHANG Li-min^{1*}, WANG Fu-guo¹, AN Qi-chang^{1,2}, YANG Fei¹, WANG Zhi¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
- * *Corresponding author, E-mail: zhangtqx@163.com*

Abstract: A flexible supporting structure composed of 3 Bipods was designed to enhance the surface accuracy of a minitype reflector in complex environments. Firstly, the flexibility matrixes of the Bipods and whole support structure were established through matrix transformation and the defining design variables of the Bipods were optimized through MATLAB to meet the requirements of maximum of the axial stiffness when the radial stiffness was minimum. The simulation verification was then performed by applying different forces and thermal loads to the optimized supporting structure. Finally, a zygo interferometer was employed to verify the thermal stability of the supporting structure. The results show that the Bipod support structure keeps a fine surface accuracy under a thermal-structural load, meanwhile providing excellent dynamic performance. Except for giving the reflector a better thermal stability, the support rigidity of the structure resists the impact of the environmental dynamic load on the reflector. Moreover, the analysis indicates that the first order natural frequency of the

收稿日期:2014-03-07;修订日期:2014-05-20.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20130102018JC)

flexible supporting structure is 1 781.7 Hz, and the relative error is 1% as compared with that of the theoretical calculation.

Key words: minitype reflector; Bipod; flexible supporting structure; flexible matrix; optimum design

1 引言

随着光机系统向着更高的精度发展,光学系统的关键部件反射镜的面形质量对整个光学系统成像质量的影响越来越明显,小型反射镜作为其中的重要部件,其面形精度(PV值和RMS值)也越来越受到关注。

反射镜在重力作用下和环境温度变化时,镜面都会发生变形,从而导致成像质量的下降,因此需要合理设计反射镜的支撑结构。反射镜的支撑可在对反射镜进行有效定位的同时卸载其自重并减小热应力和装配应力对反射镜的影响,从而减小镜面的变形。在力的传递过程中,应尽量避免产生较大的集中力,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,最终使反射镜的镜面变形最小,以保证成像质量^[1-4]。

柔性结构可在一定程度上释放应力,在温度变化时反射镜可自由膨胀或收缩,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^[5]。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。Bipod支撑的柔性镜座被广泛应用于各种光路系统,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,它一般通过3个衬垫黏接在反射镜的边缘(如本文设计的结构),对于稍大反射镜可以通过弹性套筒黏接于反射镜的底部。

本文根据机构学的基础理论建立Bipod结构的理论模型,并以在径向刚度最小的同时使轴向刚度达到最大为目的对结构参数进行优化。仿真分析和试验验证了Bipod支撑结构能够满足设计指标要求,也对其他柔性支撑结构提供了参考。

2 基于伴随矩阵的柔度组建

Bipod柔性镜座三维模型如图1所示。

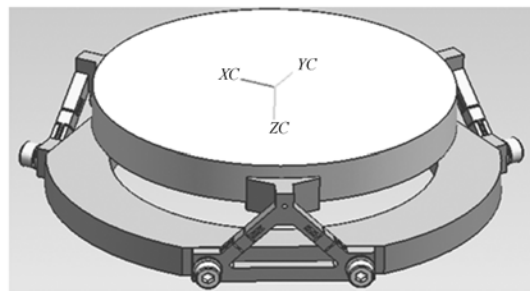


图1 柔性镜座整体实物图

Fig. 1 Sketch of flexible lens seat

将Bipod每一条支腿的各个部分都设为等截面柔性梁,其柔度矩阵可以由3个尺寸参数 l 、 t 、 b (如图2所示)与材料的杨氏模量 E 、剪切模量 G 表示。坐标原点位于梁下端面中心,在此坐标系下柔度矩阵的表达式为^[6-8]:

$$C_{\text{beam}}(t, b, l) = \begin{bmatrix} \frac{l}{3EI_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{2EI_y} & 0 \\ 0 & \frac{l}{3EI_x} & 0 & -\frac{l}{2EI_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{EA} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l}{2EI_x} & 0 & \frac{l}{EI_x} & 0 & 0 \\ \frac{l}{2EI_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{EI_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{GI} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $A = tb$ 、 $I_x = tb^3/12$ 、 $I_y = tb^3/12$ 、 $I = I_x + I_y$ 。

Bipod实物如图3所示。

将支腿的柔度坐标原点设在支腿底部,如图4所示。

设定伴随变换矩阵:

$$Ag(x_{ol}, y_{ol}, z_{ol}, \alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} R & 0 \\ D_{01}R & R \end{bmatrix}, \quad (2)$$

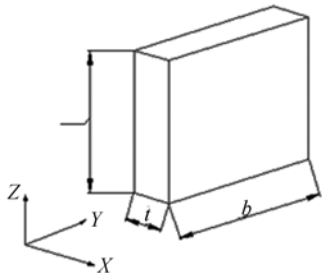


图 2 坐标系的建立

Fig. 2 Constitution of coordinate

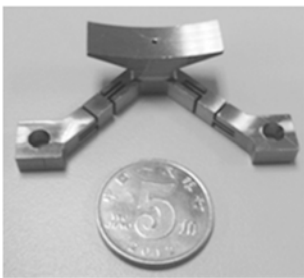


图 3 Bipod 实物图

Fig. 3 Sketch of bipod

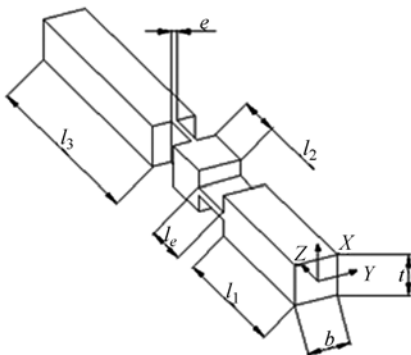


图 4 支腿结构简图

Fig. 4 Sketch of leg

其中:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + c\beta c\gamma & s\beta s\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix},$$

表示原始坐标系在新坐标系中的方向, c 与 s 分别代表“cos”和“sin”函数:

$$\mathbf{D}_{O1} = \begin{bmatrix} 0 & -z_{O1} & y_{O1} \\ z_{O1} & 0 & -x_{O1} \\ y_{O1} & -x_{O1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

表示原始坐标系原点 (x_{O1}, y_{O1}, z_{O1}) 在新坐标系中

的坐标反对称阵。

则, 一条支腿的柔度矩阵为:^[9]

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{unit} &= \mathbf{C}_{beam}(t, b, l_1) + \mathbf{A}g^T(0, 0, l_1, 0, 0, 0) \\ &+ \mathbf{C}_{beam}(t, b, l_e) \mathbf{A}g(0, 0, l_1, 0, 0, 0) + \\ &+ \mathbf{A}g^T(0, 0, l_1 + l_e, 0, 0, 0) \\ &+ \mathbf{C}_{beam}(t, b, l_2) \mathbf{A}g(0, 0, l_1 + l_e, 0, 0, 0) + \\ &+ \mathbf{A}g^T(0, 0, l_1 + l_e + l_2, 0, 0, 0) \\ &+ \mathbf{C}_{beam}(t, b, l_e) \mathbf{A}g(0, 0, l_1 + l_e + l_2, 0, 0, 0) + \\ &+ \mathbf{A}g^T(0, 0, l_1 + 2l_e + l_2, 0, 0, 0) \end{aligned}, \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_{beam}(t, b, l_3) \mathbf{A}g(0, 0, l_1 + 2l_e + l_2, 0, 0, 0)$$

设模拟镜半径为 r , 单件 Bipod 的柔度为

\mathbf{C}_{leg1} , 则:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{leg1}^{-1} &= [\mathbf{A}g^T(r, \frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), \\ &- \frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), 0, 0, \frac{\pi}{4}) \mathbf{C}_{unit} \\ &+ \mathbf{A}g(r, \frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), \\ &- \frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), 0, 0, \frac{\pi}{4})]^{-1} + \\ &+ [\mathbf{A}g^T(r, -\frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), \\ &- \frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), 0, 0, -\frac{\pi}{4}) \mathbf{C}_{unit} \\ &+ \mathbf{A}g(r, -\frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), \\ &- \frac{\sqrt{2}}{2}(l_1 + l_2 + l_3 + 2l_e), 0, 0, -\frac{\pi}{4})]^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

设总柔度为 \mathbf{C} :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^{-1} &= \mathbf{C}_{leg1}^{-1} + [\mathbf{A}g^T(0, 0, 0, \frac{2\pi}{3}0, 0) \\ &+ \mathbf{C}_{leg1}^{-1} \mathbf{A}g(0, 0, 0, \frac{2\pi}{3}0, 0)]^{-1} + \\ &+ [\mathbf{A}g^T(0, 0, 0, -\frac{2\pi}{3}0, 0) \\ &+ \mathbf{C}_{leg1}^{-1} \mathbf{A}g(0, 0, 0, -\frac{2\pi}{3}0, 0)]^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

通过伴随变换建立了 Bipod 柔性镜座柔度矩阵的理论解析解。该柔度矩阵为 6×6 的方阵, 其中, 左上角的 3×3 子块对应平动部分, 其余部分表示转动与耦合运动。通过右乘载荷向量, 可以得到 6 维的广义位移向量。

3 基于 MATLAB 的尺寸参数优化

Bipod 柔性镜座的柔度是由单件 Bipod 柔度

矩阵通过旋转伴随变换得到的,故在研究结构尺寸参数优化问题时,只考虑一组支腿即可。

优化 Bipod 的柔度 C_{leg1} ,使径向刚度最小的同时轴向刚度达到最大,即在有效的支撑反射镜的同时,对由反射镜及其支撑结构热膨胀和装配造成的载荷产生最大的吸收作用。

本文目标函数有两个,对于多目标的优化常用方法有加权求和法与乘除法。由于加权法权重的确定较为困难,所以对于探索经验较缺乏的问题时多采用乘除法。

将轴向柔度记为 f'_z ,则目标函数为 $\min\{f'_z\}$;另一个是径向柔度目标函数记为 $\max\{f'_r\}$,所以采用统一目标法之乘除法,统一目标函数为:

$$F(X) = \frac{f'_z}{f'_r} \quad (7)$$

建立优化数学模型:

$$\min\{F(X)\} \quad (8)$$

在实际优化过程中,为了防止 2 个方向柔度之间的耦合,即防止 f'_z 、 f'_r 以相同趋势变化。在相邻两次寻优之间增加不等式约束:

$$f'_{z^{n+1}} < f'^{(n)}_{z} \quad f'_{r^{n+1}} > f'^{(n)}_{r} \quad (9)$$

通过 MATLAB 计算,当 $r=50$ mm 时,得到一组优化尺寸:

$$t=b=5 \text{ mm}, e=0.5 \text{ mm}, l_e=l_2=5 \text{ mm}, l_1=10 \text{ mm}, l_3=12 \text{ mm}.$$

将此数据代入式(2)即可得到 Bipod 柔性镜座的柔度矩阵,通过右乘载荷矩阵可以得到静力学响应,对其求逆之后,可得其刚度矩阵 $K=C^{-1}$,进而可以求得系统动力学响应。

反射镜采用微晶玻璃,外形尺寸 100 mm × 12 mm。利用振动系统特征方程 $|K-\omega^2 M|=0$,可得系统的一阶频率为 1 800 Hz。

4 有限元分析

经过优化设计,最终确定 Bipod 结构的详细参数,依此对整个组件进行详细有限元分析。

4.1 重力和热载荷作用下反射镜面形分析

静力学分析主要考察在重力和热载荷作用下反射镜的面形变化^[9]。

经分析在反射镜组件在静力载荷、恒定热载

荷、力热耦合载荷等不同工况下,反射镜的面形结果如表 1 所示。

表 1 Bipod 支撑时不同工况下的面形

Tab. 1 Mirror surface precision supported by Bipod under different loadcases (nm)

工况	Bipod under different loadcases (nm)		
	光轴垂直重力 +20 °C	光轴垂直重力 +50 °C	光轴垂直重力 -40 °C
面形	5.475 3	11.181 0	21.825 0
工况	光轴水平重力		
	+20 °C	+50 °C	-40 °C
面形	0.436 3	10.321 5	20.635 0
工况	-40 °C		+50 °C
	面形	20.616 2	10.307 9

如果采用刚性支撑,3 点等间隔支撑在反射镜的边缘,不同工况下反射镜的面形结果如表 2 所示。

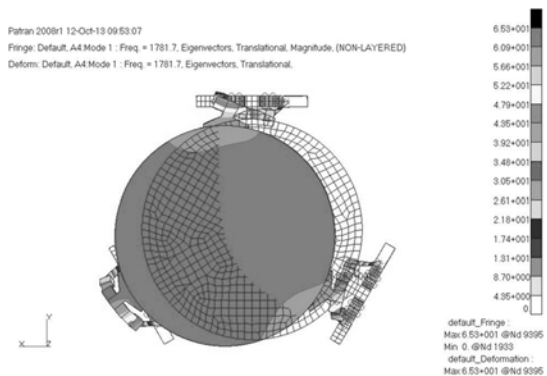
表 2 刚性支撑时不同工况下面形

Tab. 2 Mirror surface precision supported by rigidity under different loadcases (nm)

工况	不同工况下面形 (nm)	
	光轴垂直重力 +20 °C	光轴水平重力 +20 °C
面形	3.256 6	0.254 2
工况	-40 °C	
	面形	93.407 9

4.2 模态分析

模态分析是考察动态刚度的重要指标,由图 5 可知,前两阶振型方向为二维平移且正交,大小分别为 1 781.7 Hz 和 1 784.2 Hz,远高于一般使用环境要求,满足动态刚度要求。



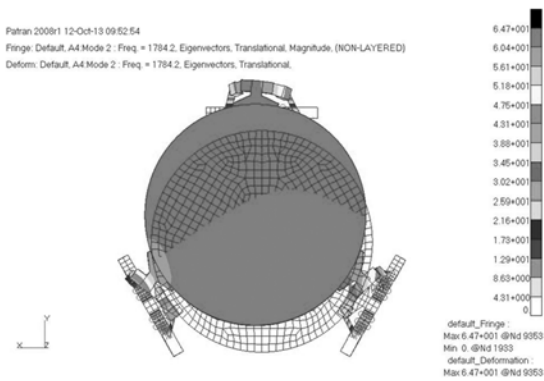
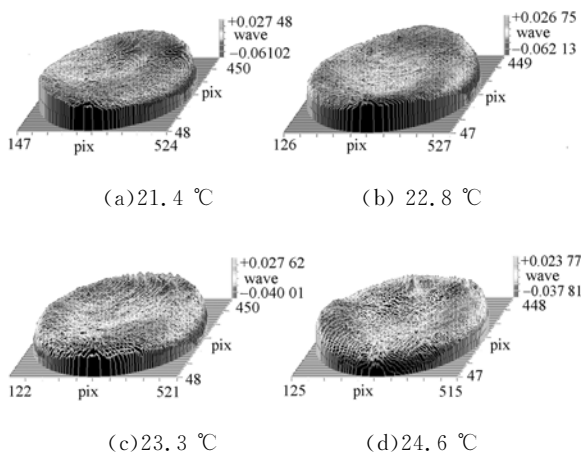


图 5 组件前 2 阶模态

Fig. 5 The first 2-order models of supports

5 试验测试

使用洋干漆将反射镜与 Bipod 黏接,反射镜竖直放置,装夹 Bipod 底座与 Zygo 干涉仪对准。反射镜裸镜检测面型 RMS 为 $6\lambda/1\ 000$,黏接后



(a) 21.4 °C

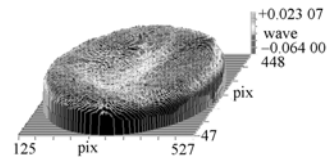
(b) 22.8 °C

(c) 23.3 °C

(d) 24.6 °C

参考文献:

- [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.
XUE J, HU H B, SONG H ZH. Research on the flexible supporting structure of the optical reflector [J]. *Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 30 (4): 457-461. (in Chinese)
- [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.
GUO J, HE X. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Opt. Pre-*



(e) 25.3 °C

图 6 面形误差干涉仪检验结果

Fig. 6 Results of surface errors with interferometer

在不同温度条件下使用 Zygo 干涉仪进行测量 (21.4、22.8、23.3、24.6、25.3 °C) 时 RMS 均为 $8\lambda/1\ 000$,面形如图 6 所示。

Zygo 干涉仪的精度为 $\lambda/1\ 000$,与裸镜 RMS 相比,增加支撑结构之后表面 RMS 变化仅为 $\lambda/500$,可见 Bipod 对于面形的影响较小。

6 结论

本文针对小型反射镜的 Bipod 柔性支撑结构进行了理论计算和优化,设计了一种适合 $\Phi 100$ mm 的柔性镜座,并进行了仿真分析和试验验证。结果表明,Bipod 柔性支撑结构可以使反射镜在静力学与热力学混合工况下保持良好的面形;分析结果与理论计算相比,误差约为 1%,证明了理论的正确性与简化的可行性,即使在削减径向刚度后,系统依旧有良好的动力学特性。此外,反射镜与支撑结构的加工与装配误差导致的应力载荷与由热力学工况引起的应力载荷相似,故 Bipod 结构对于装配应力也有很好的释放作用。本文方法也可为其他小型反射镜的柔性支撑设计提供参考和借鉴。

cision Eng., 2008, 16(9): 1642-1647. (in Chinese)

- [3] 付亮亮,何欣,廉凤慧.小型反射镜支撑方案的设计与分析[J].光学技术,2008,34(4):532-534.
FU L L, HE X, LIAN F H. Design and analysis of minitype reflected mirror supporting structure project [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 532-534. (in Chinese)
- [4] 刘巨,董得义,辛宏伟,等.大口径反射镜组件的温度适应性[J].光学精密工程,2013,21(12):3169-3175.
LIU J, DONG D Y, XIN H W, et al.. Temperature adaptation of large aperture mirror assembly [J].

- Opt. Precision Eng., 2013, 21(12): 3169-3175. (in Chinese)
- [5] 周海宪,程云芳. 光机系统设计(原书第三版)[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
ZHOU H X, CHEN Y F. *Opto-Mechanical Systems Design (3rd edition of original book)* [M]. Beijing:China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [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.
HUANG ZH, KONG L F, FANG Y F. *Mechanism Theory and Control of Parallel Manipulators* [M]. Beijing:China Machine Press, 1997. (in Chinese)
- [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,2013,785-789.
AN Q CH, ZHAN J X, ZHANG L M. Flexibility analysis of mirror flexible lens seat[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 785-789. (in Chinese)
- [8] 李宗轩,张雷,姚劲松,等. Cartwheel 型双轴柔性铰链设计[J]. 光学精密工程,2013,21(9):2317-2325.
LI Z X, ZHANG L, YAO J S, et al.. Design of cartwheel bi-axial flexural hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2317-2325. (in Chinese)
- [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.
YU J J, LIU X J, DING X L, et al.. *Mathematical Foundation of Manipulators Mechanism* [M]. Beijing:China Machine Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



张丽敏(1981—),女,山西朔州人,博士,副研究员,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事精密机械设计方面的研究工作。E-mail:zhangtqx@163.com



杨飞(1982—),男,湖北天门人,硕士,副研究员,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学仪器机构设计方面的研究。E-mail: yangflying@163.com



安其昌(1988—),男,山西太原人,硕士研究生,2011年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事空间机构学的研究。E-mail:anj@mail.ustc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)