

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.013

基于运动学原理的三镜支撑设计及 支撑位置优化研究*

徐 伟,张丽敏*,刘昌华

(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: 针对三镜支撑机构需要应对重力影响以及温度变形的问题,对三镜的支撑方法进行了研究,提出了一种基于运动学原理的支撑设计;对支撑点位置进行了优化,通过ANSYS上的优化分析模块,以RMS值为指标,优化出了支撑点的位置;对不同重力方向作用下的三镜面型进行了有限元分析,得到了重力方向与反射镜面型的关系曲线;利用ZYGO干涉仪对支撑前后的三镜面型进行了试验检测,实测重力作用下的RMS值为 0.021λ ,支撑后仅增大 0.002λ 。研究表明,该支撑方法通过令柔性三点底支撑与中心侧支撑互相解耦,能够减小重力作用或者温度变化时,因变形不协调而产生的集中应力,从而拥有良好的面型。该支撑方法是可靠的,优化出的支撑点位置是可行的。

关键词: 运动学原理;三镜支撑;优化分析

中图分类号: TH751 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)12-1574-04

Support design of M3 based on the kinematic method and optimization of the support position

XV Wei, ZHANG Li-min, LIU Chang-hua

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

Abstract: Aiming at the support structure of M3 was needed to respond to the effect of gravity and deformation due to temperature changing, a support method was researched based on the kinematic method; an analysis that used finite element method to optimize the support position by using the optimizing module of ANSYS was made which regarded the RMS value as a target; the deformation of mirror was analyzed and the curve of RMS value changed by different directions of gravity was obtained; the deformation of mirror before and after support were tested by using ZYGO, a result was obtained that the test value of RMS under the effect of gravity was 0.021λ which was only 0.002λ , s bigger than that without support. The results indicate that, this support method can reduce the concentrated stress due to uncoordinated deformation when the effect of gravity or the temperature change, by making the flexible three-point bottom support and the side support in center to be decoupled, and so to get a fine RMS value. The support method is reliable, the optimized position of support points is feasible.

Key words: kinematic method; the support of M3; optimized analysis

0 引 言

近年来发展研究的地基光电望远镜的光学系统主

要以大口径反射式为主^[1]。随着望远镜的口径越来越大,三镜系统作用也越来越广泛:已经从简单的光束转折,发展到更多的望远镜系统跟踪瞄准、波前校正等方

收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(20130102018JC)

作者简介: 徐 伟(1988-),男,黑龙江五常人,研究实习员,主要从事精密机械方面的研究. E-mail: xwzqlb@163.com

通信联系人: 张丽敏,女,博士,副研究员. E-mail: zhangtqx@163.com

面^[2-3]。通常情况下,三镜在重力作用以及温度变化的影响下面型会发生变化,从而导致成像质量的下降;所以镜子支撑机构在完成有效定位的同时,还需要充分考虑到这些影响。

从力的传递方面考虑,一方面在重力作用以及温度变化时,要尽量减小镜体与支撑机构接触处的集中应力;另一方面各支撑部分能够解耦,从而使支撑机构符合运动学原理,既不过约束也不欠约束,达到运动学的平衡,从而拥有最好的成像质量^[4]。柔性支撑已被广泛地运用于反射镜的支撑机构中,来应对重力作用以及温度变化导致的集中应力过大,从而改善面型^[5-10]。

本研究根据运动学原理,针对椭圆微晶三镜,讨论一种满足运动学平衡的柔性支撑方式;应用CAE技术对其支撑点位置进行优化设计,并对不同重力方向作用下的镜面变形进行分析评价。在本研究的讨论中,没有涉及有关支撑方式的具体机械结构,而是通过施加约束的方式来对三镜进行定位及加载等。

1 支撑方式

本研究以2 m望远镜中的三镜为例,其尺寸大小以及材料参数如表1、表2所示。该镜为一椭圆形反射镜,长短轴比例为1.414:1,薄镜面厚度为10 mm。

表1 三镜材料参数

弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·mm ⁻³)
90 300	0.24	2.53×10 ⁻⁶

表2 三镜尺寸参数

长轴/mm	短轴/mm	厚度/mm	镜面/mm	倒角
350	248	40	10	C30

轴向支撑点个数的选取由一个推导反射镜最少支撑点个数的经验公式来确定,该公式是在反射镜测试过程中防止因自重变形导致面型RMS值大于规定值而给出的,公式为:

$$N = \left(\frac{0.375r^2}{t} \right) \left(\frac{\rho}{E\delta} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: N —最少支撑点个数; r —反射镜半径; t —反射镜厚度; ρ —反射镜材料密度; E —反射镜材料弹性模量; δ —允许的RMS值。

根据经验公式,可以得到最少轴向支撑点个数为3个。反射镜自由状态下拥有6个自由度,运动学原理要求,反射镜在不过定位状态下完全约束这6个自由度,并且在任何状态下都要受力平衡,满足约束方程:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0 \\ \sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

本研究采用柔性设计的三点底支撑与中心侧支撑相结合的一种支撑方式,就是基于上述原理的一种支撑;每一个支撑点所约束的自由度如图1所示。

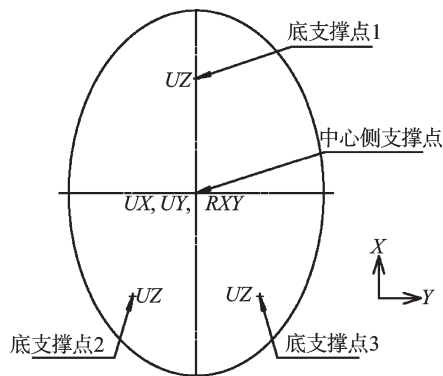


图1 支撑原理示意图

其中:①三点柔性底支撑方式通过柔性设计使每一个底支撑的轴向刚度远大于径向刚度,三点支撑完成对轴向平移自由度UZ外加两个转动自由度RXZ、RYZ的约束;②柔性中心侧支撑方式的轴向刚度远小于径向刚度,来约束径向的两个平移自由度UX、UY,外加绕光轴的转动自由度RXY;因此底支撑与侧支撑相结合,完成对UX、UY、UZ、RXY、RXZ、RYZ自由度的约束,且支撑解耦,符合运动学原理,达到了运动学的平衡。同时,通过对底支撑与中心侧支撑进行合理的柔性设计,可以减小温度应力的影响。

国内外对于反射镜经常采用周边支撑的方式,例如压边支撑,其过约束虽能令基频较高,重力作用下面型较好,但温度变化结果较差,同时周边支撑占用径向空间以及质量较大,对三镜系统并不适用。柔性支撑通常被用来减弱温度效应的影响,目前,采用柔性杆来进行三点支撑的方法已经被用于空间反射镜上。但由于本研究所采用的3个杆为柔性设计,在某一方向上的刚度要远大于其他方向,仅能完全约束这一方向自由度外加两个转动自由度,对于另外两个平移自由度及一转动自由度,并不是完全约束,反射镜在这些自由度上仍具有一定的弹性,导致基频较低,对于地面设备由于重力的作用,不完全约束的影响甚至更大。

相比较而言,本研究所设计的柔性三点底支撑与中心侧支撑的组合,全约束并且不过约束,同时支撑全部在反射镜背部,不占用径向空间,再加上合理的柔性设计,能够应对温度变化以及重力的影响。

2 支撑点位置优化分析

本研究中三镜采用微晶材质,考虑对称性要求,将3个底支撑孔按照椭圆长轴对称布置,侧支撑孔在

中心处。因此,支撑点位置只需优化 L_1 、 L_2 及 L_3 即可确定底支撑点与侧支撑点的相对位置;中心侧支撑孔以及3个底支撑孔的大小由支撑机构而定。

具体三镜优化尺寸示意图如图2所示。

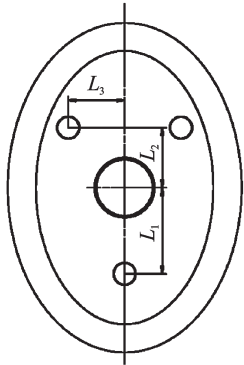


图2 三镜优化尺寸示意图

本研究运用 ANSYS 有限元分析软件中的优化分析模块对支撑点位置进行优化。ANSYS 的优化算法包括:零阶方法、一阶方法、随机优化、梯度法等。本研究选用 ANSYS 提供的一种改进的零阶方法—子问题逼近法 (Sub-problem Approximation Method), 这种方法只用到因变量而不用它们的偏导数,采用目标函数和状态变量的逼近方法,将约束的优化问题转换为非约束的优化问题,可以适用于普遍的工程问题,迅速得到优化结果^[11-12]。

优化支撑位置时,本研究以镜面面型 RMS 值为目标函数,优化设计变量为 L_1 、 L_2 及 L_3 ,载荷为重力,方向沿光轴方向。优化变量初始值为 $L_1=90$, $L_2=62$, $L_3=58$,优化分析的数学模型为:

$$\min f = f(L_1, L_2, L_3) \begin{cases} 86 \leq L_1 \leq 94 \\ 58 \leq L_2 \leq 66 \\ 55 \leq L_3 \leq 61 \end{cases} \quad (3)$$

式中: f —目标函数,即 RMS 值; L_1 , L_2 , L_3 —优化设计变量。

本研究运用 ANSYS 参数化设计语言 APDL 进行对称建模,采用 Solid45 八节点六面体单元进行网格划分。优化分析时,首先在光轴方向即 Z 向加载重力加速度;其次选取中心侧支撑孔环面与重心平面相交线处的节点,约束 UX 、 UY 及 RXY ;再次选取3个底支撑孔底面边线处的节点,约束 UZ 以及 RXZ 、 RYZ ,以此来模拟本研究所设计的符合运动学原理的支撑的边界约束;最后进行静力求解。之后本研究运用事先编程好的面型计算程序直接在 ANSYS 中计算三镜镜面 RMS 值。在优化分析模块中设置好优化变量 L_1 、 L_2 、 L_3 的初始值以及优化范围,定义目标函数、最大迭代次数以及零阶方法 (Sub-Problem) 进行优化分析,经

过计算得到 RMS 值最小时的最优变量值: $L_1=92$, $L_2=64$, $L_3=60$,此时 RMS 值为 6.62 nm。

3 面型评价

本研究根据支撑位置的优化结果,令 $L_1=92$, $L_2=64$, $L_3=60$ 来进行不同重力方向加载时候的面型分析。笔者采用与优化分析时候相同的约束方案,仅改变重力加载方向。考虑到三镜实际使用时候的工况,以光轴方向与重力方向重合(即重力方向垂直镜面)为初始位置,将重力方向分别以椭圆长轴、短轴为旋转轴转动一定角度,并计算面型 RMS 值,得到 RMS 值与旋转角度的关系曲线,旋转角度与 RMS 关系图如图3所示。

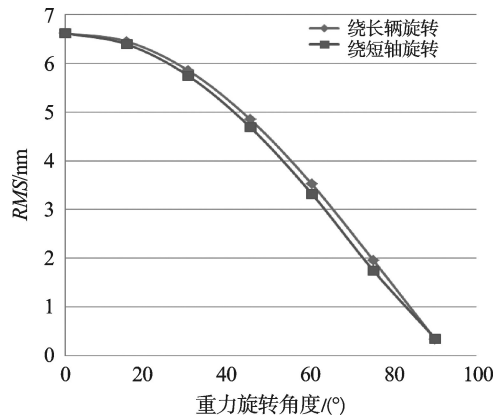


图3 旋转角度与 RMS 关系图

由图3可知,重力方向垂直镜面时候, RMS 值最大为 6.62 nm,重力方向旋转时 RMS 值逐渐减小,最小为重力沿长轴方向,此时 RMS 值为 0.33 nm。分析可知,由于三镜的径厚比较大,三镜在轴向的刚度小于其径向的刚度,水平放置时重力方向垂直镜面,轴向变形较大导致 RMS 值较大;当重力方向与镜面平行时,径向刚度较大,所以变形相对较小。

选取 RMS 值最大以及最小时,即重力沿光轴、长轴方向时候的面型云图如图4所示。由此可见,通过设计的支撑方式以及优化出的支撑位置,在发生重力

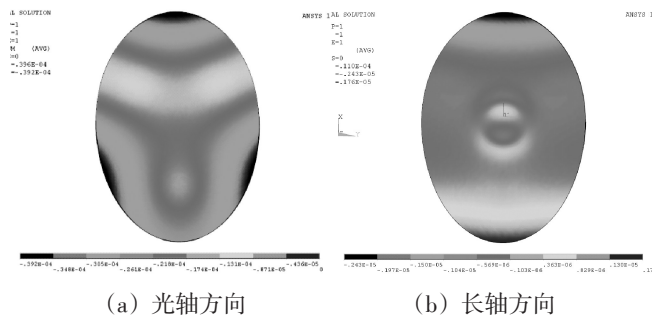


图4 重力作用下的面型云图

变形时,能够使镜面的变形均匀,符合预期。

4 实验检测及分析

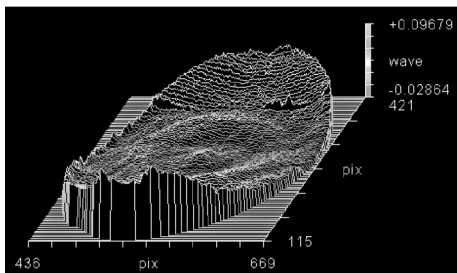
本研究使用ZYGO干涉仪对三镜进行面型检测。首先测试裸镜的面型,作为参考;其次对采用本研究支撑设计的三镜进行支撑后面型检测,通过前、后结果对比来进行评价。

检测现场如图5所示。本研究将三镜垂直放置,即测试的重力方向沿椭圆长轴方向。

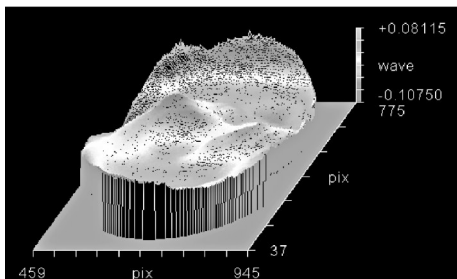


图5 面型检测现场

支撑前、后的面型图如图6所示。



(a) 裸镜面型 0.019λ



(b) 支撑后面型 0.021λ

图6 干涉仪面型测试结果

对实验结果进行分析可知,裸镜RMS值为 0.019λ ,支撑后RMS值为 0.021λ ,两者相差 0.002λ ,即支撑前后RMS值变化约为 1.2 nm ,对于实际使用的三镜系统,支撑后的面型结果满足指标要求。同时,由面型

云图可得,通过将裸镜与支撑后进行对比,表面变形较大区域位于中心以及长轴两端附近,该趋势与有限元分析结果相近。

5 结束语

本研究根据运动学原理,提出了一种满足运动学平衡的三镜支撑方式;笔者对基于该种支撑方式的支撑点位置进行了优化分析,并进行了面型评价。

本研究支撑方式的优点在于各个支撑部分能够解耦,既不过约束也不欠约束,再配合柔性设计,能够充分应对重力以及温度变化的作用,减小集中应力;同时位置优化后的三点底支撑与中心侧支撑的组合,能够使反射镜拥有良好的面型,有限元分析结果表明,重力光轴方向时RMS值为 6.62 nm ;同时实验检测结果表明,支撑后的三镜RMS值为 0.021λ ,仅变化了 0.002λ ,支撑方法符合预期要求。

参考文献(References):

- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京:中国科学技术出版社,2002.
- [2] 杨飞,王富国,陈宝刚,等. 大口径望远镜中三镜技术现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(1):1-7.
- [3] 张锦锋,郭适宇,金惠良. 射电望远镜天线主反射面主动调整系统控制软件数据读写方法的比较[J]. 机电工程技术,2012(4):64-67.
- [4] PAUL R, YODER J R. 光机系统设计[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2008.
- [5] 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.
- [6] 王忠素,翟岩,梅贵,等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学精密工程,2010,8(18):1833-1841.
- [7] 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.
- [8] 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,2013,43(7):785-789.
- [9] 辛宏伟,关英俊,柴方茂. 离轴空间遥感器主支撑结构设计[J]. 光学精密工程,2012,20(6):1257-1264.
- [10] 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.
- [11] 耿麒麟,杨洪波,翁志成,等. 大口径平背形主镜背部支撑位置的优化计算方法[J]. 光学技术,2007(11):889-891.
- [12] 吴清彬,陈时锦,董申,等. 长条形反射镜轻量化结构的参数优化设计[J]. 光学技术,2003(1):76-82.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

徐伟,张丽敏,刘昌华. 基于运动学原理的三镜支撑设计及支撑位置优化研究[J]. 机电工程,2014,31(12):1574-1577.

XV Wei, ZHANG Li-min, LIU Chang-hua. Support design of M3 based on the kinematic method and optimization of the support position[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(12): 1574-1577.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>