

基于有限元法的光电经纬仪主镜轻量化设计

后建敏^{1, 2}, 卓仁善¹, 孙宁¹

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

摘要:对某光电经纬仪主镜的结构进行研究,了解主镜的支撑方式,分析了光轴不同指向时,镜面的面形变化(PV值、RMS值)规律。在对实体镜进行分析的基础上保证其支撑条件不变,对主镜进行轻量化设计,计算其轻量化率、PV值及RMS值,比较两种轻量化结构,并研究镜面面形随镜面厚度的变化规律。分析结果表明,结构的轻量化效果较好,符合设计要求,研究发现,随着镜面厚度的增加,PV值和RMS值逐渐减少。

关键词:有限元法;光电经纬仪;主镜;轻量化;面形

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1672-9870(2008)04-0077-04

Lightweight Design and Analysis for a Theodolite Based on Finite Element Method

HOU Jianmin^{1, 2}, ZHUO Renshan¹, SUN Ning¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The primary mirror of a theodolite was studied by finite element method. The relationship between surface figure deformation (PV and RMS) and optical axis directions was gotten when the optical axis pointed to different angles. Based on the results of solid mirror, two lightweight structures were designed and compared, and the relationship between surface figure deformation and mirror thickness was studied. The results show that the lightweight structure is better, and the surface figure deformations are less, when the mirror thickness is thicker. It satisfies the requirement of design.

Key words: finite element method; theodolite; primary mirror; lightweight; surface figure

光电经纬仪是涉及光学、精密机械、电子、伺服控制、信息和计算机技术的综合性光学测量设备,是现代军事技术高度发展的象征^[1]。光电经纬仪是测量设备的一种,光电经纬仪在现代化靶场中是获取外弹道数据和飞行状态的最基本的测量手段之一。

在望远镜中主反射镜对光学系统成像质量的好坏起着关键作用,它依赖于主反射镜的结构形式、制造质量、安装方式及安装质量和所受载荷等因素。随着科学的发展,人们希望看到越来越远,越来越暗的物体,对望远镜聚光能力及其分辨率的要

求越来越高,其分辨率可以表示为 $1.22f \cdot \lambda/D$ 。由此可以看出要提高光学系统的光学分辨率,加大口径 D 是重要的途径。但是随着主镜口径的增加,会引起一系列的问题,如主镜重量增加、自重变形和温度变形增大等问题。另外,据美国的《生命探索之路》统计,对于地基望远镜来说,镜子的价格是与镜子的直径平方成正比;镜子的支撑结构和制造的价格与镜子直径的三次方成正比,但总的来说,是与直径的二点七次方成比例^[2-7]。

因此随着主镜口径的增大,为获得足够的刚度并防止主镜重量和造价大到难以接受的地步,主镜

收稿日期:2008-09-08

基金项目:长春光机所预研项目

作者简介:后建敏(1984-),女,硕士研究生,主要从事结构分析与综合的研究,E-mail:koukou607@163.com。

通讯作者:卓任善(1960-),女,朝鲜族,研究员,硕士生导师,主要从事精密仪器设计与研究。

的结构更显得重要。

本设计要求对某光电经纬仪主镜进行轻量化设计,口径为 $\Phi 512$ mm,轻量化率大约 50%,技术指标要求主镜综合面形误差[PV] $<1/8\lambda$, [RMS] $<1/40\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)。本文主要是在已有的主镜的基础上对其进行研究,分析光轴不同指向时,镜面的面形值的变化情况,并在此基础上对主镜进行轻量化设计,并进行分析,为以后的轻量化设计工作提供依据。

1 主镜模型参数

某光电经纬仪通光口径为 500 mm,主镜材料为 QK2,轻冕玻璃,材料的主要性能参数为密度 $\rho=2.27$ g/mm³,泊松比 $\nu=0.25$,弹性模量 $E=6980$ kg/mm²。主镜的结构参数为最大口径 $\Phi 512$ mm,中心孔直径 $\Phi 95$ mm,边缘厚度 85 mm,镜面为球面,其曲率半径 2600 mm。利用三维建模软件 UG 建立主镜的实体模型,主镜的质量为 35.87 kg。

2 主镜支撑方式研究

随着主镜口径的增大,单纯的三点支撑或单圈支撑已不能满足自重情况下的面形精度要求,所以有必要采用多点支撑的方法。

Hall 在 1970 年给出了计算最少支撑点的经验公式:

$$N = \frac{0.375D^2}{t} \left(\frac{\rho}{E\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中 N D t ρ E 和 ω 分别代表支撑点的数量、光学镜的口径、镜厚、密度、弹性模量和要求的 PV 值。

背部支撑方式中,对于实心口径很小的镜子,一般采用三点支撑。对于稍大一些的镜子,底支撑常采用浮动支架支撑,它是在每一个静定的支撑点上通过一个刚性的浮动支架,把支撑点数扩大为 2 或 3。

在设计中,主镜选用 9 点支撑,底支撑分为内外两圈,内圈均匀分布 3 点,外圈均匀分布 6 点(如图 1 所示),每点承担 1/9 的重量,每 3 点通过一个三角形托架,落在球铰链上。通过球铰链,可以自由调节。支撑方式采用把支撑元件胶结在反射镜背部,每个支撑点采用支撑盘支撑在主镜的背部^[4,5]。

大口径光学件常用的侧支撑结构主要有刚带支撑、水银带支撑、气囊支撑、杠杆重锤侧支撑等,本设计主要采用杠杆重锤侧支撑结构。

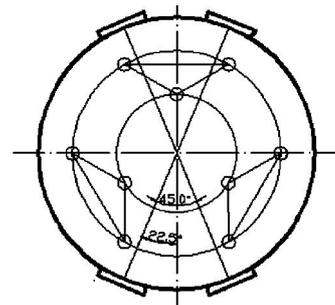


图 1 支撑方式示意图

Fig.1 Sketch of support for primary mirror

3 光轴不同指向时的面形变化

3.1 载荷及约束处理

利用有限元分析软件 Patran 建立主镜有限元模型,并进行网格划分,对模型共划分单元 8604 个,节点 10050 个。建立约束条件如下:

(1) 主镜采用芯轴定位,受到 9 点底支撑,支撑点为圆环域,内圈 3 个,外圈 6 个,沿圆周均匀分布,约束 9 点的 z 轴,使其位移为 0;同时主镜受到侧支撑的作用;

(2) 主镜 6 处受到前支撑力,根据经验取每处前支撑力大小为 30 N;

(3) 主镜受重力 g 作用。

3.2 面形变化规律

当镜体水平放置时,其自重引起的镜面中心最大变形量为:

$$\omega_{\max} = \frac{qa^4}{64D} \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} \right) \quad (2)$$

式中 q 为镜面单位面积的质量 a 为反射镜半径 ν 为反射镜材料泊松比 D 为抗弯强度。

对于弹性模量为 E ,厚度为 t 的实心镜体:

$$D = Et^3/(1-\nu^2) \quad (3)$$

因此:

$$\omega_{\max} = \frac{3q}{16E} (1-\nu^2) \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} \right) \frac{a^4}{t^3} \quad (4)$$

若镜面厚度为 t ,镜面单位面积质量可表示为:

$$q = \rho t \quad (5)$$

因此:

$$\omega_{\max} = \frac{3}{16} \frac{\rho g}{E} (1-\nu^2) \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} \right) \frac{a^4}{t^2} = C \frac{a^4}{t^2} \quad (6)$$

式中系数 C 是与镜体材料相关的常数。

在有限元分析软件 Patran 中建立主镜的有限元模型,通过改变重力的作用方向对不同位置的有限

元模型进行相应的约束。在这里，定义 α 为光轴与 +x 方向之间的夹角。考虑到主镜的工作角度为 $-15^\circ \sim 185^\circ$ ，由于结构的对称性，分析 $\alpha = -15^\circ \sim 90^\circ$ 时的镜面面形变化，结果如图 2 所示。

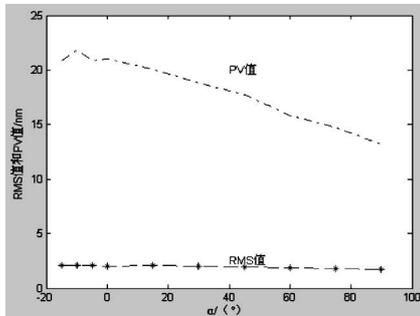


图 2 主镜面形随 α 的变化

Fig.2 Changing of PV and RMS vs. angle α

从图 2 可以看出，当 $\alpha = -15^\circ \sim 90^\circ$ 时，PV 值和 RMS 值的总体变化趋势是随着 α 角的增大而减小的，当 α 大约为 -10° 时达到最大值。PV 值的变化幅度比较大一些，这是由侧支撑的支撑面积较小造成的，说明影响侧支撑性能的主要因素是侧支撑结构刚度。RMS 值的变化幅度较小。

4 轻量化结构

本次设计是在原有支撑不变的基础上对主镜进行轻量化设计，并研究轻量化性能，本次设计采用的是背部开口式结构。

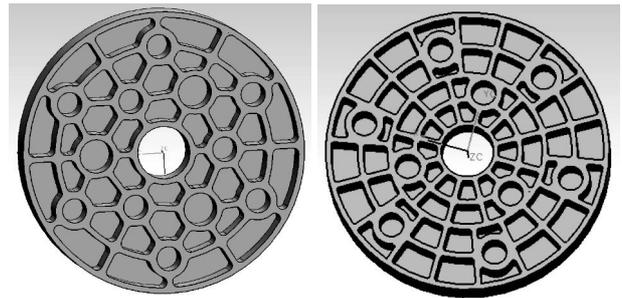
4.1 轻量化设计

轻量化结构就是尽量多的去除不参与光学成像的主镜镜体材料而尽量少的减小镜体的刚度。许多研究人员对正六边形，正四边形，三角形等几种轻量化蜂窝孔形状进行研究，比较它们的几何结构对主镜刚度的影响。如 Maser 和 Soosaar, Barnes^[8,9], Sheng, Richard^[10] 等人分别用不同的材料、口径和厚度的模型对几种蜂窝孔对主镜刚度的影响进行了研究；结合国内的加工水平和加工难度也对几种蜂窝单元结构进行了研究^[5]。

主镜轻量化孔有三角形、扇形、六边形、圆形以及异性孔等形式。圆形孔虽然工艺性最佳，但材料去除率最低，目前已很少采用；三角形孔轻量化的刚度最高，但材料去除率较低，且温度特性不好，在顶点处容易形成热结；六角形孔和扇形孔的材料去除率较高，结构刚度和热稳定性也较好，在实际工程设计中应用较广^[3,5]。哈勃望远镜主镜就采用了蜂窝状轻量化结构，主镜由 ULE 制成，直

径 2.4 m，厚度 0.33 m，重 829 kg，轻量化率约为 70%，面密度为 180 kg/m²。

本设计中，由于背部支撑方式已经确定，采用背部圆盘进行胶结，其支撑圆盘的大小和位置已经确定，因此在综合考虑镜子的形状及设计要求的基础上，提出了两种背部开口式的轻量化结构，如图 3 所示。图 3 (a) 采用异性孔，图 3 (b) 采用扇形孔，其筋厚均取 10 mm，镜面均为 15 mm。



(a) 结构

(b) 结构

图 3 轻量化结构

Fig.3 Lightweight structures

4.2 静态分析

对图 3 的两种轻量化结构进行分析，求出其轻量化率，并得出其镜面变形 PV 值和 RMS 值。

轻量化率是反应轻量化程度的一个重要参数，可以表示为：

$$\eta = (W_0 - W) / W_0 \times 100\% \quad (7)$$

式中 W 为轻量化主镜的重量， W_0 为未经轻量化的重量。

表 1 轻量化结构的面形变化

Tab.1 Surface figure deformation of two lightweight structures

结构	轻量化率	α	PV (nm)	RMS (nm)	MAX (nm)
结构 (a)	50.4%	0°	46.8	8.02	32.4
		90°	47.8	6.83	36.5
结构 (b)	46.4%	0°	67.4	7.66	55.7
		90°	68.2	8.26	53.8

对两种轻量化结构进行比较，比较结果如表 1 所示，可以看出轻量化结构 质量 17.78 kg，轻量化率 50.4%。有限元分析结果得到，光轴垂直时镜面 PV 值为 47.8 nm，RMS 值为 6.8 nm；光轴水平时镜面 PV 值为 46.8 nm，RMS 值为 8.0 nm，其轻量化率高于结构 (b)，且面形 PV 值和 RMS 值均小于结构 (b)，所以结构 (a) 的各项性能较好，满足设计要求。图 4、图 5 为结构 (a) 分别为 $\alpha = 90^\circ$ ， $\alpha = 0^\circ$ 时的变

形云图。表 2 列出结构 在不同镜面厚度下的面形变化。

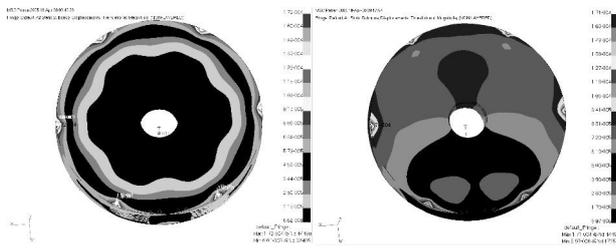


图 4 $\alpha=90^\circ$ 时结构的变形云图

图 5 $\alpha=0^\circ$ 时结构的变形云图

Fig.4 Deformation of primary mirror surface as $\alpha=90^\circ$ Fig.5 Deformation of primary mirror surface as $\alpha=0^\circ$

表 2 面形随镜面厚度的变化

Tab.2 Surface figure deformation vs. mirror thickness

镜面厚度	质量 (kg)	PV (nm)	RMS (nm)	MAX (nm)
5	14.9	57.4	9.4	39.3
10	16.3	62.9	9.3	44.8
15	17.8	47.8	6.8	36.5
20	19.2	48.5	7.5	36.1
25	20.7	34.7	6.5	22.4

从表 2 可以看出随着镜面厚度的变化,镜面的变形也发生变化,在镜面厚度大约为 10 mm 时达到一个极值,当镜面厚度大于 10 mm,随着镜面厚度的增加,PV 值和 RMS 值总体呈现逐渐减少的趋势。

5 结论

通过上面的有限元分析可以得到如下结论:

(1) 通过对实体镜进行分析可得,当 α 变化时,PV 值和 RMS 值的总体变化趋势是随着 α 角的增大而减小的,并且当 α 大约为 -10° 时达到最大

值。

(2) 对两种轻量化结构进行分析可得,轻量化结构 质量 17.78 kg,轻量化率 50.4%。有限元分析结果得到,光轴垂直时镜面 PV 值为 47.8 nm,RMS 值为 6.8 nm;光轴水平时镜面 PV 值为 46.8 nm,RMS 值为 8.0 nm,性能均好于结构 ,符合设计要求。

(3) 研究分析了镜面厚度变化对镜面面形的影响,得到当镜面厚度 >10 mm,随着镜面厚度的增加,PV 值和 RMS 值总体呈现逐渐减少的趋势。

本文没有考虑经纬仪工作状态下热环境变化、温度梯度及其他光机热工况对主镜镜面面形精度的影响,在以后的研究工作中将进一步考虑。

参考文献

- [1] 赵贤森.经纬仪[M].北京:中国计量出版社,2002.
- [2] 吴清文.空间相机中主镜的轻量化技术及其应用[J].光学精密工程,1997,5(6):69-80.
- [3] 国绍文,王武义,张广玉,等.空间光学系统反射镜轻量化技术综述[J].光学仪器,2005,27(4):78-82.
- [4] 黄启泰.轻量化碳化硅反射镜支撑方案分析[D].苏州大学硕士学位论文,2004.
- [5] 郭喜庆,王悦勇.大口径反射镜几种轻量孔结构形式的分析[J].光学精密工程,2000,8(6):518-521.
- [6] 吴清文.空间相机主镜的力学、温度场特性及轻量化研究[D].中国科学院长春光机所博士论文,1997.
- [7] 张舸,赵文兴.轻型反射镜镜体结构参数的分析[J].光学精密工程,2006,14(1):48-53.
- [8] Barnes W P. Optimal Design of Cored Mirror Structures [J]. Applied Optics, 1969, 8(6):1191-1196.
- [9] Barnes W P. Hexagonal vs. Triangular Core Lightweight Mirror Structures [J]. Applied Optics, 1972, 11(12):2748-2751.
- [10] Richard R M, Malvick A J. Elastic Deformation of Lightweight Mirrors [J]. Applied Optics, 1973, 12(6):1220-1226.