

文章编号 1004-924X(2013)12-3111-07

大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计

伞晓刚^{1,2*}, 孙 宁¹, 卓仁善¹, 乔彦峰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:针对大口径光电经纬仪主镜的支撑结构对主镜面形精度的影响, 对大口径光电经纬仪的 $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ 主镜的支撑结构进行了研究。分析了现有轴向和径向支撑结构的局限性, 提出了适用于大口径主镜的新的轴向和径向支撑结构, 并阐述了该支撑结构的工作原理和优势。利用有限元分析软件建立了主镜的参数化模型, 优化了主镜轴向支撑点和径向支撑点的位置, 并分析了主镜光轴在竖直和水平位置两个极限状态下的面形误差, 计算得到了主镜在竖直状态下面形误差 RMS 值为 2.52 nm; 在水平状态下面形误差 RMS 值为 4.33 nm。对主镜进行装调后, 用光学干涉仪检测得到主镜光轴水平时面形精度 RMS 值为 19.87 nm。仿真分析结果和实物检测结果都满足设计指标中面形误差 RMS 值小于 $\lambda/30$ 的要求 ($\lambda=632.8\ \text{nm}$), 验证了轴向和径向支撑结构的可行性。

关键词:大口径光电经纬仪; 主镜; 支撑结构; 面形精度

中图分类号: TH743; V556 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3111

Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite

SAN Xiao-gang^{1,2*}, SUN Ning¹, ZHUO Ren-shan¹, QIAO Yan-feng¹

(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: nersan@gmail.com*

Abstract: In consideration of the effect of support structure for the primary mirror of a large aperture theodolite on the surface figure precision of the primary mirror, the support structure of a $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ primary mirror was explored. The disadvantages of existing axial and radial supporting structures were analyzed and a new axial and radial complex supporting structure for large aperture primary mirror was presented. Then, the performing principle and the advantages of the supporting structure were discussed. A parameter model of primary mirror was built based on the finite element analysis software, the axial and the radial supporting positions were optimized and the surface figure errors of the optical axis for the mirror in vertical and in level orientations were analyzed. Obtained results show that the surface figure precisions are 2.52 nm and 4.33 nm in RMS values as the mirror's optical axis in vertical and level orientations, respectively. After alignment, the primary mirror is tested in its optical axis is in level orientation

收稿日期: 2013-08-01; 修订日期: 2013-09-20.

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (No. 1040603)

by an optical interferometer, and the mirror's RMS value is 19.87 nm in the measurement. The results fully satisfy the precision requirement of RMS value less than $\lambda/30$ ($\lambda=632.8\text{nm}$), which proves the feasibility of the axial and radial supporting structure mentioned above.

Key words: large aperture theodolite; primary mirror; supporting structure; surface figure precision

1 引言

现代靶场的建设要求地基光电经纬仪的探测能力和观测分辨力不断提高,导致光电经纬仪向大口径方向发展。主反射镜(以下简称主镜)作为光电经纬仪主光学系统中的关键元件,其面形精度直接影响经纬仪的成像质量^[1]。而影响主镜面形精度的因素除了主镜镜面的加工误差、自重、热变形外,主镜支撑结构的优劣起着决定性的作用。大口径主镜的支撑通常包括径向支撑和轴向支撑两部分。主镜轴向支撑大多采用 Whiffle-tree 结构^[2-5],国内外学者研究的焦点主要集中在支撑点位置的计算方法上,对轴向支撑结构本身改进不大。目前常用的主镜径向支撑方式都是在主镜外圆柱面上按一定规则施加支撑力,由于施力位置不均匀,容易造成主镜工作面靠近外圆柱面的部分存在应力集中,支撑效果欠佳。

本文以某大型光电经纬仪的 $\Phi 1\,000\text{ mm}$ 主镜为研究对象,借助有限元法和优化设计理论对其轴向和径向支撑结构进行了详细研究,提出了改进的大口径主镜径向和轴向复合支撑结构方案。分析计算了主镜光轴在水平和竖直两种典型工作状态下的镜面变形误差,验证了主镜复合支撑结构的合理性。

2 主镜参数及支撑要求

由于主镜口径很大,主镜面形精度容易受到自重和温度变化等因素的影响,因此多选用高刚度、高强度且膨胀系数很低的微晶玻璃(Zerodur)作为大口径经纬仪主镜的材料。

主镜外形尺寸如图 1 所示,质量约为 250 kg。主镜的反射面是抛物面,曲面方程为 $y^2=7\,500 \cdot x$ 。主镜工作的俯仰角度为 $-5^\circ \sim 185^\circ$ (主镜光轴处于水平状态时定义为 0°)。

对主镜的面形精度要求是:加工后的面形精度 RMS 值小于 $\lambda/40$ (检测波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$),

支撑后工作状态下要求主镜面形精度 RMS 值小于 $\lambda/30$ 。

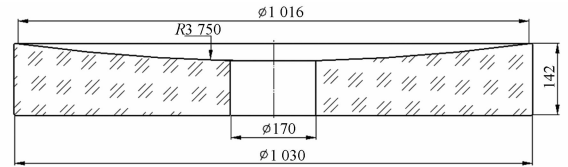


图 1 主镜外形尺寸

Fig. 1 Shape parameter of primary mirror

3 主镜复合支撑方案

由于主镜面形精度对光学系统的成像质量至关重要,所以需要设计一套合理的主镜支撑系统,该支撑系统既能有效地带动主镜完成需要的方位与俯仰角度运动,又能抵消主镜自身重力对面形的不利影响,保证稳定的主镜面形精度。

中小口径光电经纬仪的主镜大多采用在中心孔处用芯轴支撑的结构形式,但这种支撑方式仅适用于口径小于 800 mm 的主镜^[6],800 mm 以上的大口径主镜必须采用轴向和径向支撑相结合的复合支撑方案才能获得良好的主镜面形精度。同时,为了避免经纬仪其他结构的振动与变形等传递到主镜上,支撑系统不能采用刚性支撑结构,而是采用浮动支撑方式,如杠杆平衡重锤系统、气压支撑系统或者液压支撑系统。

综上,本文的 $\Phi 1\,000\text{ mm}$ 主镜采用芯轴径向定位、Whiffle-tree 结构无定向轴向支撑和杠杆平衡重锤浮动径向支撑的复合支撑方案,如图 2 所示。这套主镜支撑系统包括芯轴组件、径向支撑组件、轴向支撑组件和防转组件。芯轴组件的作用是对主镜进行精确的中心定位,具有较大的抗弯刚度,可和径向支撑组件一起限制主镜的径向位移,而对主镜的轴向位移没有限制作用。防转组件用来防止主镜绕轴向的意外旋转。本文的研究重点是大口径主镜的轴向和径向支撑结构设计。

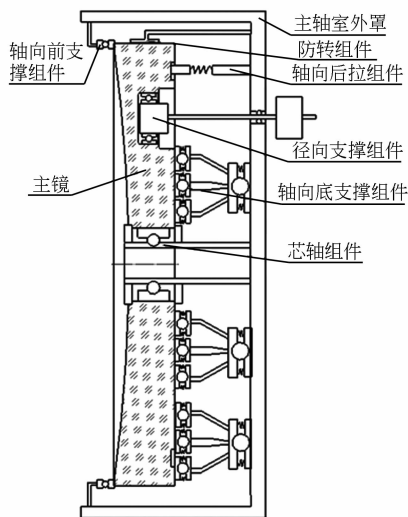


图 2 主镜复合支撑示意图

Fig. 2 Sketch map of supporting system for primary mirror

3.1 主镜轴向支撑结构设计

主镜轴向支撑的作用是限制主镜的轴向位移,并保持良好的主镜面形精度。由于主镜工作角度为 $-5\sim 185^\circ$,需要从主镜两种不同的工作状态入手设计轴向支撑结构。

(1)当主镜工作在 $-5\sim 0^\circ$ 和 $180\sim 185^\circ$ 的状态时,主镜在重力作用下有向背离主镜平背面方向运动的趋势,这时需要对其进行轴向支撑,克服主镜重力在轴向的分力。

目前常用的轴向前支撑结构如图 3 所示,该结构作用在主镜前表面外边缘,沿圆周均布若干部组。轴座和调节杆顶端是球铰连接,能始终提供轴向的支撑力,支撑力的大小通过调节杆来调整。这种支撑方式简单可靠,但弊端是施力位置紧邻主镜的反射工作面,应力集中很容易传导到反射面上从而影响主镜面形精度。

为了解决上述问题,采用在主镜的平背面施加与主镜重力轴向分力方向相反的拉力来提供轴向支撑,如图 4 所示。粘座与主镜背部盲孔胶结在一起,通过旋转螺母可以调整拉簧的拉力大小。装调该结构时,用弹簧秤拉调节杆的末端,当弹簧秤显示合适的拉力时,旋紧锁紧螺母,对主镜持续提供后拉支撑力。

主镜在 $-5\sim 0^\circ$ 和 $180\sim 185^\circ$ 的最大偏角是 5° ,这时主镜重力在轴向的分力 $F=250\text{ kg}\cdot 9.8\text{ N/kg}\cdot \sin 5^\circ=213.5\text{ N}$,图 4 结构 2 个为一组,圆周均布 6 组,这样每个拉簧需要提供的最小拉力

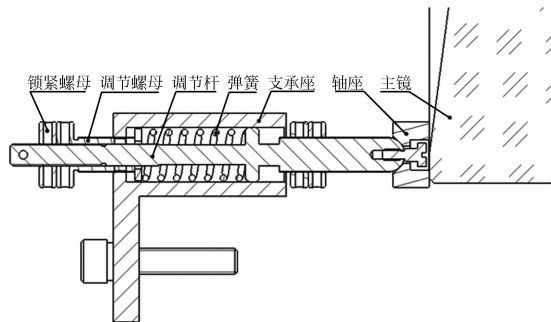


图 3 轴向前支撑结构

Fig. 3 Axial front supporting structure

$F_{\min}=213.5\text{ N}/12=17.8\text{ N}$ 。考虑到经纬仪工作时主镜在旋转运动状态下的安全性,设置 $F=30\text{ N}$ 。

由于大口径主镜厚度较大,采用在主镜平背面施加轴向作用力的方式可以降低应力集中对主镜面形精度的影响程度。

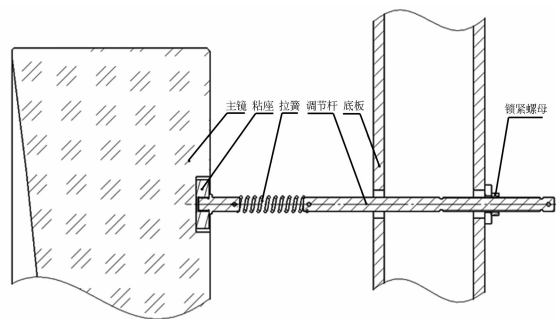


图 4 轴向后拉结构

Fig. 4 Axial pull-back supporting structure

图 3 所示的传统轴向前支撑结构也保留在本文的轴向支撑方案中,但通过调整调节杆的位置使该机构对主镜施加不大于 5 N 的轴向支撑力,即它不作为主要的轴向支撑结构,而是只在其他结构失效的情况下起保护主镜的作用。

(2)当主镜工作在 $0\sim 180^\circ$ 状态时,主镜在重力作用下有向主镜平背面方向运动的趋势,此时采用经典的 Whiffle-tree 无定向三角板支撑结构。这种结构有两个要素:支撑点的数量和位置。显然,主镜光轴竖直向上时轴向支撑引起的面形误差最大,故以这个位置研究主镜的轴向支撑结构。

主镜轴向最少支撑点数的判定准则^[3]:

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

其中: D 为主镜直径; E 为主镜材料的弹性模量; δ 为允许的最大镜面面形误差 RMS 值; ρ 为材料密度; t 为主镜厚度。

由式(1)可得最少的轴向支撑点数为 4。考虑到支撑结构的可靠性和 Whiffle-tree 的结构特点,主镜轴向支撑采用如图 5 所示的 18_6^{12} 布局方式。这 18 个支撑点处都采用外径为 80 mm、内径为 62 mm 的圆环形支撑垫,且支撑垫与主镜之间并不固连。

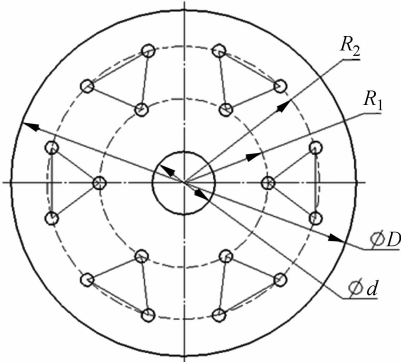


图 5 轴向支撑点布局方式

Fig. 5 Configuration of axial supporting points

轴向支撑点分布的内圈半径 R_1 和外圈半径 R_2 的确定方法有:

(1)质量均分法^[7]。根据选定的支撑点数目,对主镜通过体积(面积)比例近似划分来模拟镜子质量的划分,从而找出分块镜子的质心作为轴向支撑点;

(2)经验公式法^[3, 8]。基于一些设计实践总结出的支撑点内、外圈半径与主镜中心孔直径、主镜外圆直径之间的近似定量关系;

(3)有限元分析法^[9-10]。建立轴向支撑点优化数学模型,应用 ANSYS 优化分析模块进行优化设计获得轴向支撑点位置;

采用第三种方法对主镜轴向支撑位置进行优化。首先建立主镜的参数化模型,用四面体单元划分网格,在 18 点支撑的位置添加 6 个自由度的全约束。优化目标函数为主镜工作面变形最小,设计变量为轴向支撑点分布的内圈半径 R_1 和外圈半径 R_2 ,约束条件为 R_1 、 R_2 的取值范围和主镜材料的许用应力。轴向支撑优化的数学模型为:

$$\text{Find: } R_1, R_2$$

$$\text{Minimize: } f = f(R_1, R_2)$$

$$\text{Subject to: } 0 < \frac{d}{2} + \frac{80}{2} \leq R_1 \leq \frac{D}{2} - \frac{80}{2}$$

$$0 < \frac{d}{2} + \frac{80}{2} \leq R_2 \leq \frac{D}{2} - \frac{80}{2}$$

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad (2)$$

其中: σ_{\max} 是主镜最大应力, $[\sigma]$ 是主镜材料许用应力, d 与 D 分别是主镜的中心孔直径和最大外圆直径。

用 ANSYS 优化分析模块对上述模型求解,得到最佳支撑点位置为 $R_1 = 225.2 \text{ mm}$, $R_2 = 439.7 \text{ mm}$ 。

在上述两种轴向支撑结构的综合作用下,用有限元软件 patran&nastran 分析主镜的变形情况,结果如图 6 所示。主镜面形精度 $\text{RMS} = 2.52 \text{ nm}$ 。

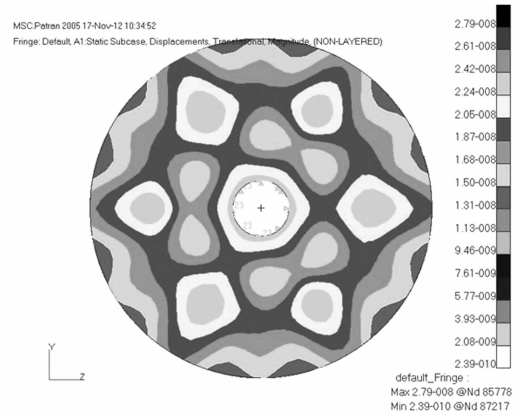


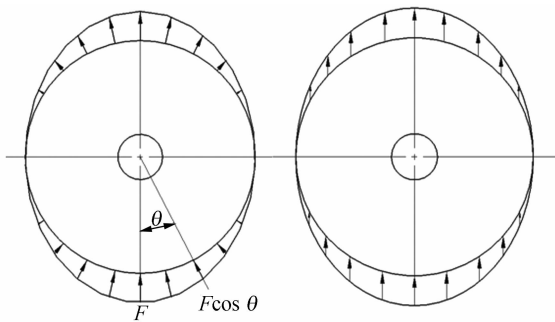
图 6 轴向支撑后主镜变形云图

Fig. 6 Mirror deformation after axial support

3.2 主镜径向支撑结构设计

主镜径向支撑的作用是限制主镜的径向位移,并保持良好的主镜面形精度。径向支撑结构要求^[11]是径向支撑力的合力通过主镜的重心,以避免对主镜产生额外的扭矩;主镜在任何角度,径向支撑力都可以平衡其重量。

大口径主镜目前常用的径向支撑方式是外边缘支撑法,如推拉支撑、水银带支撑、吊带支撑等。推拉支撑是离散点施力方式,通过杠杆配以重锤平衡主镜的重量。图 7 所示为两种推拉支撑的受力状况示意图。图 7(a)为径向余弦推拉支撑,图 7(b)为竖直均匀承重支撑,这两种支撑方式都是在主镜外圆柱面施加离散支撑力,且施力位置距离主镜工作面很近,易产生应力集中,影响主镜面形精度,也会降低支撑后的面形重复精度。



(a) 径向余弦推拉支撑 (b) 竖直均匀承重支撑
 (a) Radial supports with cosine push-pun forces (b) Vertical supports with uniform bearing forces

图 7 径向推拉支撑力分布图

Fig. 7 Distribution of the radial supporting force

为了避免在主镜工作面附近施加径向力,采用在主镜平背面开盲孔并施加径向支撑力的结构。主镜平背面沿圆周均布 3 个盲孔,3 组杠杆平衡配重机构作用在盲孔的内圆柱面上提供径向支撑力。杠杆平衡配重机构的结构如图 8 所示。支座固定在底板上,通过调心球轴承支承配重杆,使配重杆可在小范围内转动,消除与主镜背部安装孔的不同轴度误差。配重箱通过配重杆及调心球轴承、钢球和套、胀套支承主镜。胀套粘在主镜盲孔内,可与主镜通过保持架内钢球沿配重杆轴向移动,消除轴向安装误差。

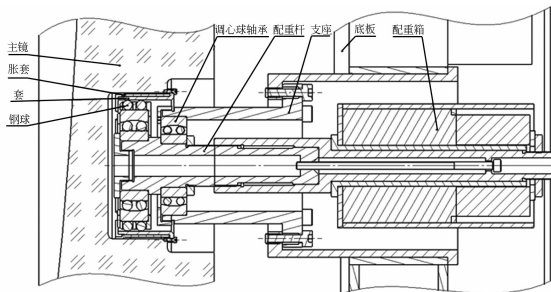


图 8 径向支撑组件结构图

Fig. 8 Structure of radial supporting structure

根据结构需要,盲孔直径为 118 mm。建立主镜参数化模型,对 3 个盲孔的分布半径进行优化分析,得到主镜变形和盲孔分布半径的关系曲线如图 9 所示,于是得到最佳盲孔分布位置是 $R_m = 302$ mm。

借助于有限元分析软件 patran&nastran,主镜光轴处于水平位置时在 3 个盲孔处添加径向约束,分析其在自重作用下的镜面变形情况,计算出

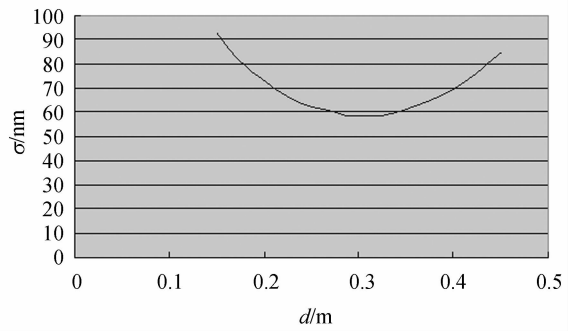


图 9 主镜变形与盲孔位置的关系曲线

Fig. 9 Relation between mirror deformation and blind-hole's position

其镜面变形误差 RMS 值为 4.33 nm。其镜面变形如图 10 所示。

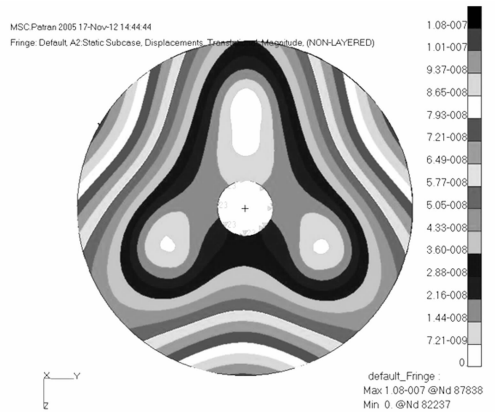


图 10 径向支撑后主镜变形云图

Fig. 10 Mirror deformation after radial support

4 主镜装调与检测结果

装调内容包括主镜定位芯轴的调整、轴向支撑和径向支撑的调整、主镜和主镜室之间的同心与共轴的调整等。

装调完成后,对主镜的最终状态进行检测。由于条件限制,只能在主镜光轴水平状态时进行检测。采用 4D 干涉仪对主镜工作面的面形精度进行检测,检测结果如图 11 所示。主镜面形精度 $PV = 259.4$ nm, $RMS = 19.87$ nm = $\lambda / 31.8$, 满足主镜对支撑系统的设计指标要求。从检测结果可以看出,像散数值很小,可以认为除了很小的高阶残余像差外,主镜面形达到了很高的精度。在反复的正镜、倒镜检测过程中,主镜检测结果保持了

很好的重复精度,证明了支撑系统的可靠性和稳定性。

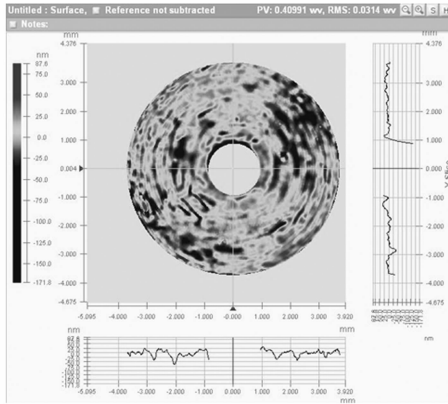


图 11 主镜的干涉仪检测结果

Fig. 11 Primary mirror's measuring results offered by optical interferometer

5 结 论

本文对大口径光电经纬仪的 $\Phi 1\ 000\ \text{mm}$ 主

参考文献:

- [1] 易明, 王晓, 王龙. 美军光电对抗技术、装备现状与发展趋势初探[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 601-607.
YI M, WANG X, WANG L. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5):601-607. (in Chinese)
- [2] 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, 2003: 61-68, 84-93.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design*[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003: 61-68, 84-93. (in Chinese)
- [3] YODER J R, PAUL R. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1993: 407-470.
- [4] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. New York: Springer-Verlag Inc, 2003: 219-223.
- [5] 王富国, 杨文波, 赵文兴, 等. 1.2m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1): 85-91.
WANG F G, YANG W B, ZHAO W X, et al.. Light-weight design and analysis of a 1.2 m SiC pri-

镜的支撑结构进行了研究,分析了现有支撑结构的局限性,有针对性地提出了新的大口径主镜复合支撑方案。提出了 Whiffle-tree 无定向三角板轴向支撑和轴向后拉支撑相结合的结构方案,并对轴向支撑位置进行了优化设计。提出了作用于主镜平背面盲孔内的杠杆平衡配重支撑机构,通过优化分析得到了最佳的径向支撑位置。

利用有限元分析软件对上述主镜支撑结构进行了分析计算,得到当主镜光轴竖直时,面形精度 $\text{RMS}=2.52\ \text{nm}$; 主镜光轴水平时,面形精度 $\text{RMS}=4.33\ \text{nm}$; 主镜完成加工与装调后面形精度 $\text{RMS}=19.87\ \text{nm}$, 这个结果是主镜加工误差、装调误差、检测误差等相互耦合与叠加的结果,代表了主镜的最终工作状态。

仿真分析与实物检测结果证明了所提出的主镜复合支撑方案满足设计指标要求的主镜面形精度 RMS 小于 $\lambda/30$ 的要求,且支撑结构可靠,性能稳定。

- mary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 85-91. (in Chinese)
- [6] 张东阁. 主镜及其支撑系统的设计研究[D]. 北京: 中国科学院, 2010.
ZHANG D G. *Study on Primary Mirror and Its Supporting System*[D]. Beijing: Sciences Academy of China, 2010. (in Chinese)
- [7] LUC A. Optimized axial support topologies for thin telescope mirrors [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(2):567-574.
- [8] 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. Supporting structure design for primary mirror of large aperture space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1642-1647. (in Chinese)
- [9] 吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面主镜支撑系统优化设计[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 129-132.
WU X X, YANG H B, ZHANG J X, et al.. Optimal design of support system for the large aperture sphere mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1):129-132. (in Chinese)
- [10] 王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向支撑

点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 877-880.

WANG F G, YANG H B, YANG F, *et al.*. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors[J]. *Infra-*

red and Laser Engineering, 2007, 36(6): 877-880. (in Chinese)

[11] MYUNG K C. Optimization strategy of axial and lateral supports for large primary mirrors [C]. *SPIE*, 1994, 2119: 841-851.

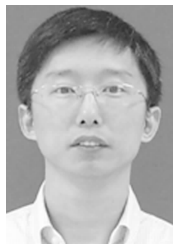
作者简介:



伞晓刚(1982—),男,辽宁铁岭人,博士研究生,2006年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2008年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事光电测量设备结构设计方面的研究。E-mail: nerdsan@gmail.com



卓仁善(1960—),女,吉林人,研究员,毕业于东北工学院,主要从事光学精密仪器设计方面的研究。Email: zhuorenshan@sina.com



孙宁(1974—),男,吉林辽源人,副研究员,1995年于浙江大学获得学士学位,2003年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事主镜支撑系统研究。E-mail: nicolas1974@sina.com



乔彦峰(1962—),男,吉林长春人,研究员,1985年于南京工学院获学士学位,主要从事光电测控技术方面的研究。Email: qiaoyf@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)