

文章编号 1004-924X(2012)10-2207-07

大口径轻量化主镜边缘侧向支撑的优化设计

范磊^{1,2}, 张景旭¹, 吴小霞¹, 王富国¹, 陈夫林^{1,2}, 杨洪波^{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: 对大口径主镜的侧向支撑结构进行了优化, 以便最大限度地降低重力作用下的镜面变形。首先, 从理论上给出了一种优化主镜边缘侧支撑结构的判据和思路, 然后, 引入边缘切向剪切侧支撑原理, 阐述了这种支撑形式的优化思想和优势。以口径为 2060 mm 的扇形轻量化主镜作为分析实例, 采用 16 个边缘离散支撑点, 优化设计等角间距侧向支撑, 并针对轻量化主镜的结构特点和等角间距支撑下支撑力值相差较大的缺点, 将等角间距改为不等角间距侧向支撑, 分析推导了相应的支撑力公式。结果显示, 改进后的支撑形式提高了系统的支撑刚度, 镜面变形由原来的 1.723 nm 降为 1.633 nm。所研究的边缘切向剪切支撑方式很大程度上保证了主镜镜面面形, 对不同口径的扇形孔轻量化主镜的设计有普适性。

关键词: 光学设计; 大口径主镜; 轻量化主镜; 侧向支撑; 优化设计

中图分类号: TH751; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2207

Optimum design of edge-lateral support for large-aperture lightweight primary mirror

FAN Lei^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹, WU Xiao-xia¹,
WANG Fu-guo¹, CHEN Fu-lin^{1,2}, YANG Hong-bo^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China 100039*)

* *Corresponding author, E-mail: yanghb@ciomp.ac.cn*

Abstract: The lateral support structure of a large aperture primary mirror was researched and optimized to effectively reduce the deformation of the primary mirror under the gravity. First, an idea and criterion to optimize the edge-lateral support structure was provided theoretically. Then, on the basis of the tangential shearing support principle, the optimization procedure of the support structure and its merit were explained. Based on the principle, a lightweight mirror with a diameter of 2 060 mm was taken as an example, and an equal-angle lateral support was optimized by using 16 discrete points. According to the characteristic of the lightweight mirror, the original supporting structure was improved to be the no-equal-angle lateral support to avoid the disadvantage that the gap between the support forces was large in previous structure. The results indicate that the supporting stiffness of the

收稿日期: 2012-06-17; 修订日期: 2012-08-03.

基金项目: 中科院长春光学精密机械与物理研究所第三期创新工程专项资金资助项目

system has been enhanced and the mirror deformation is reduced from 1.723 nm to 1.633 nm. It concludes that the edge tangential shearing support structure which is fit to the lightweight mirror with sector hole can keep the mirror surface figure to a large extent. So this method provides a new option for the lateral support of large-aperture lightweight mirror.

Key words: optical design; large aperture primary mirror; lightweight primary mirror; lateral support; optimum design

1 引言

随着地基光电望远镜口径不断增大,主镜及其支撑系统的重量也越来越大,为了降低系统的重量与成本,大口径望远镜主镜普遍采用轻量化结构形式^[1]。为保证主镜在重力作用下的面形精度,必须合理设计主镜支撑系统。一般情况下,支撑系统由轴向支撑和侧向支撑两部分组成^[2],当光轴随俯仰角变化时,轴向支撑和侧向支撑共同承担主镜重量。但当光轴指向水平时,侧向支撑承担了主镜的全部重量,对面形精度的保持起主要作用。传统的主镜侧向支撑一般有钢带支撑、水银袋支撑、径向余弦推拉支撑、竖直推拉支撑等^[3],且一般以过镜体质心面的边缘支撑居多^[2-5,8-9]。而对于轻量化主镜来说,由于轻量化结构的多样性与复杂性,相应的侧向支撑形式也较为复杂。一般口径相对较小的轻量化主镜采用边缘侧向支撑形式,更大口径的主镜则根据自身系统的特点,其侧向支撑形式呈现出多样化^[5]。国外,梵蒂冈尖端技术望远镜(VATT)主镜(1.83 m)为半封闭式轻量化结构,其侧向支撑采用边缘竖直推拉形式^[4];Hale望远镜主镜(5.08 m)为背部开放式轻量化结构,侧向支撑采用过质心面的轴向侧向组合式竖直推拉支撑形式^[5];大型双筒望远镜(LBT)主镜(8.4 m)为背部半封闭式轻量化结构,侧向支撑设计在镜体背板上,采用斜向推拉主动支撑形式^[6]。

半封闭式轻量化主镜结构刚度好,是轻量化主镜的首选^[1]。本文从镜面变形与应力分析入手,引入新的边缘切向剪切支撑原理,并运用该原理,以口径为 2 060 mm 的扇形孔轻量化主镜为设计实例,对其侧向支撑进行了详细的理论分析与优化设计,获得了很好的面形结果,为大口径轻量化主镜的侧向支撑提供了一种很好的设计、优化方法。

2 镜面应力与面形的关系

镜面变形量的大小是衡量主镜支撑结构的一个重要标准。而侧向支撑所引起的最大镜面变形发生在望远镜指向水平方向时,分析了此时镜面变形与内部应力之间的关系。

设侧向支撑力过主镜质心面,其应力分布如图 1 所示。在这一位置上,光轴方向的变形分量是影响主镜面形精度的主要因素。在重力与侧向支撑力的相互作用下,镜体将产生泊松效应,进而主镜在 Z 向(光轴方向)的应变分量为^[3]:

$$\epsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y), \quad (1)$$

式中: ν 为泊松比; E 为主镜的弹性模量; σ_x 和 σ_y 分别是 X 轴和 Y 轴方向上的应力。

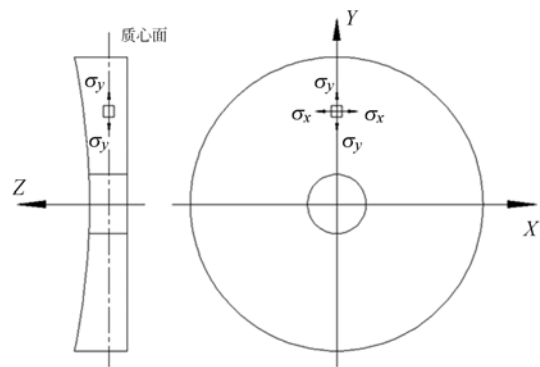
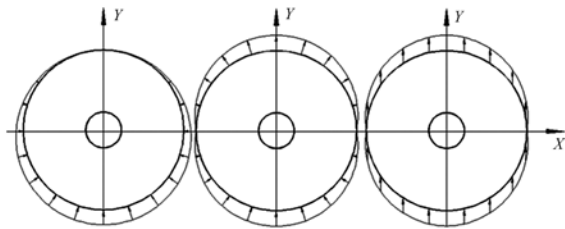


图 1 光轴水平时主镜应力分布图

Fig. 1 Stress distribution when optical axis points horizon

当主镜材料一定时,主镜 Z 向(光轴方向)的变形取决于 σ_x 和 σ_y 的大小与方向。因此,作为一个理论判据,当 $\sigma_x = -\sigma_y$ 时, $\epsilon_z = 0$ 。即当侧向支撑对主镜产生的应力在 X 轴和 Y 轴方向相反时,主镜在重力作用下,镜面在光轴方向变形最小。图 2 所示为 3 种典型的边缘侧向支撑形式,分别为水银袋支撑、径向余弦推拉支撑和竖直推拉支撑。



(a)水银袋 (b)径向余弦推拉 (c)竖直推拉
(a) Mercury bag (b) Radial cosine push-pull (c) Vertical push-pull

图 2 经典边缘侧向支撑形式

Fig. 2 Classical edge lateral support structures

根据公式(1),比较上述 3 种边缘侧向支撑形式,其中竖直推拉支撑 $\sigma_x=0$,导致的镜面 Z 向变形最小^[3]。但很明显,该侧向支撑还不是最佳支撑形式。

3 边缘切向剪切侧支撑原理

根据上面对镜面应变与应力的分析可知,竖直推拉支撑下的镜面变形较小,但与理想的侧支撑形式还相差甚远,最好的支撑结构应尽量满足镜面应力分量 σ_x 和 σ_y 大小相等、方向相反。但实际设计中却很难给出支撑力与两者之间的定量关系。为此,G. Schwesinger 从另一个角度出发,提出了边缘切向剪切侧支撑原理,且成功应用于 VLT 望远镜主镜侧向支撑^[7]。

当光轴水平时,设主镜边缘侧支撑力连续分布,将支撑力分别沿切向和径向分解,引入核心参数 β 为所有切向分力对重力支撑贡献的比值。则有:

$$\beta = \frac{\int_0^{2\pi} P_{tv}(\theta) d\theta}{G} = \frac{P_t}{P_t + P_r}, \quad (2)$$

式中: $P_{tv}(\theta)$ 为边缘侧支撑力的切向分力沿重力方向的分量, G 为主镜总重, P_t 为所有切向分量沿重力方向的分力的合力, P_r 为所有径向分量沿重力方向分力的合力。

主镜支撑的受力分析如图 3 所示,由于 $\int_0^{2\pi} [P_{t\theta}(\theta) \cdot \cos(\theta) + P_{r\theta}(\theta) \cdot \sin(\theta)] d\theta = G$, 则设边缘切向分力 $P_{t\theta} = \frac{P_t \cdot \cos \theta}{\pi}$, 边缘径向分力 $P_{r\theta} = \frac{P_r \cdot \sin \theta}{\pi}$, 其合力 P_θ 就可以表示为参数 β

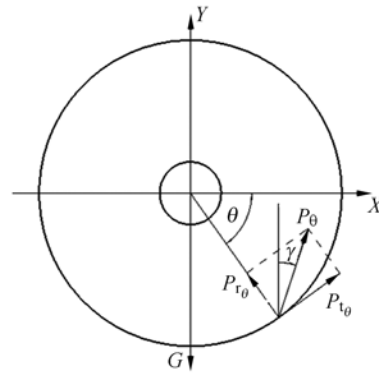


图 3 主镜边缘支撑力分析图

Fig. 3 Edge support force of primary mirror

和 θ 的函数:

$$P_\theta = \frac{P_r}{\pi(1-\beta)} \sqrt{(1-2\beta)\sin^2 \theta + \beta^2}, \quad (3)$$

对应的竖直面夹角 γ 为:

$$\tan \gamma = \frac{2\beta-1}{(1-\beta)\tan \theta + \beta \cot \theta}. \quad (4)$$

由上式惊奇的发现:

当 $\beta=0$ 时,边缘支撑形式为径向力支撑,如图 2(b)所示, $P_\theta = \frac{P_r \sin \theta}{\pi}$, $\gamma = 90^\circ + \theta$ 。

当 $\beta=1$ 时,边缘支撑力全部是切向力支撑, $\gamma = \theta$ 。

当 $\beta=0.5$ 时, $P_\theta = P_r/\pi$, $\gamma=0$ 。此时支撑形式为竖直推拉支撑,如图 2(c)所示。

综上所述,公式(3)建立了侧向支撑力和参数 β 的关系;公式(4)反映了不同的 β 值对应不同的侧向支撑形式。在侧向支撑力的方向随 β 的变化过程中,参数 β 间接反映了支撑力与镜面应力 σ_x 和 σ_y 的关系,构建了两者的某种传递关系,从理论上给出了一种优化侧向支撑的可能。因此,根据上面的分析可以推知,在 $[0,1]$ 区间,可以通过优化参数 β 来实现边缘侧向支撑的优化。

4 轻量化主镜的侧向支撑力优化

参考国内外大口径望远镜的发展历程,根据实际工作需要,选用一块口径为 2 060 mm 的扇形轻量化主镜作为分析实例。一般情况下,对于 2 m 级口径的轻量化主镜来说,采用传统的侧向支撑结构完全可以满足镜面面形要求。但是,本文重点在于探究该 2 m 级主镜作为 4 m 口径主

镜的缩比实验镜,能否采用切向剪切侧支撑原理来优化侧支撑形式,能否从理论上验证这种方法的优越性,从而为 4 m 乃至更大口径轻量化主镜的侧向支撑设计提供一种新的思路。

根据第三节对边缘切向剪切侧支撑原理的分析,为了追求较高的镜面面形精度,对轻量化主镜侧向支撑进行优化设计,其关键在于合理运用切向剪切原理以及优化参数 β 。

表 1 主镜基本参数表

Tab.1 Parameters for primary mirror

直径 /mm	中心孔直径 /mm	外边缘厚度 /mm	主镜重量 /N
2 060	400	190	4 417.44

参考文献[1]中,主镜材料选用新一代光学材料 SiC,轴向支撑采用背部 36 点支撑,轻量化形式采用半封闭式,轻量化孔选用扇形孔,背部设计有工艺孔,内部筋板厚度均为 8 mm,上下面板与外边缘筋板厚为 10 mm。轻量化结构如图 4 所示,主镜基本参数如表 1 所示。

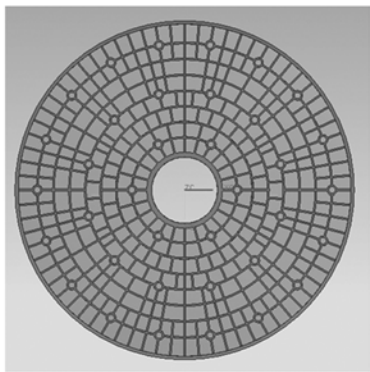


图 4 主镜轻量化结构

Fig. 4 Structure of lightweight primary mirror

4.1 等角间距支撑力的优化

边缘切向剪切原理中侧向支撑力在主镜外边缘上是连续分布的,但考虑到实际主镜的支撑结构,必须将其等价地离散成多点支撑。

综合考虑该主镜边缘支撑空间的大小,首先选取侧向支撑点数 $n=16$ (随着口径的增大,可相应增大支撑点个数,但必须保证为偶数),按照外边缘等角间距分布。根据边缘切向剪切原理,给出离散的等角间距支撑点的支撑力分量:

$$F_{t_i} = \beta \frac{2G}{n} \cos \left[\frac{2(i-1)\pi}{n} + \delta_i \right], \quad (5)$$

$$F_{r_i} = (1-\beta) \frac{2G}{n} \sin \left[\frac{2(i-1)\pi}{n} + \delta_i \right], \quad (6)$$

其中: F_{t_i} 为支撑点切向分力; F_{r_i} 为支撑点径向分力; G 为主镜重力; n 为支撑点数; 为避免支撑点落在坐标轴上,此处 $\delta_i = \pi/16$ 。

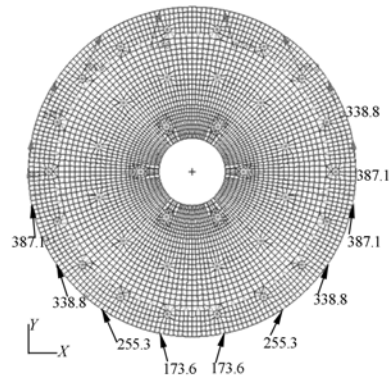


图 5 等角间距支撑力分布图

Fig. 5 Distribution of equal-angle support forces

借助有限元分析软件 ANSYS 对主镜进行有限元建模。根据主镜实际的边界载荷,施加约束如下^[5]:约束 36 个支撑垫的 Z 自由度(光轴方向);约束左右对称面的 X 自由度;约束落在 X 轴上的质心面节点的 Y 自由度。载荷施加如下:在模型的质心面上同时施加公式(5)和(6)的参数化等间距边缘侧支撑力,同时施加重力载荷。图 5 所示为对应侧向支撑力分布图。

设定参数 β 为优化变量,镜面变形的 RMS 值为目标函数。利用有限元软件 ANSYS 的优化模块 OPT,采用通用的零阶方法和一阶方法对模型优化,优化时为了避免所求得解是局部最小值而非全局最优解,在优化时采用了多组不同的初始值,最后获得优化结果为:当 $\beta=0.71$ 时,RMS 值最小为 1.723×10^{-6} mm。图 6 所示为变量 β 的优化迭代曲线,其中横坐标为 β 值,纵坐标为 RMS 值。表 2 列出了优化后位于第一象限支撑点的侧支撑力。

表 2 优化后第一象限支撑点的侧向支撑力分布

Tab.2 Distribution of supporting points in first quadrant(optimized)

支撑点 i	$\theta_i / (^\circ)$	F_{t_i} / N	F_{r_i} / N	F_i / N
1	11.25	385.869	30.971	387.1
2	33.75	327.124	88.198	338.8
3	56.25	218.577	131.997	255.3
4	78.75	76.754	155.701	173.6

由图 6 可以明显看出,镜面 RMS 值的变化随 β 值的改变很大,且在 $[0, 1]$ 区间存在最小值。同时看到,采用传统径向推拉支撑 ($\beta=0$) 和竖直推拉支撑 ($\beta=0.5$) 引起的镜面变形相对较大。

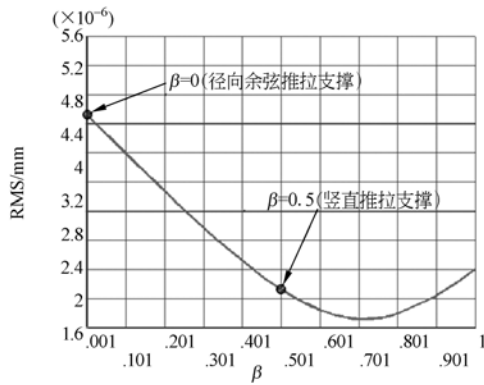


图 6 镜面 RMS 值的优化曲线

Fig. 6 Optimized figure of mirror RMS

4.2 不等间距支撑力的优化

由图 4 可以看出,该轻量化主镜内部的加强筋简单地分为径向筋和环形筋,等角间距的侧向支撑尽管结构分布形式简单,但仍然存在 2 个问题:

(1) 优化后的侧向支撑力大小相差较大,例如表 2 中支撑点 1 处的支撑力是支撑点 4 处的 2 倍多,这样会导致支撑力较大处的集中应力较大,对镜子自身的安全和镜面变形的保持不利。

(2) 按照等角度的设计要求,侧支撑点没有落在主镜径向筋与外边缘交汇处,从而会导致系统支撑刚度下降,镜面变形增大。

因此,为了减小支撑力的差距,同时使支撑点作用在径向筋方向,可以根据边缘切向剪切原理(见图 3),在不改变 $\beta=0.71$ 的前提下,对支撑力做一定的修改,其原理如图 7 所示,推导切向支撑分力与径向支撑分力分别为:

$$F_{t_i} = \int_{\theta_i - \delta_i}^{\theta_i + \delta_i} P_{t_\theta}(\theta) \cos(\theta - \theta_i) d\theta + \int_{\theta_i - \delta_i}^{\theta_i + \delta_i} P_{r_\theta}(\theta) \sin(\theta - \theta_i) d\theta, \quad (7)$$

$$F_{r_i} = \int_{\theta_i - \delta_i}^{\theta_i + \delta_i} P_{r_\theta}(\theta) \cos(\theta - \theta_i) d\theta - \int_{\theta_i - \delta_i}^{\theta_i + \delta_i} P_{t_\theta}(\theta) \sin(\theta - \theta_i) d\theta, \quad (8)$$

$$F_i = \sqrt{F_{t_i}^2 + F_{r_i}^2}, \quad (9)$$

其中:

$$P_{t_\theta}(\theta) = \beta \frac{G}{\pi} \cos \theta, \quad (10)$$

$$P_{r_\theta}(\theta) = (1 - \beta) \frac{G}{\pi} \sin \theta, \quad (11)$$

其中: θ_i 为支撑点对应的角度; δ_i 为支撑点两侧对称的积分角度; F_i 为支撑力合力; $P_{t_\theta}(\theta)$ 和 $P_{r_\theta}(\theta)$ 分别为积分区域内偏转角对应的切向分力和径向分力。特别的,当所有积分角度 δ_i 相等且等于 π/n 时,式(7)和(8)可简化为等角间距支撑力公式。

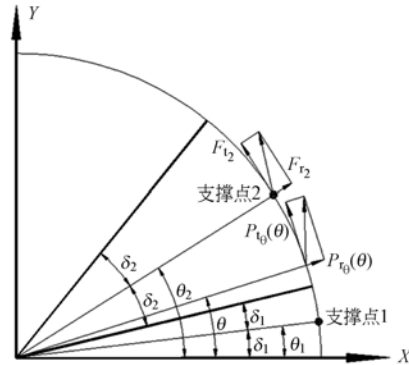


图 7 不等角间距支撑力计算原理图

Fig. 7 Principle of no-equal-angle support forces

由图 7 可以看出, $\sum_{i=1}^4 \delta_i = 45^\circ$ 。为了减小各支撑力 F_i 的差值,可以适当改变 θ_i 和积分角 δ_i 。由于轻量化主镜的径向筋分布间隔为 5° ,为了合理布置支撑点, θ_i 和 δ_i 都需要按照 5° 的倍数改变。经计算比较,在第一象限中 θ_i 的最佳取值分别为 $10, 30, 50$ 和 75° ; 对应 δ_i 分别取 $10, 10, 10$ 和 15° 。

表 3 所示为计算出的位于第一象限支撑点的侧向支撑力。将这些支撑力施加到原来的模型中,借助有限元分析软件 MSC. Nastran 分析计算,结果镜面的 RMS 值为 1.633×10^{-6} mm, 镜面变形趋势与前面的理论分析相符,加强了主镜的支撑刚度,降低了镜面变形量。其镜面载荷与变形云图如图 8 和图 9 所示。

表 3 计算出的第一象限支撑点的侧向支撑力分布
Tab. 3 Distribution of supporting points in first quadrant(calculated)

支撑点 i	$\theta_i / (^\circ)$	F_{t_i} / N	F_{r_i} / N	F_i / N
1	10	342.33	24.87	343.23
2	30	301.04	71.61	309.44
3	50	223.44	109.71	248.92
4	75	133.94	221.27	250.15

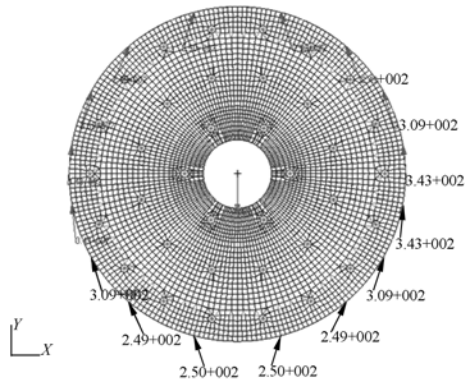


图 8 不等角间距支撑力分布图

Fig. 8 Distribution of no-equal-angle support forces

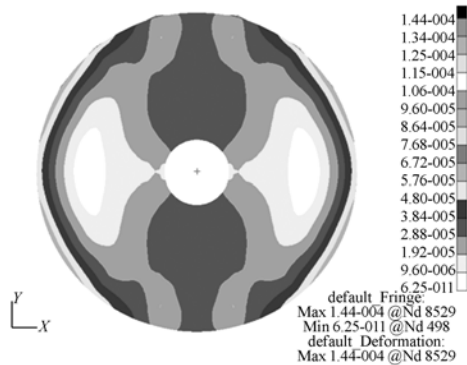


图 9 镜面变形云图

Fig. 9 Deformation nephogram of primary mirror

5 结 论

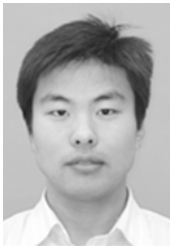
主镜光轴水平时,侧向支撑引起的主镜镜面变形最大。在这一工况下,根据主镜镜面变形的泊松效应,给出了一种以镜面面形最优为目标,寻求镜面应力 $\sigma_x = -\sigma_y$ 的侧向支撑优化思路;然后根据上述优化思路引入边缘切向剪切原理,提出通过优化参数 β 来寻找最优侧向支撑形式;并在边缘切向剪切原理的基础上,选取口径为 2 060 mm 的轻量化主镜作为优化实例,分析推导出一种适应于扇形孔轻量化主镜结构特点的不等角间距侧向支撑形式,最终优化计算结果为,当 $\beta = 0.71$ 时,镜面变形量最小为 1.633×10^{-6} mm,同时减小了支撑力值间的差距。该优化设计方法从原理分析到公式推导再到优化计算,对不同口径扇形轻量化主镜都具有一定的普遍适用性,为后续 4 m 乃至更大口径的主镜侧向支撑提供了一种新颖有效的设计方法。

参考文献:

- [1] 王富国,杨洪波,赵文兴,等. 1.2 m 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 H B, ZHAO W X, *et al.*. Lightweight design and analysis of 1.2 m SiC primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 85-91. (in Chinese)
- [2] 王洋,张景旭,杨飞. 大口径望远镜主镜支撑系统结构研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊): 31-33.
WANG Y, ZHANG J X, YANG F. Support structure of large-aperture telescope primary mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(supp): 31-33. (in Chinese)
- [3] 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.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [4] WEST S C, NAGEL R H, HARVEY D, *et al.*. Progress at vatican advanced technology telescope [J]. *SPIE*, 1997, 2871: 73-84.
- [5] PAUL R, YOUNDER. *Opto-mechanical System Design* [M]. Washington: CRC Press, 2006.
- [6] DAVID S A, JONATHAN K, JOHN M H, *et al.*. The large binocular telescope primary mirror support control system description and current performance results [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 4C1-12.
- [7] SCHWESINGER G. Lateral support of very large telescope mirrors by edge forces only [J]. *Journal of Modern Optics*, 1991, 38(8): 1507-1516.
- [8] 王洋,张景旭. 大口径望远镜主镜支撑优化分析[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 108-113.
WANG Y, ZHANG J X. Optimization and analysis for the support of the large aperture telescope primary mirror structure of large-aperture telescope primary mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(1): 108-113. (in Chinese)

- [9] 闫勇,贾继强,金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1534-1539.
YAN Y, JIA J Q, JIN G. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1534-1539. (in Chinese)
- [10] 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. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1642-1647. (in Chinese)
- [11] 崔向群. 采用主动光学的大口径单块薄镜面支撑系统[D]. 中科院南京紫金山天文台博士学位论文, 1995.
CUI X Q. *Support System of Large Aperture Thin Primary Mirror with Active Optics* [D]. Nanjing: Dissertation of doctoral degree, Nanjing observatory, Chinese Academy of Sciences, 1995. (in Chinese)

作者简介:



范磊(1986—),男,内蒙古凉城人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事光机电系统设计和仿真分析。E-mail: fanlei1995@sina.com



王富国(1979—),男,山东单县人,副研究员,主要从事光机系统设计与仿真。E-mail: wfg109@163.com



张景旭(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于北京邮电学院获得硕士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大型光电望远镜结构总体技术的研究。E-mail: Zhangjx@ciomp.ac.cn



陈夫林(1985—),男,山东泰安人,博士研究生,2006年于烟台大学获得学士学位,主要从事薄镜面主动支撑的研究。E-mail: ocean_fulin@hotmail.com



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理所研究获得博士学位,主要从事大口径薄镜面主动支撑系统设计,计算机辅助设计的研究。E-mail: Wu-xiaoxia@sohu.com



导师简介:

杨洪波(1963—)男,黑龙江龙江人,研究员,博士生导师,1985年于齐齐哈尔轻工学院获得学士学位,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要研究方向为光机电集成计算机仿真技术。E-mail: yang-hb@ciomp.ac.cn