

1.5 m 口径垂直状态短筒长焦距平行光管次镜支撑系统设计

张丽敏, 吕天宇, 杨 飞

(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: 非球面次镜相对于主镜的位置和稳定性对光管的检测和校验性能起着非常重要的作用。从原理上分析了次镜支撑系统, 同时建立改进的支撑桁架动力学模型; 然后, 使用降维处理的方法通过有限元分析对结构进行优化设计; 最后, 分析温度变化对 1.5m 光管性能的影响。结果表明, 采用的切向三翼支撑结构, 减小了系统的遮拦比而且保证了结构的刚度, 改进桁架的比刚度得到改善, 从而使整个支撑系统的一阶谐振达到 62Hz; 改变局部结构材料降低了温度变化对光学系统的影响, 使波像差由 $\lambda/20$ 减小为 $\lambda/30$ 。提出的设计方案精度高, 稳定性好, 可以满足设计要求。

关键词: 次镜; 切向三翼支撑; 桁架; 波像差

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3283-06

Design of SM support system of 1.5 m aperture vertical collimator with long focus and short tube

Zhang Limin, Lv Tianyu, Yang Fei

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

Abstract: The relative position and stability between primary mirror and aspherical secondary mirror(SM for short) is important to test and checkout for the collimator. First, the supporting system of secondary mirror was analyzed according to the theory, and the dynamics model of supporting trusses was built. Then, the secondary supporting system was designed, optimized according to the disposal of decreasing dimension by FEA. Finally, effects caused by temperature were analyzed. The results show that tangential spider van support could reduce the masking and keep the stiffness at the same time. The ratio of rigidity of the improved supporting truss is uprated, which make the 1st resonance of the whole system arrive at 62Hz. The effect of temperature also can be decreased by change material of local structures, making the wavefront error of system change from $\lambda/20$ to $\lambda/30$. The scheme has fine accuracy, well stability and meet the design requirement.

Key words: secondary mirror; tangential spider van support; supporting truss; wavefront error

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-25

基金项目: 中科院三期创新基金

作者简介: 张丽敏(1981-), 女, 博士, 主要从事精密机械结构设计方面的研究。Email: zhangtxq@163.com

0 引言

大口径、长焦距平行光管是一种高精度、综合型基础光学检测和校验设备,由于其口径大焦距长,一般采用反射式系统。根据光管主反射镜的使用状态可以分为共轴式反射系统和离轴式反射系统,共轴系统具有结构紧凑、体积小、调试方便等优点,在很多领域有着广泛的应用^[1-2]。检验高质量的光学系统需要更高精度的光管匹配,因此在光管研制过程中,必须从光学、机械、真空、电控、热控和隔微震等方面进行综合研究与分析,以满足精度要求。对于短筒长焦距光管可采用类似 R-C 望远镜主光路结构形式,即主镜-次镜-三镜将光路折转。

文中根据 1.5 m 垂直状态短筒长焦距平行光管(简称 1.5 m 光管)光学系统的要求,设计了切向三翼次镜支撑结构和具有大比刚度的桁架支撑结构,并基于有限元分析进行优化。

1 次镜系统设计分析

1.1 次镜设计指标

1.5 m 光管光学系统由主镜(PM)、次镜(SM)、三镜(TM)、窗口玻璃组成,如图 1 所示。光学系统对次镜的位置公差要求较高,详细指标如表 1 所示。

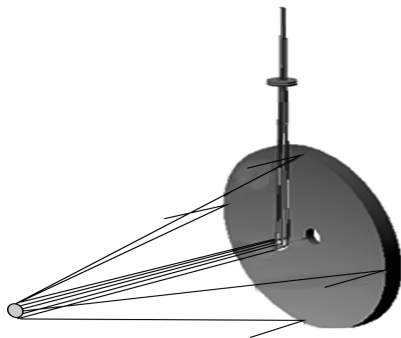


图1 1.5 m 光管光路系统

Fig.1 1.5 m collimator optical system

表 1 光学系统对次镜位置的要求

Tab.1 Requirement of optical system for secondary mirror position

	Eccentricity at X axis /mm	Eccentricity at Y axis/mm	Distance at Z axis /mm	Tilt at X axis/ (")	Tilt at Y axis/ (")
Error between FM and SM	±0.02	±0.02	±0.04	±10	±10

1.2 spider 支撑分析

次镜室一般通过薄片梁支撑即 spider 结构支撑,典型的结构形式包括三翼对称结构、三翼偏置结构、四翼十字型对称结构和四翼十字型偏置结构等。对称结构抗扭刚度很小,为了克服这一缺点,现大多采用偏置结构,使抗扭刚度得到极大提高^[3]。

在影响结构稳定性的因素中,叶片厚度和偏置量越大,稳定性越好,但同时增加了叶片的长度,使结构在圆周平面内两平动方向的刚度减小,导致支撑结构变形增大。

遮拦比也是评价次镜支撑系统的一个重要指标。遮拦比越大,光学系统的成像质量越差。

因此设计时需要综合考虑结构变形、谐振频率、遮拦比等,使结构的性能达到最佳。

根据参考文献[4],典型的四翼十字型偏置结构其谐振频率为:

$$f = \frac{1}{\pi} \sqrt{[(4EI/L) + (12EIr^2 \cos^2 \theta / L^3) + (EA r^2 \sin^2 \theta / L)] / J} \quad (1)$$

三翼偏置结构谐振频率比相同条件下四翼结构高一些。如果采用三翼切向支撑结构(见图 2),达到

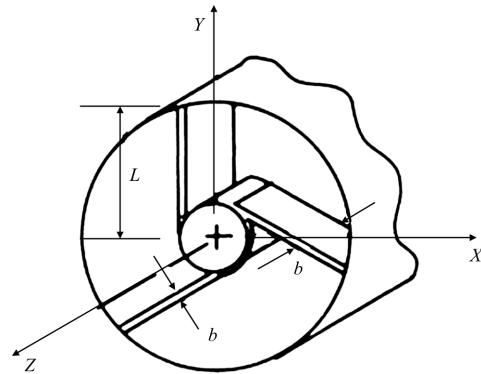


图2 三翼切向支撑结构

Fig.2 Tangential spider van support

相同谐振频率时所需的叶片厚度减小,从而可以减小结构的遮拦比。此时结构的偏转角为:

$$\theta = \frac{T}{3r^2 K_t} \quad (2)$$

式中: θ 为偏转角; T 为施加转矩; r 为被支撑体的半径; $K_t = AE/L$ 为切向叶片刚度, E 为叶片的弹性模量, L 为梁叶片的长度, A 为叶片的截面积^[5]。

1.3 支撑桁架设计

次镜及其支撑系统相对主镜系统为远端悬臂质量,直接影响结构力学特性^[6]。大口径光学系统

主次镜之间支撑结构一般采用 V 字形三角 Serrurier 结构单元,也叫 A 字形桁架结构,其设计思想是基于变构件受弯曲载荷为拉压载荷的结构优化设计原则^[7],刚度大、重量轻,主要用于保证主次镜的准直。传统的 Serrurier 桁架并不能完全解决望远镜结构中存在的重力变形问题,但可以根据实际情况在此基础上进行修正或改形,如在改进的 MMT 望远镜中,采用的交叉杆式桁架可以使结构刚度达到最大。

由于次镜室采用三翼支撑结构,主次镜间的支撑通常只能采用 6 杆桁架,受限于外围空间尺寸,支点跨距较小,从而造成结构稳定性较差,通过将 6 支腿变为 9 支腿(见图 3)可以增强结构的刚度。

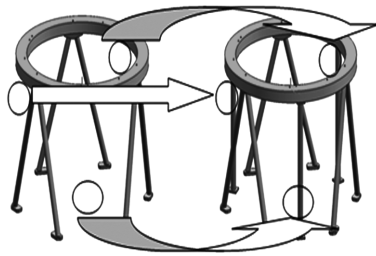


图 3 9 杆桁架结构

Fig.3 9-leg supporting trusses

1.4 支撑系统的动力学模型

建立了桁架动力学模型,各组支撑杆不计阻尼,次镜支撑结构视为刚体,其二维模型如图 4 所示。图中 1#、2# 和 3# 代表 3 组 A 字杆,其法向刚度和切

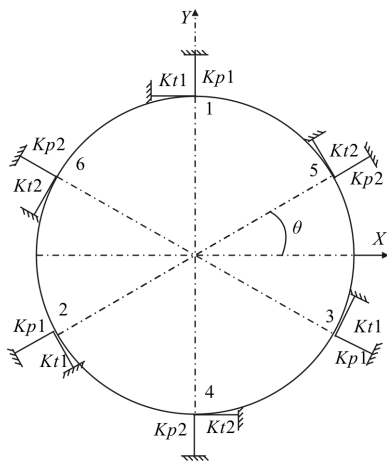


图 4 二维动力学模型

Fig.4 2D dynamics model

向刚度均为 $Kp1$ 和 $Kt1$,4#、5# 和 6# 代表 3 组“1”字杆,其法向刚度和切向刚度均为 $Kp2$ 和 $Kt2$ 。根据拉格朗日方程, $\frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 (i=1, \dots, n)$ 建立其动力学方程。

势能:

$$U = \frac{1}{2} (Kt1 \sum_{i=1}^3 x_i'^2 + Kp1 \sum_{i=1}^3 y_i'^2) + \frac{1}{2} (Kt2 \sum_{i=4}^6 x_i'^2 + Kp1 \sum_{i=4}^6 y_i'^2)$$

x_i' 和 y_i' 为局部坐标系,方向分别为支撑杆的法向和切向。与全局坐标系为:

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

动能 $T = T_1 + T_2$, T_1 为支腿动能, T_2 为次镜室支撑结构动能。

$$T_1 = \int_0^l \frac{1}{2} \rho dv \left[\frac{1}{2} \frac{\dot{x}}{l^3} (v^2)(3l-v) \right]^2 + \int_0^l \frac{1}{2} \rho dv \left[\frac{1}{2} \frac{\dot{y}}{l^3} (v^2)(3l-v) \right]^2$$

$$T_2 = \frac{1}{2} M (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)$$

最后得方程

$$\begin{bmatrix} m \\ m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2} (Kp1 + Kt1 + Kp2 + Kt2) \\ \frac{3}{2} (Kp1 + Kt1 + Kp2 + Kt2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

2 支撑系统的结构优化

次镜通光口径为 $\Phi 130 \text{ mm}$, 图 5 为三翼梁支撑结构旋转剖视图。结构的优化设计需要首先对其建立参数化的有限元模型,并对这些参数赋予较合理的初始值来生成可分析的有限元模型,所采用的初始值一般并不会影响优化设计的结果^[8]。该支撑结构参数优化的数学模型可以表示为 $f_{\max} = f(a, L, L1, H, t, \Phi_o, \Phi_i)$, t 为叶片厚度, Φ_o 为支腿的外径, Φ_i 为支腿的内径, $s.t. \delta_z \leq 0.02 \text{ mm}, \delta_{\theta} \leq 0.05 \text{ mm}$, 式中 f 为支撑结构的一阶谐振, δ_z 为天顶角 0° 时次镜在重力方向偏移, δ_{θ} 为俯仰角 0° 时次镜在重力方向偏移。如果将上式所包含的全部参数集中

放在一个优化文件中分析,由于变量较多,致使优化迭代次数多。为此采用对优化问题降维处理的方法,首先分别对初始结构的各参数执行单变量优化分析,然后观察各参数变化对于结构的影响,选择影响较小的参数根据加工及装配等限制条件予以预先确定,最后对剩余参数详细分析。通过分析可知,参数 H, t, Φ_o 和 Φ_i 相对于其他参数对结构的谐振影响较大。取 $a=140\text{ mm}, L=120\text{ mm}, L1=210\text{ mm}$, 以 H, t, Φ_o 和 Φ_i 为变量对结构进行分析。

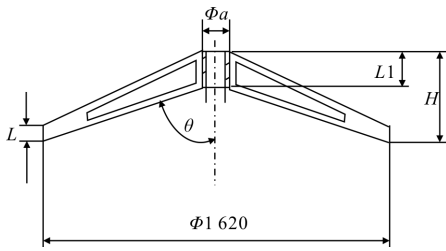


图 5 三翼支撑结构简图

Fig.5 Sketch of supporting structure of tri-plate

(1) $t=10\text{ mm}, \Phi_o=76\text{ mm}, \Phi_i=64\text{ mm}, H$ 对结构的影响见表 2。

表 2 参数 H 对结构的影响

Tab.2 Effect of parameter H

H/mm	δ_z/mm	δ_{y1}/mm	Mode of 1st/Hz
500	0.018 789	0.066 545	54.7
480	0.018 835	0.057 754	57
460	0.018 711	0.060 051	56.7

(2) $\Phi_o=76\text{ mm}, \Phi_i=64\text{ mm}$, 根据以上数据, $H=480\text{ mm}, t$ 对结构的影响见表 3。

表 3 参数 t 对结构的影响

Tab.3 Effect of parameter t

t/mm	δ_z/mm	δ_{y1}/mm	Mode of 1st/Hz
6	0.018 022	0.060 201	39
7	0.017 908	0.061 003	45
8	0.017 889	0.061 827	50.7
9	0.017 920	0.062 665	54.7
10	0.017 975	0.063 514	56.7
11	0.018 039	0.064 370	57.6

(3) 根据以上数据, $H=480\text{ mm}, t=10\text{ mm}, \Phi_o$ 和 Φ_i 对结构的影响见表 4。

表 4 参数 Φ_o 和 Φ_i 对结构的影响

Tab.4 Effect of parameter Φ_o and Φ_i

Φ_o/mm	Φ_i/mm	δ_z/mm	δ_{y1}/mm	Mode of 1st/Hz
76	66	0.019 014	0.074 330	53.6
76	64	0.018 630	0.066 150	55.7
76	62	0.018 348	0.060 339	57.1
76	60	0.018 132	0.056 013	58.1
60	46	0.019 125	0.075 121	53
60	44	0.018 882	0.069 527	54.4
60	42	0.018 692	0.065 228	55.5
89	79	0.018 466	0.063 886	56.4
89	77	0.018 114	0.057 050	58.1

综合考虑, 取 $H=480\text{ mm}, t=10\text{ mm}, \Phi_o=76\text{ mm}, \Phi_i=62\text{ mm}$ 。天顶角 0° 时结构的变形云图见图 6。

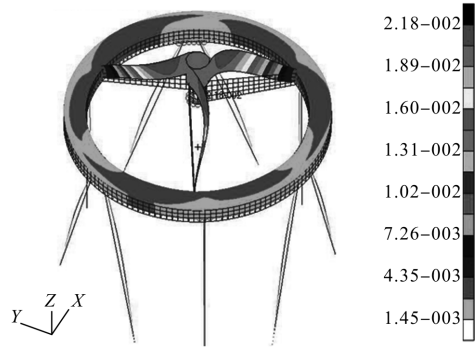


图 6 支撑系统变形云图

Fig.6 Deformation of supporting system

根据以上数据, 带入公式(3),

$$m=0.2357 \times (3 \times 66.17) + 206.7 = 253.5\text{ kg}$$

$Kp1 = 297.8\text{ N/mm}, Kt1 = 250\text{ 00 N/mm}, Kp2 = Kt2 = 170\text{ N/mm}$, 所以 $f_x = f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 62\text{ Hz}$ 。

对模型进行有限元分析, 前两阶谐振频率相同均为 66.3 Hz , 振型方向正交, 模态云图见图 7。

由于仿真时将 spider 结构简化为 MPC 刚性连接单元, 增加了结构刚度, 所以仿真结果较实际值稍大。

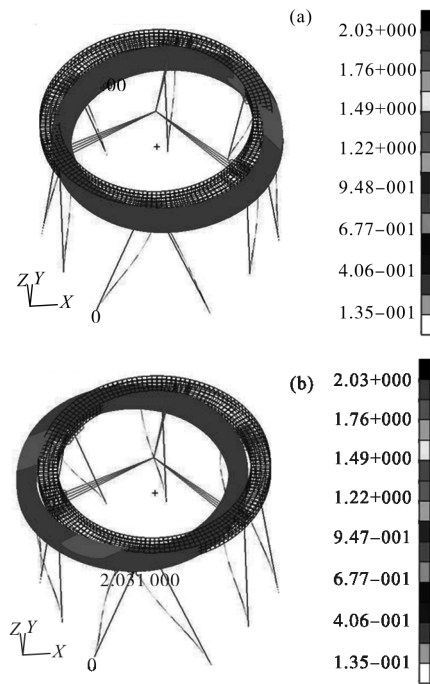


图 7 谐振云图

Fig.7 Resonance deformation

3 温度变化对系统的影响

光学元件和支撑结构受环境温度的影响会产生一定的变形,给光学系统带来像差,尤其在大口径光学系统中,环境温度对光机系统的影响更不容忽视。1.5m 光管虽然进行了热控处理,但是仍然需要考虑温度变化对系统的影响。1.5m 光管支撑结构材料一般采用结构钢,材料属性见表 5。

表 5 材料属性

Tab.5 Material property

Material	$\rho/\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$	E/MPa	μ	Thermal expansion coefficient
1Cr18Ni9	7.92E-6	180 000	0.24	15.5 E-6
4J32	8.1 E-6	141 000	0.25	0.65 E-6

采用传统 3 点支撑方式支撑次镜,温度变化将影响次镜面形,所以需要采用柔性安装方式,如 bipod 柔性支撑、柔性叶片支撑等。当温度变化使反射镜产生热膨胀/收缩时,柔性支撑结构适应此变化,从而使温度对面形的影响最小。

镜支撑桁架按照两种工况分析:一是全部采用 1Cr18Ni9,二是将 3 条“1”字支腿改为 4J32,两种工况下次镜位置变化趋势如图 8 所示。可以看出,采用工况 1 时次镜位置变化接近 1.5 mm;采用工况 2 时

次镜位置变化小于 1 mm,工作状态(温度 10~30 °C)时主次镜轴向间距由 $\pm 0.3\text{ mm}$ 缩小为 $\pm 0.2\text{ mm}$ 。

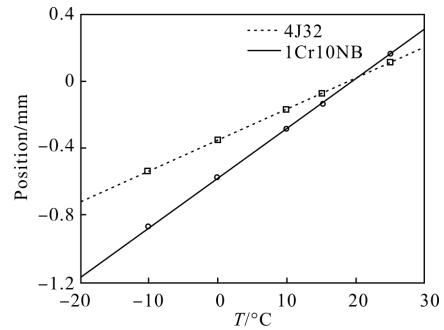


图 8 次镜在温度-20~+30°C范围内的位置变化

Fig.8 Secondary mirror position during -20°C to +30°C

通过 Code V 软件分析次镜轴向移动造成的光学系统波像差,检测波长 632.8 nm。根据分析结果得到,波像差主要包括离焦和球差,见表 6^[9]。

表 6 波像差

Tab.6 Wavefront error

Distance change between PM and SM/mm	Zernike defocus / λ	Zernike Spherical aberration/ λ	System RMS / λ
-0.4	-0.002 0	0.153 2	0.068
-0.3	-0.001 4	0.113 9	0.500
-0.2	-0.000 9	0.074 6	0.033
-0.1	-0.000 4	0.035 4	0.019
+0.1	0.000 5	-0.042 8	0.019
+0.2	0.000 9	-0.081 8	0.036
+0.3	0.001 4	-0.120 7	0.053
+0.4	0.001 8	-0.159 6	0.070

看出主次镜间距改变 $\pm 0.4\text{ mm}$ 时,系统波像差为 $\lambda/14$ 。图 8、图 9 所示为离焦量 $\pm 0.4\text{ mm}$ 时仿真的波前信息。

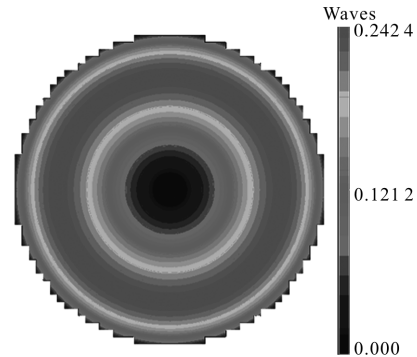


图 8 离焦量+0.4 mm 时的波像差

Fig.8 Wavefront error with defocus of +0.4 mm

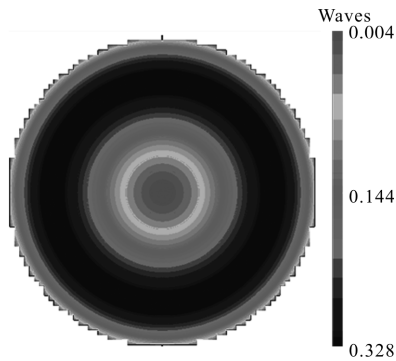


图 9 离焦量 -0.4 mm 的波像差

Fig.9 Wavefront error with defocus of -0.4 mm

4 结 论

文中理论与仿真相结合对 1.5 m 光管次镜支撑系统进行分析、优化与详细设计, 得出如下结论:(1) 结构刚度较高, 对振动、冲击等动态工作环境具有较强的适应性, 可以降低外界环境对光管性能的影响;(2) 3 条“1”字辅助支腿不仅增加了桁架刚度, 同时可以作为处理温度对结构影响的一项措施, 成本低, 便于实施;(3) 此外, 所建立的理论模型与仿真结果匹配, 可以作为同类结构的设计参考。

参 考 文 献:

- [1] Liao Zhichun. The mounting structure of reflection mirror in collimator [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(1): 14–23. (in Chinese)
廖知春. 平行光管反射镜的支承结构 [J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1): 14–23.
- [2] Li Guang, Wang Jinsong, An Zhiyong. The infrared collimator design for infrared sights testing [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(4): 71–73. (in Chinese)
李光, 王劲松, 安志勇. 用于红外瞄具测试的红外平行光管系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 71–73.
- [3] Jia Qinglian, Deng Wenyuan. Dynamic analysis for supporting structure of middle/little aperture second mirror [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 34(1): 57–60. (in Chinese)
贾庆莲, 邓文渊. 中小口径次镜支撑结构的动力学性能分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(1): 57–60.
- [4] Liang Wenke, Liu Shunfa. Mechanical analysis of secondary mirror supporting structure [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 11(5): 466–471.
梁文科, 刘顺发. 次镜支撑结构的力学性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2003, 11(5): 466–471. (in Chinese)
- [5] Tina M Valente. Optimal support structures for chopping mirrors[C]//SPIE, 1992, 1690: 366:375
- [6] Zhao Ye, Li Ling, Yang Huabao. The optimal design of bracket structure for the second mirror of a large-aperture space optical remote sensor [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(3): 373–378. (in Chinese)
赵野, 李玲, 杨华保. 大口径空间光学遥感器次镜支架优化设计[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(3): 373–378.
- [7] Li Wei, Liu Hongwei, Guo Quanfeng, et al. Combined supporting structure of thin wall joint cylinder and supporting bar between primary mirror and second mirror in space camera [J]. *Optics Precision Eng*, 2010, 18(12): 2633–2641. (in Chinese)
李威, 刘宏伟, 郭权锋, 等. 空间相机主次镜间的薄壁筒和支杆组合支撑结构 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(12): 2633–2641.
- [8] Wu Qingbin, Chen Shijin, Dong Shen. Optimization of parameters structural design of lightweight reflector [J]. *Optics Precision Eng*, 2003, 11(5): 466–471. (in Chinese)
吴清彬, 陈时锦, 董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(5): 466–471.
- [9] Sun Jingwei. Alignment technique for the large-aperture telescope based on astigmatism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 427–435. (in Chinese)
孙敬伟. 利用像散分析实现的大口径望远镜装调技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 427–435.