

# 改良型卡塞格林系统的加工检验

李卓霖 付秀华 贾宗合 杨永亮 顾皓楠

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 卡塞格林系统是望远系统中最经典的反射式光学系统。常规的卡塞格林系统成像点在系统以外,可以直接采用干涉仪检验。而改良型卡塞格林系统成像点在两镜之间,无法用常规方法进行检验。基于系统特性,主要分为两步检测:对主镜进行精确检验;通过检验系统的弥散斑评价成像质量。在采用轮廓仪测量、阴影法检验以及 Zygo 干涉仪检测的基础上,通过搭建特殊结构对系统进行精确检测。同时,在检验过程中要边测量边修正面形,使得系统成像质量符合使用要求。

**关键词** 光学制造;非球面;卡塞格林系统;检验

**中图分类号** TG580.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.022201

## Processing and Test of Improved Cassegrain System

Li Zhuolin Fu Xiuhua Jia Zonghe Yang Yongliang Gu Haonan

(School of Opto-Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** Cassegrain system is the most classic reflective optical system in telescope systems. The imaging point of a regular Cassegrain system is outside the system and thus can be tested using an interferometer. However, the imaging point of the improved Cassegrain system lies between two mirrors, so that it cannot be directly measured. It can be tested in two steps based on the system characteristics: an accurate test is made for the primary mirror; the image quality is evaluated based on the system's dispersion spot. Such a system is measured by a profilometer and tested by Zygo interferometer and the optical shadow method. A special structure is used to test accurately. The surface figure should be modified based on the measured results in the test process to meet the requirements on the optical system's imaging quality.

**Key words** optical fabrication; aspherical surface; Cassegrain system; test

**OCIS codes** 220.4610; 240.5450; 240.6700; 240.0240

## 1 引言

近年来,由两个二次曲面反射镜组成的反射式光学系统越来越多地应用于大型天文望远、环境监测、空间遥感等光学系统中,其中应用最广泛的是卡塞格林系统。卡塞格林系统容易得到较大口径的反射材料,不产生色差,系统结构相对简单,并且通过镀制宽波段的反射膜层可达到很高的反射率<sup>[1]</sup>。通常卡塞格林系统的像成在系统之外,可用 Zygo 干涉仪直接检验,而改良型卡塞格林系统焦点位于两镜之间,无法进行常规检测。

针对这一问题,本文提出一种方法,在采用轮廓仪测量、阴影法检验和 Zygo 干涉仪检测的基础上,通过搭建特殊结构对改良型卡塞格林系统进行精确检测。

**收稿日期**: 2011-09-21; **收到修改稿日期**: 2011-09-29; **网络出版日期**: 2011-12-23

**基金项目**: 国家 863 计划资助课题。

**作者简介**: 李卓霖(1987—),女,硕士研究生,主要从事光学镀膜、光学工艺及测试等方面的研究。

E-mail: zhuolinli666@163.com

**导师简介**: 付秀华(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事光学薄膜与光学工艺及测试等方面的研究。

E-mail: goptics@126.com

## 2 设计原理及要求

### 2.1 经典卡塞格林系统原理

经典卡塞格林系统结构形式如图 1 所示,可消除球差,主镜为抛物面。对于图 1 所示系统,有公式

$$\alpha = \frac{l_2}{f_1'} = \frac{2l_2}{R_1} \approx \frac{h_2}{h_1}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{l_2'}{l_2}, \quad (2)$$

$$S_1 = \left[ \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4} e_2^2 \right] - \frac{\beta^3}{4} (1 - e_1^2) = 0. \quad (3)$$

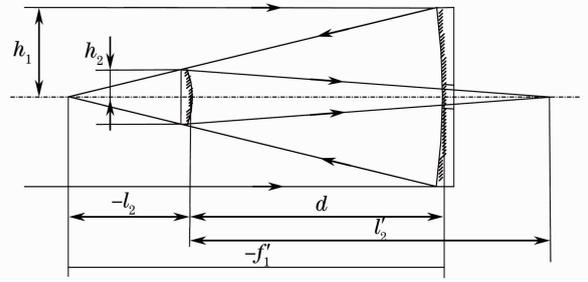


图 1 卡塞格林系统光路

Fig. 1 Optical path of Cassegrain system

(1)式中  $\alpha$  表示副镜离第一焦点的距离与主镜焦距的比值,它同时也决定了副镜的遮光比。(2)式中  $\beta$  表示副镜的放大倍数,主镜的焦距乘以  $\beta$  即为系统的焦距。卡塞格林系统可消除球差,故(3)式中像差为零。同时,系统的主镜是抛物面<sup>[2]</sup>,即主镜偏心率  $e_1^2=1$ ,代入(3)式中得到

$$e_2^2 = \frac{(1-\beta)^2}{(1+\beta)^2}, \quad (4)$$

即副镜的偏心率只与副镜的放大倍率有关<sup>[3]</sup>。卡塞格林系统的副镜是凸面,同时将主镜焦距放大,  $\beta < -1$ ,可以得到  $e_2^2$  恒大于 1,故卡塞格林系统的副镜是凸的双曲面。

### 2.2 设计要求

改良型卡塞格林系统的结构如图 2 所示,其中主镜口径为 124 mm,副镜口径为 20 mm,系统组合焦距为 549.577 mm,会聚点在两镜之间,主镜开孔尺寸为  $\Phi 18$  mm。对各零件要求面型精度均方根(RMS)值均小于  $\lambda/20$ ,系统成像点处弥散斑直径要求小于  $5 \mu\text{m}$ 。材料均为 K4 玻璃。

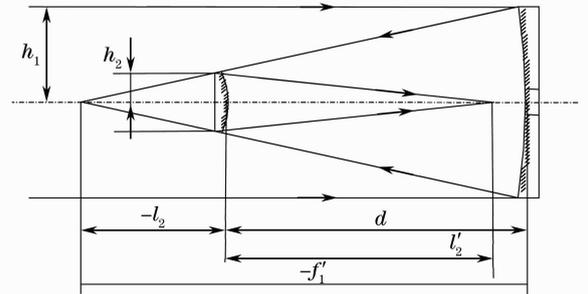


图 2 改良型卡塞格林系统光路

Fig. 2 Optical path of improved Cassegrain system

## 3 卡塞格林系统抛光过程中的检验

### 3.1 主镜抛光过程中的检验

在现代测量方法中,轮廓仪测量非球面<sup>[4]</sup>是一种最便捷、最直观、应用最广泛的检测方法。在加工过程中使用轮廓仪检测既节省时间又可以直接输出面形数值。要获得精确的面形,测试时必须先校准主镜的中心,然后沿着水平方向移动探针至主镜的边缘,保证测量时探针由主镜的一端通过中心滑动到主镜另一端,可以直接显示出工件表面的面形曲线。

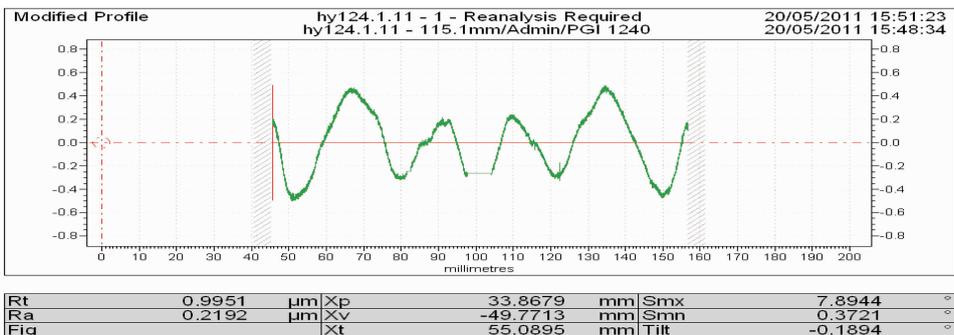


图 3 轮廓仪测量曲线

Fig. 3 Measure curve of profilometer

经过铣磨成型后的主镜经轮廓仪测量峰谷(PV)值为 $9.18\ \mu\text{m}$ 。采用德国 Opto Tech 200CNC-B 数控抛光设备对主镜进行粗抛光,抛光过程中不断调整主轴转速和抛光盘压力,再次测量得到主镜 PV 值为 $0.9951\ \mu\text{m}$ 。如图 3 所示,可以清楚地看出主镜在边缘处存在明显的凹带,PV 值接近 $-0.5\ \mu\text{m}$ ,下一步要修正其面形必须根据测试的面形误差分布结果来设计抛光盘的分布,按 Opto Tech 数控抛光机的抛光去除原理模型,生成的抛光盘的最佳分布如图 4 所示,图中阴影部分的抛光材料为沥青,其余部分不参与抛光。

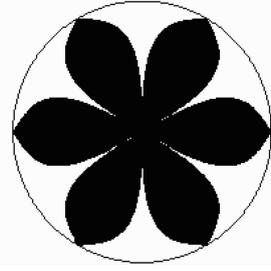


图 4 抛光盘

Fig. 4 Polishing plate

使用此抛光盘继续加工,同时调整抛光盘的摆幅大小,使面形趋于理想。由于主镜中心需要开孔,所以不考虑 $\Phi 18\ \text{mm}$ 以内的面形精度。但是采用轮廓仪测量面形,确定顶点的位置是保证测量精度的唯一途径,所以,考虑采用非接触式的测量方法——阴影法检测。刀口阴影法与轮廓仪检测比较,可以检测出 RMS 值小于 $\lambda/25$ 的波面缺陷。

在反射式二次曲面非球面中,基于抛物面的物镜关系以及光路可逆性,如图 5 所示,在焦点 S 点处放置点光源,经过抛物面反射的光线平行于光轴出射。由于刀口阴影法只能切到会聚光线,因此需增加辅助镜,如图 6 所示。从图中可以看出平行光经过辅助镜后会聚到 S' 点,刀口在成像点 S' 处切割。要保证主镜的面形,从理论上推断,辅助镜的面形精度要高于主镜面形,在此,选用 $\Phi 265\ \text{mm}$ ,焦距为 $2.65\ \text{m}$ ,RMS 值小于 $\lambda/30$ 的辅助镜。

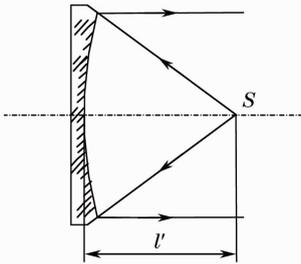


图 5 抛物面光路图

Fig. 5 Optical path of paraboloid

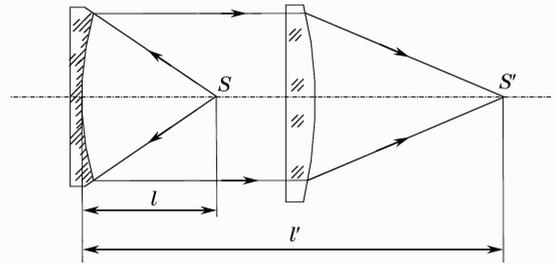


图 6 抛物面检测系统

Fig. 6 Testing system of paraboloid

另外,在检验的过程中要确保光源、主镜、标准镜以及刀口仪同轴<sup>[5]</sup>。用阴影法检测,从呈现出的亮暗相间阴影图中可以直接判断工件表面的缺陷。对检测结果进行分析,通过改变修抛力度、位置和主轴转速等,获得较为均匀的阴影图,如图 7 所示,此时主镜 RMS 值小于 $\lambda/20$ 。

由于阴影法不能量化输出 RMS 值,所以再用 Zygo 干涉仪对比检测<sup>[6]</sup>。Zygo 干涉仪是一个自准的检测系统,根据抛物镜的成像特点,系统需增加辅助镜即平行平板,使系统内光线按照原路返回到光源处,如图 8 所示,平行平板的面形精度为 $0.02\lambda$ 。基于主镜中心的特点,在平行平板中心同样需要开 $\Phi 18\ \text{mm}$ 的孔,由 S 点处发出的光线经过主镜及平行平板两次反射,再次回到 S 点。干涉仪测试结果如图 9 所示,RMS 值

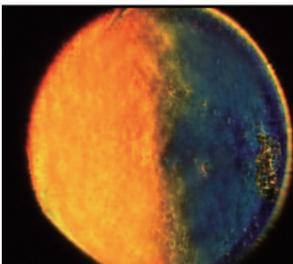


图 7 检测结果

Fig. 7 Testing result

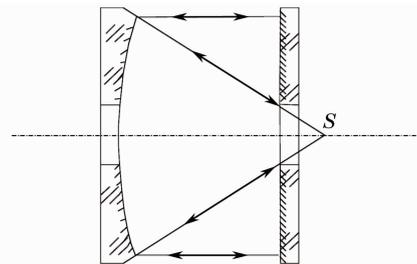


图 8 平行平板补偿系统

Fig. 8 Compensation system of parallel plate

为  $0.032\lambda$ 。

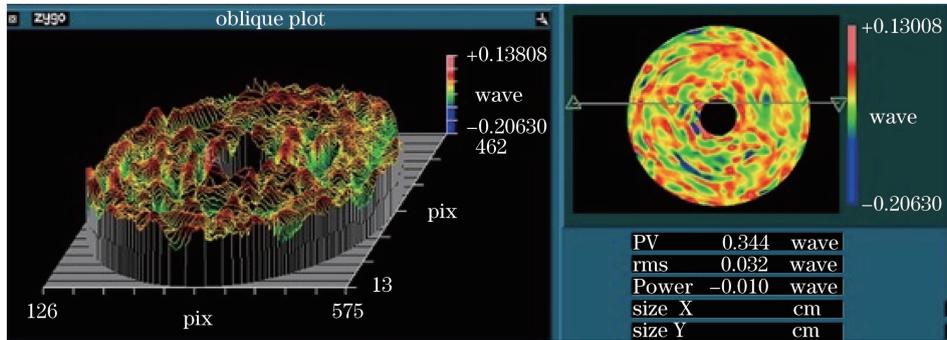


图9 主镜面形图

Fig.9 Contour plot of the primary mirror

### 3.2 系统的检验

副镜前期的加工方法与主镜相同。副镜加工到一定精度后,通过与主镜对接<sup>[7]</sup>,基于主镜的合格面形,采用阴影法检测系统整体成像质量,逐渐修正副镜面形。

系统检验光路如图10所示,在系统焦点前放置 $45^\circ$ 反射镜,从光源 $S(N)$ 点处发出光线,经过反射镜、副镜、主镜以及平行平板后原路反射到 $N(S)$ 点,用刀口在 $N(S)$ 点处切割光线,观察光斑成像质量。副镜与主镜检验方法不同的是,基于主镜的表面精度,根据成像点的弥散斑大小、形状,同时利用读数显微镜测量弥散斑大小,反复修正副镜表面。

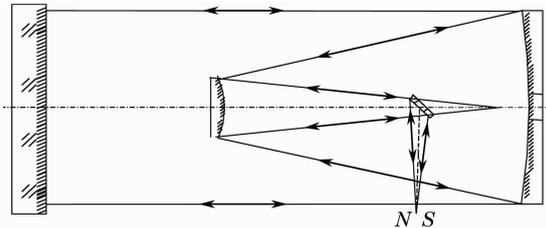


图10 用于检测卡塞格林系统的光路

Fig.10 Optical path for testing Cassegrain system

## 4 结 论

采用数控结合手抛的加工方法,使得主镜的面形精度PV值从 $0.99\ \mu\text{m}$ 改善到 $0.344\ \mu\text{m}$ ,RMS值为 $0.032\lambda$ 。同时,主、副镜共同组成卡塞格林系统,像质的评价通过检验系统的成像效果进行,由读数显微镜测量出系统呈现的弥散斑直径由 $10\ \mu\text{m}$ 一直缩小到 $4.8\ \mu\text{m}$ 。通过对改良型卡塞格林系统的制造检验,采取增加辅助镜的方法,解决了常规检验的难题。分别采用轮廓仪检测、阴影法检验以及Zygo干涉仪对零件和系统进行精确检测,提高了检测精度。

## 参 考 文 献

- Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspheric Surface of Optics[M]. Beijing: Science Press, 1994. 41~46
- 潘君骅. 光学非球面的设计、加工及检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 41~46
- Cai Li, Geng Sujie, Fu Xiuhua. The Processing Technique of Optical Components[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2006. 245~254
- 蔡立, 耿素杰, 付秀华. 光学零件加工技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006. 245~254
- Yang Li. Manufacturing Technology of the Sophisticated Optics[M]. Beijing: Science Press, 2001. 350~359
- 杨力. 现代光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 350~359
- Geng Anbing, Wang Bin. Inversion method for aspheric surface equation derivation based on data measured from Talysurf[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 042204
- 耿安兵, 王彬. 基于轮廓仪测量数据的非球面方程反演技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(4): 042204
- Wang Xiaopeng, Gao Zhishan, Ma Jun *et al.*. Investigation of measurement uncertainty of aspheric surface based on null-computer-generated holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112003
- 王小鹏, 高志山, 马骏等. 非球面测量中零位计算全息测量不确定度分析研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0112003
- Rao Xuejun, Ling Ning, Wang Cheng *et al.*. Application of Hartmann-Shack sensor in aspheric process[J]. *Acta Optica*

*Sinica*, 2002, **22**(4): 491~494

饶学军, 凌 宁, 王 成 等. 哈特曼-夏克传感器在非球面加工中的应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 491~494

7 Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Li Xinglong *et al.*. Manufacture and test of Cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 764~767

付联效, 吴永刚, 李兴隆 等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 764~767