

文章编号: 0253-2239(2008)04-0764-04

# 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验

付联效<sup>1</sup> 吴永刚<sup>1</sup> 李兴隆<sup>2</sup> 郝沛明<sup>1</sup> 王 鹏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092; <sup>2</sup> 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要** 介绍了卡塞格林系统的焦距为 6000 mm, 系统的相对口径为 1/10, 主镜的口径为 600 mm, 主镜相对口径为 1/1.2, 主镜的材料是微晶玻璃, 背面打有盲孔, 质量为原来的 50%。由于主镜的相对口径比较大, 而且经过轻量化, 因此加工难度比较大, 在加工过程中在传统方法的基础上对工艺加以改进, 采用三点扩九点的支撑方法和四点夹持的方法, 最终将主镜加工到了很高的精度。主次镜组合系统的弥散圆直径小于 0.02 mm, 用干涉仪检验卡塞格林系统主镜的峰值(PV)为 1.23λ, 均方根(RMS)为 0.18λ。

**关键词** 光学设计; 卡塞格林系统; 主镜; 大相对口径; 轻量化

**中图分类号** TH743 **文献标识码** A

## Manufacture and Test of Cassegrain System's Primary Mirror with Large Relative Diameter and Lightweight

Fu Lianxiao<sup>1</sup> Wu Yonggang<sup>1</sup> Li Xinglong<sup>2</sup> Hao Pingming<sup>1</sup> Wang peng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Precise Optical Engineer and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)  
(<sup>2</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The Cassegrain system is manufactured with focal length of 6000 mm, and relative diameter of 1/10. The diameter of the primary mirror is 600 mm with its relative diameter of 1/1.2 and the material of the primary mirror is crystallitic glass. Because of even holes on the back of the primary mirror, the lightweight ratio of the primary mirror is 50%. For the reason of large relative diameter and light weight the manufacture of the system is difficult. In the course of the manufacture new methods are developed based on the traditional methods. The support of nine points is used based on the support of three points and finally the primary mirror is made with a high precision. The diameter of dispersion circular of the Cassegrain system is less than 0.02 mm, peak value (PV) of Cassegrain system is 1.23λ ( $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ ), and the root-mean-square (RMS) value of system is 0.18λ.

**Key words** optical design; Cassegrain system; primary mirror; large relative diameter; lightweight

## 1 引 言

由两个反射镜组成的光学系统具有很重要的实用价值, 其原因是反射镜材料比透镜材料容易得到, 尤其是大尺寸的; 镀铝或介质膜的反射层在很宽的波段范围内有很高的反射率; 没有色差。因此, 在大口径天文望远镜系统、红外或紫外光学系统中两镜系统都有重要应用。在反射式天文望远镜的光学系统中, 卡塞格林系统占有重要地位<sup>[1]</sup>。但大口径实体镜在加工过程中不可避免地受到重力作用, 若是用在陆基望远镜中, 重力作用对反射镜光学镜面有

不可忽视的影响, 若用在天基失重状态下, 则重力状态下的形变将完全释放出来, 破坏成像质量, 而轻量化则可以减轻或消除这些影响, 同时轻量化的镜体由于自身重量较轻, 可减轻火箭运载动力, 降低火箭发射成本。但轻量化的镜体在加工过程中不容易消除像散等, 因此加工难度比较大。在国内对口径为 500 mm 以上、轻量化程度 50% 以上的镜体的加工的工艺技术不成熟, 目前这种镜体的加工还没有成功的范例, 本文介绍的这种加工方法比较好地解决了这一难题。

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-10-17

作者简介: 付联效(1979-), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事光学镀膜、光学设计、光学加工等方面的研究。

E-mail: fulianxiao2006@163.com

导师简介: 吴永刚(1957-), 教授, 博士生导师, 主要从事光学镀膜和设计等方面的研究。

E-mail: ygwu@mail.tongji.edu.cn

## 2 设计要求

卡塞格林系统的基本结构如图 1 所示,主镜、次镜都是双曲面,其中主镜是指面向平行光的镜面<sup>[2]</sup>。

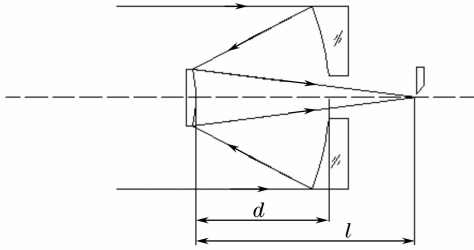


图 1 卡塞格林系统光路

Fig. 1 Optical path of Cassegrain system

该系统设计的技术指标是主镜口径为 600 mm,副镜口径为 12~92 mm,系统相对口径为 1:10,则系统焦距  $f=6000$  mm,焦点引出主镜后可以接各种光谱、光度观测设备。系统要求最终弥散圆直径小于 0.02 mm,用 Wyko 干涉仪测波面误差要达到均方根(RMS)不大于  $\lambda/10$ <sup>[3]</sup>。主镜采用德国 Schott 公司的微晶玻璃,主镜半径为 1440 mm,有效通光口径  $\phi_0=600$  mm,非球面偏心率  $e_1^2=1.00486$ ,副镜为 Q1-Schott 石英玻璃。

## 3 主镜的加工

主镜的加工过程如下:

### 1) 粗磨与滚圆

先整平,即磨两面平行,要求两面的平行度不大于 0.02 mm。然后套钻中孔,磨内外圆,要求内外圆的椭圆度不大于 0.03 mm。最后求出主镜面形的比较球面半径,然后在工作平面上磨出比较球面<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} x = \frac{R_0 - \sqrt{R_0^2 - (1 - e^2)y^2}}{1 - e^2}, \\ R = R_0 + xe_1^2/2, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $R_0$  为球面半径, $R$  为比较球面半径, $x$  为矢高,由(1)式解出主镜的  $R=1456.2$  mm。

### 2) 轻量化

用数控切屑的方法按设计要求在主镜非加工面开盲孔,盲孔采用蜂窝状结构如图 2 所示,轻量化达 50%。

### 3) 主镜的固定与夹持

由于镜体相对口径大,轻量化程度高,夹持力一旦过大,镜面就会变形,产生像散和彗差等。如果单纯的三点支撑,会在三点周围形成“塌陷”,从而影响镜面的成像质量。本文采用独特的三点扩九点的方法,如图 3 所示,在  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  三点支撑的基础

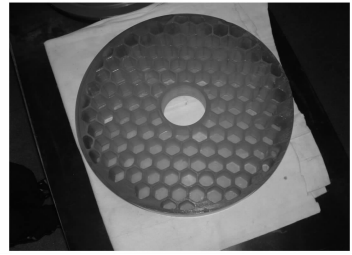


图 2 轻量化的主镜

Fig. 2 Primary mirror of lightweight

上,加三角形托架扩充到九点,就会避免“塌陷”,其中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别为三个三角形托架的重心, $R_1$  为三角形托架顶点到圆心的距离, $R_2$  为三角形托架底角顶点到圆心的距离, $R_3$  为主镜的半径。侧面的夹持传统工艺一般为十二点环抱夹持,本文为四点环抱式,夹持力既要保证机床主轴转动时同心度保持不变,更重要的是又要保证不致使主镜变形。

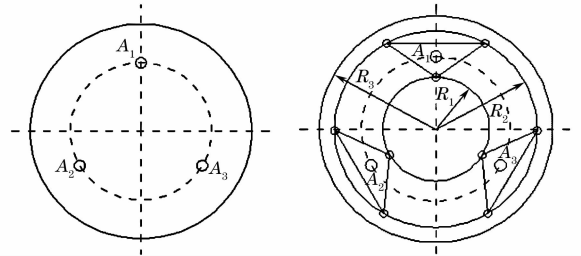


图 3 三点支撑(a),三点扩九点支撑(b)

Fig. 3 Support of three point (a), nine points based on three points (b)

### 4) 凹双曲面加工

主镜面形的最大修磨量

$$\delta_{\max} = \phi_0^4 e^2 / (512 R_0^3), \quad (2)$$

由(2)式解出主镜的最大修磨量  $\delta_{\max}=0.089$  mm。

在比较球面的基础上,按立式补偿检验方案进行加工获得非球面,先细磨成形,然后抛光,再用刀口仪观察面形,这个过程会有多次反复。这时通过补偿器看到的面形只作为参考,但是尺寸必须准确,为以后的对接检验做准备。

## 4 主镜的检验

用奥夫纳(Offner)补偿法检验主镜<sup>[5]</sup>:

$$S_1 = h^4 \frac{e^2 \Delta n}{r_0^3} = 2h_s P_s, \quad (3)$$

$$P_s = P_0^s + \frac{n+2}{n} \left[ Q + \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} - \frac{2n+2}{n+2} \nu_1 \right]^2,$$

$$C_1 = Q + \frac{n}{n-1}, \quad C_2 = Q + 1,$$

式中  $S_1$  为球差,  $Q$  为透镜的弯曲,  $\nu_1$  为孔径角的规范化值,  $n$  为折射率,  $C_1$  和  $C_2$  为透镜曲率的规范化值, 单透镜分成双透镜, 求解各个面的半径, 得到<sup>[6]</sup>

$$r_1 = \frac{1}{C_1 \varphi}, r_2 = \frac{1}{C_2 \varphi}, r_3 = \frac{1}{C_3 \varphi}, r_4 = \frac{1}{C_4 \varphi}, \quad (4)$$

$\varphi$  为光焦度。为了使补偿器更好地校正高级球差<sup>[7]</sup>,  $P_s$  和光焦度  $\varphi$  的分配要合理, 有时需要反复的多次求解, 才能得到好的光学设计结果。求出初始结构的

数据后, 由于初始结构的数据只是近似的解, 需要利用 Zemax 软件对初始结构的数据进行优化。优化过程有时需要很长时间才能得到比较好的结果。

求出初始结构的数据后, 将数据输入光学软件 Zemax 进行优化, 得到的数据如表 1 所示。

如图 4, 纵向像差小于 0.03 mm, 轴上波差为 0.0178 $\lambda$ , 满足补偿器设计使用要求, 在 0.1° 时的离轴波差为 0.1021 $\lambda$ , 满足设计要求, 可以使用。

表 1 优化后的数据结果

Table 1 Data after optimization

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	Conic
Objection	Standard	Infinity	745.152		2.601074	0
Stop	Standard	-977.872	25	K9	110	0
2	Standard	-225.065	1		120	0
3	Standard	748.451	25	K9	120	0
4	Standard	-170.706	228.469		120	0
5	Standard	-184.352	15	K9	30	0
6	Standard	-126.566	1440		40	0
7	Evenasph	-1440	-1440	MIR	610	-1.004856
8	Standard	-126.566	-15	K9	40	0
9	Standard	-184.352	-228.469		30	0
10	Standard	-170.706	-25	K9	120	0
11	Standard	748.451	-1		120	0
12	Standard	-225.065	-25	K9	120	0
13	Standard	-977.872	-745.1508		110	0
Image	Standard	Infinity			2.606076	0

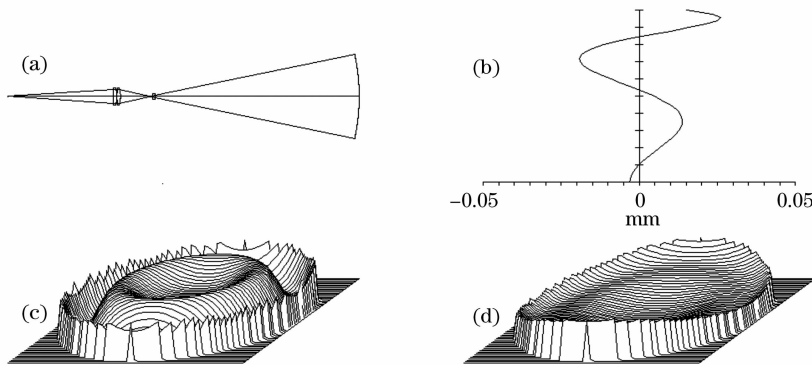


图 4 系统的结构(a)、纵向球差(b)、轴向波前函数(c)和离轴波前函数(d)图

Fig. 4 Layout of system (a), longitudinal aberration (b), wavefront function on axis (c) and wavefront function off axis (d)

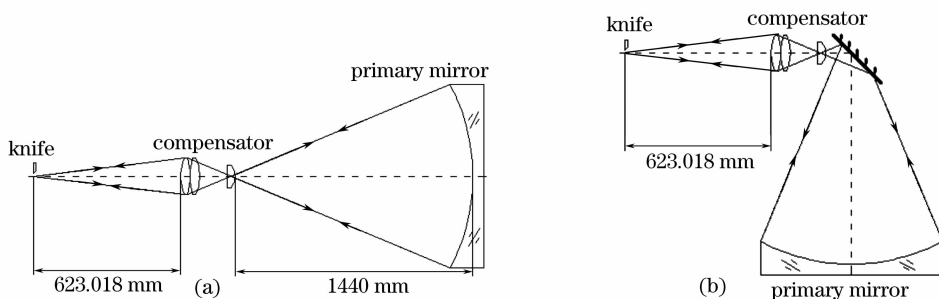


图 5 主镜的补偿检验。(a) 垂直, (b) 水平

Fig. 5 Compensating test of primary mirror. (a) Vertical, (b) horizontal

检验分为垂直补偿检验和水平补偿检验两种,后截距的设计数据  $l=623.018\text{ mm}$ ,实际数据  $l=625.722\text{ mm}$ ,后截距的实际误差在误差允许范围之内,用两种检验方法得到的数据相符。加工过程中需要频繁检验,因为主镜口径很大,重量也较重,如果每次检验都拆卸镜子,不仅会增加危险性,还会带来每次调整的误差,也会延长加工时间、增加劳动强度,因此采用垂直检验,如图 5(a)所示。这样在加工阶段,主镜就一直在机床上,避免了反复调整带来的同心误差、水平误差和夹持力的变化。本文用机床的工作平台可以翻转  $90^\circ$ ,主镜可随平台翻转,将光轴调整到水

平状态,进行水平检验,如图 5(b)所示。

## 5 主、次镜系统评价

由于像质评价以系统的整体成像效果为准,主镜加工到一定精度后,必须和次镜对接,通过传统的刀口仪观察系统误差,进一步修磨主镜。由于刀口仪观察系统误差受个人主观影响比较大,因此系统像差达到一定值后,利用干涉仪采集波差数据,进一步精修主镜,经过数次主次镜对接精修后,最终使卡塞格林系统达到使用的要求,组合系统经干涉仪采集的数据如图 6 所示。

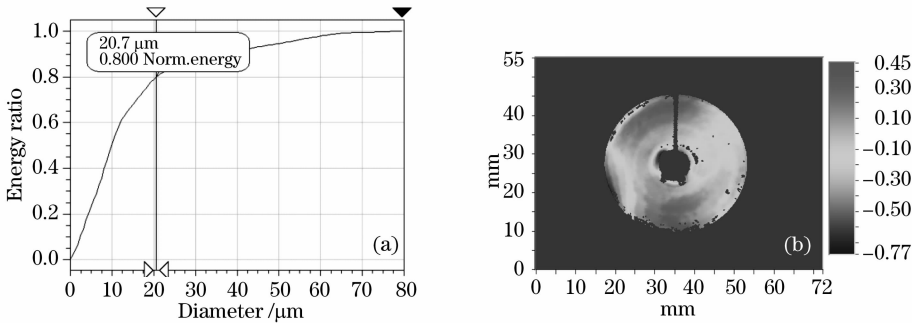


图 6 (a) 系统能量分布图和 (b) 系统面形图

Fig. 6 (a) Energy distribution and (b) contour plot of system

从图 6 可以看到,组合系统焦点处在弥散圆直径为  $20\ \mu\text{m}$  有 80% 的能量通过,符合弥散圆直径小于  $0.02\text{ mm}$  的要求,干涉仪检验峰值为  $1.23\lambda$ ,均方根为  $0.18\lambda$  ( $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ )<sup>[8]</sup>。由于系统工作于红外波段,完全满足使用要求。

## 6 结 论

介绍了卡塞格林系统的设计要求,采用三点扩九点的支撑方法和四点夹持的方法,将主镜加工到了很高的精度。主次镜组合系统的弥散园直径小于  $0.02\text{ mm}$ ,用干涉仪检验卡塞格林系统主镜的峰值为  $1.23\lambda$ ,均方根为  $0.18\lambda$ ,完全满足使用要求。

## 参 考 文 献

- 1 Pan Junhau. *The Design, Manufacture and Test of the Aspheric Surface of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1994. 61~66  
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. 61~66
- 2 Yang Li. *Manufacturing Technology of the Sophisticated Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 352~357  
杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 352~357

- 3 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. Beijing: China Machine Press, 1983. 397~416  
D. 马拉卡松. 光学车间检验[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983. 397~416
- 4 Hao Peiming. The manufacture of the convex aspheric surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **14**(10): 1424~1428  
郝沛明. 凸非球面加工[J]. 光学学报, 1991, **14**(10): 1424~1428
- 5 Hao Peiming, Wang Peng, Wang Zhanshan *et al.*. Lens design for high power and wide-aperture beam expander[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 494~496  
郝沛明,王鹏,王占山等. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(6): 494~496
- 6 Hao Peiming, Wang Peng, Hu Xiaoyang. Optical system with two-lens zero focal power and single corrector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 1017~1020  
郝沛明,王鹏,胡晓阳. 无光焦度校正器和单一反射镜组成的光学系统[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 1017~1020
- 7 Wang Chunyan, Wang Zhijian, Zhou Qingcai *et al.*. Solving the cam curve of the compensating group about zoom lens using dynamic optical theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 891~894  
王春艳,王志坚,周庆才等. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮廓线[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 891~894
- 8 Yu Xiang, Rao Xuejun, Xue Lixia *et al.*. Dynamic aberration measuring instrument inducing human eye accommodation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1198~1204  
余翔,饶学军,薛丽霞等. 可诱导人眼自主调节的动态像差测量仪[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1198~1204