文章编号: 1002-1582(2004)05-0619-04

Φ520mm F/1.6 椭球面反射镜加工*

李新南, 袁吕军, 刘星涛, 夏自立
(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

摘 要: 介绍了一块 Φ520mm 大相对孔径(F/1.6)轻量化椭球面反射镜的加工与检测方法。镜面的有效口径为 Φ502mm,顶点曲率半径为 1600mm,非球面系数 $k = -0.9663$,面形精度要求优于 0.025λ(RMS)。镜子背面有 54 个大小深浅不一的不通孔,用于减轻镜子的重量。采用 WYKO 干涉仪检测得到镜面面形误差达 RMS0.02λ, λ=632.8nm。

关 键 词: 大口径强光力非球面; 轻量化反射镜; 光学加工; 光学检测
中图分类号: P111.2; TG580.61+3 **文献标识码**: A

Manufacturing of the Φ520mm F/1.6 ellipsoid mirror

LI Xin-nan, YUAN Lu-jun, LIU Xing-tao, XIA Zi-li
(National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technologies, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: The method of manufacturing and testing for an ellipsoid mirror with Φ520mm diameter are discussed. The parameters of the mirror are as follows: clear aperture is Φ502mm, radius of curvature is 1600mm, conic constant $k = -0.9663$, requirement of surface accuracy is λ/40(RMS) at λ=632.8nm. In order to reduce the weight of the mirror, 54 blind holes with different diameter are drilled from its back surface and the depth are matched the outline of the front-surface. Finally surface accuracy 0.02λ(RMS) is demonstrated by using the WYKO phase-shifting interferometer.

Key words: fast F-ratio aspheric mirror; light-weighted mirror; optical manufacturing; optical testing

1 引 言

大口径兼大相对孔径光学非球面对简化光学系统结构,减小结构空间尺寸,提高仪器整体实用性能指标起十分重要的推动作用,而非球面的面形质量直接影响到光学性能及仪器总体目标的实现,非球面的加工质量是仪器整体考虑时必须直面的关键问题。大口径强光力光学非球面加工困难在于镜面偏离比较球面的量值很大。一般情况下,非球面度与镜面的口径大小成正比,与镜面相对孔径的三次方成正比。随着镜面口径的增加,特别是相对孔径的增大,镜面的非球面度迅速增加,加工修琢过程中容易造成带状面形误差,难于达到高精度。1990 年以来,国外研究机构采用了新颖的抛光工具,来消除镜面上的高频误差,如主动抛光盘技术,柔性抛光盘技术等,成功磨制了口径大到 8m,焦比达 F/1.2 的非球面反射镜。国内研究人员也正在进行相关方面技术工作,特别是小磨头数控抛光技术已在多家单位运用。这里介绍一块 Φ520mmF/1.6 的轻量化椭球面反射镜的加工,采用先进的移相干涉检验设备,运用灵活有效的加工手段,在较短的时间里,镜面面形误差达到了 RMS 0.02λ, λ=632.8nm。

2 镜面的面形方程及其加工技术要求

该镜面为一反射式椭球面,面形方程为

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2y^2}}$$

式中 非球面系数 $k = -0.9663$; 顶点曲率 $C = 1/1600$。

镜子上设有支撑定位孔和定位台阶,镜面的有效口径为 Φ502mm,背面开有不通孔以减轻整个镜子的重量。镜面的加工要求如表 1。

表 1 加工要求

外径	中孔	Δk	ΔR	面形允差
Φ520mm	Φ118mm	±0.001	±1mm	RMS ≤0.025λ, λ=632.8nm

3 镜子外形加工

镜坯为一种低膨胀材料,最初形状为圆形平板,成型后为平凹形。成型前选择平板的一个面作为基

* 收稿日期: 2003-11-07 E-mail: xnli@nairc.ac.cn
作者简介: 李新南(1963-),江苏人,南京天文光学技术研究所研究员,从事大型镜面磨制技术研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

准面,将镜子装夹到专用铣磨机床的工作台上,用不同的金刚砂磨轮分别磨外圆、中孔、台阶、支撑定位孔、减重孔和起始球面。各道工序过程中,对各尺寸和形位公差进行严格控制,加工结束后,用三坐标仪作了精密测量,见表 2,结果符合设计要求。外形加工完成后的镜子的局部见图 1。

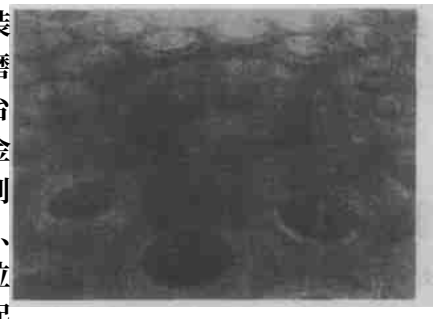


图 1 镜子背面局部示意

表 2 镜子外形尺寸和形位公差实测数据

检验项目	技术参数及要求	检验工具	实际测试数据
外圆直径/ mm	$\Phi 520^{+0.08}_{-0.15}$	三座标仪	Φ519.846
中孔直径/ mm	$\Phi 118^{+0.08}_{0}$	三座标仪	Φ118.017
中孔圆柱度/ mm	≤0.02	三座标仪	0.0197
外圆与中孔的同心度/ mm	Φ0.05	三座标仪	0.006
中孔对背面的垂直度/ mm	≤0.03	三座标仪	0.0255
镜子背面 400 范围平面度/ mm	≤0.01	三座标仪	0.0077

4 起始球面与非球面度[1]

考虑两种起始球面的选择方案,一种是选择与镜面的中孔边缘和外圆边缘相接的球面作为起始球面,另一种是选择与镜面的中心和边缘相接的球面作为起始球面,相比之下,前一种方案镜面偏离比较球面的非球面度要小一些。非球面度最大量值出现在镜面的 0.7 带区附近,镜面的最大非球面度:0.026mm,约合 41λ,λ=632.8nm,沿径向的每厘米最大非球面度:0.0074mm,约合 11.7λ,λ=632.8nm,图 2 为镜面上非球面度随镜面径向位置的变化情况,图 3 为镜面上每厘米非球面度随镜面位置的变化情况,它决定镜面局部加工的难易程度。根据计算情况,以最大非球面位置为起点,分别向镜面的中心和边缘修改非球面。

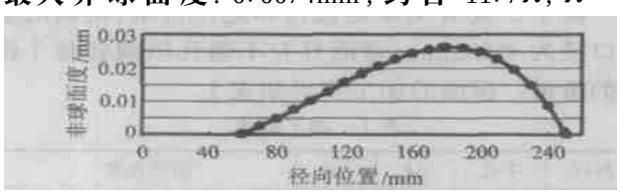


图 2 非球面度随镜面位置的变化

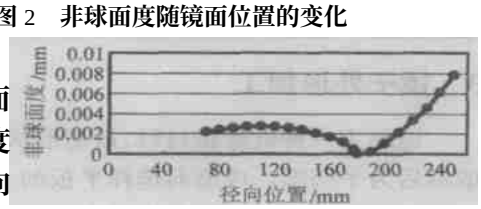


图 3 每厘米非球面度随镜面位置的变化

5 顶点曲率半径测量[2]

由于有中孔存在,不能直接测量其顶点的曲率半径。计算分析表明,在靠近中孔附近,镜面上某点的法线距随径向位置的变化相对而言较小,所以实际上可以控制中孔附近镜面上某些点的法线距的变化来达到控制顶点曲率半径的目的。镜面上某点的法线距与顶点曲率半径 R_0 之间的关系如下

$$R_0 = \sqrt{R_y^2 - y^2} + (1 + k)x$$

式中 R_y 为镜面指定位置的法线距;k 为非球面系数;x,y 为镜面指定位置的坐标。测量 R_0 时采用刀口仪来确定镜面上某一带区的法线距,然后将其换算到顶点曲率半径。综合各种误差的影响,包括:镜面上测量点位置的不确定性、刀口仪对法线与光轴交点位置的判断误差、测量杆受温度影响造成的长度误差、镜面偏心率变化引起的法线距误差、测量过程中的操作误差等因素,顶点曲率半径的测量误差在 ±0.3mm 以下。

6 镜面检测方法

常规情况下,椭球面反射镜的检验可以利用其两个焦点的特性进行。即:当在其中的一个焦点位置放置一个理想的点光源时,在其另一个焦点处应能得到一个完善的点像。在本例中,两个焦点相对镜面顶点的位置分别为:第一焦点 $f_1 = R_0/(1+e) = 806.85$mm,第二焦点 $f_2 = R_0/(1-e) = 94216.31$mm。由于第二焦点位置偏离镜面顶点很远,检验时,长光路里气流和震动的影响非常严重,加上镜面对该焦点的张角只有约 18′,故利用无像差点特性检验镜面的办法难于实现。另一方面,镜面非常接近于抛物面,所以可以考虑采用抛物面的特性来检测。图 4 给出了这种方法的原理图。图中,补偿小透镜和椭球面一起组合成抛物面,位于其焦点的点光源经组合系统成像于无穷远,利用一块与椭球面镜口径相当的标准平面镜,可以实现自准直检验。为了保证检测结果可靠无误,同时设计了

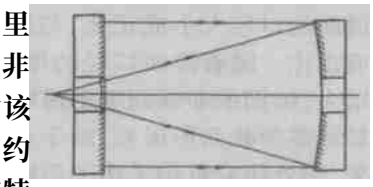


图 4 小透镜加平面镜的自准检测方案

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一套 Offner 补偿检测光路,见图 5。两套光路可以用来互相验证检测结果。

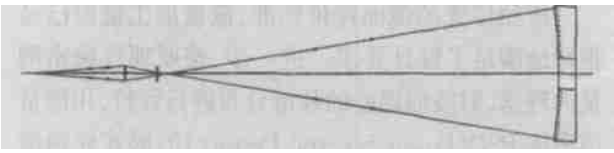


图 5　Offner 补偿器补偿方案

图 6、图 7 分别给出了这两种补偿检验方法的残余波面误差示意图,理论上,用小透镜加平面自准方法的残余误差低于 λ/1000 P-V,用 Offner 补偿器补偿的残余误差低于λ/100P-V。实用时,补偿器的各光学元件的面形参数和机械尺寸均采用了实测数据,并以此为依据对补偿器与镜面的相对位置作调整。综合考虑补偿光路内各种误差因素的影响,包括补偿器光学元件的外形参数误差和材料折射率误差,各光学元件之间的间隔误差,分析表明,两种补偿方法均可以保证比较高的补偿精度。

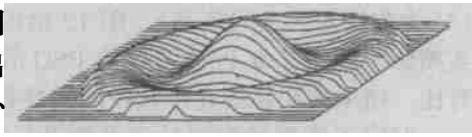


图 6　小透镜加平面自准方案残余波差示意图

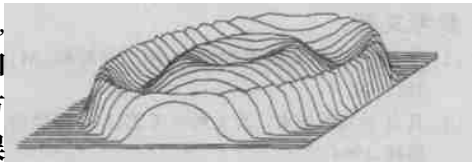


图 7　Offner 补偿器补偿方案残余波差示意图

对照所述的两种检验方案,考察光路可调整间隔对镜面参数的影响,可以发现小透镜加平面自准检测方案中,可调整间隔的误差对镜面偏心率和顶点曲率半径的影响要小一些,所以,在加工过程中采用该检测方案,这样可以在控制面形的同时,比较好地控制参数 R_0 与 k。

7　镜面加工

镜面加工时采用了一台 60cm 加工能力的抛光设备,设备的工作台可以翻转 90°,在检测时镜面随工作台作翻转,光轴可以调整到水平状态。由于镜子的背面有减重的不通孔,镜子加工时采用了多点底支撑。在修改非球面的过程中,根据对应带区非球面度的大小采用了大小尺寸不同的一组工具,较好地避免了高频误差引入镜面。在最后阶段,有针对性地对镜面进行了修整,镜面面形误差明显减小。图 8 和图 9 分别给出了在加工过程中镜面修整前后的一组轮廓曲线,图中 WV 表示波长 λ,波长 λ=632.8nm。

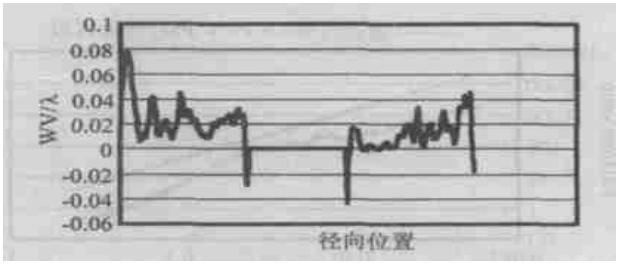


图 8　镜面修整前的轮廓曲线

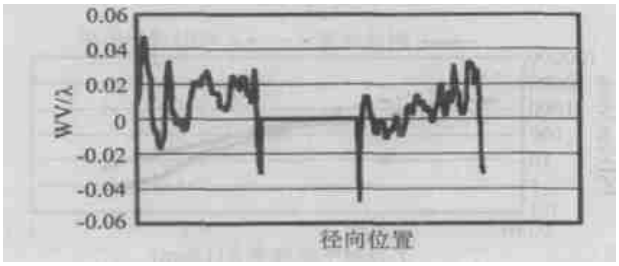


图 9　镜面修整后的轮廓曲线

8　加工结果与分析

采用 WYKO 干涉仪对完工后的镜面进行了检测。整个检测装置放置在一台 4m 长的气浮平台上,图 10 和图 11 分别给出了检验时的干涉图。图 10 是采用小透镜加平面自准方案时拍摄的,图 11 是采用 OFFNER 补偿方案时拍摄的,参照图 4 和图 5 所示的光路,前者检验光束在被检验镜面上反射了两次,后者为一次。依照前述,我们比较注重于用前者来控制镜面的偏心率,在这一光路里,如果镜面的偏心率偏离了设计要求,将会显著地以三级球差的形式在干涉图上反映出来。由于检测结果中同时包括了整个光路内所有光学元件的误差,辅助元件的加工误差需要严格控制。考虑到图 4 光路中存在一块直径大于 Φ500mm 的标准平面镜,该镜子支撑状态好坏也直接影响检测结果,为了避免支撑不当引入非对称面形误差影响被加工镜面的检测结果,所以最后采用了 OFFNER

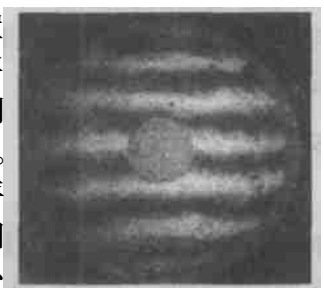


图 10　小透镜加平面自准方案干涉图

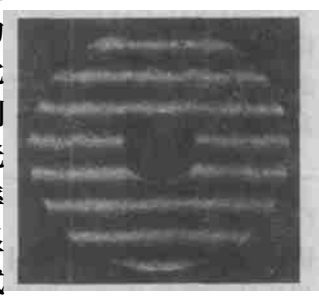
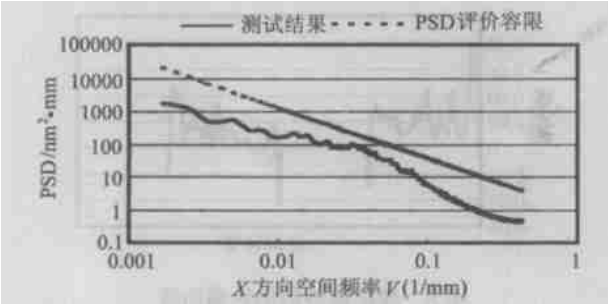
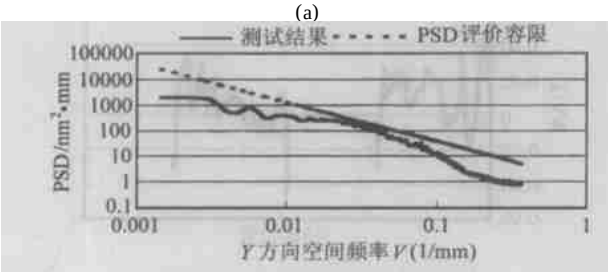


图 11　OFFNER 补偿方案干涉图

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)



(b)

图 12 干涉检验实测所得到二维 PSD 及评价 PSD 的容限对比

补偿方案作为镜面面形的终检手段。实测的镜面面形误差为 rms = 0.02λ,λ = 632.8nm。

按照传统的镜面评价标准,该被加工镜面已经很好地满足了设计要求。进一步,按照现代精密测量的理念,对波前误差的频谱分布进行评价,用能量谱密度 PSD(Power Spectral Density)的形式评判镜面波纹差,其具体的评价指标为:PSD $\leq 1.05/V^{1.55}$ (V 为波纹差的空间频率)。图 12 给出了干涉检验实测所得到的二维 PSD 及评价 PSD 的容限之间的对比。结果表明镜面在中频段同样具有良好特性。

对完工镜面的面形其它参数进行实测,测量结果为:顶点曲率半径 R_0 = 1600 ±0.3mm,镜面的非球面系数 k = - 0.9665。

参考文献:

[1] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京:科学出版社,1994.

[2] 几几马克苏托夫. 天文光学工艺[M]. 杨世杰译,北京:科学出版社,1964.

(上接第 615 页)

明非线性的独立特征要比非线性的不相关特征更加适合分类识别。

5 结 论

本文在 ICA 和 KPCA 方法的基础上,导出了一种基于 KICA 的人脸识别算法。首先将输入样本通过非线性映射将其映射到高维特征空间中,然后再在高维特征空间中进行 ICA 变换,通过求解 KPCA 问题和利用 FASTICA 算法求取非线性统计独立基,然后将样本投影到非线性的独立基上作为特征向量用来进行分类识别。实验结果表明,本文提出的 KICA 要比 PCA、KPCA 和 ICA 算法识别率要高。

参考文献:

[1] Chellappa R, Wilson C L, Sirohry S. Human and machine recognition of faces: a survy[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(5): 705 —740.

[2] Turk M, Pentland A. Eigenfaces for recognition, Journal of cognitive neuroscience[J]. 1991, 3(1): 71 —86.

[3] Yang M H. Face recognition using kernel methods[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2002, 14: 215 —220.

[4] Bach F R, Jordan M I. Kernel independent component analysis[J]. Journal of Machine Learning Research, 2002, (3): 1 —48.

[5] Bartlett M S, Movellan J R, Sejnowski T J. Face recognition by independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(6): 1450 —64.

[6] 丁佩律,梅剑锋,张立明,等. 基于独立分量分析的人脸自动识别方法的研究[J]. 红外与毫米波学报,2001,20(5): 361 —364.

[7] Scholkopf B, Smola A, Muller K. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem[J]. Neural Computation, 1998, (10): 1299 —1319.

[8] FASTICA matlab 工具包[DB/OL]. http://www.cis.hut.fi/projects/ica/fastica/.

(上接第 618 页)

镜相对入射光束有抖动对其转向角的影响,并给出相应的精确表达式。根据以上分析,通过预先对所用的五角棱镜进行标定,在数据处理中对角度误差予以修正,可减小五角棱镜的制造中产生的角度误差对测量系统造成系统误差。此外,在五角棱镜加工、使用中,由于光束是经过多个面入射、反射、出射,因而作者认为各面的加工的平面性及玻璃折射率是否均匀也会给测量带来误差,对于在高精度计量过程中也是不能忽视的一个方面。

参考文献:

[1] 董艳玲. 大型工件平行度、垂直度激光测量系统的研制[D]. 北京: 清华大学, 1989.

[2] 郝群,赵洋,曹芒. 等. 五角棱镜角度误差对建立大尺寸平面基准的影响[J]. 光学技术,1997,(4): 49 —51.

[3] 冯其波. 激光高精度测量大型工件内外径方法和系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 1993.

[4] 高立民,罗长州,陈良益,等. 五角棱镜在方位对准中的应用[J]. 应用光学,2003,24(1): 5 —7

[5] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.

[6] 匡萃方,冯其波,刘欣,等. 用矢量方法分析角锥棱镜直角误差对其光路反射特性的影响[J]. 光学仪器, 2003, 25(4): 55 —58

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net