

$\phi 2.16$ 米非球面主镜的二维哈特曼检验

高必烈 李德培 潘君骅
(中国科学院南京天文仪器厂)

提 要

首次采用二维哈特曼法在车间对 $\phi 2.16$ 米非球面主镜进行检验,给出了主镜的光浓度,最佳焦面点列图,镜面偏差的等高线图,均方根误差等,还用泽尼克(Zernike)多项式拟合镜面的偏差面形,求出像差系数^[1]。用本方法及二维最小二乘法消去测量误差,求出实际镜面的偏差面形^[1,2]。此外对本方法还做了一些改进,即以最佳焦面点列图上各对几何重心的偏差平方和作为评价函数,采用优化的方法找出实际镜面的顶点曲率半径 R 和离心率 e 。

一、引 言

大光学表面的定量检验技术是目前大家所关心的共同问题,特别是对于非球面表面的无补偿定量检验更是如此。

对于单一的非球面主镜来说,采用阴影检验法、台曼-格林干涉条纹法、星点法等要想给出定量的误差信息都是不现实的。哈特曼屏板检验方法是属于一种波面采样的定量检验方法,已有80多年历史,但是长期以来一直采用一维抽样检验。以后又发展到将沿不同方向(如8个方向、16个方向等)的径向一维哈特曼检验组合起来的方法^[3]。直到测量技术和计算手段日趋发达的今天,采用二维的矩形阵列来检验才有可能^[1]。由于二维哈特曼法具有采样比例高、结果可靠性高、可重复性好、数据精确、方法简单等优点,故各国的天文光学工作者都采用此种方法^[1~4]。

二、基本原理和方法

如图1所示建立一个坐标系,采用一个矩形阵列来采样,显然当采样点之间关系确定时是不难再现波前的。若实际波面在某点相对于理想波面倾斜时,光线将不聚集在理想位置上,而会产生一个偏差 $\Delta_0(x, y)$,这个 Δ_0 就反映了该点波面的倾斜状况。实际检测时,是在光轴上 S 处放置一点光源,然后在 P 和 P' 处拍摄两张照片。由两张照片或一张照片与一屏孔板上相对应的两点坐标即可确定镜面上的入射点。根据入射光线和反射光线,利用空间光线间的相互关系,可求得平行光入射时实际的反射光线和理想的反射光线之间的偏差 Δ_0 ,构成焦面的点列图。

点列图上各点对重心的偏离状况,构成被检镜面的几何光浓度曲线。而各点偏差的平方和构成一个评价函数,分别将非球面主镜的结构特征参数——顶点曲率半径 R 和离心率

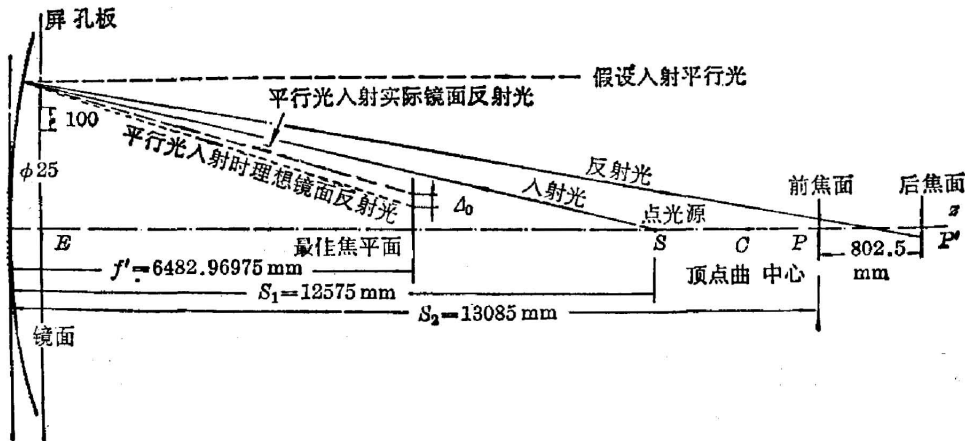


图1 二维哈特曼检验原理图及装置示意图

Fig. 1 Setup of the experiment

的平方 e^2 ——作为变量, 选取适当的步长因子, 采用最优化方法, 可求得实际镜面的结构特征参数(即它的实际尺寸以及与设计的偏差)。

由于底片与镜面之间的测量误差以及光源偏离光轴效应, 将导致 $\Delta_0(x, y)$ 产生一个线性偏差。采用两个一维线性最小二乘法分别拟合到 $\Delta_0(x)$ 和 $\Delta_0(y)$ 上, 即可消除此项效应^[1]。

$$\begin{aligned} \Delta(x) &= \Delta_0(x) - A - Bx, \\ \Delta(y) &= \Delta_0(y) - C - Dy, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\Delta_0(x)$, $\Delta_0(y)$ 是点列图上各点偏差的两个分量, $\Delta(x)$ 、 $\Delta(y)$ 是消除测量误差后的相应分量, A 、 B 、 C 、 D 为线性偏差系数。 x 、 y 为镜面上对应点的入射坐标。若采样点数为 N , 则系数 A 、 B 、 C 、 D 为:

$$\begin{cases} A = (\sum \Delta_0(x)) / N; \\ C = (\sum \Delta_0(y)) / N; \\ B = [\sum x(\Delta_0(x))] / (\sum x^2); \\ D = [\sum y(\Delta_0(y))] / (\sum y^2). \end{cases} \quad (2)$$

若最佳焦距为 f , 则镜面上各采样点的偏差斜率为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega}{\partial x} \doteq \frac{\Delta(x)}{2f}; \\ \frac{\partial \omega}{\partial y} \doteq \frac{\Delta(y)}{2f}. \end{cases} \quad (3)$$

所以采用梯形法则积分, 即可求出以波长为单位的镜面偏差。

$$\begin{cases} \omega_x = \frac{1}{2f\lambda} \int_0^x \Delta(x) dx \doteq \sum \frac{\Delta(x) \cdot d}{2f\lambda}; \\ \omega_y = \frac{1}{2f\lambda} \int_0^y \Delta(y) dy \doteq \sum \frac{\Delta(y) \cdot d}{2f\lambda}; \end{cases} \quad (4)$$

其中 d 为屏孔的间隔, λ 为所采用的波长, ω_x 、 ω_y 是由 x 或 y 方向积分得出的波前。

由于数值积分方法往往具有固有的累积误差,为了减小这些误差,对于绝大多数采样点,都取八个不同方向的积分平均值(如图2)。因为从理论上讲,当镜面是光滑无奇点时,

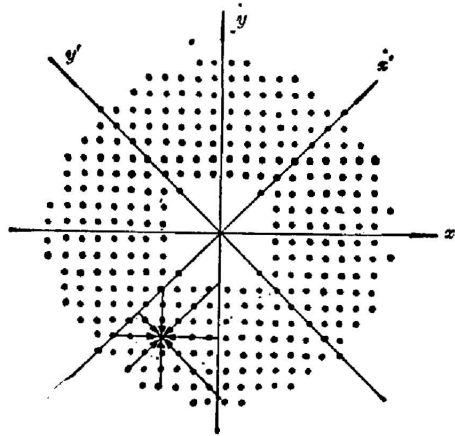


图2 采样屏板及积分路径
Fig. 2 A 326-hole square array test screen and integration paths

它的一阶和二阶导数都应是连续的,得出的镜面偏差形状与积分路径无关。因此每次都从 x, y 两个方向积分取平均值作为一点向下积分的基准。然后沿相反路径再积分一次。四次平均后再将点列图绕坐标原点旋转 45° , 用不同的孔距和不同的路径重复积分多次取平均,实质上是起平滑作用,也部分地弥补了由于采样点的不连续所带来的影响。

最后,为了消除由于求重心和确定最佳焦面时所产生的残余误差,以及水平检验时不同气流层的温差所造成的在 0° 和 90° 方向上的像散和镜面变形,采用泽尼克系数对波面进行拟合,求出其像差系数,然后消去不属于镜子本身的虚像差,求得镜子的实际偏差形状。当然也可采用二维的最小二乘法,在采样点上对波面进行拟合,它也可消去测量误差,

求得镜面的实际偏差面形。两种方法我们都采用过,实践证明采用大工具修琢的镜面,比较平滑。对于高频变化比较小的镜面,采用泽尼克系数法拟合较好,易于用解方程的形式使绘制面形图。对于手修的镜面,即高频偏差较频繁的镜面,采用二维最小二乘拟合法更能真实地反映镜面形状。然而其偏差的等高线图比较难画。由于 $\phi 2.16$ 米主镜是手修的,故采用二维最小二乘拟合法,和泽尼克系数法求出像差系数。

三、检验装置和测量处理

检测装置如图1所示,点光源 S 及正方孔阵的屏板 E , 由于屏孔距最大误差达到 3mm 以上,故需拍两张底片 P 及 P' 。若屏孔距的最大偏差 $< 0.05\text{mm}$, 则可将屏孔板作为一张底片处理,将会节省大量的底片测量时间。

屏孔板上孔的布局如图2所示,孔间距离约为 100mm , 孔的大小约为 $\phi 25\text{mm}$ 。底片的测量是在东德的坐标量度仪上完成。由于底片上光斑较大,且为人工找寻的光点密度中心,故精度仅能达 0.01mm , 这对于目前这样一个水平的镜面尚可以,若镜面较好,均方根偏差仅为 $\lambda/10 \sim \lambda/16$ 时,则要求底片的测量误差 $< 0.005\text{mm}$, 最好能达到 0.002mm 以下,要想达到这个精度,可以采用二维底片密度自动判读仪或缩小光斑尺寸后用人眼判读。

目前的屏孔数为 326 个,间距 $> 100\text{mm}$, 对于一些高频变化的误差容易被遗漏。故应把镜面旋转到不同方向进行多次拍摄,这样可以加密采样点,并可消除由于不同层水平检验的空气温差及钢带悬吊镜坯所引起的镜子变形的附加误差。当然最好是采用垂直和多次旋转镜面检验,则能使结果更加精确真实。

两张底片的归一化处理,是使各对点的角度偏差总和为最小。

四、测量的结果及分析

图 3 是焦面内外两张照片。图 4 是最佳焦面上的点列图。图 5 是不同口径和 e^2 时的光浓度曲线以及与夏威夷 3.6 米非球面主镜的光浓度的比较曲线。图 6 是消去测量误差前后的偏差面形的等高线。

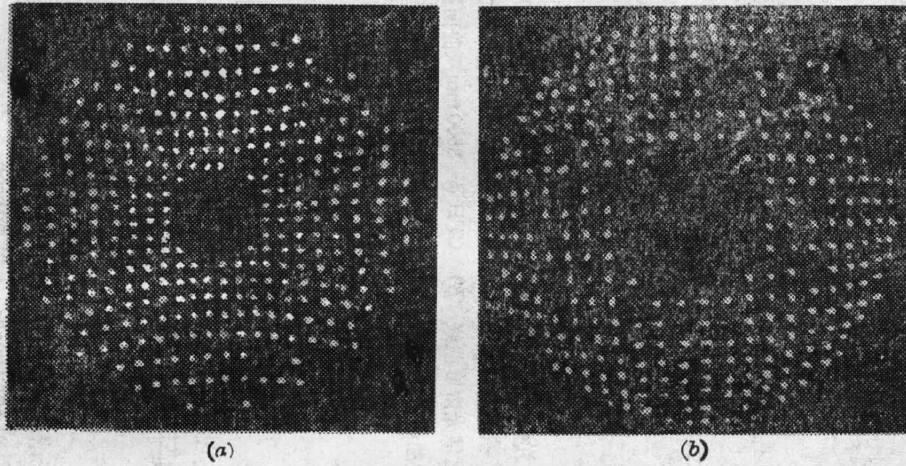


图 3 $\phi 2.16$ m 主镜二维哈特曼照片

Fig. 3 Two-dimensional Hartmann patterns for the $\phi 2.16$ m mirror

(a) Inside focal plane; (b) Outside focal plane

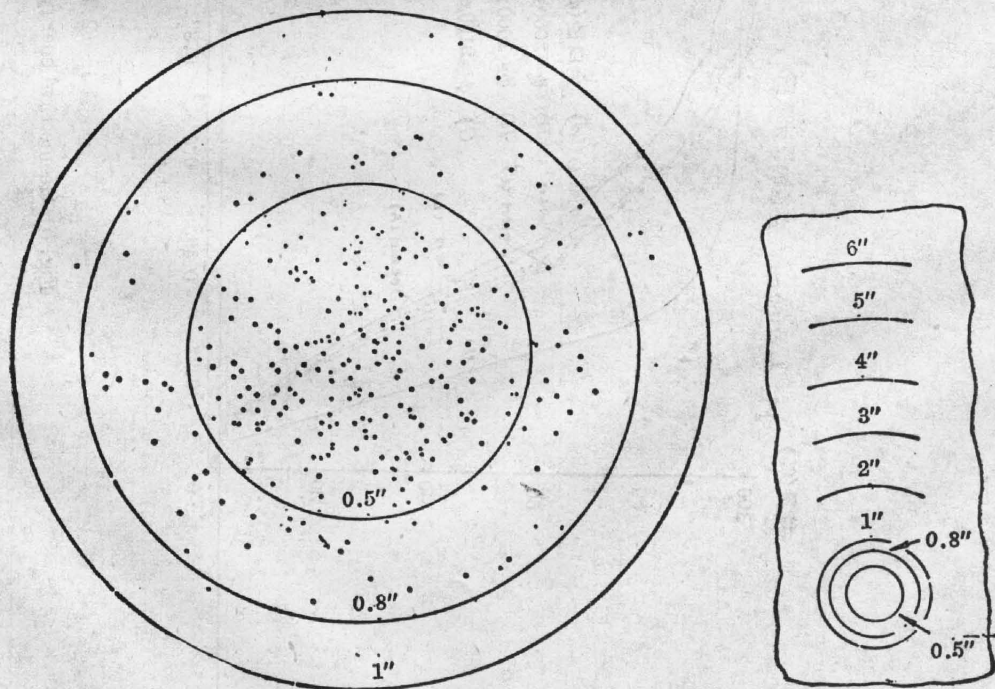


图 4 最佳焦面点列图

Fig. 4 Spot diagram at best focus

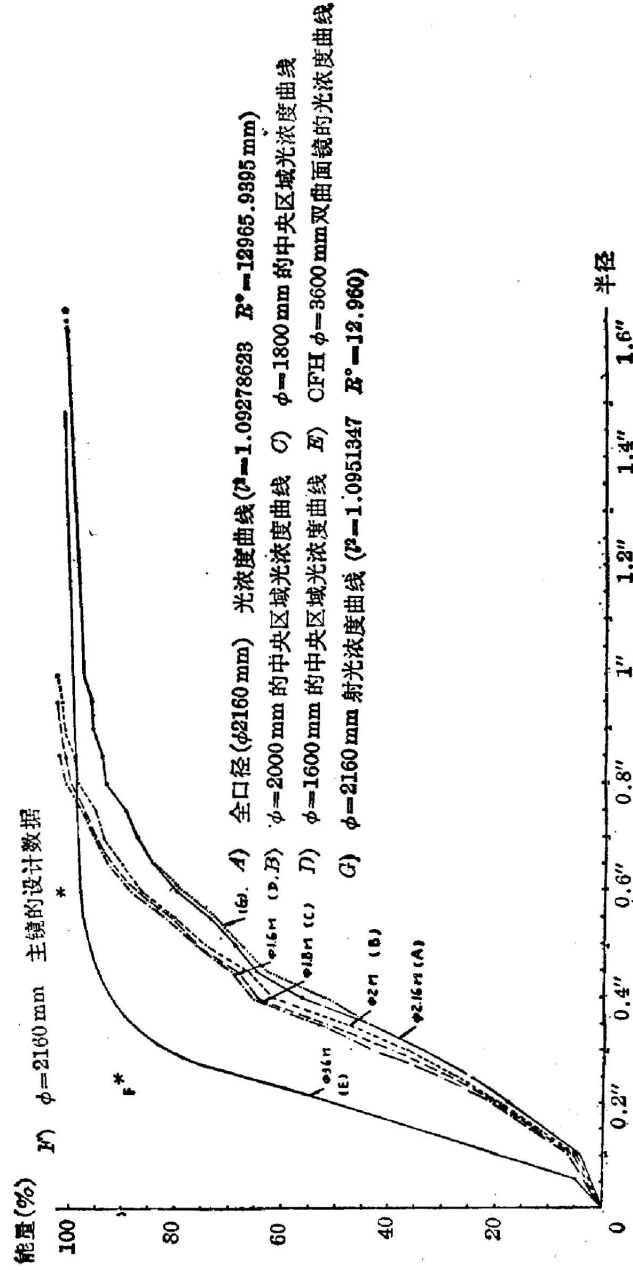
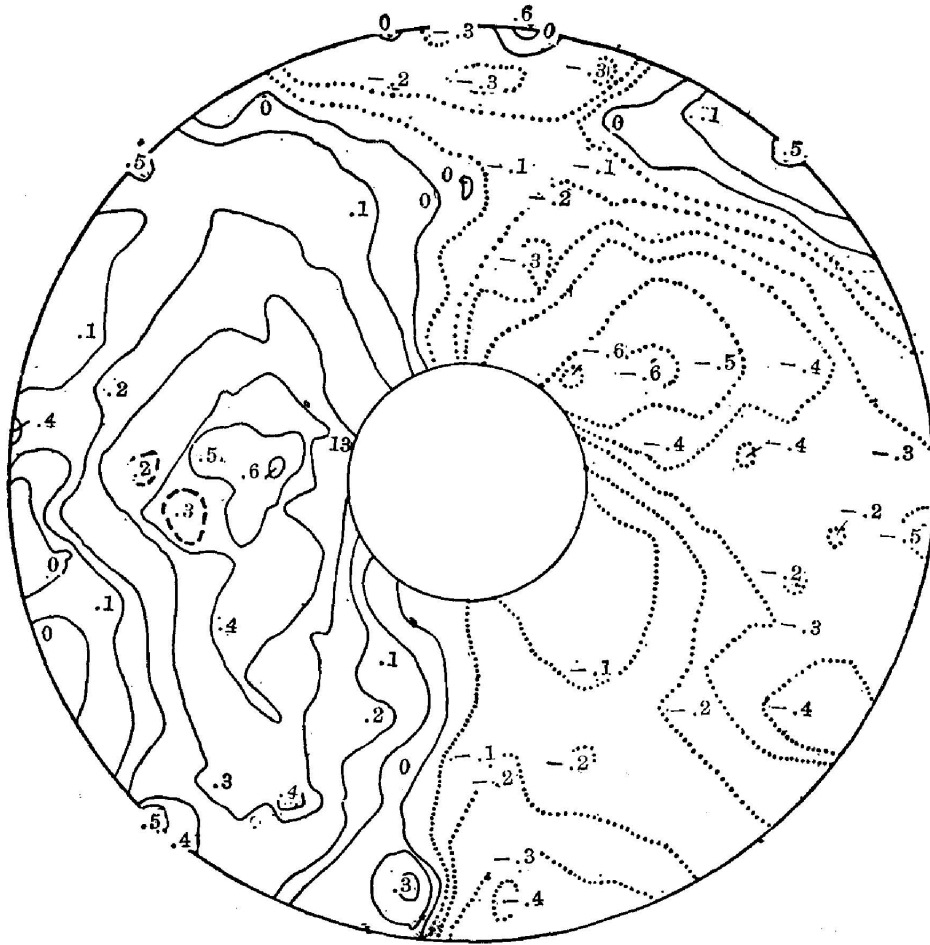


图 5 $\phi 2.16$ m 主镜光浓度曲线图

Fig. 5 Geometrical energy concentration for the $\phi 2.16$ m mirror



(a) $r_m s = \lambda/3.517$

图 6(a) $\phi 2.16$ m 非球面主镜镜面偏差的等高线图

Fig. 6(a) Contour map having measure error

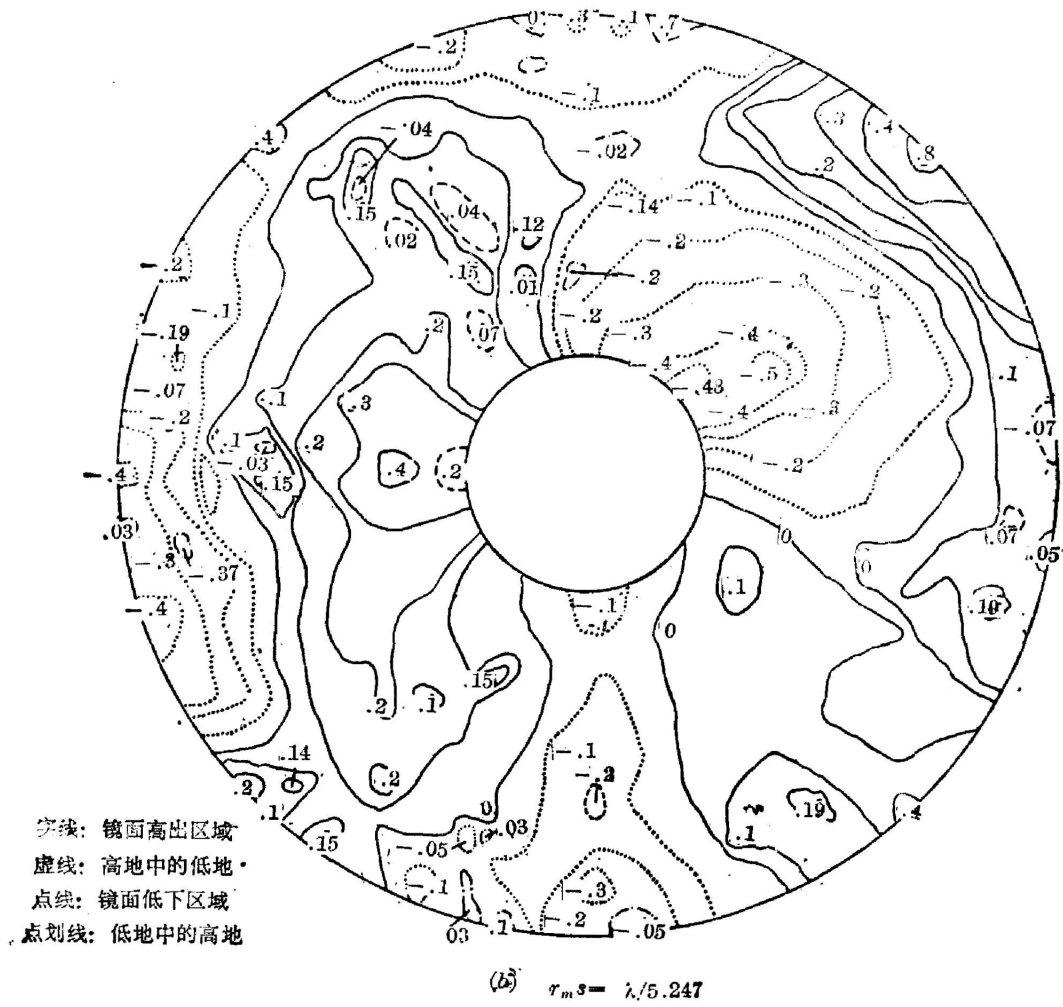
图 6(b) $\phi 2.16\text{ m}$ 非球面主镜镜面偏差的等高线图

Fig. 6(b) Contour map with measurement error corrected

φ2.16 m 望远镜主镜二维哈特曼定量检测数据一览表
Table: Two-dimensional Hartmann testing data for a φ2.16 m mirror

偏差值	设计数据		实测数据		主 镜 面 像 差 系 数 表 (单位:λ)									
	$R = 12960 \pm 4 \text{ mm}$	$e^2 = 1.0951847$	$R = 12965.9895 \text{ mm}$	$e^2 = 1.09278623$	泽尼克系数	系数值	注	泽尼克系数	系数值	注	泽尼克系数	系数值	注	
$\Delta R = +5.9895 \text{ mm}$					1	-0.0240	顶点偏差	16	$.8243 \times 10^{-3}$		31	$-.5556 \times 10^{-4}$		
$\Delta e^2 = -.00254847$					2	.00923	x 方向倾角	17	$.6843 \times 10^{-4}$		32	$.1892 \times 10^{-4}$		
φ2.16 米主镜的光浓度值 ($e^2 = 1.09278623$)	5%	0%1	70%	0%519	3	-.0528	y 方向倾角	18	$-.4907 \times 10^{-3}$		33	$.1108 \times 10^{-4}$		
	10%	0%133	80%	0%605	4	.5540	0° 及 90° 像散	19	$.7843 \times 10^{-3}$		34	$-.5275 \times 10^{-4}$		
	20%	0%215	90%	0%773	5	.0888	离焦量	20	-.001178		35	$.1978 \times 10^{-3}$		
	30%	0%277	95%	1%1	6	.2305	45° 像散	21	.008078		36	$-.8308 \times 10^{-3}$		
	40%	0%332	99.99%	1%716	7	.08804		22	-.007853		37	.001329		
	50%	0%369	99.999%	2%340	8	-.009544	x 轴的三级慧差	23	$-.222 \times 10^{-3}$		38	$-.162 \times 10^{-3}$		
60%	0%439	100%	5%674	9	.01493	y 轴的三级慧差	24	.12521		39	$.2659 \times 10^{-4}$			
					10	.01215		25	.02302	五级球差	40	.01786		
					11	-.01495		26	-.05202		41	.003307		
					12	.8595		27	-.0305		42	-.00744		
					13	.0629	三级球差	28	.2006		43	-.004287		
					14	-.1462		29	$.116 \times 10^{-3}$		44	.0284		
					15	-.08761		30	$-.2837 \times 10^{-3}$		45	-.1929		

镜面均方根误差表 (rms, 单位: λ)	
消差前	φ2.16 米
	φ1.8 米
消差后	φ2.16 米
	φ1.8 米

消差前	φ2.16 米		φ1.8 米	
	5500 Å	6328 Å	5500 Å	6328 Å
消差前	$\frac{\lambda}{2.480}$	$\frac{\lambda}{2.827}$	$\frac{\lambda}{5.854}$	$\frac{\lambda}{6.758}$
	0.4033 λ	0.3537 λ	.1708 λ	.1498 λ
消差后	$\frac{\lambda}{3.458}$	$\frac{\lambda}{3.943}$		
	0.2892 λ	0.2536 λ		
消差前	$\frac{\lambda}{3.057}$	$\frac{\lambda}{3.517}$		
	0.3271 λ	0.2843 λ		
消差后	$\frac{\lambda}{4.561}$	$\frac{\lambda}{5.217}$		
	0.2193 λ	0.1906 λ		

显然这块镜子的结果并不好,均方根误差高达 $\lambda/5.247$,在 $\phi 1.8$ 米的区域也达到近 $\lambda/7$,从等高线图上看,镜面上主要有三块“高地”和四块“洼地”,此外除局部边缘外(右上角)基本上边缘都低下。产生这种结果的主要原因是:因为镜坯是由三块苏联 JK5 玻璃分层浇铸而成的,形成各层厚度、应力不均匀,粘结层各处性能不一,表面各处硬度不同,这些都给加工带来了很大的困难,虽然手工局部修改,而结果仍不理想。右上角的高出区为镜子的破边区域,而普遍的塌边估计是由镜坯的硬支撑及高强度的大研磨工具所引起的。

从主镜面的像差系数表可以看出第四项的像散系数较大,如前所述,这是由于水平检验时,空气层的温度梯度及镜子形变所引起的。当然如果在不同方向上(最好至少三个方向)多拍摄几组照片,则上述两个因素所引起的像散效应也是可以从镜面的像差系数中解算出来而消除的,剩下的为镜子本身所固有的像散。

从表中可以看出主镜面的 e^2 实测值比设计数据小 0.00234847, 而 R 大 5.9395 mm。

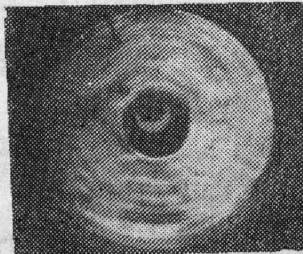


图 7 $\phi 2.16$ m 主镜阴影图

Fig. 7 Foucault map

仔细校准奥夫纳补偿器与被检镜的距离则可以限制 Δe^2 与 ΔR 到极小。从镜面的均方根误差表及光浓度曲线也可看出,对不同的镜面特征参数,上述值也是不一样的。显然实际镜面偏离了设计要求,这点对大型非球面是很难控制的。

此外图 6(a) 的消差前面形偏差图与图上的阴影照片能较好地对应起来,证明了此二维哈特曼检验程序是无误的。

由于此次检验工作(包括程序的编制)是在镜子磨完之后才开始的,故未能用检验来指导修磨,但是这次我们首次实践了一种检验方法,这样为今后加工出水平较高的非球面大镜面创造了条件。

最后感谢在计算过程中本厂计算机房同志们所给予的帮助,感谢徐钦贵、余景池、赵树棠、陈贤龙、倪黎、王世聪、朱政、王建国等同志在程序、光阑设计、底片的拍摄、测量及等高线图的绘制中所给予的帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] I. Ghozeil, «Optical Shop Testing», (D. Malacara, New York Printed, 1978), Chap. 10.
- [2] E. N. Wilson, M. Lelvyer; *E. S. D. Technical Rep.*, 1977, No. 8.
- [3] J. C. Fouere, G. Ratier; *C. F. H. Telescopi Rep.*, 1978.
- [4] I. Ghozeil, J. E. Simmons; *Appl. Opt.*, 1974, 13, No. 8 (Aug), 1773.
- [5] D. H. Schulte; *Appl. Opt.*, 1968, 7, No. 1 (Jan), 119.

Two-dimensional Hartmann quantitative test of an aspherical primary mirror ($\phi 2.16$ m)

GAO BILIE LI DEPAL AND PAN JANHUA

(*Nanjing Astronomical Instruments Factory, Academia Sinica*)

(Received 15 March 1985; revised 18 April 1985)

Abstract

This paper deals with the two-dimensional Hartmann quantitative test of the largest hyperboloidal primary mirror made in China. It is the first of its kind carried out in this country. It provides geometrical energy concentration, spot diagram at best focus, contour map for the mirror and aberration coefficients of Zernike polynomial fitting wavefront. In addition, parameters of the real shape, i.e., real radius of its curvature (\bar{R}) and function of eccentricity of a conic surface (e^2) are given.