

计算机全息在 $\phi 1.56$ 米双曲面主镜 加工检验中的应用

施志果 马仁勇

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

王 兰 娟

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文提出了计算和绘制条纹型计算机全息图的新方法——条纹序号法。采用这种方法,制得了精度为 $\lambda/20$ 的全息图。采用了单块补偿透镜——全息图组合的检验系统。给出了计算机全息检验在 $\phi 1.56$ 米主镜加工过程的早期、中期、后期三阶段中的检验结果和作用。

一、引 言

长期以来,人们一直在探索非球面加工中的检验问题。1967年 Lohmann^[1]首先提出和实现了计算机全息图(CGHI)。它真实地高精度地再现光波波面,使制造光学非球面样板成为现实可行,使完善消像差的复杂补偿系统不再成为必要。这一性能很快被用来解决光学非球面检验这一难题^[2,3]。

1971年 Birch^[3]提出和实现了干涉条纹型计算机全息图,他采用的计算和绘图方法称为扫描法。和扫描法相比,条纹序号法^[4]具有下列优点:(1)计算和绘图的概念及过程清晰;(2)波面取样点数要减少一千倍以上;(3)条纹地址的计算精度只受限于计算机的精度;(4)可以按照所需要的顺序,逐条地、完整地计算和绘制第 m 根条纹。

本文采用条纹序号法计算机全息对1.56米双曲面主镜进行了加工中检验。全息检验的结果,不仅及时给出了主镜面形质量的定量评价,而且直观地揭示了横向测试通道中准稳定温差空气层的存在和侧支承引起的镜面像散。

二、计算机全息图和它的精度测量

全息摄影的原理光路示于图1。在本文叙述的应用中,物波面是一个完善的无加工误差的1.56米双曲面主镜的返回波面,如图2中曲线 O 所示(它只有数学形式的存在)。制作全息图的任务,就是首先计算出全息图上干涉条纹的位置,然后用计算机控制的绘图仪精确地绘制出干涉图,再缩小到合适的尺寸,就成为实用的全息图。

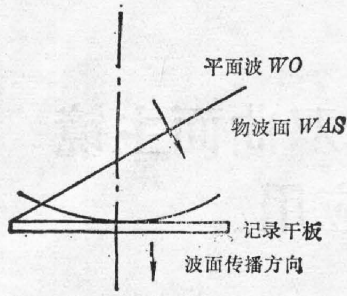


图 1 全息图的产生

Fig. 1 Schematic diagram of the holographic recording

注意到物波面 ψ_0 是圆对称的波面, 如图 3 所示。在半径为 r_n 的圆周上, 波面光程具有相同值 $\psi_0(r_n)$ 。参考平面波的光程为 $\psi_p = A_0 + A_1x$ 。第 m 根条纹上各点的位置必须满足

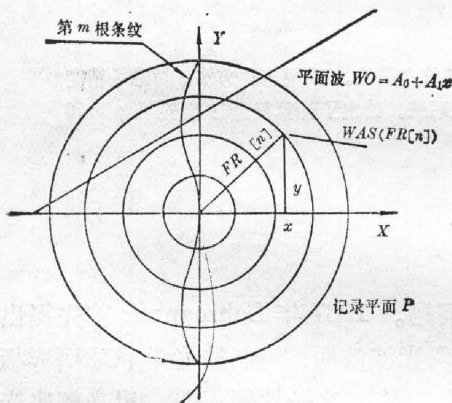


图 3 用条纹序号法计算第 m 根条纹
Fig. 3 Calculation of the site of the M th fringe by means of the fringe-order method

下式

$$A_0 + A_1x - \psi_0(r_n) = m\lambda,$$

$$x = \frac{m\lambda + \psi_0(r_n) - A_0}{A_1} \quad (1)$$

如果 $|x| \ll r_n$, 则说明此点必然在半径 r_n 圆周上, 是真值点。继而求出

$$y = \sqrt{r_n^2 - x^2}, \quad (2)$$

这就是我们提出的条纹序号法^[4]。

本文采用此法分析了某大型数控绘图仪的误差性质, 拟订了合适的绘图步骤, 并制作了 1.56 米主镜检验用的计算机全息图。全息图的参数为: 直径 $\phi 36.83 \text{ mm}$, $A_0 = 500\lambda$, $A_1 = 6\lambda/\text{mm}$, 含有 221 根条纹, 参考平面波的倾角为 $\theta = 3'3''14$, 再现波面最大斜率为 $0.75\lambda/\text{mm}$, 波峰 3.967λ 。

1.56 米主镜是造价昂贵的大型精密光学部件, 因此需要事先对全息图再现波面的精度

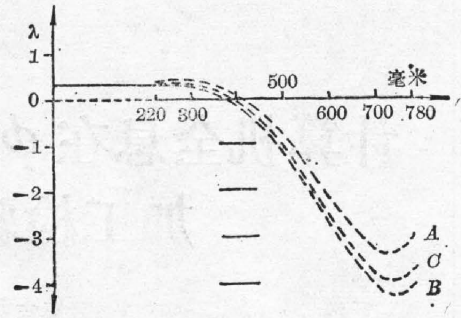
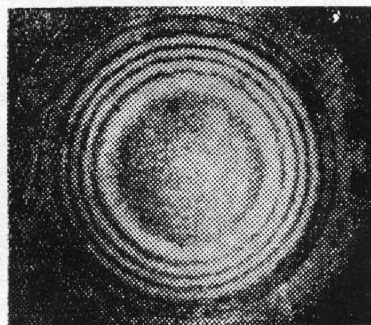
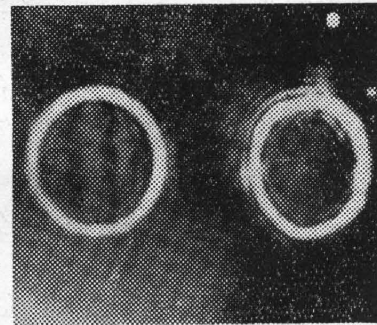


图 2 主镜返回波面

Fig. 2 Return wavefront from the primary mirror



(a)



(b)

图 4 (a) 全息图再现波面与平面波同轴干涉图; (b) 远场衍射花样

Fig. 4 (a) Coaxial interferogram resulting from interfering plane wavefront with wavefront produced by CGH; (b) Diffraction pattern in far-field

表 1 全息片再现波面精度的测定

Table 1 Measurement of the accuracy of the aspheric wavefront produced by CGH

理 论 值	暗环编号	中心洞边	1	2	3	4	峰	边
	全息图半径 H (mm)	5.6726	11.1950	12.9697	14.3952	15.9134	17.4685	18.4188
镜面半径 y (mm)	220	452.29	532.65	598.60	668.83	736.71	779.79	
波面读数 W (λ)	0.3404	-0.5	-1.5	-2.5	-3.5	-3.967	-3.674	
实 测 值	实测 H_0 (mm)		33.952	39.127	43.117	47.487		54.137
	$H_0 \times \frac{18.35}{54.137} = H_1$		11.508	13.262	14.614	16.095		
	按 H_1 查 W_1 (λ)		-0.6508	-1.705	-2.658	-3.601		
误 差	平面波相位初值 $\phi_0 = W_1 - W$ (λ)		-0.1508	-0.205	-0.158	-0.101	ϕ_0 (平均) = 0.1537	
	$\Delta\phi_0$ (λ)		0.0029	0.0513	0.0043	0.0527		
	全息片精度 ΔW	(λ)	1/344.8	1/19.49	1/232.5	1/18.9		

进行测定。图 4(a) 是全息图再现波面与平面波的同轴干涉图。实际测定精度时用的干涉图的直径为 $\phi 110$ mm。从图 4(a) 上可以看出, 再现波面不存在可觉察到的像散。测定全息图再现波面实际达到的精度如表 1 所示。表 1 的测量结果表明全息图再现波面的精度为 $\lambda/18.9$ 。主镜面形的设计要求为 $\lambda/8$ 。光线在主镜镜面反射一次, 所以在干涉平面上的视在误差为 $\lambda/4$ 。这就说明我们制作的全息图是能胜任主镜面形检验工作的。

三、单块补偿透镜和全息检验系统

本文采用计算机全息图——单块补偿透镜组合方案。这种组合方案, 国外文献上多有倡议和论述^[5]。但实际使用, 尚未见报道。

在传统的大型天文望远镜主镜的加工检验中, 要求补偿器对主镜的法线像差进行完善的补偿^[6]。但是, 计算机全息使完善的消像差补偿不再是必需的。这就给补偿器的设计和加工带来了很大的灵活性和方便。1.56 米主镜面形为

图 2 单块补偿透镜的尺寸

Table 2 Size of single compensation lens

	透 镜 尺 寸			返 回 波 面 WAS		在 图 2 中的 标志
	R_1	h_2	d	最大斜率 λ/mm	波 峰 λ	
不靠样板	96.592	60.07	15	0.74	3.378	A
靠 样 板	96.15	60	15.80	0.78	4.247	B
成品尺寸	96.15	60	15.77	0.75	3.967	C
成品面形 (对样板言)	$N < 0.2$	$N < 0.2$				
	$\Delta N < 0.1$	$\Delta N < 0.1$				

$$y^2 = 20800x + 0.0919572x^2. \quad (3)$$

主镜的法线像差为 31.935 mm。单块补偿透镜补偿该像差的大部分, 这种补偿既不要求完

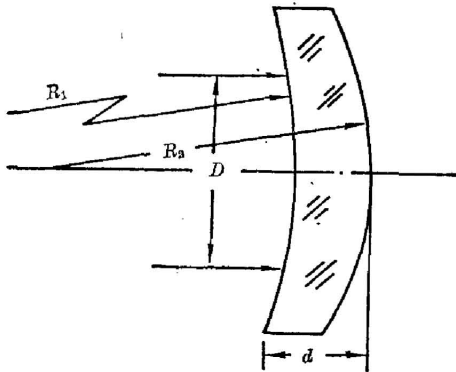


图 5 单块补偿透镜

Fig. 5 Single compensation lens

善, 补偿的程度也没有严格的要求。单块补偿透镜尺寸如表 2 所示, 其结构示于图 5。残余像差则由全息图来提供零位干涉检验。透镜中心厚度的设计值为 15.80 mm, 返回波面如图 2 中的曲线 B。实际成品透镜的中心厚度为 15.77 mm, 相应返回波面改变为图 2 中的曲线 C。以 15.77 代入最后的计算和绘图程序, 让计算机全息图去记录和再现图 2(c) 的波面, 这就自动消除了补偿透镜的加工误差。

全息检验系统光路图示于图 6, 30 mW 单频氦氖激光束经过平行光管, 扩展为 $\phi 50$ mm 平行光束。在小孔处, 设置系统的公共焦点, 其角灵敏度为 $20''/\text{mm}$, 以便利各元件准直。参考平面镜只需作角度调整, 为全息图提供参考平面波。计算表明: 全息图横向移动 0.33 mm, 产生 $\lambda/4$ 的全差; 全息图轴向移动 90 mm, 产生 $\lambda/25$ 的误差; 补偿透镜的光轴倾斜 $2'10''$, 产生 $\lambda/4$ 的误差; 光轴横向移动 0.04 mm, 产生 $\lambda/4$ 的误差。全息图再现波面和主镜返回波面的远场衍射花样如图 4(b) 所示。它有助于补偿透镜和主镜之间轴向距离的调整。实际使用说明, 这个全息系统在使用上是方便的, 能迅速获得主镜返回波面的干涉条纹。在观察屏处, 可以获得 $\phi 36$ mm 的明亮清晰的干涉场。

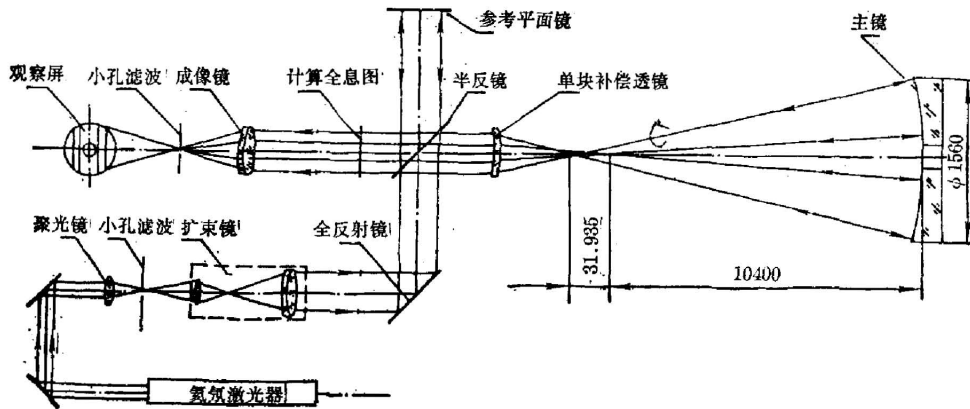


图 6 1.56 米主镜全息干涉检验光路图

Fig. 6 The holographic testing setup for 1560 mm primary mirror

四、检验结果和发现的问题

计算机全息检验主镜的结果示于图 7~11。检验的日期注明在相应的图中。现将分析这些照片所得的结果叙述如下:

1. 主镜侧支承引起的镜面像散

在全息检验时, 主镜处于直立位置, 其光轴指向水平上方 3° 。像散的现象在全息检验

中一再地出现, 它的量级为 0.5λ 到 1λ 。经过多次实验和分析, 确认这个像散来自主镜方面, 是由于主镜侧支承引起的镜面像散^[7,8]。图 9(b) 和图 11(b) 是数据处理的结果, 它们同样形象地说明主镜镜面像散的存在。

2. 横向测试通道中准稳定温差空气层的存在

横向测试通道中, 主镜离开补偿透镜的距离为 10 米。在全息检验过程中, 我们感觉到

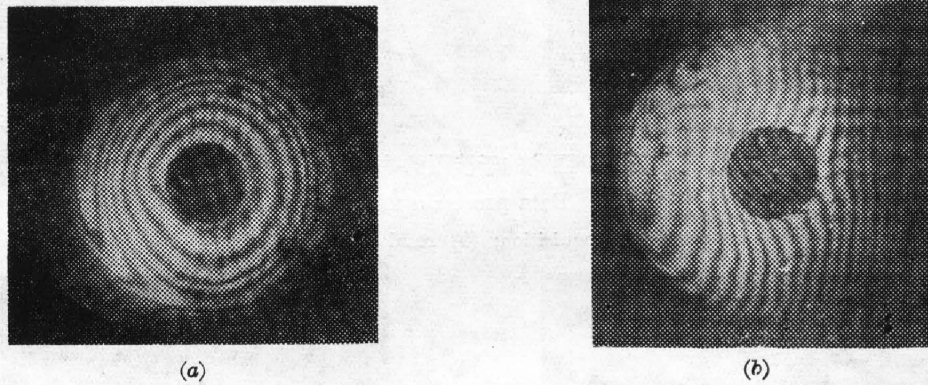


图 7 主镜的全息检验(1983年6月5日)

Fig. 7 Early CGH testing (5 June 1983)

(a) mirror-plane wave; (b) mirror-CGH

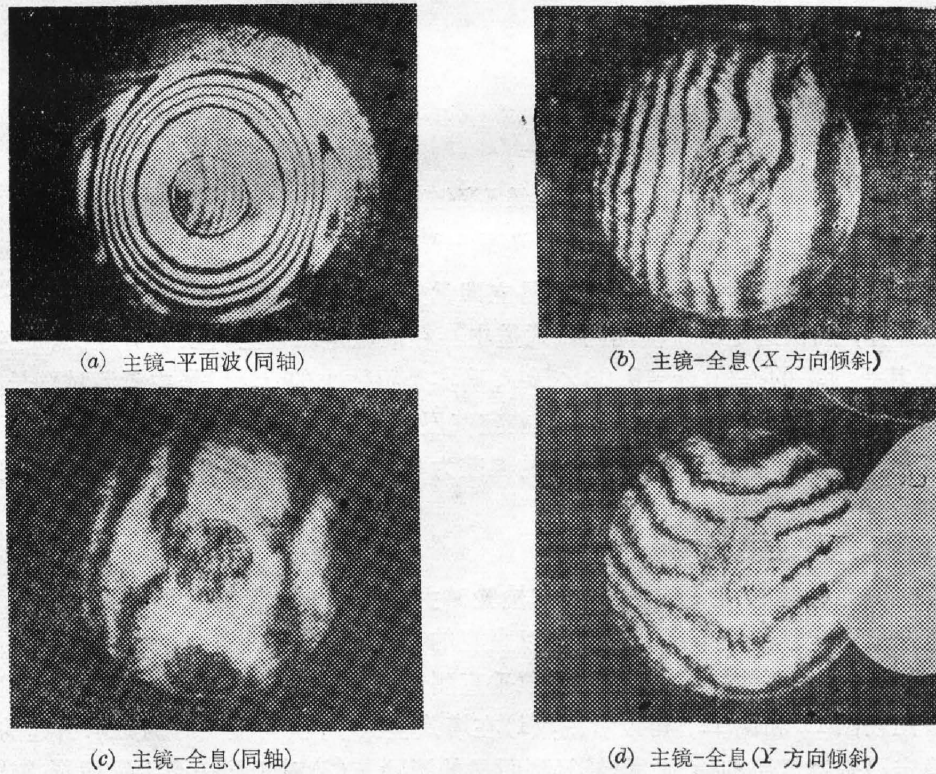
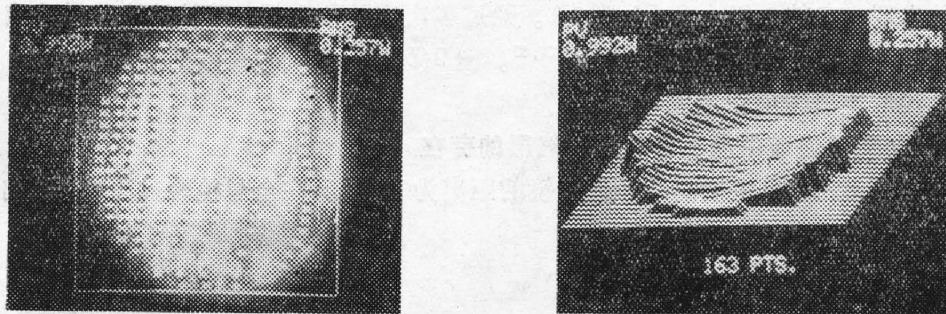


图 8 主镜的全息检验(1983年8月7日)

Fig. 8 Medium term CGH testing (7 August 1983)

(a) mirror-plane wave (coaxial); (b) mirror-CGH (X-tilt); (c) mirror-CGH (coaxial); (d) mirror-CGH (Y-tilt);



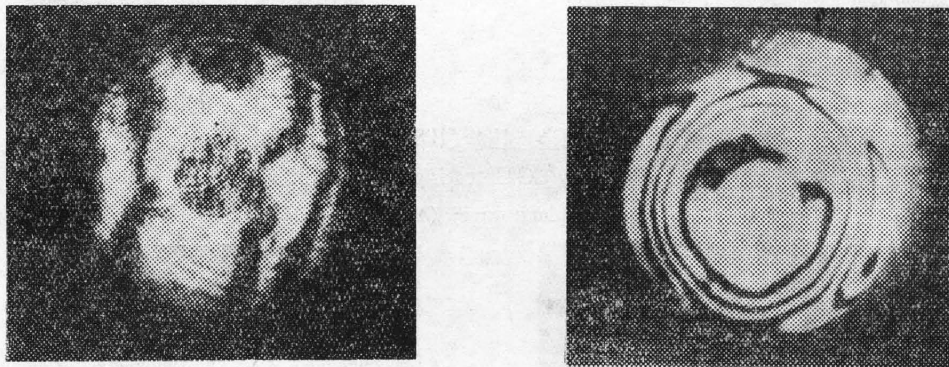
(a) 取样

(b) 处理结果

图9 图8的干涉图的数据处理

Fig. 9 Data processing for Fig. 8

(a) data acquisition; (b) result of processing



(a)

(b)

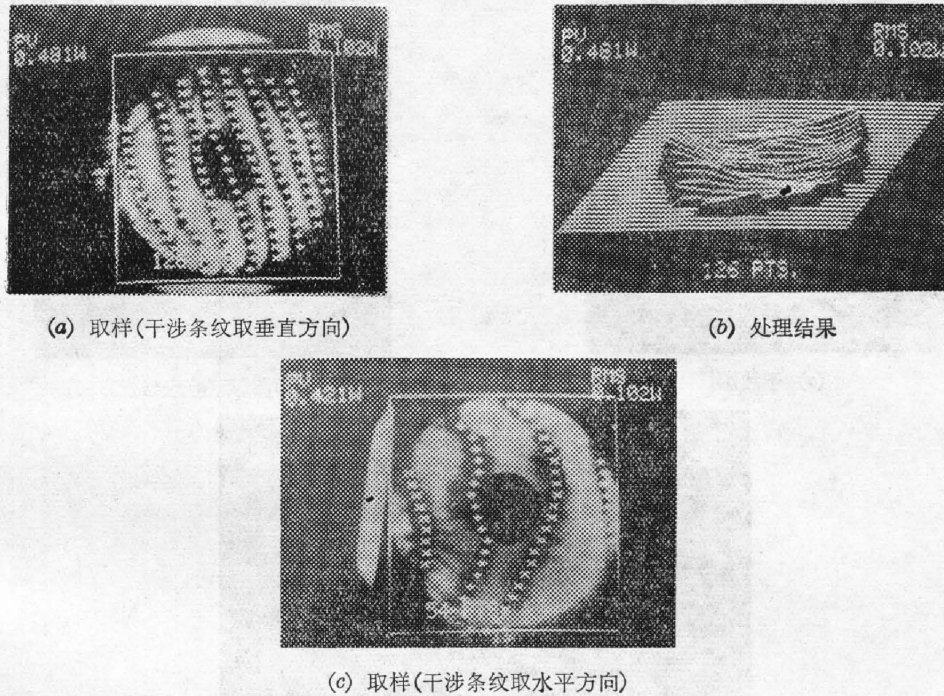
图10 缓慢变化的干涉图

Fig. 10 Interferogram with gradual change

有一种捉摸不定的因素使干涉图发生不易立即觉察到的缓慢的变化。图10就是一例。经过分析和计算,确认这是由于横向测试通道中存在准稳定温差空气层所引起的。空气温度差 0.1°C ,其折射率的差值 $\Delta n=9.03\times 10^{-8}$,确实是很微小的^[9]。但是主镜测试臂长度为10米,将会产生 1.484λ 的光程差变化。温差空气层的交替变化是缓慢的,因而引起干涉图案的缓慢变化。实际测量主镜上端和下端的温差为 0.25°C 。但在打开空调器或关掉空调器的过程中,这个温差是变化的。

3. 塔式检验的必要性

计算机全息检验的结果,揭示出横向检验时主镜侧支承引起的镜面像散的存在,和横向测试通道中准稳定温差空气层的存在。以直观的方式具体的结果说明在大型主镜的加工检验中,塔式检验是必要的。从而导致了屋顶垂直测试塔的建立。图12是1.56米主镜塔式检验结果。比较图11和图12,可以看到:(1)在塔式检验中,横向检验时侧支承引起的镜面像差和准稳定温差空气层的影响,已经得到明显的消除。(2)对于同一个主镜面形来讲,从面形误差的峰-谷值和均方根值来看,塔式检验结果比横向检验结果改善约一倍。例如,横向全息检验时的峰-谷值为 0.481λ ,均方根值为 0.102λ ;塔式检验时峰-谷值为 0.274λ ,均方根值为 0.063λ ,如图11(b)和图12(c)所示。



(a) 取样(干涉条纹取垂直方向)

(b) 处理结果

(c) 取样(干涉条纹取水平方向)

图 11 主镜的全息检验(1984年7月14日)

Fig. 11 Last CGH testing (14 July 1984)

(a) data acquisition; (b) result of processing; (c) data acquisition and processing

4. 计算机全息检验对主镜面形的定量评价

计算机全息检验主镜是零位干涉检验, 所以检验中获得的干涉图就是对主镜面形的定量表示。在干涉图上出现的局部误差 ΔN 和光圈数 N , 都要除以 2, 才代表主镜面形的误差, 这是因为光线在镜面反射一次。从全息检验给出的干涉图上, 我们可以清楚地看到, 在主镜研磨的过程中, ΔN 和 N 的不断改善和低带区的消失。

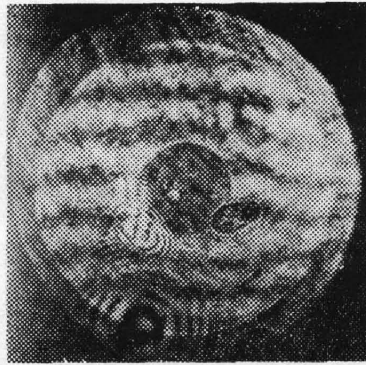
图 11(a) 和图 11(c) 是全息检验时, 同一干涉场在互相垂直位置上的二张干涉条纹图。数据处理说明, 它们的峰-谷值差为 $0.481\lambda - 0.421\lambda = \lambda/16$, 均方根值之差为 0。这说明, 全息检验在互相垂直的二个位置上具有相同的灵敏度*。

由于图像处理仪不能区分和扣除侧支承像散, 通过分析图 11 中的干涉条纹, 得知此时主镜面形的误差 ΔN 已经优于设计要求的 $\lambda/8$ 。

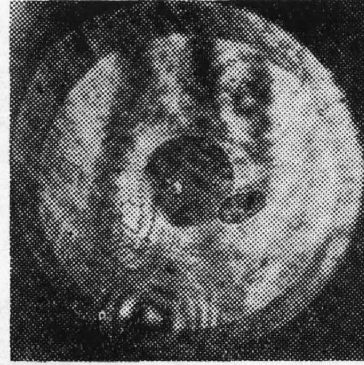
当借助刀口仪阴影来近似估计光学表面缺陷的数值时, 要依赖于观察者的经验^[10]。还要依赖于影响视场亮度和衬度的各种因素, 例如, 点光源的亮度和小孔的大小, 补偿系统对光的衰减, 误差 ΔN 的斜率(即同一数值的误差 ΔN 延伸在多大的区域上)等等。当被测光学表面和补偿系统发生了很大的变化时, 观察者就要在新的测试条件下取得新的误差判断经验。

在 1.56 米主镜加工的中期, 当人们借助刀口仪阴影判断认为主镜面形质量已达到 $\lambda/15$ 峰-峰误差, $\lambda/30 \sim \lambda/40$ 均方根误差时, 紧接着的计算机全息检验结果明确指出(如图

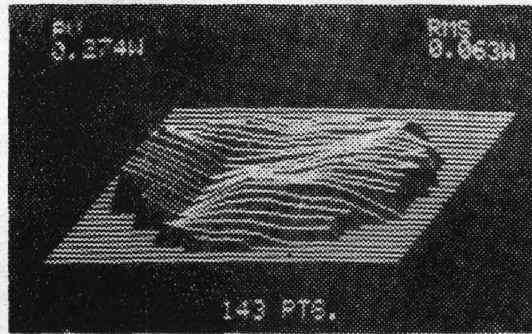
* 曾有人认为, 全息检验在二个互相垂直的位置上, 有不同的灵敏度。



(a) 干涉图



(b) 干涉图[与(a)成垂直方向]



(c) 处理结果

图 12 主镜的塔式检验(采用二块透镜补偿的干涉仪, 1984年5月)

Fig. 12 Results of tower testing of primary mirror by means of the interferometer with tow lens compensator (may 1984)

(a) interferogram; (b) interferogram[perpendicular to (a)]; (c) result of processing

8(b)所示)此时主镜面形质量实际上只达到不差于 $\lambda/4$, 不优于 $\lambda/6$ 的水平, 镜面存在一个低带。从而取得了可贵的经验。

五、结 束 语

近年来, 出现了几项光学检验的新概念和新技术^[1]。计算机全息非球面检验就是其中的一种。在本文所叙述的工作范围内, 全息检验系统的小型化问题还不可能放在优先的地位来考虑。但是, 很显然, 系统的小型化是一个很重要的问题。小型化将直接有助于对主镜同轴同心的调整。小型化还包含着多方面的含义, 例如, 现场的微机数据处理, 录放像设备的采用, 还可以将干涉条纹投影到主镜表面, 以便更为具体地指明镜面误差。

作者谨向协助本工作的肖德荣、宋德忠、邵联贞、乔景文同志表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] A. W. Lohmann, D. P. Paris; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, No. 10 (Oct), 1739.
- [2] A. J. MacGorven, J. C. Wyant; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 3 (Mar), 619.

- [3] K. G. Birch, F. J. Green; *J. Phys. (D): Appl. Phys.*, 1972, **5**, No. 11 (Nov), 1982.
[4] 施志果等;《激光》, 1981, **8**, No. 6 (Jun), 42.
[5] M. Faulde, A. F. Fecher *et al.*; *Opt. Commun.*, 1973, **7**, No. 4 (Apr), 363.
[6] F. E. Ross; *Astrophys. J.*, 1943, **98**, 341.
[7] R. G. Tull; *Sky Telesc.*, 1968, **36**, 213.
[8] A. J. Malvie; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 3 (Mar), 575.
[9] D. E. Gray; *American Institute of Physics Handbook (third edition)*, (McGraw-Hill Book Company, 1972), 6~111.
[10] Д. Л. Максутов;《天文光学工艺》, (科学出版社, 1964)
[11] D. Malacara; *Optical shop testing*, (John Wiley and Sons, New York, 1978).

Computer generated hologram (CGH) and it's application in null testing of $\phi 1560$ mm hyperboloidal primary mirror

SHI ZHIGUO AND MA RENYON

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

WANG LANJUAN

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

(Received 8 October 1984)

Abstract

A new method for calculating and drawing the computer generated hologram (CGH)-the fringe order method has been suggested. A OGH with $\lambda/20$ accuracy for reconstructed wave-front has been made using this method. The results and effect of CGH null testing of $\phi 1560$ mm primary mirror in it's early, middle and final polishing stages are given.