

文章编号 1004-924X(2006)02-0207-06

环形子孔径拼接检测大口径非球面镜的规划模型及分析

侯 溪^{1,2}, 伍 凡¹, 杨 力¹, 吴时彬¹, 陈 强¹

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 环形子孔径拼接技术是一种无需辅助元件就能检测旋转对称大口径非球面镜的有效手段。根据该技术的检测原理, 从几何光学的角度建立了子孔径规划模型, 给出了模型数值求解的具体方法。以一口径为 700 mm、中心遮拦为 160 mm、顶点曲率半径为 3 000 mm 的抛物面镜为例进行了数值计算, 且从物理光学的角度对数值计算结果进行了进一步分析和解释, 并进行了初步的实验研究。结果表明, 该模型具有较好的预测效果, 可为实际检测方案设计提供理论依据, 使得检测过程可控、量化和可重复。

关键词: 光学测试; 干涉计量; 规划模型; 数值计算; 环形子孔径; 大口径非球面镜

中图分类号: TH703 文献标识码: A

Layout model and analysis of annular subaperture stitching technique for testing large aspheric mirror

HOU Xi^{1,2}, WU Fan¹, YANG Li¹, WU Shi-bin¹, CHEN Qiang¹

(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Annular subaperture stitching technique is a feasible method for testing rotationally symmetric aspheric mirror without any additional elements. Based on the testing principle, a subaperture layout model was established with geometry optics theory, and the numerical solving method was provided in detail. Taking a paraboloidal mirror with clear aperture of 700 mm, center obscuration of 160 mm, and vertex curvature radius of 3000 mm as a example, the paper analyzed and explained the numerical results of model with the corresponding physical optics theory. The experimental results show that the model is better in predictability, and it will provide the theory basis for the practical measurement and also will make the measurement process more controllable, quantitative and repeatable.

Key words: optical test technique; interferometry; layout model; numerical computing; annular subaperture; large aspheric mirror

1 引言

光的干涉是光的波动性的主要特征之一,它是许多光学仪器和测量技术的基础。1675年,牛顿进行了牛顿环实验,这是光的干涉现象。1881年,A. A. Michelson 设计制作了闻名于世的迈克尔逊干涉仪。1960年后期,T. H. Maiman 制成红宝石激光器,随后出现了以激光为光源的干涉仪,对科学技术的进步发挥了重要作用。1960年 Bell 实验室的研究人员发明了电荷耦合器件 CCD。1945年莫克利和埃克特设计出第一台电子计算机。上个世纪 70 年代中后期,随着激光技术、电子技术、计算机技术的发展,传统的干涉检测方法与这些技术相结合,产生了位相干涉检测技术。该技术的检测精度可达 $\lambda/100$ 以上,且具有很高的重复性,使得干涉检测技术发展到一个新的水平。数字化的相移干涉仪已经成为现代光学加工检验中不可缺少的高精度仪器。

光学加工和检测技术的不断发展使得以非球面镜为关键部件的大口径光学系统在天文、空间光学和军事等领域得到了愈来愈广泛的应用,而大口径非球面镜的制造需要相应的检测技术和仪器。在大口径非球面镜的抛光加工阶段,通常的定量检测方法^[1](自准直法、补偿器法、计算全息法)都需要制造相应的辅助元件(大口径反射镜、补偿器、计算全息板)在相移干涉仪上实施。环形子孔径拼接技术^[2]是一种无需辅助元件就能检测旋转对称大口径非球面镜的有效手段,该检测技术大大降低了检验成本,同时可以消除辅助元件的设计、制造和调整误差对检测精度的影响。由于该技术自身的优点和具有可检测大口径非球面镜的潜能而受到了各国研究人员的重视,并进行了积极的研究^[2,6]。Liu. Y. M^[2]提出了该技术和基于 Zernike 多项式的拼接算法,并以二个子孔径检测了一口径为 190 mm、 F_3 的抛物面镜,此外推导了所需最少子孔径数的近似计算公式。M. Melozzi 等^[3]提出了基于离散相位值的拼接算法,以 5 个子孔径检测了一口径为 114 mm 的扁椭球面镜。Fermin G. A 等^[4]也研究了该技术,以 2 个子孔径检测了一口径为 100.10 mm、曲率半径为 596.61 mm 的抛物面镜。然而,在以上的原理性实验研究过程中,均选择了小口径非球面镜作

为被测对象。当以该技术检测大口径非球面镜时所需子孔径数目较多,而且随着非球面镜面斜率变化的不一样将使得各个子孔径的大小不相同,这大大增加了子孔径数据准确提取的难度。因此研究子孔径划分模型是一项有意义的工作,它将为实际检测提供理论依据。

本文基于环形子孔径拼接技术的检测原理,从几何光学的角度建立了子孔径划分模型,对模型用数值计算的方法进行了求解,并从物理光学的角度对其计算结果进行了解释,此外给出了实验研究的结果及分析。

2 检测原理描述

相移干涉仪能方便地以曲率中心检验球面镜,但是以顶点曲率中心检验大口径非球面镜时,返回波前中的角误差可能非常大,以致一些光线不能回到干涉仪孔径内。即使所有的光线都进入到干涉仪,参考球面波前和非球面镜表面之间大的斜率差也将导致高的条纹密度。图 1 为顶点曲率中心检验非球面镜时的计算机模拟干涉图,图 2 为一定离焦调整后的计算机模拟干涉图。由图中可以清楚看到,仅有部分干涉条纹密度较小,其余部分条纹密度较大,具有较高的空间频率。由采样定理可知,当干涉条纹的空间频率大于 CCD 探测器的分辨率时,将出现频谱混叠现象,条纹不能正确地探测,甚至不能采样到数据。

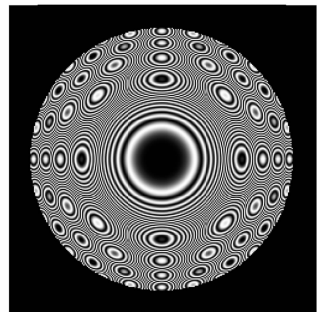


图 1 顶点曲率中心检验非球面镜的模拟干涉图
Fig. 1 Simulated interferogram for vertex measurement

环形子孔径拼接技术通过改变被测非球面镜与干涉仪之间的相对距离,使不同曲率半径的参考球面波前来匹配此非球面镜上的不同环带区域,这样在所匹配的环带区域里的入射参考球面

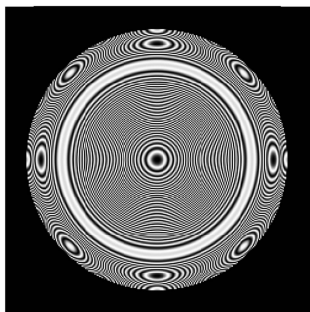


图 2 一定离焦后检验非球面镜的模拟干涉图
Fig. 2 Simulated interferogram for measurement with some defocus

波前与被测非球面表面之间的偏离量减小到干涉仪的测量范围内,然后由适当的算法将各个可分辨干涉条纹部分的子孔径数据重构出全孔径面形信息。

3 环形子孔径规划模型及数值求解方法

根据上述检测原理,本文建立了如下几何光学模型。以非球面顶点为坐标原点 O ,光轴方向为 x 轴建立直角坐标系,轴对称的非球面面形可以用它的子午截线方程表示,

$$x = Ay^2 + By^4 + Cy^6 + \dots, \quad (1)$$

式中右边如果只取第一项,则为二次曲面,其他项为相对二次曲面的高次偏离。

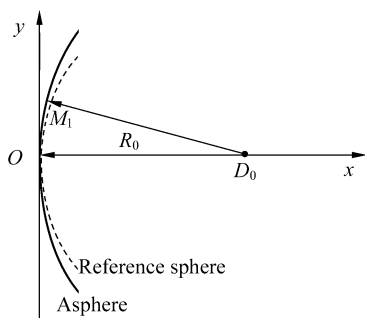


图 3 顶点曲率中心检验光路模型
Fig. 3 Model of vertex measurement

假设在整个调整过程中,干涉仪的光轴始终垂直于被测非球面。设干涉仪能检测的相对于参考球面波前的最大偏离度为 δ 。图 3 为顶点曲率

中心检验时的光路, M_1 为干涉仪所能检测范围的临界点, D_0 为顶点曲率中心, R_0 为顶点曲率半径。以 D_0 点为中心的参考球面波前满足如下方程,

$$(x - R_0)^2 + y^2 = R_0^2, \quad (2)$$

设待求的 M_1 点的坐标为 (x_0, y_0) ,其应该满足如下方程组,

$$\begin{cases} x_0 = Ay_0^2 + By_0^4 + Cy_0^6 + \dots \\ \sqrt{(x_0 - R_0)^2 + y_0^2} - R_0 = \delta, \end{cases} \quad (3)$$

图 4 为轴向调整距离 d_1 后的检测光路,此时参考球面波前中心坐标为 $(R_0 + d_1, 0)$,设其半径

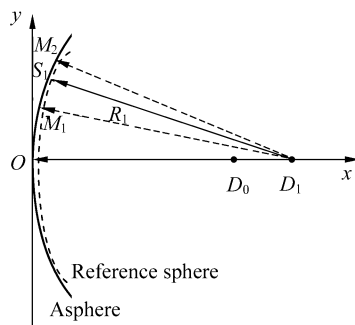


图 4 一定离焦调整后的检测光路模型
Fig. 4 Model of measurement with some defocus

为 R_1 ; M_2 为待求的临界点,设其坐标为 (x_1, y_1) ;同时 M_1 也应该满足临界点条件,这样所采样的两个子孔径数据刚好能连续; S_1 为新的光程差为零的位置,设其坐标为 (p_1, q_1) 。它们应该满足如下方程组,

$$\begin{cases} x_1 = Ay_1^2 + By_1^4 + Cy_1^6 + \dots \\ p_1 = Aq_1^2 + Bq_1^4 + Cq_1^6 + \dots \\ (p_1 - R_0 - d_1)^2 + q_1^2 = R_1^2 \\ \sqrt{(x_0 - R_0 - d_1)^2 + y_0^2} - R_1 = \delta \\ \sqrt{(x_1 - R_0 - d_1)^2 + y_1^2} - R_1 = \delta, \end{cases} \quad (4)$$

此外,由于在 S_1 点入射光线垂直于非球面,即非球面的斜率与入射光线的斜率乘积为 -1 ,

$$\frac{q_1}{p_1 - R_0 - d_1} \times \frac{Dy}{Dx} \Big|_{x=p_1} = -1, \quad (5)$$

方程组(4)和(5)共有 6 个方程,6 个未知量,可以联立求解,这转换为一个纯数学问题。该方程存在一个递推的过程,这里运用具有强大符号计算和数值计算功能的 Mathematica5.0 软件,对该模型进行数值求解。其具体的步骤如下:

(1)根据被测非球面镜的口径大小和干涉仪

的分辨能力,设定循环中止的条件和临界点满足的最大偏离度。

(2) 根据被测非球面镜有无中心遮拦,选择初始临界点值的求解方程组。如果不存在中心遮拦,根据方程组(3)求解出临界点 M_1 的坐标值 (x_0, y_0) , 并作为方程组(4)、(5)的初始条件。如果存在中心遮拦,那么中心遮拦边缘点应该满足临界点条件,将已知的中心遮拦边缘点坐标作为初始值 (x_0, y_0) 直接代入,以方程组(4)、(5)计算出临界点 M_2 的坐标值 (x_1, y_1) 。

(3) 对方程组的求解结果进行选择,选择符合该模型物理意义的解。

(4) 输出求解出的临界点坐标、零条纹坐标、球面波前中心(焦点)坐标和球面波前半径值。

(5) 将计算出的 M_2 点坐标值 (x_1, y_1) 赋值给 (x_0, y_0) , 清楚其余变量的值。在该情况下继续求解方程组(4)、(5), 输出计算结果并把所求解的新的临界点的坐标值作为新的初始值。

(6) 对方程组(4)(5)的求解循环进行,直到

所计算出的新的临界点的纵坐标值超过被测非球面镜的半径,也就是达到步骤 1) 所设定的中止条件。

4 算例及结果分析

为了与实验结果具有可比性,本文对实验中所用抛物面镜进行了环形子孔径划分模型的数值计算。该抛物面镜口径为 700 mm、中心遮拦为 160 mm, 顶点曲率半径为 3 000 mm, 其子午截线方程为

$$y^2 = 6\,000x \quad (80 \leq y \leq 350), \quad (6)$$

最大偏离度可表示为

$$\delta = N \times \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

其中, N 为干涉条纹数目, 激光光源选择 He-Ne 激光, 其波长 $\lambda = 0.632\,8 \mu\text{m}$ 。表 1 为不同 N 值情况下的计算结果。

表 1 数值计算结果(单位 mm)
Tab. 1 Results of numerical computing

N	子孔径编号	内临界点纵坐标	外临界点纵坐标	零条纹纵坐标	焦点的横坐标	球面波前半径
1	1	80	151.605	121.3	3 002.452 3	3 002.45
	2	151.605	198.827	176.8	3 005.209 7	3 005.21
	3	198.827	236.829	218.655	3 007.9 684	3 007.96
	4	236.829	269.539	253.712	3 010.7 283	3 010.71
	5	269.539	298.701	284.494	3 013.489 5	3 013.46
	6	298.701	325.271	312.69	3 016.251 9	3 016.21
	7	325.271	349.839	337.778	3 019.015 7	3 018.96
2	1	80	172.699	134.64	3 003.021 3	3 003.02
	2	172.699	230.726	203.788	3 006.921 6	3 006.91
	3	230.726	276.873	254.846	3 010.824 4	3 010.80
	4	276.873	316.384	297.286	3 014.729 8	3 014.69
	5	316.384	351.501	334.404	3 018.637 7	3 018.58
3	1	80	187.294	144.056	3 003.458 7	3 003.46
	2	187.294	252.499	222.301	3 008.236 3	3 008.22
	3	252.499	304.065	279.474	3 013.017 6	3 012.99
	4	304.065	348.106	326.828	3 017.802 7	3 017.75

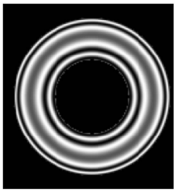
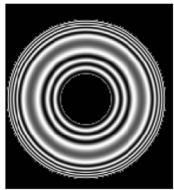




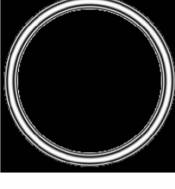


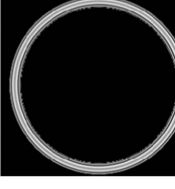


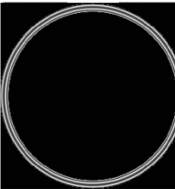


分析表 1 中数据可以得到,随着反映干涉仪可分辨条纹能力的 N 值的增大,全孔径测试所需要的子孔径数目将减少。要检测非球面边缘部分,需要在轴向增大干涉仪与被测非球面间的距

离;反之,如果检测非球面中心部分,需要减小它们之间的相对距离。同时可以看出从中心向边缘环带的大小逐渐减小。此外,参考球面波前中心(焦点)到抛物面顶点的距离与波前半径的差值越

来越大,在进行边缘部分检测时,中心部分光程差较大,中心部分干涉条纹的密度将很大。

表 2 计算干涉图

Tab. 2 Computer interferograms

子孔径 编号	计算干涉图		
	表 1 计算 结果	内半径缩小 20 mm 外半径扩大 20 mm	引入一定 倾斜量
1			
2			
3			
4			
5			

干涉仪的系统质量^[7]取决于标准镜头的精度、成像系统的几何变形和所量化条纹的数目等因素。当用来量化分析的条纹数不超过 7 时,美国 Zygo 公司制造的 GPI 干涉仪的检测性能可优于 $\lambda/20$ 。虽然原则上一般相移干涉仪可以分辨几十根条纹,然而在实际检测中发现,当条纹数超过 10 时将大大影响到检测结果精度。而在实际检测中由于倾斜调整误差将不可避免地引入附加光程差,使得条纹数目增加,以上数值计算只取 1~3 根条纹是为实际检测留下了一定的裕度。

为了从物理光学的角度理解上述计算结果,对 $N=2$ 的情况下应用光学设计软件 Zemax 对所计算环形子孔径区域及其向外扩大 20 mm 后的区域内的干涉图进行了分析计算,并考虑到倾斜调整误差所引入的附加光程差,其结果如表 2 所示。根据表 1 结果所计算出的干涉图具有很好的对比度,条纹能够很好地被分辨。从环形子孔径内半径缩小 20 mm 且外半径扩大 20 mm 后的计算干涉图可以看出,在第 1、2 个子孔径其附近条纹密度仍然较小,在一定范围内可以被分辨;第 3 到第 5 个子孔径所能分辨的范围越来越小,特别是第 5 个子孔径,仅在零条纹附近很小的一个环带区域内干涉条纹密度较小,具有较好的对比度和可分辨性。此外,环形子孔径干涉条纹从中心到边缘越来越窄。当存在倾斜调整误差时,子孔径内的干涉条纹数有所增加。

5 实验及结果分析

为了进一步验证以上子孔径规划模型是否正确,采用 Zygo GPI 相移干涉仪对一口径为 700 mm 的抛物面主镜进行了检测,具体参数如前所述。由于该主镜较重,不适合进行平移、倾斜等调整操作,故将干涉仪主机放在一个五维调整架上,通过调整干涉仪实现其与抛物面镜间轴向距离的相对调整,与干涉仪主机相连并安装有 MetroPro 软件的计算机及监视器放在距五维调整架约 1 m

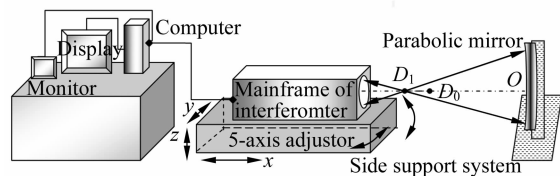


图 5 检测系统示意图

Fig. 5 Sketch for measurement system

处的桌面上,如图 5 所示,其中 O 、 D_1 、 D_0 的意义与图 4 中相同。GPI 干涉仪 CCD 分辨率可设置为 160×120 、 320×240 和 640×480 三种模式,其采样频率分别为 60 Hz、60 Hz 和 30 Hz,考虑到被测抛物面镜的口径和相对口径不算太大,而且车间测试环境相对较差,选用了 320×240 的分辨率,此时 CCD 具有 60 Hz 的帧频。此实验独立于前面的理论分析,是根据干涉仪所能分辨的每个

子孔径干涉条纹范围,应用其数据处理软件的 Mask 功能将相应子孔径数据提取出来。

实验结果如图 6 所示,以 5 个环形子孔径实现了全孔径检测,各个子孔径的干涉条纹均具有较好的对比度,而且条纹数较少,能被 CCD 较好地分辨。这 5 个子孔径对应抛物面镜上的范围分别为:80~152 mm、152~225 mm、225~275 mm、275~317 mm 和 317~350 mm,这与上述模型在 $N=2$ 时的计算结果比较接近。实验中第一、二个子孔径范围与所计算结果的偏差分别约为 20 mm 和 5 mm,其余 3 个子孔径均吻合得非常好。前两个子孔径范围间的差异是因为其范围内的非球面度比较小,干涉仪可分辨干涉条纹对应镜面范围较大,实验中该子孔径仅取了零环带附近的数据,而理论计算所设定的允许最大偏离



图 6 5 个子孔径干涉图

Fig. 6 Interferograms of five subapertures

度为 2 个条纹,说明子孔径 1 所取数据范围比计算范围缩小了,当适当增大该子孔径范围时,仍可取得理想的测试数据。而后 3 个子孔径所能分辨干涉条纹范围的自由度相对较小,实际检测结果与理论分析结果接近的可能性较大,实验结果也说明了这一点。据分析,子孔径数目和该方法的最终检测精度密切相关;因此,在前两个子孔径测试时可以适当让条纹数多一些,这样可以增大对

干涉仪的测量范围的利用,为外环带测量留下一定的裕度,以减少子孔径数目,提高最终检测精度。从图 6 还可以看到,从中心环带到边缘环带其宽度越来越小,可分辨的干涉图形越来越窄,这与上述理论分析相一致。第一个子孔径干涉图近乎为零条纹,这说明该子孔径倾斜调整误差较小;而其余 4 个子孔径干涉条纹数目略多,说明它们均存在一定的倾斜误差,这与上述存在倾斜情况下理论计算出的干涉图形状具有相似性。

6 结 论

简单介绍了环形子孔径拼接检测大口径非球面镜的原理,在此基础上,建立了环形子孔径规划模型,给出了模型的具体求解方法,这是对环形子孔径检测理论的一个补充。对一口径为 700 mm 的抛物面镜的实验检测结果较好地解释了规划模型相应的理论计算结果,表明该规划模型符合环形子孔径检测技术的物理模型,对实际检测具有一定的指导意义,使得检测过程能够可控、量化和可重复。

通过实验还可以得出:各个子孔径的干涉条纹均具有较好的对比度,而且条纹数较少,能被 CCD 较好地分辨。从中心环带到边缘环带其宽度越来越小,可分辨的干涉图形越来越窄,在中心部分应尽可能增大对干涉仪动态范围的利用,以便为外环带测量提供足够的宽裕度。对于每一次子孔径测量,可以利用干涉仪中的变焦系统尽可能将子孔径干涉条纹在视场所允许的范围内将其放大到 CCD 靶面上,以获得更多的该子孔径数据的采样点数。

参考文献:

- [1] MALACARA D. *Optical shop testing*[J]. John Wiley& Sons, Inc., 1978.
- [2] LIU Y M, GEORGE N L. Subaperture testing of aspheres with annular zones[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(21):4504-4513.
- [3] MELOZZI M, PEZZATI L, MAZZONI A. Testing aspheric surfaces using multiple annular interferograms[J]. *Opt. Eng.*, 1993, 32(5):1073-1079.
- [4] FERMIN G A, FAUSTO E R. Testing a paraboloid mirror using annular subapertures without auxiliary optics[J]. *SPIE*, 2003, 4829:44-45.
- [5] FERMIN G A. Testing parabolic surfaces with annular subaperture interferogram[J]. *Opt. Rev.*, 2004, 11(2):82-86.
- [6] MALACARA D, SERVIN M, MORALES A, et al. Aspheric wavefront testing with several defocusing steps[J]. *SPIE*, 1985, 576:190-192.

作者简介:侯溪(1980—),男,四川阆中人,博士研究生,主要从事大口径非球面检测技术研究。E-Mail:hxxh6776@sohu.com