文章编号 1674-2915(2013)01-0088-08

子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿

王孝坤
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:针对在子孔径拼接测量非球面的过程中干涉仪与待测非球面相对位置存在的对准误差,提出了一种基于模式搜索迭代算法的调整误差补偿方法。该方法可以很好地从测量的子孔径相位数据中消除由拼接测量位置没有对准带来的调整误差,实现多个子孔径的精确拼接。对该方法的基本原理和实现步骤进行了分析和研究,建立了子孔径拼接测量的调整误差补偿模型。对口径为230 mm×141 mm的离轴碳化硅非球面反射镜进行了调整误差补偿和相位数据拼接,得到了精确的全口径面形分布。作为验证,对待测非球面进行了零位补偿检测,结果显示两种测试方法的面形PV值和RMS值的相对偏差仅为0.57%和2.74%。

关 键 词:子孔径拼接干涉术;非球面;调整误差;模式搜索算法;非共路误差
中图分类号:TQ171.65; O436.1 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20130601.0088

Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching interferometry

WANG Xiao-kun
(*Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: jimwxk@sohu.com*

Abstract: For the purpose to decrease the misalignment error from a testing aspheric surface by Subaperture Stitching Interferometry (SSI), a translated error compensation method is proposed to subtract the misalignment error from each phase detum and to stitch multi-subapertures precisely. The basic principle and process of the method are researched, and a compensation mode is established based on the mode search algorithm. The experiment is carried on for an off-axis SiC aspheric mirror with a clear aperture of 230 mm×141 mm, the phase data of the whole aperture are stitched precisely and the figure error is compensated by eliminating the misalignment error. For the comparison and validation, the asphere mirror is also tested by null compensation method, and the relative errors of PV and RMS are 0.57% and 2.74%, respectively.

Key words: Subaperture Stitching Interferometry (SSI); aspheric surface; misalignment error; mode search algorithm; non-common path error

收稿日期:2012-09-14;**修订日期**:2012-11-13
基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 08663NJ090);国家自然科学基金重点项目(No. 61036015)

1　引　言

子孔径拼接干涉测量(SSI)是利用小口径干涉仪的标准球面参考波前对大口径非球面上各区域的相位进行逐次测量,然后通过 SSI 算法获得非球面全口径面形信息的测量方法[1-6]。SSI 技术拓宽了干涉仪测量非球面的横向和纵向动态范围,使干涉仪测量非球面的口径和相对口径都有了很大的增加。此外,由于对小块子孔径区域测量所利用的干涉仪 CCD 像元面积与全口径干涉测量所利用的干涉仪 CCD 像元面积是相同的,所以 SSI 能够获得非球面面形中高频段的信息。

使用 SSI 技术无需补偿透镜、计算全息、大口径辅助镜等光学辅助元件就能实现对大口径非球面、离轴非球面、甚至自由曲面的检验,同时可以获得面形中高频的相位信息,这不仅提高了分辨率,而且降低了成本,节省了时间[7-13]。

由于 SSI 利用标准球面波检测非球面,对于单个子孔径相位数据的测量,需要干涉仪出射波前的曲率半径与待测子孔径区域的最接近球面半径吻合,因此对拼接调整机构的定位精度和重复精度有很高的要求。但是在拼接测量过程中,干涉仪与待测非球面实际的相对位置关系与理论的相对位置关系肯定存在偏差,而该偏差会影响最终的拼接检测精度。为了解决该问题,本文提出了一种基于模式搜索迭代算法的调整误差补偿方法。

2　基本原理和流程

SSI 测量非球面的示意图如图 1,在拼接测量过程中,调整干涉仪与待测非球面的相对位置,使干涉仪标准球面波前对准非球面待测区域,从而使从非球面上反射返回的光束与干涉仪的参考光束产生干涉,进而测定和记录各子孔径的相位分布。利用模式搜索误差补偿方法从测量的子孔径相位数据中消除由于拼接测量位置失准带来的调整误差,实现多个子孔径的拼接,从而精确地完成非球面全口径面形拼接检测。

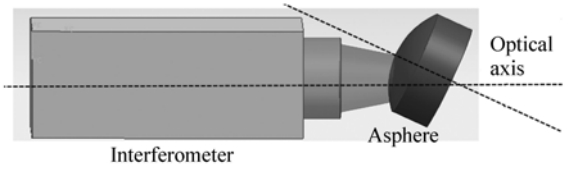


图 1　子孔径拼接测量非球面面形的示意图

Fig. 1　Sketch of testing convex asphere by SSI

利用标准球面波检测非球面会产生非共路误差(即标准参考球面波面与待测子孔径区域非球面波面的偏差)。对于非球面度比较小的非球面的拼接,可以采用理论位置时各子孔径的非球面方程与参考球面方程的理论偏差或用 Zemax 软件模拟子孔径干涉测量来求解非共路误差。从每个子孔径的干涉相位数据中剔除该误差,通过 SSI 算法实现拼接检测[14-16]。但是对于偏离量比较大的非球面,尤其是离轴非球面,也采用这一方法进行拼接就会产生很大的拼接误差。

本文提出采用模式搜索算法来补偿这一拼接误差。该算法首先对初始位置的参数进行迭代优化,找出最接近实际位置的调整参数,从每个子孔径的相位数据消除优化参数位置的非共路误差,再通过子孔径拼接算法就能够实现子孔径拼接检测。模式搜索算法又称为 Hooke-Jeeves 法,是在某点附近按一定的步长搜索函数值更小的点,且步长随搜索过程的进行而减小,通过该算法来搜索出最大最小正基模式。它可以处理边界约束、线性代数、线性不等式、并且不需要函数连续或可微,而大多数传统优化方法通过使用梯度或者高阶导数的方法来搜寻优化点,它们一般要求函数连续可微。

一般待测非球面都是回转对称的,无需绕 Z 轴的转动,因此对于单个子孔径的位置调整,仅需考虑 5 个方向,分别是沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的平动以及绕 X 轴和 Y 轴的转动。所以,调整误差补偿模型中共有 5 个优化参量,即分别为:沿 X 轴方向的平移 d_x;沿 Y 轴方向的平移 d_y;沿 Z 轴方向的平移 d_z;绕 X 轴的转动 α;绕 Y 轴的转动 β。

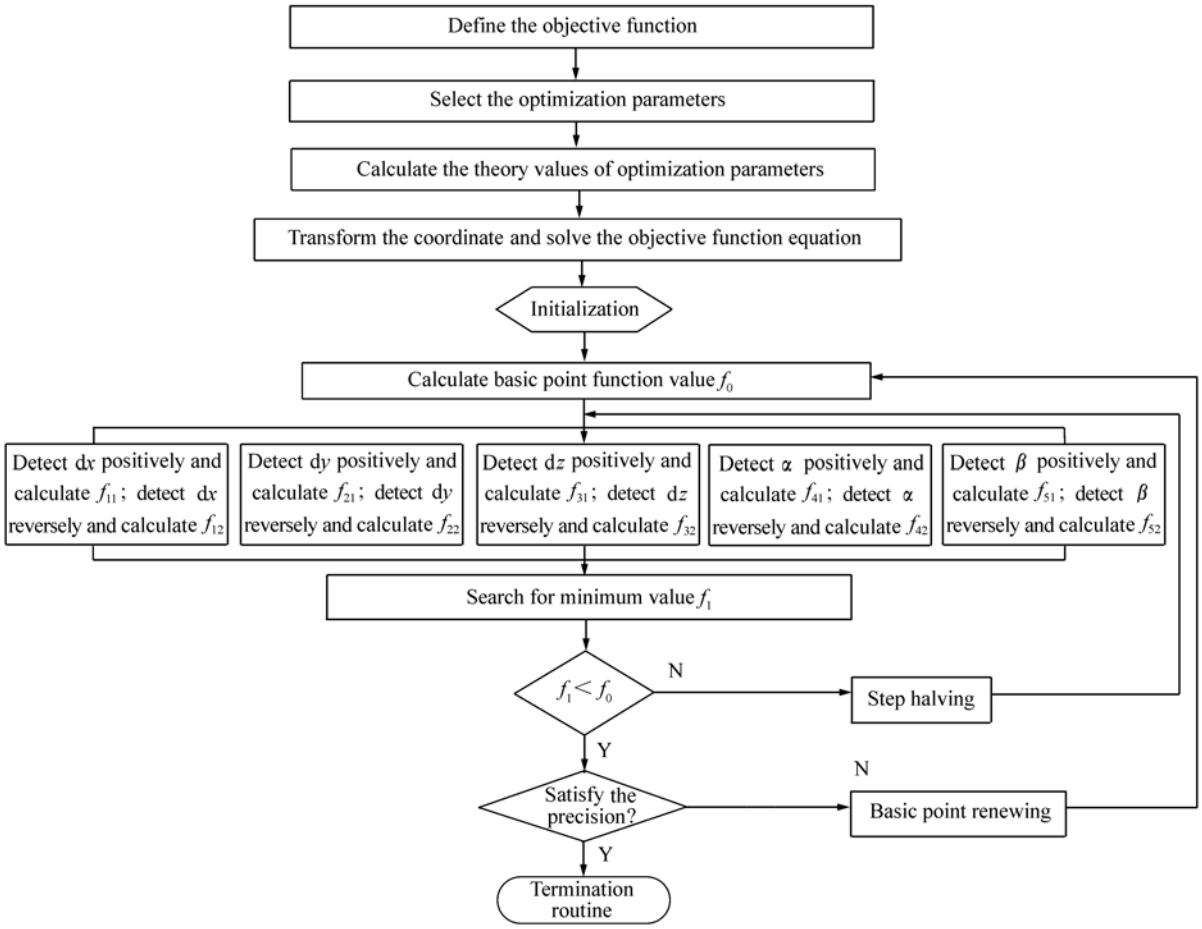


图 2　调整误差补偿方法的流程图

Fig. 2　Flow chart of the compensation of misalignment

为实现调整误差补偿,完成子孔径精确拼接测量,本文的模式搜索调整误差补偿方法的流程如图 2 所示,具体步骤如下:

(1)定义目标函数

算法中定义子孔径相位数据除去非共路误差后的相位分布的 RMS 值为目标函数 f。

(2)选定优化参量

调整误差补偿模型中共有 5 个优化参数,分别是 d_x、d_y、d_z、α 和 β。

(3)计算理论位置调整参数值

根据子孔径测量规划,求解测量某一子孔径时待测非球面与干涉仪之间的相对位置理论调整量 d_{x0}、d_{y0}、d_{z0}、α_0 和 β_0。

(4)坐标变换,求解目标函数方程

建立待测非球面的母镜坐标系(x,y,z)以及以某个子孔径几何中心为坐标原点的直角坐标系(x',y',z'),如图 3 所示,Z 为光轴方向,O 为待测非球面的母镜坐标系原点,O'为某个测量子孔径的几何中心。坐标系(x',y',z')相对坐标系(x,y,z)的平移和旋转分别为 d_x、d_y、d_z、α 和 β。

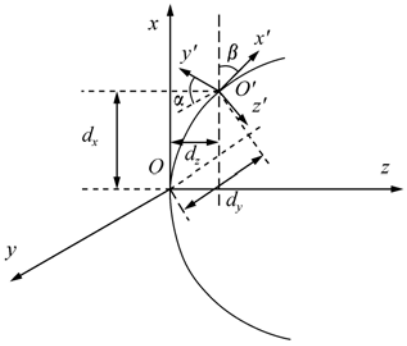


图 3　坐标系定义图

Fig. 3　Sketch of the coordinates

设镜面上任意点在坐标系(x,y,z)下的坐标为$P(x,y,z)$,P的矢量为$\boldsymbol{p}=(x\ y\ z\ 1)^{\mathrm{T}}$,其调整后在坐标$(x',y',z')$下的坐标为$P'(x'y'z')$,$P'$的矢量为:$\boldsymbol{p}'=(x'\ y'\ z'\ 1)^{\mathrm{T}}$。由刚体运动定理可得两个矢量之间的坐标变换矩阵$\boldsymbol{T}$为式(1):

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta & -\sin\beta\cos\alpha & 0\\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0\\ \sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta & 0\\ d_x & d_y & d_z & 1\end{bmatrix}. \tag{1}$$

二次非球面的母镜可以用式(2)表示:

$$x^2+y^2=2R_0z-(1+k)z^2. \tag{2}$$

利用空间坐标变换矩阵(1)求解在以子孔径区域中心为坐标原点的新坐标系下非球面方程表达式为:

$$Az'^2+Bz'+C=0\ , \tag{3}$$

式中:

$$A=\sin^2\beta+\sin^2\alpha\cos^2\beta+(1+k)\cos^2\alpha\cos^2\beta\ , \tag{4}$$

$$B=-kx'\sin(2\beta)\cos^2\alpha+2d_x\sin\beta-2d_y\sin\alpha\cos\beta+ky'\sin(2\alpha)\cos\beta+2(d_z+kd_z-R_0)\cos\alpha\cos\beta\ , \tag{5}$$

$$\begin{aligned}C=&\ x'^2\cos^2\beta+d_x^2+2x'd_x\cos\beta+x'^2\sin^2\alpha\sin^2\beta+y'^2\cos^2\alpha+d_y^2+x'y'\sin(2\alpha)\sin\beta+\\&2x'\sin\alpha\sin\beta d_y+2y'd_y\cos\alpha+(1+k)[x'^2\sin^2\beta\cos^2\alpha+y'^2\sin^2\alpha+d_z^2-x'y'\sin\beta\sin(2\alpha)-\\&2x'd_z\sin\beta\cos\alpha+2y'd_z\sin\alpha]-2R_0(-x'\sin\beta\cos\alpha+y\sin\alpha+d_z)\ ,\end{aligned} \tag{6}$$

$$d_z=\frac{d_x^2+d_y^2}{R_0+\sqrt{R_0^2-(k+1)(d_x^2+d_y^2)}}. \tag{7}$$

则子孔径的矢高方程为:

$$F=\frac{-B-\sqrt{B^2-4AC}}{2A}. \tag{8}$$

参考球面波前的矢高方程为:

$$S=r_0-\sqrt{r_0^2-x'^2-y'^2}. \tag{9}$$

令子孔径的矢高F与参考球面波前的矢高S的差值为P:

$$P=S(x',y')-F(x',y')\ . \tag{10}$$

对于偏离量不是很大的浅度非球面,非共路误差可以近似为参考球面方程S与待测子孔径区域非球面方程F的偏差(即为P值)。由于以子孔径的矢高F与参考球面波前的矢高S的差值作为非共路误差(Z轴方向),与法向像差存在一定的偏差,对于高陡度、离轴子孔径更明显,因此对于偏离量较大的子孔径,其非共路误差值P'为:

$$P'=P\cos\theta\ , \tag{11}$$

式中,θ为子孔径区域各点的法向角。

由于各子孔径的相位数据值可以通过干涉仪测量直接获得,设定某个子孔径测量所得的相位分布为W,定义相位数据中消去非共路误差后的相位分布为U,即$U=W-P'$,则目标函数f为:

$$f=\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(U-\overline{U})^2\right]^{1/2}, \tag{12}$$

式中,N为子孔径数据中采样点的个数。

(5)初始化,计算基点函数值

初始化程序,将理论位置调整初值代入目标函数,计算基点函数值$f(d_{x0},d_{y0},d_{z0},\alpha_0,\beta_0)$。

(6)约束取值范围,设定步长

给5个未知量约束一定的取值范围以使优化结果符合实际要求,并设定一定步长,按模式搜索法分别沿$d_{x0},d_{y0},d_{z0},\alpha_0,\beta_0$按一定的步长搜索。

(7)判定结果

如果某一轮搜索失败,即搜寻计算值大于基点函数值,则步长减半进行重新搜索迭代。

(8)精度判断

设定阈值,若相邻两次搜寻计算目标函数值的偏差小于10^{-5} nm,则停止搜寻,此时搜寻结果值可以认定为实际位置的调整量。更新基点,将最终的搜寻结果带入方程(10),即可很好地补偿调整误差,精确地将非共路误差从子孔径数据中分离,从而很好地实现了全口径拼接检测。

3 拼接检测实验

为了验证调整误差补偿方法数学模型的可行性,对一偏离量为64.1 μm的离轴非球面进行了拼接检测实验。该非球面的通光口径为230 mm×141 mm,顶点曲率半径为-1 358.8 mm,二次曲面系数为-1.59,离轴量为-88.44 mm。

SSI装置如图4所示,待测非球面安置在四维调整机构上,可以精确调整非球面在X轴、Z轴方向上的平动以及沿X轴和Y轴方向的倾斜,干涉仪安装在精密升降机构上,可以调节其在X方向上的平动,所有测试装备都安放在气浮防震平台上,子孔径划分如图5所示。

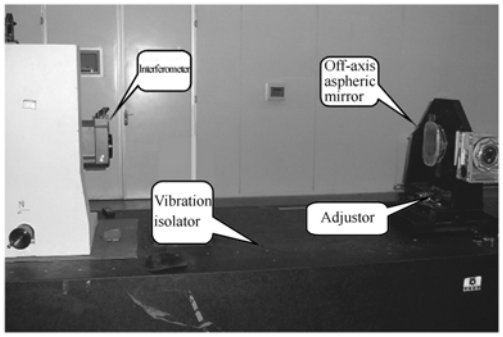


图4 SSI设备图

Fig.4 Experimental setup of SSI

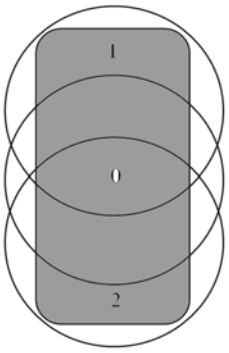
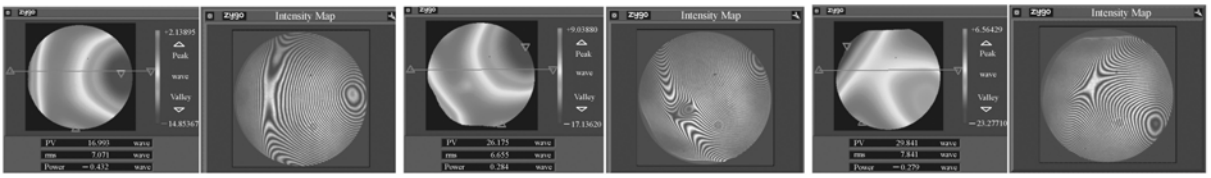


图5 子孔径分布图

Fig.5 Distribution diagram of subapertures

首先,调节好干涉仪,使其参考球面波前的曲率半径与待测非球面中心区域(中心基准子孔径0)的最接近球面半径吻合,用干涉仪测量该区域的相位分布图和干涉图,如图6(a)所示。调整待测非球面与干涉仪之间的相对位置,使干涉仪出射波前分别对准待测非球面上区域(子孔径1)和下区域(子孔径2),并分别使子孔径1和子孔径2与基准子孔径0有一定的重叠区域,用干涉法测定这两个区域的干涉图和相位分布分别如图6(b)和图6(c)所示。



(a) Central subaperture (b) Top subaperture (c) Nether subaperture

图6 子孔径测量结果

Fig.6 Phase maps and interferograms of three subapertures

利用理论位置调整参数值消除非共路误差后全口径拼接的面形误差分布如图7所示,其PV值和RMS值分别为4.763λ和0.682λ(λ=632.8 nm),可以看出,由于未对调整误差进行寻优补偿,此时面形分布有很大的"拼痕"。利用模

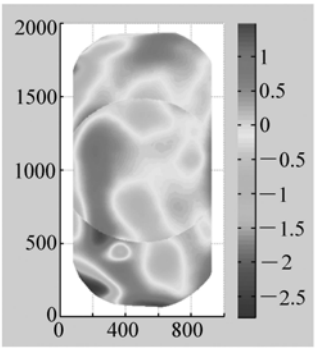


图7 按理论位置拼接面形分布

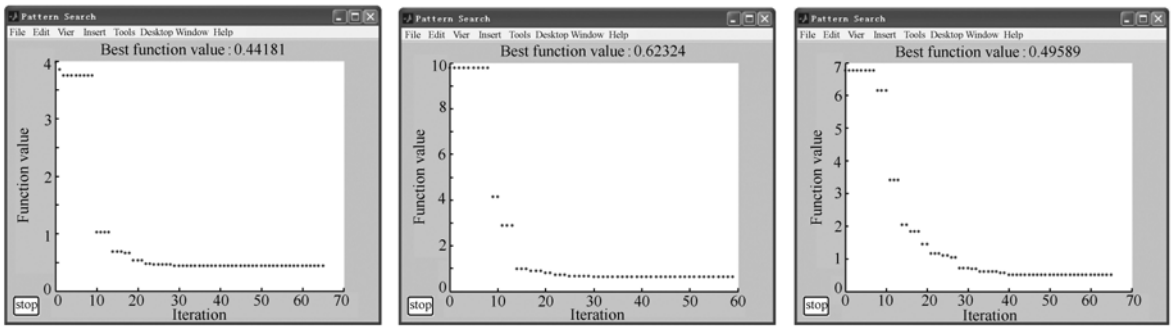
Fig.7 Surface map by SSI with theoretic parameters

式搜索算法求解各子孔径的最优位置参数如表 1 所示。各子孔径的迭代目标函数值的变化如图 8 所示,3 个子孔径经过 70 次左右迭代就能够收敛到最优解。从各子孔径中消去最优位置的非共路误差,并利用 Fuducial 标定投影畸变将各子孔径的 CCD 像素坐标统一到镜面坐标上,对重叠区域的数据进行分析和求解,求得各子孔径相对中心基准子孔径的调整误差,通过综合优化拼接算法求得拼接后的面形分布,如图 9 所示,面形误差分布没有明显的“拼痕”,其 PV 值和 RMS 值分别为 4.087λ 和 0.525λ。

表 1　理论位置参数和搜索最优化参数

Table 1　Initial and optimum parameters of location

	d_x/mm		d_y/mm		d_z/mm		α/(°)		β/(°)	
	Initial	Optimum	Initial	Optimum	Initial	Optimum	Initial	Optimum	Initial	Optimum
Subaperture0	88.44	88.614 60	0	0.000 01	2.876 32	2.873 41	0	0	−3.719 27	−3.719 30
Subaperture1	88.44	88.740 17	53.5	53.554 69	4.155 26	4.156 58	2.250 87	2.248 52	−3.717 57	−3.716 53
Subaperture2	88.44	88.604 67	−53.5	−53.453 12	4.155 26	4.053 13	−2.250 87	−2.247 73	−3.717 57	−3.718 31



(a) Central subaperture　　(b) Top subaperture　　(c) Nether subaperture

图 8　迭代目标函数值的变化图

Fig. 8　Trendline of iterative objective function

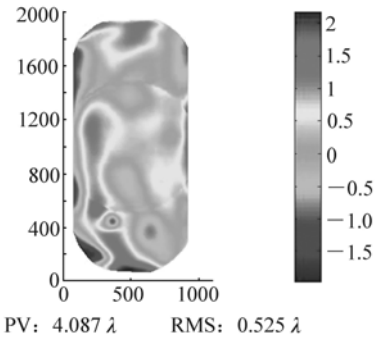


图 9　拼接后全口径面形分布图

Fig. 9　Surface map of whole aperture after stitching

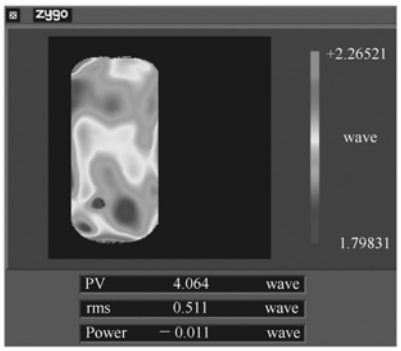


图 10　零位补偿测量面形分布图

Fig. 10　Surface map of null-compensation test

为了验证和对比子孔径拼接检验的准确性,设计了补偿透镜,利用零位补偿干涉法对该离轴非球面进行了全口镜面形测量,检测结果如图 10 所示,其面形误差分布的 PV 值和 RMS 值分别为

4.064λ 和 0.511λ。比较可得:两种测试方法所得的面形误差分布是一致的,其 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.023λ 和 0.014λ,PV 值和 RMS 值的相对偏差分别仅为 0.57% 和 2.74%。

4 结 论

基于模式搜索迭代算法,提出了一种拼接调整误差补偿方法,该方法能很好地消除和补偿子孔径拼接测量过程中由于调整机构没有对准所带来的误差,从而很好地完成对非球面子孔径拼接的检测。对该方法的基础理论和实现步骤进行了分析和研究,推导了子孔径拼接测量调整误差补偿数学模型。结合工程实例对一高陡度离轴碳化硅非球面反射镜进行了调整误差补偿和相位数据拼接,所得的全口径面形分布没有明显的"拼痕",相对理论位置数据拼接更为准确。拼接检测与零位补偿测量全口径面形误差分布是一致的,两种测试方法面形 PV 值和 RMS 值的偏差分别优于 λ/40 和 λ/70。

参考文献:

[1] HNSEL T,NICKEL A,SCHINDLER A. Stitching interferometry of aspherical surfaces[J]. *SPIE*,2001,4449:265-275.

[2] CATANZARO B,CONNELL S. Cryogenic(70K) measurement of an all-composite 2-meter diameter mirror[J]. *SPIE*, 2001,4444:238-255.

[3] JON F,PAUL D,PAUL E M,*et al*.. An automated subaperture stitching interferometer workstation for spherical and aspherical surfaces[J]. *SPIE*,2007,5188:296-307.

[4] TRICARD M,SHOREY A,HALLOCK B,*et al*.. Cost-effective, subaperture approaches to finishing and testing astronomical optics[J]. *SPIE*,2006,6273:62730L.

[5] MURPHY P,FLEIG J,FORBES G. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres[J]. *SPIE*,2006,6293: 62930J.

[6] 巩岩,赵磊.单点金刚石机床及其在光学工程领域的应用[J].中国光学,2011,4(6):537-545.
GONG Y,ZHAO L. Single point diamond machines and their applications to optical engineering[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(6):537-545.(in Chinese)

[7] ZHAO CH Y,BURGE J H. Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface[J]. *SPIE*,2008, 7063:706316.

[8] MARC T,PAUL D,GREG F. Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology[J]. *SPIE*,2005,5638:284-299.

[9] 王孝坤,王丽辉,张学军,等.子孔径拼接法检测非球面[J].光学 精密工程,2007,15(2):527-532.
WANG X K,WANG L H,ZHANG X J. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(2):192-198.(in Chinese)

[10] 潘君骅.光学非球面的设计、加工和检验[M].北京:科学出版社,1994.
PAN J H. *Design, Fabrication and Testing of Optical Aspheres*[M]. Beijing:Science Press,1994.(in Chinese)

[11] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. New York:John Wiley & Sons,Inc.1992.

[12] 侯溪,伍凡.大型双曲面次镜面形检测技术现状及发展趋势[J].中国光学与应用光学,2010,3(4):310-317.
HOU X,WU F. Status and trends of surface measurement technologies for large hyperboloidal secondary mirrors[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,2010,3(4):310-317.(in Chinese)

[13] 韩昌元.近代高分辨地球成像商业卫星[J].中国光学与应用光学,2010,3(3):201-208.
HAN CH Y. Recent earth imaging commercial satellites with high resolutions[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,2010,3(3):201-208.(in Chinese)

[14] WANG X K,WANG L H. Measurement of large aspheric surfaces byannular subaperture stitching interferometry[J]. *Chinese Optics Letters*,2007,11(5):645-647.

[15] WANG X K,ZHENG L G,ZHANG B Z,*et al*.. Subaperture stitching interferometry for testing of a large hyperboloid[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2009,38(1):88-93.

[16] WANG X K,ZHENG L G,ZHANG B ZH,*et al*.. Test of an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. *SPIE*,2009,7283:72832J.

作者简介:

王孝坤(1980—),男,江苏丹阳人,博士,副研究员,硕士生导师,2003 年于徐州师范大学获得学士学位,2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事先进光学制造技术等方面的研究。E-mail:jimwxk@ sohu. com

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊,曾于 1992 年,1996 年,2000 年和 2004 年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为"物理学类核心期刊",并于 2000 年同时被评为"无线电电子学、电信技术类核心期刊"。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和"万方数据资源系统"等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自 2000 年;美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自 2003 年已定期收录检索该刊论文;2008 年被荷兰"Elsevier Bibliographic Databases"确定为源期刊;2010 年被美国"EI"确定为源期刊。2001 年在国家科技部组织的"中国期刊方阵"的评定中,《发光学报》被评为"双效期刊"。2002 年获中国科学院 2001 ~2002 年度科学出版基金"择重"资助。2004 年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自 2011 年改为月刊,A4 开本,144 页,国内外公开发行。国内定价:40 元,全年 480 元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地　址: 长春市东南湖大路 3888 号
《发光学报》编辑部
邮　编: 130033
电　话: (0431)86176862, 84613407
E-mail: fgxbt@ 126. com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4
国际标准刊号: ISSN 1000-7032
国内邮发代号: 12-312
国外发行代号: 4863BM
http://www. fgxb. org