

文章编号 1004-924X(2016)10-2357-13

## 拼接干涉技术在同步辐射领域的发展现状及趋势

刘丁泉, 盛伟繁\*, 王秋实, 李明

(中国科学院高能物理研究所北京同步辐射装置X射线光学与技术实验室, 北京100049)

**摘要:**针对同步辐射领域光学元件的口径逐渐增大,其面形测量精度的要求已达到纳弧度级的问题,本文研究了该领域先进的面形测量方法——拼接干涉技术,以实现光学元件的高分辨率二维测量。介绍了拼接干涉技术的基本原理,综述了目前同步辐射光学领域常用的面形测量设备——激光光束长程面形仪、高精度自准直纳米测量仪,以及拼接干涉仪的发展历程和特点,比较了它们各自的缺点和优势。最后,分析了拼接干涉涉及的主要误差来源,指出该技术的应用和发展趋势主要有拼接算法的创新,干涉仪测量的快速化,拼接干涉仪的商业化,以及拼接干涉技术与其他科学技术的融合等。

**关键词:**光学元件;面形检测;拼接干涉术;同步辐射;综述

**中图分类号:**TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162410.2357

## Current status and trends of stitching interferometry in synchrotron radiation field

LIU Ding-xiao, SHENG Wei-fan\*, WANG Qiu-shi, LI Ming

(Laboratory of X-ray Optics and Technologies, Beijing Synchrotron Radiation Facility,  
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: shengwf@ihep.ac.cn

**Abstract:** In synchrotron radiation field, the apertures of optical components increase gradually and their surface figure precisions have been demanded to be a nano-radian level. This paper researches the modern surface figure measurement methods in this field, stitching interferometry, to realize the high resolution two-dimensional measurement of optical components. The basic principles of the stitching interferometry are introduced. Then, a series of common optical surface shape measurement instruments in the synchrotron radiation field are overviewed, such as long trace profilers based on laser beams, high precision and auto-collimation measuring machines for nanometer optical components and stitching interferometers. It describes their development history and working characteristics and compares their shortcomings and advantages. Finally, this paper analyzes the main error sources involved in the stitching interferometry, and points out that the application and development trends of the technology are mainly the innovation of the stitching algorithm, the improvement of measuring speeds of interferometers, the commercialization of interferometers and the integration of the interferometry and

收稿日期:2016-08-10;修订日期:2016-08-26.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 11005123)

other science technologies.

**Key words:** optical element; surface figure test; stitching interferometry; synchrotron radiation; overview

## 1 引言

自 20 世纪 80 年代以来,同步辐射光源在世界范围内得到了广泛的应用,并已经成为材料、化学、生命等科学领域不可替代的研究工具<sup>[1-2]</sup>。随着光源的广泛使用,各种研究对光源的要求也越来越高。光源质量受光束线部分影响,其中单色器、准直镜等的精度则起到较大作用。X 光反射光学元件对同步辐射光在光子能量、相空间尺度调制,尤其是相干性保持方面的作用极为重要。而提高 X 光光学元件的加工精度的前提则是其测量精度的不断提高<sup>[3-4]</sup>。例如正在筹建中的 6 GeV 高能光源,其中的光学元件就急需进行精确测量<sup>[1]</sup>。

同步辐射领域的光学元件具有大口径、曲率大的特点。德国 Fraunhofer 研究所光学组通过比较不同设备测量面形形貌误差的带宽得到,一般设备只可以测量中高频信息,范围局限在 1~200 mm。一般实验室使用的光学面形检测设备有原子力显微镜和各类干涉仪<sup>[5]</sup>,但是它们无法满足同步辐射光学元件的大口径测量要求。随着测量精度和测量范围的不断提高,先后有基于激光光束的 LTP(Long Trace Profiler)和基于高精度自准直仪的 NOM(Nanometer Optical Component Measuring Machine)面世。LTP 和 NOM 可以实现较大范围的测量(甚至 2 m),不仅可以用于同步辐射光学的高精度测量,还可以用于天文和空间光学表面的高精度测量<sup>[6-8]</sup>。测量精度也由亚微米升至纳米,由微弧度升至纳弧度,甚至更高。面形测量也可采用菲索干涉仪等设备,光学元件的口径随着需求的变化逐渐增大,甚至达到 1 m 或更大。由于口径大,一般干涉仪无法通过单次测量实现对整体面形的测量。同步辐射领域使用的反射镜半径范围大,当测量曲率半径比较小时,由于曲率比较高,单次测量结果并不准确,需要采用拼接技术。该技术主要是对菲索干涉仪和白光轮廓仪的测量结果进行拼接,例如可测式拼接角微干涉仪就是对白光轮廓仪的测量面形进行拼接<sup>[9-10]</sup>。

LTP 和 NOM 的空间分辨率可以达到毫米级,而拼接干涉仪可以达到微米级,所以拼接干涉仪的空间分辨率比 LTP 和 NOM 高。干涉仪虽然测量范围较小,但是通过拼接可以扩大测量范围。目前,LTP 和 NOM 都只适合进行一维测量,根据干涉原理,拼接干涉仪可以直接实现二维测量<sup>[11-13]</sup>。LTP 和 NOM 利用  $f-\theta$  原理最终得到的只是一条线上的角度测量值,而拼接干涉仪测量得到的是某区域内的表面面形。一般测量设备的测量范围不大,LTP 可以满足大部分光学元件的曲率测量范围,但是测量精度不是很高。NOM 的测量精度较高,但曲率测量范围却不是很大。而拼接干涉仪既可以解决 LTP 和 NOM 的二维测量问题,又可以实现高精度、大量程的测量。

拼接干涉技术测量中,干涉仪每次只测量整个光学元件的一部分,然后对测量得到的各个局部的面形进行拼接,最终得到整个面形。

## 2 拼接干涉仪原理

在大口径光学元件的面形测量中,由于光学元件表面范围和表面角度都较大,干涉仪达不到的测量范围,此时就需要使用拼接技术。根据所使用的局域部分的孔径形状,拼接分类可以分为圆形、环形和矩形拼接方法<sup>[13]</sup>。无论何种拼接技术,现今主流拼接的基本原理都是将光学元件的整体分割成几部分,并且各个局部需要满足干涉仪的测量要求,用干涉仪分别对各局域面形进行测量,然后对各局部面形进行拼接得到最终面形<sup>[14-15]</sup>。

拼接原理如图 1 所示,有 A 与 A' 两个局域部分,并且 A 和 A' 存在共同区域,A 经过一定移动可以得到 A'。对于 A 与 A' 两个局域部分,A' 与 A 的坐标分别为  $(x', y')$  与  $(x, y)$ ,A' 与 A 的测量值分别用  $F(x', y')$  和  $F(x, y)$  表示, $(x, y)$  坐标系移动  $(x_0, y_0)$  得到  $(x', y')$  的坐标系,即有:

$$\begin{cases} x = x' + x_0 \\ y = y' + y_0 \end{cases} \quad (1)$$

当将 A 与 A' 拼接在一起时,把 A 的坐标和测量值当做基准,同时认为  $F(x, y)$  和  $F'(x', y')$

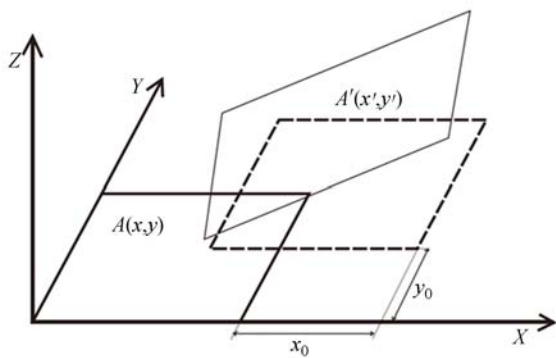


图 1 拼接原理图

Fig. 1 Principle of stitching

的被测体是刚体,在移动过程中不可避免地会产生倾斜和旋转误差,不能直接对关系进行变换。这里引入  $a$  和  $b$  分别表示在  $x$  和  $y$  方向的倾斜系数,  $c$  表示在垂直样品方向的测量值之差。 $F(x, y)$  与  $F'(x', y')$  的关系为:

$$F(x, y) = F'(x', y') + ax + by + c. \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可以得到:

$$F(x, y) = F'(x - x_0, y - y_0) + ax + by + c. \quad (3)$$

在理论上重叠区域在两次测量中的测量值信息应该是相同的,通过检测重叠部分的数据,然后对两次测量的重合区域数据之差求取平方值的最小值(式(4)),以减小随机误差对拼接精度的影响。

$$\sum \{F(x, y) - (F'(x - x_0, y - y_0) + ax + by + c)\}^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

上面数据是来自于两个干涉测量图的重叠区域的所有采样点,对式(4)进行求解,可以得到:

$$\begin{pmatrix} \sum x\Delta(x, y) \\ \sum y\Delta(x, y) \\ \sum \Delta(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x^2 & \sum xy & \sum x \\ \sum xy & \sum y^2 & \sum y \\ \sum x & \sum y & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中: $\Delta(x, y)$ 表示两次测量值之差,要将重叠部分所有的点数据都代入式(5),求解得到:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x^2 & \sum xy & \sum x \\ \sum xy & \sum y^2 & \sum y \\ \sum x & \sum y & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum x\Delta(x, y) \\ \sum y\Delta(x, y) \\ \sum \Delta(x, y) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

将式(6)的  $a, b, c$  代入式(3),从而实现  $A$  与  $A'$  的拼接,然后重复此过程,进行多次拼接就可以实现整体面形的拼接。

### 3 发展历史

拼接干涉技术从 20 世纪 80 年代初到现在已经有三十多年的发展历史,无论是理论基础、硬件设备还是软件算法都有了很大的提高。

1981 年,美国亚利桑那大学光学中心的 C. J. Kim 第一次提出了子口径拼接检测技术,对小口径平面反射镜进行阵列测量来实现大口径面镜的检测,这是拼接技术的历史性开端<sup>[16]</sup>。早期的子口径拼接检测基于 Zernike 多项式描述面形,各子口径之间没有重叠区域。拼接算法主要是以 Zernike 多项式拟合波前为基础,其中比较有代表性的是 Thunen-Kwon 算法和 Simultaneous Fit Method 算法<sup>[17-20]</sup>。

1982 年,美国帕洛阿尔托光电技术实验室的 John G. Thunen 提出了处理数据时先把各个局域部分的面形用 Zernike 多项式表达式拟合,然后再根据各个部分口径的 Zernike 多项式拟合出整体面形的 Zernike 多项式表达式的方法(Thunen-Kwon Theory)<sup>[17]</sup>。

1983 年,新墨西哥大学现代光学实验室的 Weng W. Chow 提出将每个圆形子孔径测得的面形数据直接拟合(Simultaneous Fit Method, SFM)全口径的 Zernike 多项式表达式<sup>[18]</sup>,算法速度比 Thunen-Kwon Theory 提高了 2~4 倍<sup>[19]</sup>。但是由于上述算法都是基于 Zernike 多项式描述面形的,只能描述低频面形;当被测波前高频信息比较多或者不规律的时候,Zernike 多项式项数不能扩展到无穷大,因而导致高频信息较多时精度会大幅降低。

1986 年,瑞士光学发展实验室 Stuhlinger 提出了一种离散测量值法(Discrete Phase Method, DPM)来描述子口径面形。该算法将面形变为大量分布的离散测量值,并且各个局部区域之间存在重叠部分,最后利用测量值数值差,通过最小二乘法得到各个局域面形的测量值相对平移和倾斜量<sup>[20]</sup>。

1994 年,千叶大学图像科学系 M. Otsubo 在无迭代的拼接算法中引入平均化误差的思想,大大提高了拼接算法的精度,扩大了横向动态范围<sup>[14,21]</sup>。

1997 年,法国 CILAS 的 M. Bray 首次将干

涉仪与拼接技术相结合,提出了拼接干涉这一理论,并做出了世界上第一个实体拼接干涉仪。该拼接干涉仪通过控制被测元件在平面内做二维运动,完成了所有局域部分的面形测量,然后通过算法计算实现整体测量。但是该方法只能依靠各个部分测量面形的重叠区域来决定相邻测量对象的相对角度,误差主要来源于拼接处,测量精度较低<sup>[9,22]</sup>。

1998年,Phase Shift Technology公司的Tang, S根据任意刚体在运动的时候都存在6个自由度这一现象,基于重叠区域测量值差值来求取各个局域部分的自由度关系,从而在一定程度上提高了拼接精度<sup>[23-24]</sup>。

1999年,M. Bray将传统的干涉仪和拼接干涉仪做了对比,得出拼接并不会给系统产生较大误差的结论,并且将功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)的概念引入到干涉测量中<sup>[25-26]</sup>。

2001年,赫歇尔太空天文台的Brian Cantanzaro将3.5 m的宇宙望远镜分成14个直径为2 m的局部面形,通过三维拼接实现面形测量,证明了拼接技术的可行性和发展潜力<sup>[27]</sup>。

2002年,瑞士吕勒奥理工大学的Sjodahl提出了迭代的离散测量值拼接算法,首次采用迭代方法分别计算每个子口径相对于基准的6个自由度的定位误差。首先通过奇异值分解法求解获得6个定位误差的最优估计,然后更新重叠区域形成一个新的目标函数进行优化,最后迭代直到算法收敛到给定精度,该精度即为最终的拼接精度<sup>[28]</sup>。

2003年,美国QED公司的Jon Fleig等人成功研制了SSI自动拼接干涉仪,测量装置见图2。该装置通过计算机控制可以实现平面、球面、非球面的面形高精度自动检测,测量口径可以达到200 mm<sup>[29-30]</sup>。该工作站使用高精度、6自由度的姿态台、商业用口径为四英寸或者六英寸的斐索干涉仪和一个专门制作用于自动测量的软件包,可以实现整体面形的测量。算法对由光学镜子和机械台产生的误差进行了约束优化,其中包括位置误差和畸变等。

2009年,QED公司的Andrew Kulawiec等人提出Variable Optical Null(VON)技术。该技术通过加入可控部分补偿器扩大子口径拼接干涉仪的纵向动态范围,以实现高陡度光学非球面的

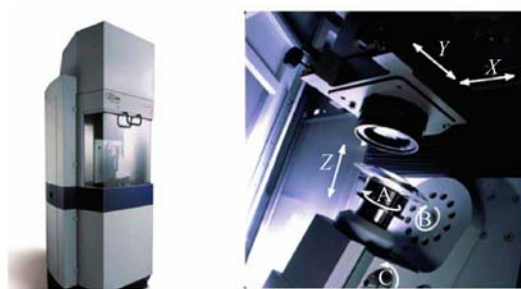


图2 QED公司的SSI工作站<sup>[29]</sup>

Fig. 2 SSI workstation with stage axes labeled

面形检测。在子口径拼接检测实验中加入一个双光楔作为可变部分补偿器,如图3所示,用来部分地补偿干涉仪射出的球面波与高陡度光学非球面的差距。检测时,将它安装于干涉仪和待测非球面之间,通过倾斜和绕自身的转动来调整波前。如图4和图5所示,可以明显看出可检测部分增大。QED公司利用VON技术成功研制出非球面拼接干涉仪(Aspheric Stitching Interferometer, ASI),该设备检测一个非球面内的条纹高达1 000条,极大提高了测量能力<sup>[31-34]</sup>。此技术能够对同步辐射领域曲率较大的镜子进行测量。



图3 一对可控楔形光束汇聚补偿器<sup>[31]</sup>

Fig. 3 A pair of optical wedges for creating a controllable aberrated wavefront in a converging beam

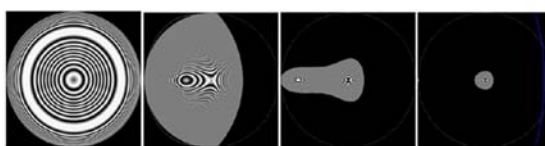


图4 未使用可变部分补偿器的波前<sup>[31]</sup>

Fig. 4 Predicted fringe patterns of subapertures from example asphere using a spherical wavefront

国内20世纪90年代初,子口径拼接技术被提出。其中,具有代表性的有程维明等学者提出的多孔径扫描检测技术(Multi-aperture Overlap-scanning Technique, MAOT),该技术采用基于齐次坐标变换的两两拼接数学模型拼接检测大口径光学元件面形<sup>[35]</sup>。国防科技大学的陈善勇等

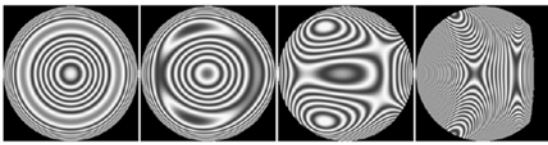
图 5 使用可变部分补偿器的波前<sup>[31]</sup>

Fig. 5 Predicted fringe patterns of example asphere subapertures using VON

学者首次将工件定位、公差评定以及多视拼合领域的方法用于非球面的子孔径拼接干涉测量。这种拼接方法将李代数、全局最优化等理论应用到子孔径拼接问题中,然后将拼接分解为重叠计算和位形优化两个子问题,利用迭代优化方法求解两个子问题,直到算法收敛至精度要求内<sup>[36-39]</sup>。2014年,陈善勇等人又提出了一种双计算全息图可变部分补偿器。与 VON 技术不同,该补偿器只有相对旋转自由度,没有整体倾斜自由度,具体就是将 Zernike 多项式的第五项和第七项加上一个反向的值,将之抵消掉<sup>[40]</sup>。这种方法也达到了曲率较大镜子的测量要求,可以应用于同步辐射领域。四川大学张蓉竹等学者对去倾斜技术、样品容量等因素对拼接干涉检测面形的影响进行了研究<sup>[41-43]</sup>。中科院光电研究所候溪等学者实现了大口径面形的波前测量和环形子孔径拼接面形等的测量<sup>[44-46]</sup>。长春光机所王孝坤和张学军等学者基于齐次坐标转换和全局优化的基础,实现了对环形子口径和圆形子口径的拼接检测<sup>[47-53]</sup>。此外,多所国内高校和研究所在该领域也比较活跃<sup>[54-57]</sup>。

拼接干涉技术逐渐成熟,其应用也普及到了同步辐射领域。2002年,美国阿贡国家实验室的 Lahsen Assoufid 搭建的半自动拼接测量系统可以用来测量 X 光学元件的面形。该系统首次实现了在同步辐射领域的使用,并且通过测量得到比传统测量方法(例如 LTP)更高的精度。在实验中,对 1 m 长的 X 光学镜子进行测量,系统的重复误差少于 0.6 mrad,与 LTP 的测量结果相当。当实现全自动和系统升级后,估计可以达到 0.01 mrad 或者更高的精度<sup>[58]</sup>。2003年,日本大阪大学的 Kazuto Yamauchi 等人研制出专门应用于同步辐射领域的测量 X 射线反射镜的显微拼接干涉仪(Microstitching Interferometry, MSI)<sup>[59]</sup>。考虑到拼接干涉技术中的累计误差以

及低频数据测量的重要性,该设备先使用精度较高的小口径仪器测量各局部光学元件的面形,再通过一个精度较低的大口径仪器测量整体的面形,最后通过拼接得到整体面形。测量过程中使用反馈系统来降低误差,最终的波峰波谷值达到亚纳米级,横向分辨率高于 20  $\mu\text{m}$ ,拼接角度误差也减少至  $1 \times 10^{-7}$  rad。

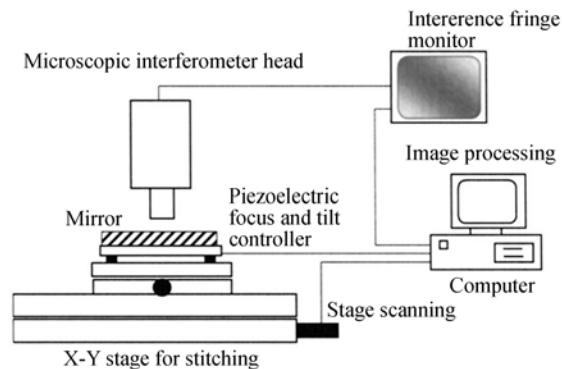
图 6 显微拼接干涉仪的工作原理图<sup>[59]</sup>

Fig. 6 Schematic of Microscopic Interferometer (MSI)

在同步辐射领域,大多数光学元件在弧矢方向的曲率半径比较小,而子午方向的曲率半径比较大,因此导致元件在弧矢方向的弯曲比较严重。干涉仪测量的干涉条纹太少,如图 7 所示,导致测量结果不准确<sup>[15]</sup>。目前,虽然可以用 VON 等技术来检测高陡度光学非球面的面形,但是还不能完全实现整体面形的测量<sup>[31-34,40]</sup>。2004年,日本大阪大学的 Hidekazu Mimura 等人在用 MSI 做纳米聚焦的时候提出了相对角拼接干涉仪(Relative Angle Determinable Stitching Interferometry, RADSI)<sup>[15]</sup>。在装置中加入一块平面参考镜,如图 8 所示,可以同时移动参考镜和待测镜或



图 7 干涉测量条纹

Fig. 7 Interference fringe pattern

者对参考镜局部进行倾斜,使用倾斜角度来得到转换公式(3)中的倾斜系数,其他系数则通过重叠部分得到,此方法也可以减小误差。RADSI 的测量过程如图 9 所示,先对整体进行测量,然后参考镜和待测镜面一起移动,测量完成后只移动参考镜回原位置,便可以得到旋转角度,最后重复前面步骤即可得到所有的旋转角度。MSI 主要用来进行大型 X 射线镜面面形的高空间分辨率测量,而 RADSI 主要用来进行硬 X 射线聚焦椭圆镜面的面形测量,他们将这两种方法结合,对与实现纳米聚焦的椭圆表面有相同曲率的圆柱表面进行测量,其绝对精度可以达到  $3\text{ nm}^{[15]}$ 。2005 年,他们又采用 RADSI 对与实现纳米聚焦的椭圆表面有相同曲率的圆柱表面进行测量,绝对精度可以达到  $4\text{ nm}^{[60]}$ 。但是 RADSI 对 X 光汇聚光斑影响最大的中频数据精度并不是很高。

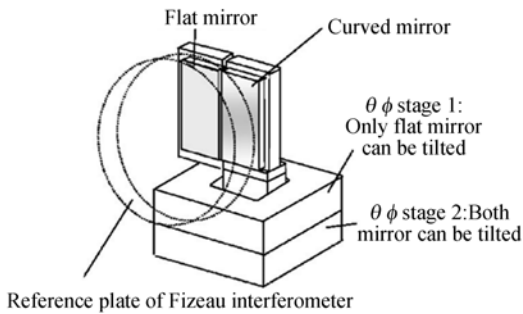


图 8 相对角拼接干涉仪的基本原理图<sup>[15]</sup>

Fig. 8 Schematic of Relative Angle Determinable Stitching Interferometry(RADSI)<sup>[15]</sup>

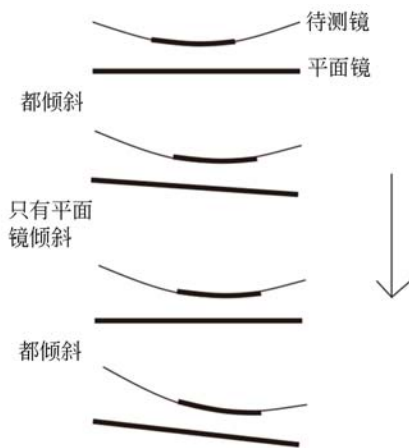


图 9 相对角拼接干涉仪的测量步骤

Fig. 9 Measurement procedures of Relative Angle Determinable Stitching Interferometry(RADSI)

2007 年,日本大阪大学的 Haruhiko Ohashi 等人对 MSI 和 RADSI 进行了升级,对为 RADSI 和 MSI 工作的具有 5~6 个自由度的平台进行机械设计,采用柔性铰链使转轴具有更高的稳定性和精度,采用半闭环控制的线性驱动器使镜子放置台的旋转角度位置更准确,从而可以更高效地处理更大的数据量。测量区域也扩大到  $500\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ,并且实现了对  $0.5\text{ m}$  长的 X 射线镜的测量,RMS 值可以达到  $1.4\text{ nm}$ ,横向分辨率也可以达到  $36\text{ }\mu\text{m}^{[61]}$ 。

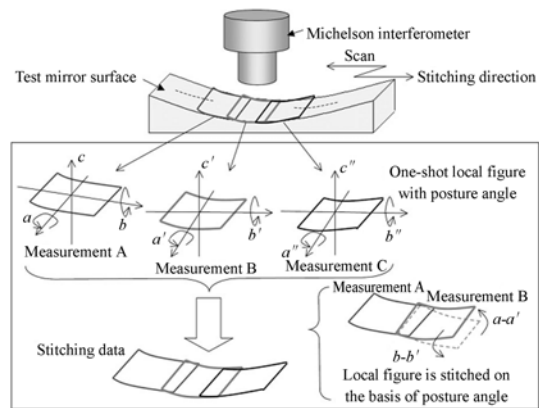


图 10 测量方法的基本原理示意图<sup>[62]</sup>

Fig. 10 Principal schematic of a developed RADSI system<sup>[62]</sup>

2008 年,日本 Spring-8 的 Hirokatsu Yumoto 等研究人员设计了一种新型的 RADSI 来测量硬 X 射线聚焦镜。其中,局部部分的面形用迈克尔逊干涉仪来测量,同时用大口径斐索干涉仪来测量相邻两个口径之间的角度,从中得到式(3)中的  $a$  和  $b$ ,整体测量数据重复 RMS 可以达到  $0.8\text{ nm}$ 。测量步骤具体见图 10,用迈克尔逊干涉仪分别对各个部分进行测量,同时使用斐索干涉仪对其角度进行测量,最后实现数据拼接,得到面形。图 11 为测量设备的结构图<sup>[62]</sup>。

2009 年,他们又对该设备进行了改进,利用大口径斐索干涉仪,使用一个平面镜来测量整体的相对拼接角度,使用精度较高的 Michelson 干涉仪测量局部高精度、高空间分辨率的面形。局部面形和拼接角度的测量是同时进行的。角度测量的稳定性可以达到  $1 \times 10^{-8}\text{ rad}$ 。实验装置全部在防震气浮台上,超净间的温度变化控制在  $\pm 0.1^\circ$ ,对一个可以实现  $25\text{ nm}$  聚焦镜的面形测量重复性峰谷值小于  $3\text{ nm}^{[63]}$ 。

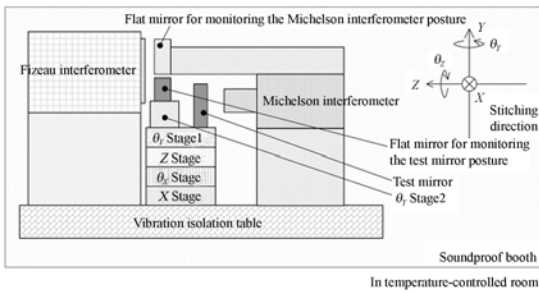


图 11 RADSI 测量装置的基本结构图<sup>[63]</sup>

Fig. 11 Configuration of a developed RADSI measurement instrument<sup>[63]</sup>

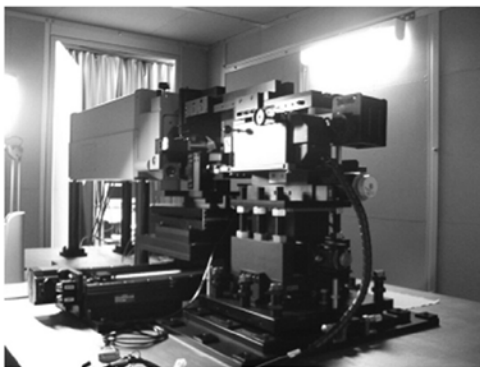


图 12 拼接干涉仪实物图<sup>[63]</sup>

Fig. 12 Overview of developed measurement instrument for RADSI<sup>[63]</sup>

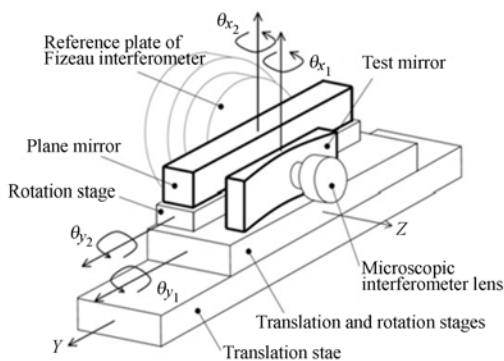


图 13 拼接干涉仪原理图<sup>[10]</sup>

Fig. 13 Device configuration of developed metrology system<sup>[10]</sup>

拼接角显微干涉仪装置的原理如图 13 所示。该装置最终的纵向尺寸可以达到 1 nm 精度,横向分辨率小于 0.1 mm。测量重复性和可靠性在测量聚焦小于 10 nm 以下光斑的聚焦镜时,波峰波谷值可以小于 4 nm<sup>[10]</sup>。

2010 年,欧洲同步辐射光源 (ESRF) 的

Amparo Rommeveaux 等人完成了一种新型的用于测量 X 射线镜子的微型干涉仪,分别对两个曲率半径为 1 280 m 和 38 m 的镜子进行测量。与 LTP 的测量结果进行对比,测量的弯曲范围比 LTP 大<sup>[64-65]</sup>。

2011 年,德国布伦瑞克大学 Axel Wiegmann 等人在评价同步辐射中拼接干涉仪的测量精度时,提出了如图 14 所示的改进方法。其中光学镜子的放置平台有  $x, y, z$  3 个方向的平移,使用一个小型干涉仪,例如斐索干涉仪,将其装在滑台上,可以绕着  $x$  轴转动。图中所示的模拟试验台可以很好地实现测量过程中的定位需要,而且坐标转换也比较方便<sup>[66]</sup>。在用真实数据进行误差分析的时候,在 100 nm 范围内这种方法的拼接误差是直接测量方法的 3 倍,导致误差的主要原因是定位误差。

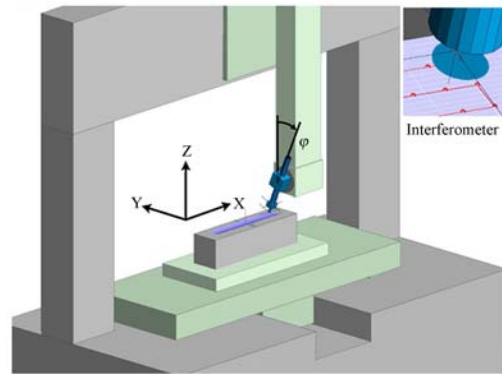


图 14 拼接干涉仪模拟实验图<sup>[66]</sup>

Fig. 14 Measuring simulation of improved stitching interferometer<sup>[66]</sup>

2013 年,法国 SOLEIL 光源 Muriel Thomasset 等人提出了一种用于高精度拼接的新型相位移动显微干涉仪。为了防止条纹变形而专门设计的远心物镜,可以实现大焦深和明显的条纹反差。所使用的相位移动修正方法可以提高面形测量精度,通过改造和升级分光棱镜和镜子夹持器,提高了测量精度。他们对一块长为 75 mm 的镜子进行了测量实验,分别使用 OPTOPHIA 和 MBSI 两种拼接算法进行面形计算并与 LTP 的测量结果进行对比,精度明显高于 LTP<sup>[67]</sup>。

综上所述,世界各主要同步辐射实验室的拼接干涉仪装置的性能如表 1 所示。

表 1 同步辐射实验室中拼接干涉仪装置的性能统计表

Tab. 1 Performance statistics of stitching interferometer in different synchrotron radiation laboratorys

设备	时间	地点	量程	测量精度	备注
半自动拼接 测量系统	2002	阿贡国家实验室	1 m × 150 mm	系统重复误差少于 0.6 mrad	首次实现了拼接干涉仪 在同步辐射领域的使用
MSI	2003	大阪大学		PV 值达亚纳米级, 横向 分辨率为 20 μm, 拼接角 度误差少于 0.1 μrad	累计误差较小, 使用反馈 系统来降低误差
MSI 与 RADS I 结合	2004	大阪大学		绝对测量精度为 3 nm	拼接角精度较高, 中频数 据精度不是很高
MSI 与 RADS I 结合 (升级版)	2007	大阪大学	500 mm × 50 mm	实验测量数据重复 RMS 为 1.4 nm, 横向分辨率为 36 μm	采用柔性铰链与半闭环 控制系统使转台定位更 准确
升级版 RADS I	2008	Spring-8		实验测量数据重复 RMS 为 0.8 nm	局部面形的测量和拼接 角度的测量同时进行的
微型 干涉仪	2010	ESRF		实验测量数据重复误差 为 0.02 μrad	分辨率范围大, 可以达到 0.01~20 mm
拼接 干涉仪	2011	布伦瑞克大学	800 mm × 400 mm × 200 mm		移动, 旋转定位方便
相位移动 显微干涉仪	2013	法国 SOLEIL 光源	800 mm × 800 mm	实验测量数据重复 RMS 为 0.79 nm	分辨率范围大, 可以达到 0.5~20 mm

在国内, 拼接干涉仪技术在同步辐射领域的使用虽然已经获得了一定成果, 但是拼接结果的精度还有待提高, 其成品目前仍处于实验室阶段, 距商品化还有相当一段距离。

#### 4 拼接干涉仪误差

拼接干涉技术的实验过程如下: 首先根据需要将所测量的光学元件表面划分为几个局部区域; 然后按照一定的顺序进行测量; 最后按照一定的算法进行拼接, 得到最终的测量光学元件面形。影响拼接干涉仪最终测量精度的因素主要有干涉仪自身测量误差、环境及装调配置误差和拼接误差。通常采用波峰波谷值 (PV)、均方根值 (RMS) 等进行精度评价。

拼接干涉技术所使用的干涉仪是一套结构复杂、精度要求较高的光机电一体化仪器。无论是菲索干涉仪还是白光轮廓仪, 其本身都存在误差。例如参考镜面型误差, 由于菲索干涉仪口径较大, 参考镜的加工困难非常大, 误差影响较大。目前,

需要通过标定参考镜的面型误差, 才可以实现测量<sup>[68-74]</sup>。另外, 激光波长稳定性、探测器误差、离轴倾斜等都会对干涉仪的测量结果产生影响。

干涉仪和其他高精度测量仪器一样, 对测试环境要求比较苛刻。环境产生的误差包括温度、振动、空气扰动和漂移等。2013 年, 日本 Spring-8 的 Hirokatsu Yumoto 等人指出在斐索干涉仪绝对面形的测量中, 空气湿度变化对于测量重复性有很大的影响<sup>[75]</sup>。他们发现, 对于一个直径为 152 mm 的参考镜, 当空气湿度变化达到 11% 的时候, 它的面形变化的峰谷值可以达到 1 nm。通过标定, 长为 145 mm 的斐索干涉仪的测量不确定性可以达到 0.7 nm。2004 年, 美国 Advanced Photon Source (APS) X 光学测量实验室对拼接干涉仪系统进行了振动诊断及校正, 得到的结论是简单的隔振系统可以通过减小传动和定位系统误差来提高测量精度<sup>[76]</sup>。在实验中除了需要减小环境误差, 还需要考虑装配误差, 例如, 通过提高光学元件夹持器的稳定性可以明显提高测量精度<sup>[61, 67]</sup>。



拼接对最终的面形测量结果也会产生误差,这与拼接模式的选取、重叠比例等都有关系。拼接过程中,重叠系数、平移误差、倾斜误差等因素都会对最终的结果产生影响。1994年,千叶大学图像科学系 M. Otsubo 在无迭代的拼接算法中引入平均化误差的思想,大大提高了拼接算法的精度,扩大了横向动态范围<sup>[14,21]</sup>。拼接误差的降低是拼接干涉中较为重要的部分。

综上所述,拼接干涉仪主要存在干涉仪自身测量误差、环境及装调误差和拼接误差 3 种误差。在设备研制的过程中,需要对这些误差进行分析和处理,使误差降到最低。

## 5 发展趋势

结合拼接干涉仪的发展历史和现状,以及它在各方面的实际应用和技术特点,其发展和应用主要围绕以下几方面展开。

### 5.1 拼接算法的创新

算法在拼接干涉仪中起到至关重要的作用。从连续的 Thunen-Kwon 算法、Simultaneous Fit Method 算法以及 Zernike 多项式拟合算法(Simultaneous Fit Method)到离散测量值方法(Discrete Phase Method, DPM)<sup>[17-20]</sup>,从无迭代拼接算法到迭代算法<sup>[14,21]</sup>,拼接算法的精度不断提高。算法创新需要通过不断地尝试,基于理论推导和计算找到适合不同面形的算法,从而进一步提高拼接精度。例如优化各局部面形的拼接系数,其中,通过改变重叠比例就可以提高拼接精度。

### 5.2 实现干涉仪测量的快速化

现在对于光学元件的要求越来越高,测量速度也越来越快。在同步辐射领域使用的高能单色器弯晶等光学元件需要进行在线测量,即需要一边调节一边测量,调节到可以满足使用要求的时候才停止。例如可以通过提高单次测量的面形面积,进而减少测量次数,达到提高测量速度的目的,同时也降低了拼接误差。例如 QED 公司的 VON 技术和双计算全息图可变部分补偿器,这些方法在测量非球面时,可以提高纵向测量范围,从而增大单次测量面形面积,提高拼接干涉仪的测量速度<sup>[31-34,40]</sup>。此外,还可以通过对算法优化,设

备改进等方法,实现干涉仪测量的快速化。

### 5.3 拼接干涉仪的商业化

拼接干涉仪成本低、测量范围广、测量精度高,这可以满足很多光学元件的设计要求,对于推进社会进步意义重大。美国 QED 公司已经成功研制了 SSI 自动拼接干涉仪,可以实现平面、球面、非球面等面形的高精度自动检测,并且在不停地改进<sup>[29-30]</sup>。虽然已经有了相关的产品,但是还不能够满足便携式要求。而许多同步辐射的光学元件需要在线站上使用,由于 X 射线照射导致温度升高,面形产生形变,需要在光束线上进行测量<sup>[77]</sup>。将拼接干涉仪各部分进行模块化,到达工作现场时将各个模块组合,实现了便携化实时测量的目的。拼接干涉仪的模块化可以更好地满足工作需求。

### 5.4 拼接干涉仪与其他科学技术的融合

拼接干涉仪技术的测量精度还有待提高,通过与其他科学技术的融合来实现精度的提高。在干涉仪测量过程中,镜子姿态台的机械设计采用柔性铰链使转轴有更高的稳定性和精度,采用半闭环控制的线性驱动器使镜子放置台旋转角度位置更准确,通过提高控制光学元件的移动精度来控制重叠部分的相对位置和角度,从而提高精度<sup>[61]</sup>。结合自动化行业使拼接干涉仪设备实现更高的运行速度;再结合相应的控制方法,例如闭环控制可以获得更高的定位。

## 6 总结

拼接干涉技术作为同步辐射领域光学面形测量的一种高分辨率的二维面形测量方法,近些年来迅速发展,并已经成为光学测量领域必不可少的技术。随着材料、化学、生物等学科领域研究的不断发展,对同步辐射光源的要求越来越高,从而对同步辐射光源光学元件的要求也越来越高。面形精度越高,面形形状越复杂,从而对检测设备的要求也越高。这需要我们不断地对检测方法和设备进行创新,以满足工作需求。作为同步辐射光学领域面形检测的重要技术,拼接干涉技术将始终向着高空间分辨率、高精度、大量程的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 姜晓明,王九庆,秦庆,等. 中国高能同步辐射光源及其验证装置工程[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2014,44(10):1075-1094.  
JIANG X M, WANG J Q, QIN Q, *et al.*. Chinese high energy photon source and the test facility[J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.*, 2014, 44(10): 1075-1094. (in Chinese)
- [2] 卢启鹏,马磊,彭忠琦. 变包含角平面光栅单色器波长扫描机构转角精度的检测方法研究[J]. 光学精密工程,2010,18(7):1548-1553.  
LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism in variable included angle plane grating monochromator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1548-1553. (in Chinese)
- [3] 卢启鹏. 高分辨掠入射软 X 射线-真空紫外单色仪[J]. 光学精密工程, 1998,6(5):91-95.  
LU Q P. High resolution grazing incidence soft X-ray and VUV monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*,1998,6,6(5):91-95. (in Chinese)
- [4] 汤琦,马健康,周泗忠,等. 弧矢聚焦双晶单色器设计[J]. 光学精密工程,2002,10(4):411-415.  
TANG Q, MA J K, ZHOU S ZH, *et al.*. Design of a sagittally focusing double-crystal monochromator in synchrotron radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(4):411-415. (in Chinese)
- [5] DUPARRÉ A, FERRE-BORRULL J, GLIECH S, *et al.*. Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(1): 154-171.
- [6] TAKACS P Z, FENG S K, CHURCH E L, *et al.*. Long trace profile measurements on cylindrical aspheres[J]. *SPIE*,1988, 966:354-364.
- [7] SIEWERT F, NOLL T, SCHLEGEL T, *et al.*. The nanometer optical component measuring machine: a new sub-nm topography measuring device for X-ray optics at BESSY [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 705(1): 847-850.
- [8] ROMMEVEAUX A, ASSOUFID L, OHASHI H, *et al.*. Second metrology round-robin of APS, ESRF and SPring-8 laboratories of elliptical and spherical hard-x-ray mirrors [J]. *SPIE*, 2007, 6704: 67040B-1-12.
- [9] BRAY M. Stitching interferometer for large plano optics using a standard interferometer[J]. *SPIE*, 1997, 3134: 39-50.
- [10] YUMOTO H, MIMURA H, HANDA S, *et al.*. Stitching-angle measurable microscopic-interferometer; Surface-figure metrology tool for hard X-ray nanofocusing mirrors with large curvature [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2-3): 203-206.
- [11] 刘斌,王秋平,傅绍军. 长程大型非球面轮廓测量仪的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2):46-53.  
LIU B, WANG Q P, FU SH J. Investigation of long trace profiler for aspherical optics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2006, 43(2): 46-53. (in Chinese)
- [12] 钱石南. 大口径平面和非球面光学表面的纳米和纳弧度精度的测量—长行程外形仪的原理应用和发展[J]. 激光与光电子学进展,2008,45(5):16-25.  
QIAN SH N. Nanometer and nanoradian accuracy measurement of large scale plane and asphere—principle, applications and development of long trace profiler [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008,45(5): 16-25. (in Chinese)
- [13] 侯溪,伍凡,杨力,等. 子孔径拼接干涉测试技术现状及发展趋势[J]. 光学与光电技术,2005,3(3): 50-53.  
HOU X, WU F, YANG L, *et al.*. Status and development trend of sub-aperture stitching interferometric testing technique[J]. *Optics & Optoelectronics Technology*, 2005, 3(3):50-53. (in Chinese)
- [14] OTSUBO M, OKADA K, TSUJIUCHI J, *et al.*. Measurement of large plane surface shape with interferometric aperture synthesis[J]. *SPIE*, 1992, 1720: 444-447.
- [15] MIMURA H, YUMOTO H, MATSUYAMA S, *et al.*. Microstitching interferometry for nano focusing mirror optics[J]. *spie*,2004, 5533: 171-180.
- [16] KIM C J, WYANT J C. Sub-aperture test of a large flat on a fast aspheric surface [J]. *Opt. Soc. Am.*,1981,71:1587.
- [17] THUNEN J G, KWON O Y. Full aperture testing with subaperture test optics[J]. *SPIE*,1983,351: 19-27.
- [18] CHOW W W, LAWRENCE G N. Method for sub-aperture testing interferogram reduction[J]. *Optics Letters*, 1983,8(9): 468-470.
- [19] JENSEN S C, CHOW W W, LAWRENCE G N. Subaperture testing approaches: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1984,23(5):740-745.
- [20] STUHLINGER T W. Subaperture optical testing: experimental verification [J]. *SPIE*, 1986, 656: 118-127.
- [21] OTSUBO M, OKADA K, TSUJIUCHI J. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms[J]. *Optical Engineering*,1994,33(2): 608-613.

- [22] BRAY M. Stitching interferometer for large optics using a standard interferometer. Description of an automated system[J]. *SPIE*, 1997, 3047: 911-918.
- [23] TANG S. Stitching: high-spatial-resolution micro-surface measurements over large areas[J]. *SPIE*, 1998, 3479: 43-49.
- [24] TANG S, CLENDENIN B. Measuring height variation over entire wafer surface with high lateral resolution[J]. *SPIE*, 2007, 6672: 667209-1-7.
- [25] BRAY M. Stitching interferometry: how and why it works[J]. *SPIE*, 1999, 3739: 259-273.
- [26] BRAY M. Stitching interferometry: Side effects and PSD[J]. *SPIE*, 1999, 3782: 443-452.
- [27] CATANZARO B E, THOMAS J A, COHEN E J. Comparison of full-aperture interferometry to sub-aperture stitched interferometry for a large diameter fast mirror[J]. *SPIE*, 2001, 4444: 224-237.
- [28] SJODAL M, OREB B F. Stitching interferometric measurement data for inspection of large optical components[J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(2):403-408.
- [29] FLEIG J, DUMAS P, MURPHY P E, *et al.*. An automated subaperture stitching interferometer workstation for spherical and aspherical surfaces [J]. *SPIE*, 2003, 5188: 296-307.
- [30] BRAY M. Stitching interferometry: Recent results and absolute calibration[J]. *SPIE*, 2004, 5252: 305-313.
- [31] MURPHY P, DEVRIES G, FLEIG J, *et al.*. Measurement of high-departure aspheric surfaces using subaperture stitching with variable null optics[J]. *SPIE*, 2009, 7426:74260P-1-9.
- [32] KULAWIEC A, MURPHY P, DE MARCO M. Measurement of high-departure aspheres using subaperture stitching with the Variable Optical Null (VONTM) [J]. *SPIE*, 2010, 7655:765512-1-4.
- [33] TRICARD M, KULAWIEC A, BAUER M, *et al.*. Subaperture stitching interferometry of high-departure aspheres by incorporating a variable optical null[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1):547-550.
- [34] SUPRANOWITZ C, MCFEE C, MURPHY P. Asphere metrology using variable optical null technology [J]. *SPIE*, 2012, 8416:841604-1-5.
- [35] CHENG W M, CHEN M Y. Transformation and connection of sub-apertures in the multi-aperture overlap-scanning technique for large optics tests [J]. *Opt. Eng.*, 1993, 32(8):1947-1950.
- [36] 陈善勇. 非球面子孔径拼接干涉测量的几何方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- CHEN SH Y. *Geometrical Approach to Subaperture Stitching Interferometry for Aspheric Surfaces*[D]. Changsha:Graduate School of National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [37] CHEN S Y, LI S Y, DAI Y F. An efficient iterative algorithm for subaperture stitching interferometry for aspheric surface[J]. *SPIE*, 2005, 6024: 60241E-1-8.
- [38] CHEN S Y, LI S Y, DAI Y F. Iterative algorithm for subaperture stitching interferometry for general surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, 22(9): 1929-1936.
- [39] CHEN S Y, LI S Y, DAI Y F, *et al.*. Iterative algorithm for subaperture stitching interferometry test with spherical interferometers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, 23(5):1219-1226.
- [40] CHEN S Y, ZHAO C Y, DAI Y F, *et al.*. Reconfigurable optical null based on counter-rotating Zernike plates for test of aspheres [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2):1381-1386.
- [41] 张蓉竹,石琪凯,蔡邦维,等. 子孔径拼接干涉检测实验研究[J]. *光学技术*, 2004, 30(2):173-175.
- ZHANG R ZH, SHI Q K, CAI B W, *et al.*. Study on the experiments of the stitching interferometer [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2):173-175. (in Chinese)
- [42] 张蓉竹,杨春林,许乔,等. 子孔径拼接干涉检测中去倾斜处理技术[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(7):879-882.
- ZHANG R ZH, YANG CH L, XU Q, *et al.*. Anti-tilting technology of the sub-aperture stitching interferograms[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(7):879-882. (in Chinese)
- [43] 董军,张蓉竹,蔡邦维,等. 样本容量对子孔径拼接检测精度影响的分析[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(1):61-64.
- DONG J, ZHANG R ZH, CAI B W, *et al.*. Effect of sampling number on the stitching interferometer [J]. *Optics & Optoelectronics Technology*, 2005, 3(1):61-64. (in Chinese)
- [44] 候溪,伍凡,吴时彬,等. 以环形子孔径扫描法测量大口径非球面的研究[J]. *光电工程*, 2004, 31(9): 26-28, 65.
- HOU X, WU F, WU SH B, *et al.*. Study on the measurement of large-aperture aspheric surfaces with annular sub-aperture scanning method [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2004, 31(9): 26-28, 65. (in Chinese)
- [45] 候溪,伍凡,吴时彬,等. 使用环形子孔径扫描法测量大口径非球面镜[J]. *光学技术*, 2005, 7, 31(4): 506-508, 512.
- HOU X, WU F, WU SH B, *et al.*. Testing the large aspheric mirror using annular subapertures [J]. *Optical Technique*, 2005, 7, 31(4): 506-508, 512. (in Chinese)

- [46] 汪利华,吴时彬,候溪,等.子孔径拼接干涉仪检测大口径平面波前[J].光电工程,2009,36(6):126-130.  
WANG L H, WU SH B, HOU X, *et al.*. Measurement of flat wavefront by sub-aperture stitching interferometry [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2009, 36(6):126-130. (in Chinese)
- [47] 王孝坤,王丽辉,张学军,等.子孔径拼接干涉法检测非球面[J].光学精密工程,2007,15(2):192-198.  
WANG X K, WANG L H, ZHANG X J, *et al.*. Testing asphere by sub-aperture stitching interferometric method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):192-198. (in Chinese)
- [48] WANG X K, WANG L H, YIN L H, *et al.*. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(11):645-647.
- [49] WANG X K, ZHENG L G, ZHANG Z B, *et al.*. Subaperture stitching interferometry for testing a large hyperboloid [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1):114-119.
- [50] 王孝坤,郑立功,张学军.子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J].光学学报,2010,30(7):2022-2026.  
WANG X K, ZHENG L G, ZHANG X J. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7):2022-2026. (in Chinese)
- [51] WANG X K, ZHENG L G, ZHANG B Z, *et al.*. Test of an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry [J]. *SPIE*, 2009, 7283:7283J-1-6.
- [52] 王孝坤.大口径凸非球面反射镜子孔径拼接检测[J].红外与激光工程,2013,42(3):716-722.  
WANG X K. Test on large convex aspherical mirror by subaperture stitching interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3):716-722. (in Chinese)
- [53] 王孝坤.利用子孔径拼接法测量大口径凸面反射镜[J].应用光学,2013,34(1):95-100.  
WANG X K. Large convex mirror measurement by subaperture stitching interferometry [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1):95-100. (in Chinese)
- [54] 徐建程,许乔,邓燕,等.环形光源在干涉仪系统中的应用[J].强激光与粒子束,2008,20(3):367-370.  
XU J CH, XU Q, DENG Y, *et al.*. Application of ring source in interferometer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(3):367-370. (in Chinese)
- [55] 云宇,彭勇,田小强,等.基于子孔径拼接原理检测大口径光学元件[J].强激光与离子束,2011,23(7):1831-1834.  
YUN Y, PENG Y, TIAN X Q, *et al.*. Research in technique of large aperture optical components test based on subaperture stitching [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7):1831-1834. (in Chinese)
- [56] 徐新华,王青,宋波,等.基于子孔径拼接技术的大尺寸光学材料均匀性检测系统[J].光学学报,2012,32:0412002-1-7.  
XU X H, WANG Q, SONG B, *et al.*. Measurement system of optical homogeneity of large-size optical material based on subaperture stitching technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32:0412002-1-7. (in Chinese)
- [57] 王宁,贾辛,刑廷文.子孔径拼接检测浅度非球面[J].红外与激光工程,2013,42(9):2525-2530.  
WANG N, JIA X, XING T W. Test of shallow asphere using sub-aperture stitching method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9):2525-2530. (in Chinese)
- [58] ASSOUFID L, BRAY M, QIAN J, *et al.*. 3-D surface profile measurements of large x-ray synchrotron radiation mirrors using stitching interferometry [J]. *SPIE*, 2002, 4782:21-28.
- [59] YAMAUCHI K, YAMAMURA K, MIMURA H, *et al.*. Microstitching interferometry for x-ray reflective optics. Review of scientific instruments [J]. *American Institute of Physics*, 2003, 74(5):2894-2897.
- [60] MIMURA H, YUMOTO H, MATSUYAMA S, *et al.*. Relative angle determinable stitching interferometry for hard x-ray reflective optics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(4):045102-1-6.
- [61] OHASHI H, TSUMURA T, OKADA H, *et al.*. Microstitching interferometer and relative angle determinable stitching interferometer for half-meter-long X-ray mirror [J]. *SPIE*, 2007, 6704:70405-1-8.
- [62] YUMOTO H, MIMURA H, KIMURA T, *et al.*. Stitching interferometric metrology for steeply curved x-ray mirrors. Surface and interface analysis [J]. *Surf. Interface Anal.*, 2008, 40(6-7):1023-1027.
- [63] YUMOTO H, MIMURA H, HANDA S, *et al.*. Stitching interferometric measurement system for hard x-ray nanofocusing mirrors [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 186:012080-1-3.
- [64] ROMMEVEAUX A, BARRETT R. Micro-stitching interferometry at the ESRF [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 616(2-3):183-187.
- [65] ROMMEVEAUX A V, LANTELME B, BARRETT R. ESRF metrology laboratory: overview

- of instrumentation, measurement techniques, and data analysis [J]. *SPIE*, 2010, 7801: 7801071-78010711.
- [66] WIEGMANN A, STAVRIDIS M, WALZEL M, *et al.*. Accuracy evaluation for sub-aperture interferometry measurements of a synchrotron mirror using virtual experiments[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(2): 183-190.
- [67] THOMASSET M, IDIR M, POLACK F, *et al.*. A new phase-shift microscope designed for high accuracy stitching interferometry [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 710: 7-12.
- [68] SCHULZ G, SCHWIDER J. IV Interferometric testing of smooth surfaces[J]. *Progress in Optics*, 1976, 13: 93-167.
- [69] FRITZ B S. Absolute calibration of an optical flat [J]. *Optical Engineering*, 1984, 23(4): 379-383.
- [70] AIC Y, WYANT J C. Absolute testing of flats by using even and odd functions[J]. *Applied Optics* 1993, 32(25): 4698-4705.
- [71] EVANS C J, KESTNER R N. Test optics error removal[J]. *Applied Optics*, 1996, 35 (7): 1015-1021.
- [72] HARIHARAN P. Interferometric testing of optical surfaces: absolute measurements of flatness[J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(9): 2478-2481.
- [73] POWELL I, GOULET E. Absolute figure measurements with a liquid-flat reference[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2579-2588.
- [74] GRIESMANN U. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(23): 5856-5865.
- [75] YUMOTO H, MATSUYAMA S, MIMURA H, *et al.*. Absolute calibration of optical flats using the three-flat test by considering the relative humidity change[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 710: 2-6.
- [76] PREISSNER C, ASSOUFID L, SHU D M. Vibration diagnosis and remediation design for an x-ray optics stitching interferometer system [J]. *SPIE*, 2004, 5533: 131-139.
- [77] YUAN S, CHURCH M, YASHCHUK V V, *et al.*. Elliptically bent x-ray mirrors with active temperature stabilization [J]. *X-Ray Optics and Instrumentation*, 2010, 2010: 784732-1-9.

#### 作者简介:



刘丁泉(1990—),男,河北衡水人,博士研究生,2013年于北京化工大学获得学士学位,主要从事高精度面形光学元件检测装置的研究。E-mail: liudx@ihep.ac.cn

#### 导师简介:



盛伟繁(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,研究员,1984年、1987年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,1994-1996年在美国阿贡国家实验室、2001年-2002年在加拿大光源做访问学者,主要从事同步辐射光学及光束线技术的研究。E-mail: shengwf@ihep.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)