

# 大口径光学平面面形平行光管子孔径拼接测量技术

王孝坤

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

**摘要** 为了实现对超大口径平面反射镜面形的精确测量,提出了平行光管子孔径拼接干涉计测方法。分析了利用平行光管拼接检测超大口径光学反射镜的基本原理与具体的实现流程和步骤。基于三角剖分算法和最小二乘拟合理论等建立了综合优化子孔径拼接数学模型。结合实例,对口径为 2 m 的超大口径平面反射镜进行了子孔径测试分析规划,利用 1 m 口径的平行光管,仅需 9 个子孔径就可以实现全口径覆盖和拼接检验。该技术极大地减少了拼接子孔径的数目,有效遏制了拼接误差累积,从而提供了一种精确、高效测量超大口径光学平面面形的方法。

**关键词** 测量;光学检测;大口径反射镜;子孔径拼接干涉计测;平行光管

**中图分类号** O439; O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.s112004

## Measurement of Large Aperture Mirror Based on Subaperture Stitching and Collimator

Wang Xiaokun

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** For the purpose of overcoming the difficulty of testing figure error of large mirror, the method of subaperture stitching interferometry (SSI) and collimator is introduced. The basic principle and flow chart of SSI are analyzed. The synthetical optimization stitching mode and effective stitching algorithm are established based on triangulation algorithm and least-squares fitting. Combining examples, a large mirror with the aperture of 2 m is tested by SSI and 1-m collimator with 9 subapertures in simulation. This method decreases the error cumulation and the number of subaperture, so it provides an accurate and swift method for measurement of large mirror.

**Key words** measurement; optical testing; large aperture mirror; subaperture stitching interferometry; collimator

**OCIS codes** 120.4610; 120.2880; 120.6650

## 1 引 言

随着空间光学技术的不断发展,大口径反射镜正越来越多地被用于各种光学系统中<sup>[1~4]</sup>。且随着光学系统分辨率指标的不断提高,要求大口径反射镜的面形精度的均方根值优于  $\lambda/50$  ( $\lambda=632.8$  nm)。

大口径反射镜的加工过程主要包括铣磨、研磨和抛光三个阶段。对于铣磨和研磨过程的反射镜可以利用三坐标或者轮廓仪对其面形进行接触式测量,通过数据分析可以获得光学面形的分布信息,从而为其进一步加工提供依据和保障<sup>[5]</sup>。对于反射镜抛光和最终阶段的面形测量,接触式测量将不再适

用,因为其测量精度的均方根值一般只能达到  $\lambda/3$ ,此外在该阶段利用接触式测量将会给镜面带来一定的划痕。

由于干涉检验具有分辨率高、精度高、灵敏度高、重复性好等优点,因此该技术已成为大口径反射镜抛光和最终阶段面形检测最为常用的方法<sup>[6]</sup>。以往一般利用瑞奇康芒法实现对大口径平面反射镜的干涉检测,该方法的瑞奇角产生检测图像压缩,使得被测平面的面形误差与球面本身的像散混合在一起,影响检测结果的准确性;同时大口径反射镜在检测系统的光瞳面上发生变形,使镜面面形误差与系

**收稿日期**: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-01

**基金项目**: 国家 863 计划(O8663NJ090)、国家 973 计划(2011CB0132005)、国家自然科学基金重点项目(61036015)和国防项目(YOJGJX0036)资助课题。

**作者简介**: 王孝坤(1980—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学超精加工和检测技术等方面的研究。

E-mail: jimwxk@sohu.com

统出瞳光程差之间的对应关系变得复杂,随瑞奇角的不同而不同,导致检测结果的数据处理变得十分复杂<sup>[7~9]</sup>。此外,瑞奇康芒法需要大口径的辅助球面镜,辅助球面镜的口径一般为待测大口径反射镜面尺寸的 1.2~1.3 倍,大口径、高精度的球面反射镜的制造相当困难,因此,大口径平面反射镜的瑞奇康芒法检测很难实现。

利用小口径干涉仪逐次对大口径反射镜的各区域进行相位测量,利用子孔径拼接可以完成对大口径反射镜全口径的面形检测<sup>[10~13]</sup>,但是对于大口径尤其是超大口径的平面镜的拼接测量,子孔径的数目需要几百个甚至上千个,这将带来很多的误差累积且测试时间很长,受环境的影响很大,使该方法的实现存在很多困难。本文提出了平行光管子孔径拼接干涉测量方法,该方法利用大口径的平行光管仅需几个子孔径就可以完成对超大口径反射镜的拼接检测,测试时间短、拼接精度高。

## 2 检测原理和流程

利用平行光管拼接检测超大口径反射镜的装置示意图如图 1 所示,它主要包括激光干涉仪、平行光管、待测大口径反射镜和调整机构等。干涉仪安放在 6 维精密调整机构上,通过调整其三个方向的平动和三个自由度的转动,使干涉仪与平行光管对准。大口径反射镜安装在 4 维精密调整机构上,通过调整其沿 X 轴和 Y 轴方向的平动以及绕 X 轴和 Y 轴的转动可以使大口径反射镜任意区域对准平行光管的出射光瞳(坐标系定义如图 1 所示)。

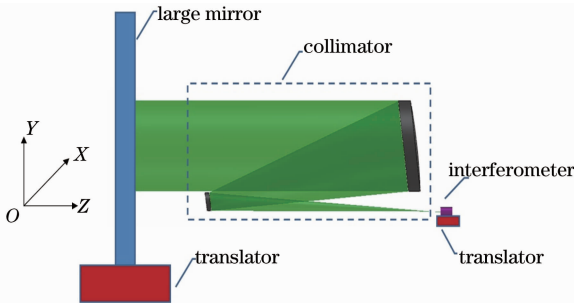


图 1 超大口径反射镜平行光管子孔径拼接检测设备示意图

Fig. 1 Sketch of setup for testing large mirror by collimator and subaperture stitching interferometry

干涉仪出射的球面波前经离轴平行光管后以标准平面波形式入射到待测大口径反射镜面上,光束经反射镜反射后沿原路返回到干涉仪 CCD 像面上,从而可以精确测定这一区域的相位分布,依次测定

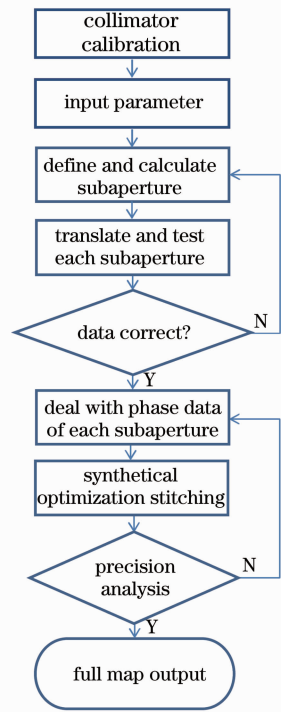


图 2 拼接流程图

Fig. 2 Flow chart of stitching and collimator

大口径反射镜上各区域的相位分布,通过子孔径拼接算法可以获得大口径反射镜全口径的面形信息。

图 2 是利用平行光管拼接检测超大口径反射镜方法的流程图,其具体的步骤如下:

### 1) 平行光管标定

在子孔径测量以前,首先将对平行光管进行标定,平行光管标定装置示意图如图 3 所示。激光干涉仪出射的标准球面波经平行光管后转化为标准平面波前,在其出射光瞳处放置一高精度的标准平面反射镜,标准平面反射镜安置在 4 维精密调整机构上,通过精确调整使标准平面反射镜对准平行光管,平行光管的出射波前经标准平面反射镜反射后沿原路返回,最终被干涉仪 CCD 接收,由于标准平面反射镜精度很高,一般其面形峰谷(PV)值优于  $\lambda/10$ ,因此测定得到的相位分布可作为平行光管系统的像差分布,设为  $w_p$ 。

### 2) 规划子孔径

根据待测大口径反射镜的口径和平行光管的出射光束大小,划分子孔径区域并计算子孔径的大小。为了求解拼接系数,各子孔径应有一定的重叠区域,为了保证求解精度,重叠区域面积一般大于子孔径面积的  $1/4$ <sup>[14]</sup>。

### 3) 子孔径相位数据的测量

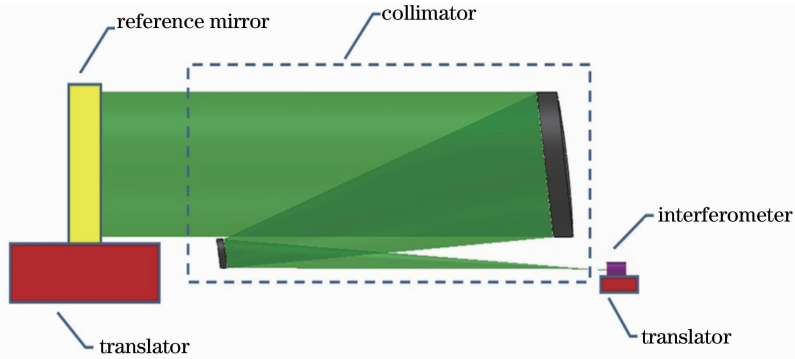


图 3 平行光管标定设备示意图

Fig. 3 Sketch of setup for calibrating collimator

移去标准平面反射镜,在调整机构上安装待测大口径反射镜,通过调整机构精确调整待测大口径反射镜,使其各子孔径区域对准平行光管,从而可以测定各区域的相位分布,设为  $z_i$ ,其中  $i=1\sim N$ ,  $N$  为子孔径的数目。

#### 4) 各子孔径相位数据的处理

在测量每个子孔径面形相位的过程中,由于受测试环境的影响、镜面粗糙度不均匀、测试仪器精度等因素的影响,使得子孔径数据必然存在缺失,这里采用三角剖分算法求解和填补子孔径相位数据。

拼接中采用 Delaunay 三角剖分,它是一种特殊的三角剖分。首先定义 Delaunay 边。Delaunay 边:假设  $E$  中的一条边  $e$  (两个端点为  $a, b$ ),  $e$  若满足下列条件,则称之为 Delaunay 边,即存在一个圆经过  $a, b$  两点,圆内(注意是圆内,圆上最多三点共圆)不含点集  $V$  中任何其他的点,这一特性又称空圆特性。如果点集  $V$  的一个三角剖分  $T$  只包含 Delaunay 边,那么该三角剖分称为 Delaunay 三角剖分。

在计算拼接系数前,首先将各个子孔径的测量数据统一到全局参考系中(实际测量中通过机械运动或者靶标读取的方式确定各个子孔径间的相对位置),定义在全局坐标下的插值点(插值点的范围大于全局坐标下镜面的尺寸),对子孔径  $i$  的测量数据进行 Delaunay 三角剖分,从而得到预先定义的数据点的  $(x, y)$  的面形值,即:利用三点定义一个平面,平面方程为  $ax+by+z+d=0$  ( $z$  的系数一定不为 0),利用

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -z_1 \\ -z_2 \\ -z_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

求解出系数  $a, b, d$  得到这三个点所确定的平面方程

$z' = -ax - by - d$ , 将点  $(x, y)$  的坐标带入到该平面方程中去,即可得到对于第  $i$  个孔径,该插值点的面形值  $z'$ 。对于不在 Delaunay 三角形内部的点,采用最接近点插值处理,即该点的面形值  $z$  值取最接近点的  $z$  值。

通过 Delaunay 三角剖分与最接近点插值的方式得到每个子孔径内插值点的面形值,即得到了各自孔径重叠区域内数据点的相位值和各子孔径完整的相位数据分布  $z_i$ 。将各子孔径相位数据  $z_i$  减去平行光管的系统误差,即可得到各子孔径的面形误差  $w_i = z'_i - w_p$ 。

#### 5) 全口径综合优化拼接

为了精确获得全口径面形误差分布,采用误差均化的全局优化拼接算法,具体分析和求解过程如下。

通过重叠区域的数据求解相邻两个子孔径的相对调整误差,可以实现子孔径两两拼接。多次利用两个子孔径的拼接原理就可以实现多个子孔径的拼接。但是这样往往会造成误差的传递和累积,从而降低了整个孔径的检测精度。因此,在子孔径拼接过程中存在综合优化的问题。当拼接区域大于 2 时,假设共有  $M$  个子孔径拼接,可以先选定其中任意子孔径作为基准,为了便于定位和测量,一般选择大口径反射镜中心区域的子孔径作为参考标准。

由于是对大口径反射镜各区域进行零位补偿测量,因此各子孔径间位置的相对失调量仅带来相对平移和倾斜。假使基准子孔径的相位分布为  $w_0$ ,则其他子孔径相位分布与基准子孔径相位分布的关系可表示为

$$\begin{aligned} w_0 &= w_1 + p_1 + a_1 x_1 + b_1 y_1 = \\ w_2 + p_2 + a_2 x_2 + b_2 y_2 &= \dots = \\ w_{M-1} + p_{M-1} + a_{M-1} x_{M-1} + b_{M-1} y_{M-1}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $w_1, w_2, \dots, w_{M-1}$  是其他子孔径的相位分布 (所有子孔径相位值均剔除了平行光管本身的像差分布),  $a_i, b_i$  和  $p_i$  分别是其他子孔径相对基准子孔径沿  $X$  方向的倾斜系数、沿  $Y$  方向的倾斜系数和相

对平移系数。

利用最小二乘法,使得所有重叠区域相位差的平方和值为最小,可得

$$s = \sum_{j_1 \neq 0, i_1 \subset W_0, W_{j_1}}^{N_1} \sum^n \{W_0(x_{li_1}, y_{li_1}) - [W_{j_1}(x_{j_1i_1}, y_{j_1i_1}) + p_{j_1}x_{j_1i_1} + a_{j_1}x_{j_1i_1} + b_{j_1}y_{j_1i_1}]\} + \sum_{j_2 \cap j_3 \neq 0, i_2 \subset W_{j_2}, W_{j_3}}^{N_2} \sum^n \{[W_{j_2}(x_{j_2i_2}, y_{j_2i_2}) + p_{j_2}x_{j_2i_2} + a_{j_2}x_{j_2i_2} + b_{j_2}y_{j_2i_2}] - [W_{j_3}(x_{j_3i_2}, y_{j_3i_2}) + p_{j_3}x_{j_3i_2} + a_{j_3}x_{j_3i_2} + b_{j_3}y_{j_3i_2}]\}^2 = V_{\min}, \quad (3)$$

式中  $N_1$  是其他子孔径与基准子孔径的重叠区域数,  $N_2$  是其他子孔径间的重叠区域数,  $n$  是重叠区域内的采样点数,  $V_{\min}$  为平方和最小值。

利用最小二乘拟合,对各个系数分别求偏导并令其值为零可得

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_{1i}} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_{2i}} = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial a_{3i}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $1 \leq i \leq M-1$ , 利用(4)式就可以得到各子孔径相对基准子孔径的最佳拼接系数,从而把所有子孔径的位相数据校正统一到相同的基准上,实现全口径面形数据拼接。以上是一种全局优化的拼接模式,在所有重叠区域权重因子相等的综合作用下求解所有拼接因子,从而有效遏制了拼接误差的传递和累积。

### 3 超大口径反射镜拼接规划

以满足重叠区域大于子孔径面积的  $1/4$ , 子孔径数目最少为准则,对口径为 2000 mm 的超大口径反射镜进行了子孔径拼接规划。利用目前常规的口径为 100 mm 的 Zygo 数字干涉仪进行拼接测量需要 1261 个子孔径,子孔径分布如图 4 所示,而利用目前实验室具备的 1000 mm 口径的平行光管进行拼接检测仅需 9 个子孔径,子孔径规划如图 5 所示。分析可知:利用大口径平行光管对超大口径反射镜进行拼接测量,极大降低了拼接子孔径个数,从而大大缩短了测试时间,有效地减少了测试环境和拼接误差传递的影响。

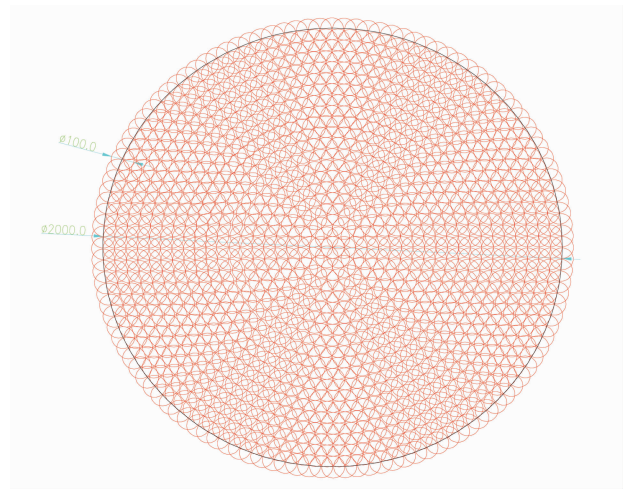


图 4 2 m 超大口径反射镜 100 mm 口径干涉仪拼接规划示意图

Fig. 4 Sketch of stitching 2-m mirror by 100-mm interferometer

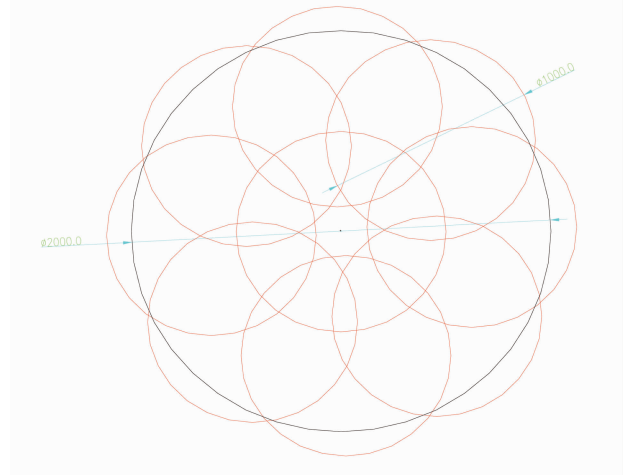


图 5 2 m 超大口径反射镜 1 m 口径平行光管拼接规划示意图

Fig. 5 Sketch of stitching 2-m mirror by 1-m collimator

## 4 结 论

利用平行光管,基于子孔径测试技术和干涉计测技术提出了超大口径反射镜平行光管子孔径拼接干涉检验方法。基于最小二乘拟合、三角剖分算法等建立了超大口径反射镜子孔径综合优化拼接数学模型。详细分析了平行光管拼接超大口径反射镜的测试步骤和实现流程,并利用口径为 1 m 的平行光管对一口径为 2 m 的超大口径反射镜进行了 9 个子孔径的规划测试。该技术极大地减少了子孔径拼接数目,并有效降低了拼接误差传递和累积,拓宽了平行光管现有的计测功能,从而提供了一种高精度、高效率、低成本检测超大口径反射镜面形的方法。

### 参 考 文 献

- 1 Roger B. Huxford. Wide FOV head mounted display using hybrid optics[C]. *SPIE*, 2004, **5249**: 230~237
- 2 Pan Baozhu, Cheng Haobo, Wen Yongfu *et al.*. Establishment of an equation of schmidt corrector plate with large aperture based on wavefront aberration functions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222001  
潘宝珠,程灏波,文永富等.基于波像差函数建立大口径施密特校正板方程[J].*光学学报*, 2012, **32**(2): 0222001
- 3 Zhang Xuemin, Han Juan, Duan Jiayou *et al.*. Alignment method of coaxial eccentric-pupil three-mirror system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0416003  
张学敏,韩娟,段嘉友等.共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法[J].*中国激光*, 2012, **39**(4): 0416003
- 4 Michel Bougoin, Pierre Deny. The SiC technology is ready for the next generation of extremely large telescopes[C]. *SPIE*, 2004, **5494**: 9~18
- 5 S. O'Donohue, G. Devries, P. Murphy *et al.*. New methods for calibrating systematic errors in interferometric measurements [C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690T
- 6 David S. Anderson, James H. Burge. Swing-arm profilometry of aspherics [C]. *SPIE*, 1995, **2536**: 169~179
- 7 Yuan Lüjun, Xing Na. Study on the Ritchey-Common interferometry for large plano optics [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 737~744  
袁吕军,邢娜.大口径光学平面瑞奇-康芒检测技术的研究[J].*光学技术*, 2007, **33**(5): 737~744
- 8 Tian Xiuyun, Wu Shibin, Wu Fan *et al.*. A data processing method in Ritchey-Common test [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 23~31  
田秀云,吴时彬,伍凡等.瑞奇-康芒法中的一种数据处理方法[J].*光电工程*, 2004, **31**(4): 23~31
- 9 Kong Xiaohui, Fan Xuewu, Ma Zhen *et al.*. Computer added Ritchey-Common test for large flat mirror measurement [J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(6): 984~988  
孔小辉,樊学武,马臻等.大口径平面镜的计算机辅助瑞奇-康芒检验[J].*应用光学*, 2010, **31**(6): 984~988
- 10 X. K. Wang, L. H. Wang. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **11**(5): 645~647
- 11 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2022~2026  
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
- 12 Paul Murphy, Jon Fleig, Greg Forbes. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [C]. *SPIE*, 2006, **6293**: 62930J
- 13 T. Marc, D. Paul, F. Greg. Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology[C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 284~299
- 14 O. Masashi, O. Katsuyuki, T. Jumpei. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(20): 608~613

栏目编辑:韩峰