

基于点源阵列的自由曲面非零位干涉 检测系统设计方法

沈 华 李 嘉 朱日宏 荣四海

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 自由曲面光学元件因具有良好的消像差能力,又能简化系统的结构,已成为新一代理想光学元件。但由于面形的“自由”以及表面的大梯度变化,使得面形高精度检测缺乏有效方法,是该类元件制造和应用的瓶颈。提出了利用点源阵列给测试波前预载倾斜量来补偿被检自由曲面表面梯度的非零位干涉自由曲面面形测量方法。针对自由曲面非旋转对称的特点,提出了基于“黑匣子”思想的逆向光路设计方法,设计出了适合自由曲面面形测量的非零位干涉光路。根据设计方案,加工并制作了该干涉装置,对自由曲面眼镜片进行了实际的干涉图采样,验证了系统的可行性。

关键词 表面光学;光学自由曲面;非零位干涉;逆向光路设计;点源阵列

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1222003

Design of Non-Null Interferometer Based on Point Source Array for Testing Freeform Surface

Shen Hua Li Jia Zhu Rihong Rong Sihai

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract Freeform optical surface is a new generation of ideal optical element because it can effectively correct image aberrations and greatly simplify optical system structures. Because of its high gradients and strong deviations from ideal sphere, it is extremely difficult to measure freeform optical surface with sufficient accuracy, which is the key limitation on its fabrication and application. Therefore, a novel non-null interferential method based on the use of multiple test beams for illuminating freeform surface with different angles is presented, which can compensate local gradients of freeform optical surface. A reverse optical design method based on “black box” theory is proposed, which can resolve the problems caused by non-rotational asymmetry surface. A real non-null interferometer for testing freeform surface is designed, and an eyeglass with non-rotational asymmetry surface is measured successfully, which verifies the feasibility of the system.

Key words optics at surfaces; freeform optical surface; non-null interference; reverse optical design; point source array

OCIS codes 240.6700; 260.3160; 220.2740; 040.1240

1 引 言

光学自由曲面是光学元件中一种复杂的元件。由于其表面自由度变化大,可以突破传统光学元件的限制,更好地校正非共轴系统的离轴像差等各

种像差,还可以使系统结构变得简单轻便,在空间光学、精密成像系统等领域有非常重要的应用^[1-3]。与传统光学表面和光学非球面不同,光学自由曲面没有统一的对称轴,不满足旋转对称,而且其表面曲

收稿日期: 2013-06-27; **收到修改稿日期:** 2013-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61308076)、江苏省自然科学基金(BK2012802)

作者简介: 沈 华(1981—),男,博士研究生,讲师,主要从事光学干涉计量方面的研究。E-mail: edward_bayun@163.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光学干涉计量方面的研究。E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

率变化较大。由于目前还没有快捷简便、高精度的测量方法,限制了光学自由曲面元件的加工以及应用推广,因此其测量技术的研究是光学元件测量领域的前沿技术问题。

目前加工自由曲面光学元件的单位能应用的检测手段主要是三坐标测量机(CMM)法和轮廓仪法。CMM法的检测精度在微米量级,可以作为检测元件轮廓外形有效手段,但不能满足面形测量精度的要求(几十纳米量级)^[4]。轮廓仪法的检测精度在几十纳米至几百纳米量级,是目前能在亚微米量级检测自由曲面光学元件的一种成熟手段,但只能检测元件表面某一条线的形状误差,不属于真正的面形测量,不能实现整个面形的高精度测量控制,无法指导高精密面形的加工。由于目前对于自由曲面光学元件面形的高精度、非接触式的无损测量缺乏有效手段,德国和美国的许多高校及研究机构已开始这一方面的研究,国内也有许多机构开始了相应的研究工作。由于干涉法是目前公认的检测光学元件面形最准确、最有效的手段,因此现今国内外对自由曲面光学元件面形测量的研究主要是通过把在非球面检测中成功应用的干涉测量方法根据自由曲面的新特点进行改进,绝大多数是基于零位干涉测试原理的方法,如孔径拼接法(SAT)^[5-6]、计算全息法(CGHI)^[7-13],也有一些基于其他原理的方法如反射光栅摄影法^[14]、摆臂式轮廓扫描法、条纹投影三维测量法^[15-20]。

零位干涉法在测试光路中加入了零位补偿器,但由于针对不同的测试面需要设计不同的与之对应的零位补偿器件,所以测量通用性差。同时自由曲面表面的大梯度变化,使得零位补偿器件的设计变得相当困难。非零位干涉则不需要针对不同的测试面设计制作不同的零位补偿器,是一种在实现高精度测量的同时,保证高效快速的通用化检测方法。而且该方法不需要满足零位补偿的自准直光路,针对大梯度变化的面形测量优势更为明显。Liu等^[21-23]提出的一种基于部分零位镜的非零位干涉法已经成功地对非球面元件进行了测量。Garbusi等^[24-29]针对大梯度非球面元件面形检测提出了一种给测试波前预载倾斜量的非零位干涉检测方法,该方法已经成功应用于表面梯度变化达到 $\pm 14^\circ$ 的非球面面形测量,测量精度优于 $\lambda/30$ [均方根(RMS)值]。其核心思想是通过透镜阵列产生多束轴外测试波前来补偿被检面的表面梯度,透镜阵列的参数与被测件的相对孔径和表面最大梯度变化值

有关。与球面干涉仪的标准镜头类似,对于某一特定的透镜阵列,只要被测对象的相对孔径和表面最大梯度变化值在该透镜阵列的允许范围内,就能满足测试要求。因此相比于计算全息法需要CGH元件与被测件一对一的对应补偿,该方法通用性更强。但是由于它是针对非球面检测提出的,以非球面的旋转对称性为数理基础,因此无论是干涉系统的设计方法还是波面解算重构算法都明显带有旋转对称性,还不能直接应用于自由曲面元件面形检测。本文根据测试波前预载倾斜量的思想,针对自由曲面非旋转对称的特点,提出了基于“黑匣子”思想的逆向光路设计方法,设计出了适合自由曲面面形测量的基于点源阵列非零位干涉系统。

2 基于点源阵列非零位干涉原理

图1为基于点源阵列非零位干涉原理,点源阵列的中心点源位于 C 点,同时也是待测自由曲面最佳拟合球面的曲率中心。 PP_1 为待测自由曲面上任意一点 P 的实际法线,线 PC 为 P 点处的最佳拟合球面法线。 α 为自由曲面 P 点处实际法线相对于最佳拟合球面法线的偏转角,也是用来表征自由曲面表面梯度变化的参量^[24]。按照传统的零位干涉原则,入射光是从 C 点出发照射到被检面的 P 点处。由于 P 点的大梯度造成 α 角过大, P 点处反射光不能按原路返回而是反射至轴外点 C_1 处,无法满足自准直光路,也就导致测试波面无法与参考波面进行干涉或者干涉时波面倾角过大造成干涉条纹过密以至CCD无法分辨。基于点源阵列的非零位干涉的原理为:要使测试波面与参考波面产生可分辨的干涉图样,经过 P 点处的反射光必须经过 C 点,则根据光路

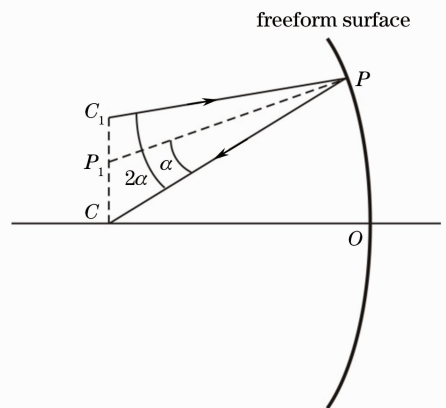


图1 基于点源阵列非零位干涉原理图

Fig. 1 Schematic of non-null interference based on point source array

可逆原理入射至 P 点的光线必须从 C_1 点处出发。即在点 C_1 处有一点源发出入射光 C_1P 对 P 点进行梯度补偿,这样反射光就可以沿 PC 方向返回干涉系统中,实现了减小测试波前与参考波前斜率差即干涉条纹密度的目的。因此,针对自由曲面全面形的测量在平面 CC_1 处必须具备一个点源阵列,从而产生多束具有不同倾角的入射波面对被测面形的每个区域进行梯度补偿。

根据以上原理,设计了一种基于点源阵列的自由曲面非零位干涉系统,主要由典型泰曼格林干涉系统和梯度补偿模块(GCM)组成,如图 2 所示。图中 SF_1 和 SF_2 为平面镜, BS_1 和 BS_2 为分束器, B 为

光阑。GCM 包括透镜阵列 LA、准直透镜组 C 和球面补偿透镜组 S。测试波面经过透镜阵列 LA 后产生多束入射光,然后再经过准直透镜组 C、球面补偿透镜组 S 后产生具有不同倾角的多重入射波面,这样就相当于在测量光路中引入了一个点源阵列。这些多重倾斜波面能对自由曲面的各个局部区域进行补偿,由自由曲面反射回来的携带自由曲面局部面形偏差的多重倾斜波面与干涉系统参考波面进行干涉,经过成像透镜 L_2 后在 CCD 上形成干涉图阵列,然后再经过一系列的波面相位解算、拟合和重构算法将被测自由曲面的面形恢复出来。

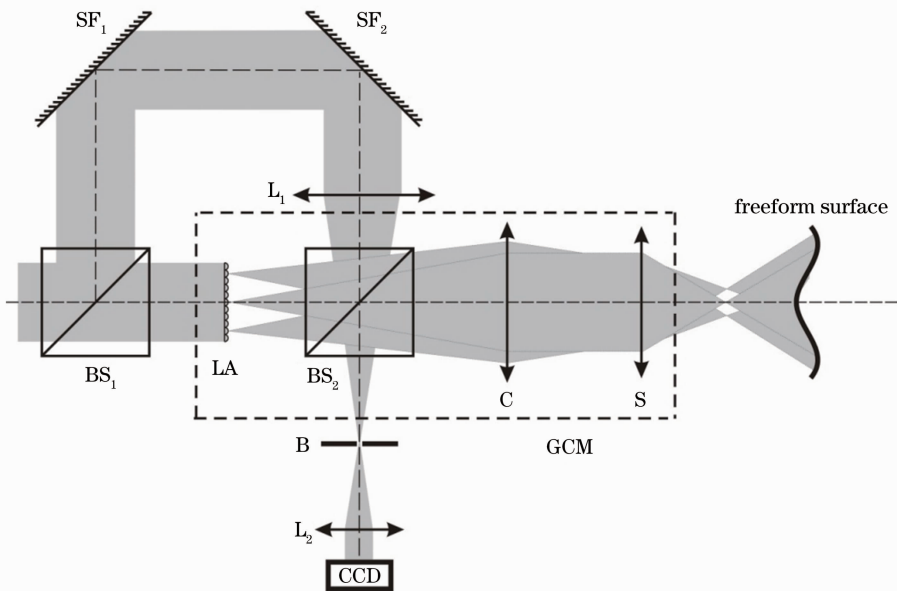


图 2 基于点源阵列的自由曲面非零位干涉系统

Fig. 2 Non-null interferometer based on point source array for testing freeform surface

3 基于点源阵列的非零位干涉系统设计方法

非零位干涉系统中泰曼格林干涉部分,由于是典型结构,所以不再阐述其设计方法。主要研究梯度补偿模块(图 2 中黑色虚框标注部分)的设计方法,分析计算该模块中各个透镜组的光学及结构参数要求,为各个透镜组在光学设计软件中(如 ZEMAX)进行设计时提供光学及结构参数的限制条件。梯度补偿模块需要分析计算的光学及结构参数包括:透镜阵列的长宽尺寸、透镜阵列的子透镜个数、透镜阵列的子透镜焦距、透镜阵列的子透镜口径以及透镜阵列的子透镜数值孔径;准直透镜组和球面补偿透镜组的焦距、口径、视场角以及两透镜组之间的光学距离。由于各透镜组的光学和结构参数在

分析与计算过程中相互影响、相互联系,再加上系统的非旋转对称的光路结构特点,因此常规的正向解析光学设计方法已经不再适用。基于“黑匣子”思想提出了逆向光路设计方法,用以寻找各透镜组参数之间的数学关系。图 3 为“黑匣子”逆向光路设计方法示意图,将准直透镜组和球面补偿透镜组看作一个“黑匣子”系统,将透镜阵列发出的波面作为输入信号,将入射至被测自由曲面的波面作为输出信号,通过建立输出信号与输入信号之间的数学模型从而确定准直透镜组和球面补偿透镜组的光学和结构参数。点源阵列的光学和结构参数可以由待测自由曲面的口径、最佳拟合球面曲率半径以及表面梯度变化的极值等参数确定。

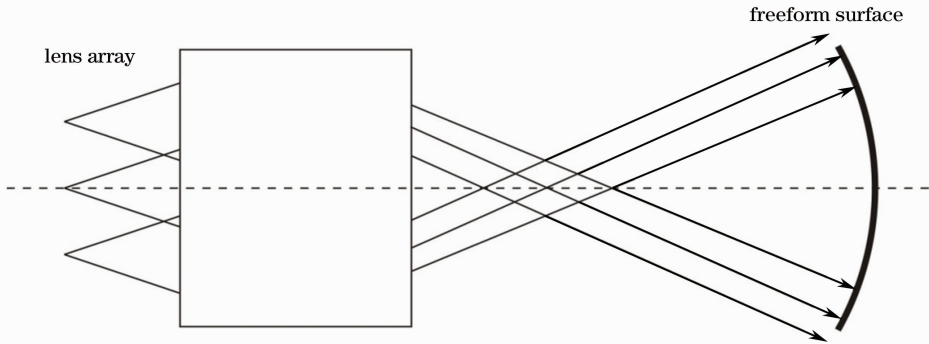


图 3 “黑匣子”逆向光路设计方法示意图

Fig. 3 Schematic of reverse optical design based on “black box” theory

3.1 数学模型的建立

在实际干涉测量中由被测件反射回干涉系统中的测试波面与参考波面进行干涉时,并不需要如图 1 所示的回射光线 PC 完全从 C 点返回,只要满足测试波面与参考波面的夹角在一定的范围,使得干涉图样条纹密度不超出 CCD 分辨率即可。图 4 为点源阵列与待测自由曲面参数之间的关系图,点源 C_1 发出的光线对自由曲面上点 P 进行梯度补偿,线 PC 为 P 点处的最佳拟合球面法线也是 P 点回射光的理想回射路径, PA 为实际反射光的方向。用 C 点与 A 的距离 a 描述实际干涉系统允许的测试波面回射时偏离

理想回射方向 PC 的范围。

根据 CCD 的一个像元探测干涉场中一根条纹的最大分辨原则,可以推导出测试波面和参考波面的最大夹角 θ ,满足

$$p \cdot \tan \theta = \lambda / 2, \quad (1)$$

式中 p 为 CCD 像元大小, θ 为测试波面和参考波面的最大夹角, λ 为光源波长。根据系统成像关系可知

$$a = f_2 \cdot \tan \theta, \quad (2)$$

式中 f_2 为球面补偿透镜组焦距。

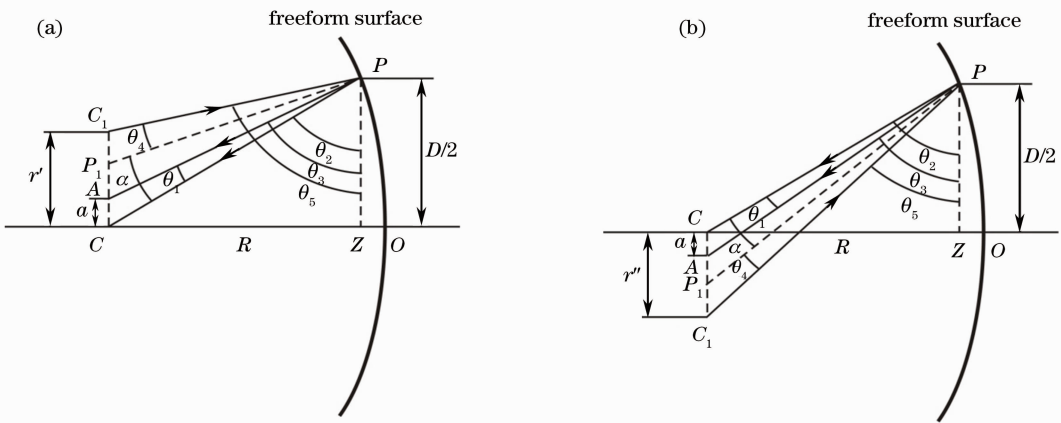


图 4 点源阵列与待测自由曲面参数之间的关系

Fig. 4 Relationship between parameters of point source array and freeform surface

下面推导点源阵列的光学参数与待测自由曲面各项参数之间的关系。在图 4(a)中, α 为自由曲面上 P 点的梯度偏差角(即 P 点处实际法线 PP_1 相对于最佳拟合球面法线 PC 的偏转角), R 为被测自由曲面最佳拟合球面的曲率半径, D 为被测自由曲面 P 点处的口径, C_1P 为点源 C_1 发出的光线方向, PC 为理想反射光线方向, PA 为实际反射光线方向, PP_1 为 P 点处实际法线方向, r' 为点源 C_1 相对于光轴 CO 的距离。由几何关系可知

$$\theta_2 = \arctan \frac{\sqrt{4R^2 - D^2}}{D}, \quad (3)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{\sqrt{4R^2 - D^2}}{D - 2a}, \quad (4)$$

$$\theta_5 = 2\theta_2 + 2\alpha - \theta_3. \quad (5)$$

当 $\theta_5 < 90^\circ$ 时,

$$r' = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}}{\tan \theta_5}. \quad (6)$$

当 $\theta_5 = 90^\circ$ 时,

$$r' = \frac{D}{2}. \quad (7)$$

当 $\theta_5 > 90^\circ$ 时,

$$r' = \frac{D}{2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \tan(\theta_5 - 90^\circ). \quad (8)$$

同样,对于另一侧的点源阵列的尺寸 r'' ,如图 4(b) 所示,由几何关系可知

$$\theta_2 = \arctan \frac{\sqrt{4R^2 - D^2}}{D}, \quad (9)$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{\sqrt{4R^2 - D^2}}{D + 2a}, \quad (10)$$

$$\theta_5 = 2\theta_2 - 2\alpha - \theta_3, \quad (11)$$

$$r'' = \frac{\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}}{\tan \theta_5} - \frac{D}{2}. \quad (12)$$

显然,当 $r' < r''$ 时,点源阵列尺寸应大于等于 r'' ; 当 $r' > r''$ 时,点源阵列尺寸应大于等于 r' 。

由图 2 可知,球面补偿透镜组焦面上的点源阵列是由干涉系统中的透镜阵列产生的。下面推导透镜阵列、准直透镜组以及球面补偿透镜组三者光学及结构参数之间的数学关系。图 5 为透镜阵列与点源阵列的物像关系图,透镜阵列最边缘的子透镜发出的光束经过准直透镜组 L_1 后,成像在球面补偿透镜组 L_2 的焦面上。根据几何光学成像原理,可知

$$\tan a_1 = \frac{r}{f_1}, \quad (13)$$

$$\tan a_4 = \frac{r'}{f_2}, \quad (14)$$

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4, \quad (15)$$

式中 r 为透镜阵列最边缘子透镜中心相对于光轴的距离。由上述关系可以得到准直透镜焦距组 f_1 和球面补偿透镜组 f_2 之间满足:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{r}{r'}. \quad (16)$$

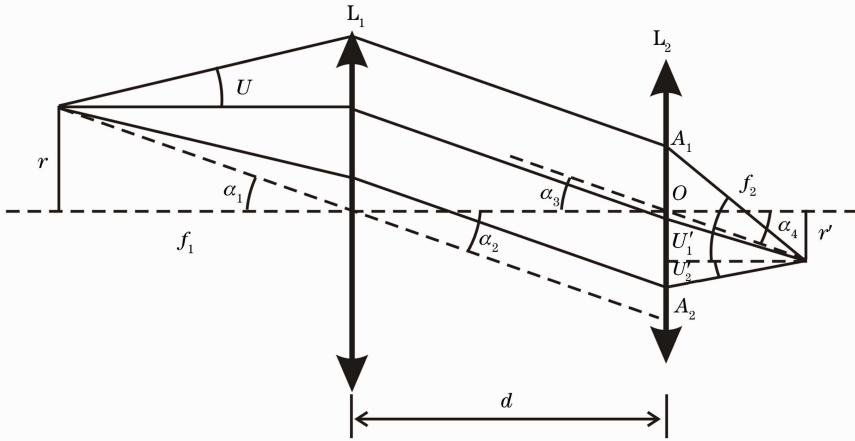


图 5 透镜阵列与点源阵列的物像关系图

Fig. 5 Diagram of the relationship between lens array and point source array

透镜阵列最边缘子透镜出射光束与球面补偿透镜组主面交于 A_1 和 A_2 两点, A_1 在球面补偿透镜组中心 O 点上方, A_2 在 O 点下方。根据图 5 中的几何关系可以得到:

$$|\overline{OA_1}| = f_1 \tan U + r - d \tan \alpha_2, \quad (17)$$

$$|\overline{OA_2}| = f_1 \tan U - r + d \tan \alpha_2, \quad (18)$$

式中 U 为透镜阵列的子透镜数值孔径角, d 为准直透镜组与球面补偿透镜组之间的光学距离。要使球面补偿透镜组具有足够的出射波面,则需要 $|\overline{OA_1}| > 0$ 。因此可以得到:

$$d < \frac{f_1 \tan U + r}{\tan \alpha_2} = \frac{f_1^2 \tan U}{r} + f_1. \quad (19)$$

下面分别讨论 $|\overline{OA_1}| > |\overline{OA_2}|$ 与 $|\overline{OA_1}| <$

$|\overline{OA_2}|$ 两种情况下的参数关系如下:

1) 当 $|\overline{OA_1}| > |\overline{OA_2}|$ 时,由(17)式、(18)式得到 $d < f_1$, 则在光轴两侧的透镜阵列最边缘的两个子透镜出射光束在球面补偿透镜组主面的重叠区域(即整个透镜阵列所有子透镜出射光束在球面补偿透镜组主面的最大重叠区域)为

$$2|\overline{OA_2}| = 2(f_1 \tan U - r + d \tan \alpha_2). \quad (20)$$

同时,为了保证各个子透镜的测试波面都能覆盖被测自由曲面整个面形,必须保证这个重叠区域大于待测曲面口径 D 。即

$$2|\overline{OA_2}| > D, \quad (21)$$

则

$$d \geq \frac{r + \frac{D}{2} - f_1 \tan U}{\tan \alpha_2} = f_1 - \frac{f_1^2}{r} \tan U + \frac{D \cdot f_1}{2r}. \quad (22)$$

根据(19)、(22)式,为使 d 有取值,则必须要满足

$$f_1 - \frac{f_1^2}{r} \tan U + \frac{D \cdot f_1}{2r} < f_1, \quad (23)$$

则

$$f_1 > \frac{D}{2 \tan U}. \quad (24)$$

根据上面的讨论,当 $|\overline{OA_1}| > |\overline{OA_2}|$ 时,准直透镜组主面和球面补偿透镜组主面之间的距离 d 的取值范围为

$$d \in \left(f_1 - \frac{f_1^2}{r} \tan U + \frac{Df_1}{2r}, f_1 \right]. \quad (25)$$

2) 当 $|\overline{OA_1}| < |\overline{OA_2}|$ 时,准直透镜组主面和球面补偿透镜组主面之间的距离 d 的取值范围为

$$d \in \left(f_1, \frac{f_1^2 \tan U}{r} + f_1 - \frac{Df_1}{2r} \right]. \quad (26)$$

最终可以得到间距 d 的取值范围为

$$f_1 - \frac{f_1^2 \tan U}{r} + \frac{Df_1}{2r} \leq d \leq f_1 + \frac{f_1^2 \tan U}{r} - \frac{Df_1}{2r}. \quad (27)$$

接下来讨论准直透镜组和球面补偿透镜组的有效工作口径大小以及点源阵列出射光束孔径角等参数之间的关系。由图 5 中的几何关系可知,准直透镜组有效口径

$$D_1 \geq 2(r + f_1 \tan U). \quad (28)$$

球面补偿透镜组的有效工作口径 D_2 与 $|\overline{OA_1}|$ 和 $|\overline{OA_2}|$ 之间的关系如下:

1) 当 $|\overline{OA_1}| < |\overline{OA_2}|$ 时,球面补偿透镜组的

有效工作口径

$$D_2 \geq 2(r' + f_2 \tan U_2'). \quad (29)$$

2) 当 $|\overline{OA_1}| > |\overline{OA_2}|$ 时,球面补偿透镜组的有效工作口径

$$D_2 \geq 2(f_2 \tan U_1' - r'). \quad (30)$$

由图 5 可知,边缘子透镜光束通过球面补偿透镜组后的光束孔径角 U' 满足

$$\tan U_1' = \frac{\overline{OA_1} + r'}{f_2} = \frac{f_1}{f_2} \tan U + \frac{r'}{f_2} + \frac{r}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1} \right), \quad (31)$$

$$\tan U_2' = \frac{\overline{OA_2} - r'}{f_2} = \frac{f_1}{f_2} \tan U - \frac{r'}{f_2} + \frac{r}{f_2} \left(\frac{d}{f_1} - 1 \right), \quad (32)$$

$$U' = U_1' + U_2'. \quad (33)$$

图 6 为各点光源出射光束孔径角的示意图,为使透镜阵列每个子透镜出射的波面能够覆盖待测自由曲面整个口径,须满足 $U' > 2U''$, 其中

$$\tan U'' = \frac{\frac{D}{2} + r'}{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2}, \quad (34)$$

即

$$U' \geq 2 \arctan \frac{\frac{D}{2} + r'}{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2}. \quad (35)$$

综上所述可知,首先根据待测自由曲面的口径、最佳拟合球面曲率半径以及表面梯度变化等参数,确定了“黑匣子”的输出信号即球面补偿透镜组焦面处点源阵列的光学和结构参数数学模型,即

$$\left\{ \begin{array}{l} r' = \begin{cases} \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2}}{\tan \theta_5}, & \theta_5 < 90^\circ, \\ \frac{D}{2}, & \theta_5 = 90^\circ, \\ \frac{D}{2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2} \tan(\theta_5 - 90^\circ), & \theta_5 > 90^\circ, \end{cases} \\ r'' = \frac{\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2}}{\tan \theta_5} - \frac{D}{2}, \\ r'_{ps} = \max(r', r''), \\ U' \geq 2 \arctan \frac{\frac{D}{2} + r'_{ps}}{R^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2}, \end{array} \right. \quad (36)$$

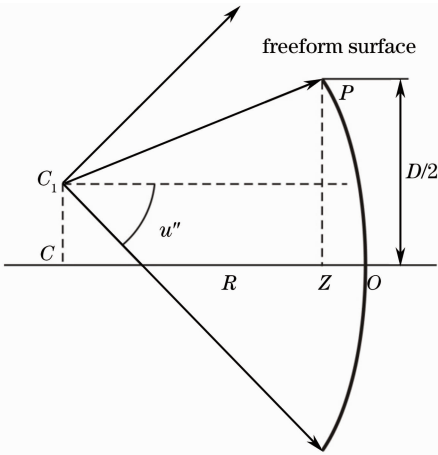


图 6 各点源出射光束孔径角的示意图

Fig. 6 Schematic of aperture angle of each point source

然后根据输出信号与输入信号之间的关系推导,建立了整个梯度补偿模块的光学及结构参数的数学模型,即

$$\begin{cases} \frac{f_1}{f_2} = \frac{r}{r_{ps}}, \\ f_1 > \frac{D}{2 \tan U}, \\ f_1 - \frac{f_1^2 \tan U}{r} + \frac{Df_1}{2r} \leq d \leq f_1 + \frac{f_1^2 \tan U}{r} - \frac{Df_1}{2r}, \\ D_1 \geq 2(r + f_1 \tan U), \\ D_2 \geq \begin{cases} 2(r' + f_2 \tan U'_2), & |\overline{OA_1}| \leq |\overline{OA_2}|, \\ 2(f_2 \tan U'_1 - r'), & |\overline{OA_1}| > |\overline{OA_2}|, \end{cases} \\ \tan U'_1 = \frac{f_1}{f_2} \tan U + \frac{r'}{f_2} + \frac{r}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1}\right), \\ \tan U'_2 = \frac{f_1}{f_2} \tan U - \frac{r'}{f_2} + \frac{r}{f_2} \left(\frac{d}{f_1} - 1\right), \\ U' = U'_1 + U'_2. \end{cases} \quad (37)$$

3.2 数学模型的最优算法及评价标准

根据前面建立的数学模型(36)、(37)式可知,模型中有大量未确定参数,如果用传统解析法计算难以获得最终结果。因此采用迭代优化的算法寻找结构的最优化解。通过迭代优化可以得到多组符合要求的参数组合(迭代的次数与系统最大补偿的梯度偏差有关,补偿梯度偏差越大迭代次数越多,系统的最大补偿的梯度偏差为 $\pm 10^\circ$,迭代次数在100次左右),必须按照系统的设计要求以及加工的实际情况在其中找到最优化解。为此,基于光学系统设计的考虑,光学系统口径和视场要尽可能小,这样有利于提高光学系统的 optical 质量,同时使得系统结构更加紧凑。具体提出了以下几个最优解评价标准:1)根

据光学设计难度以及加工能力,设计准直物镜组及球面补偿透镜组的视场角 $\omega \leq 5^\circ$;2)根据光学加工的成本以及精度限制,准直物镜组有效工作口径 D_1 和球面补偿透镜组有效工作口径 D_2 尽量控制在 $\Phi 150$ mm内;3)根据现有透镜阵列的加工工艺,透镜阵列外形尺寸大小 $2r$ 尽量小于 $\Phi 60$ mm。同时根据前面的分析可知,透镜阵列的子透镜的数值孔径越大则越容易覆盖整个被测自由曲面,但受到透镜阵列现有加工工艺的限制,算法中取透镜阵列子透镜的数值孔径 $\sin U$ 最大值为0.17,这是迭代优化算法的一个前提条件。

算法主要分为两部分:初始值计算和最优值计算。初始值计算主要根据(36)式确定 r'_{ps} 、 r' 、 U' 、 r_{mi} 。最佳值计算是在初始值计算的基础上根据模型(37)式寻找符合设计要求的最佳光学参数。初始值计算和最佳值计算的算法流程分别如图7、8所示。

通过上述算法得到了梯度补偿模块的光学结构参数以及透镜阵列的外形尺寸参数 r 和透镜阵列子透镜的数值孔径 $\sin U$ 。透镜阵列的子透镜个数通

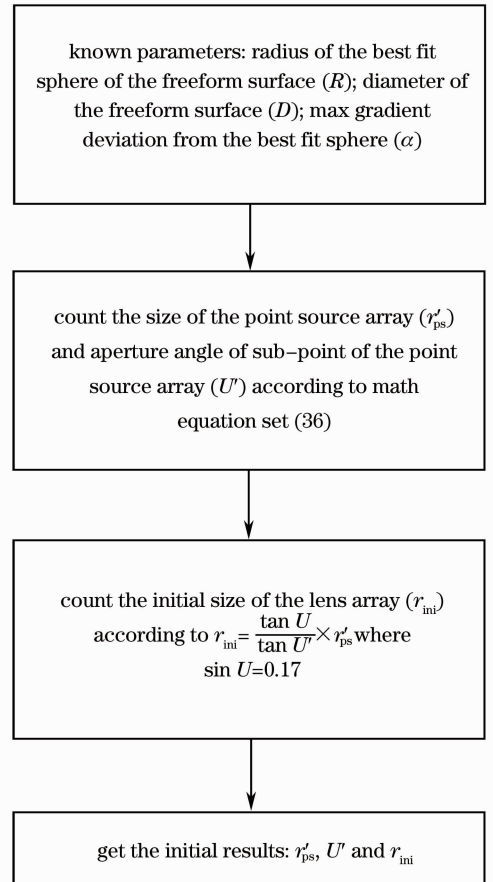


图 7 初始值计算流程图

Fig. 7 Flow diagram of initial value calculation

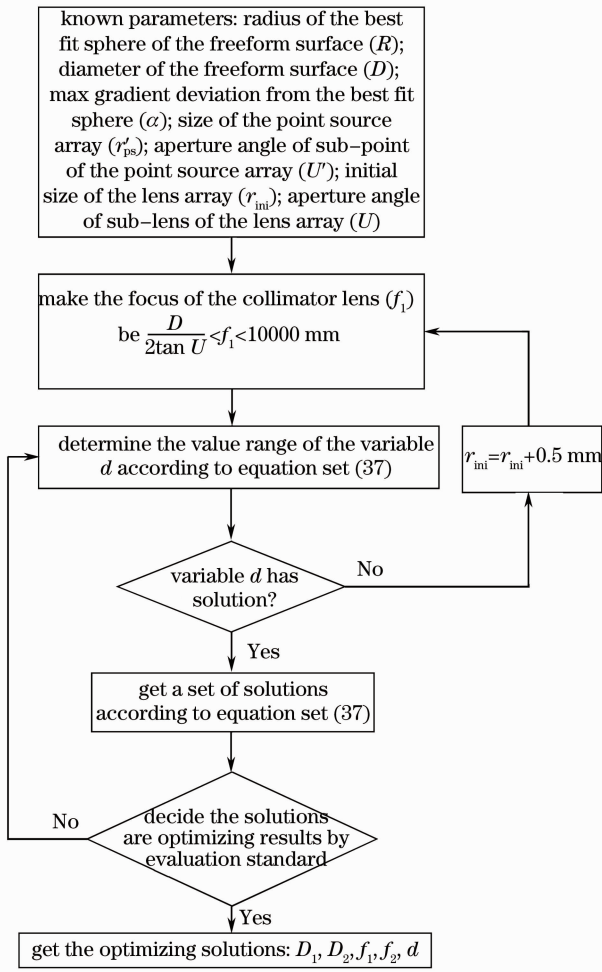


图 8 最优化值计算流程图

Fig. 8 Flow diagram of optimizing value calculation

过被测自由曲面的表面最大梯度变化值 α 就能唯一确定,因此不需要在算法中进行优化计算。

根据 3.1 节可知,轴上点光源产生的干涉图允许的测试波面和参考波面的最大夹角为 θ ,即一个点光源所能允许的被测件该处表面梯度变化范围为 $\theta/2$,则透镜阵列的子透镜个数为

$$N = \frac{\alpha}{\theta/2}. \quad (38)$$

4 基于点源阵列的非零位干涉系统设计结果及实验

根据 3 节的数学模型以及优化算法,针对最大表面梯度偏差 $\pm 10^\circ$ 以内、相对孔径小于 0.4 (F 数大于 2.5) 的系列自由曲面元件,设计了非零位干涉系统。设计得到梯度补偿模块的光学及结构参数为:

最大补偿的梯度偏差为 $\pm 10^\circ$; 透镜阵列口径为 $\Phi 42$ mm,透镜阵列子透镜口径为 $\Phi 2$ mm,透镜阵列的子透镜个数为 21×21 ,透镜阵列子透镜的数值孔径为 0.17;准直物镜组视场角为 $\pm 5^\circ$,准直物镜组有效口径为 $\Phi 118$ mm,准直物镜组焦距为 225 mm;球面补偿透镜组的视场角为 $\pm 5^\circ$,球面补偿透镜组的有效口径为 80 mm,球面补偿透镜组的焦距为 163 mm;准直透镜组与球面补偿透镜组的主面间距为 225 mm。图 9 为基于点源阵列的非零位干涉系统实验装置图。

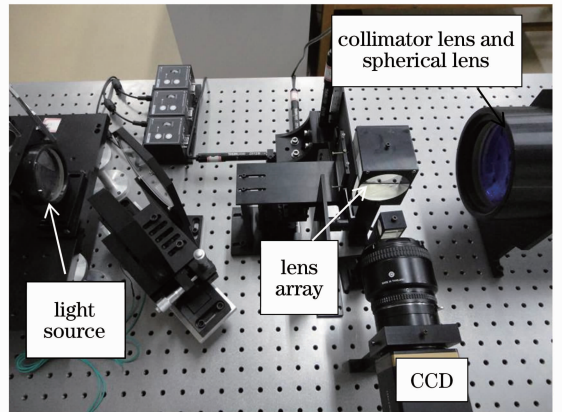


图 9 基于点源阵列的非零位干涉系统实验装置图

Fig. 9 Non-null interferometer based on point source array

由于系统不满足零位干涉条件,测量时会引入很大的回程误差,因此必须通过标定将系统误差从测量波面中分离出来。利用 F 数为 2 的标准球面作为标准面[面形精度峰谷(PV)值优于 $\lambda/20$]对所设计的系统进行回程误差的标定。针对透镜阵列形成的每个点源的球面波,利用标定球将其反射回干涉系统,调整标定球的姿态使 CCD 上形成的干涉条纹最少并采集该干涉图。重复该过程直至所有点源的标定干涉图都完成采样,总计得到 441 个标定波面以及每个标定波面在 CCD 上的位置信息。图 10 为标定得到的一个点源回射干涉系统时所产生的误差波面。由图 10 可知系统轴外回程误差较大,达到 3.8λ 。通过该标定过程,得到了每个点源的系统误差波面,这样在测量实际自由曲面时在每个点源的测量波面中扣除该误差波面后就可获得被测件的面形波面。同时通过该标定过程,还得到了每个点源所发出的球面波通过被测件回射后在 CCD 上的位置信息,由这个位置信息就可以得到 CCD 靶面与被测件之间的坐标映射关系。

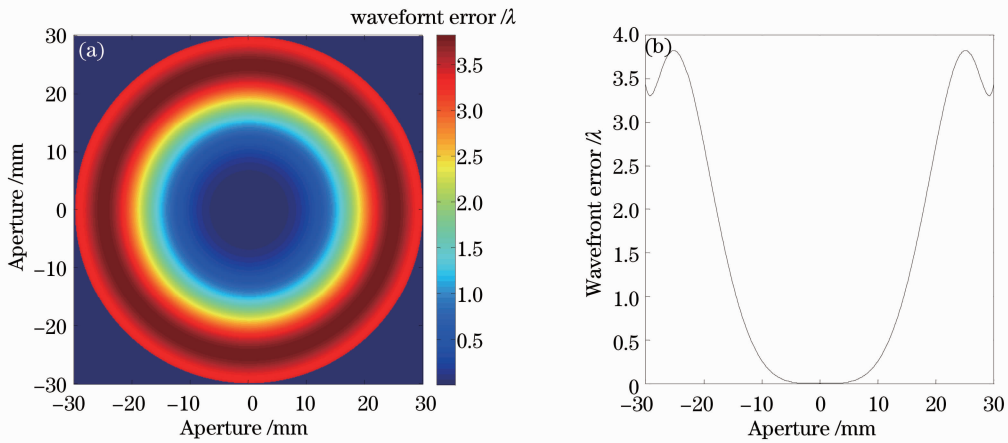


图 10 单个点源的标定结果。(a) 标定单个点源的误差波面 ($\Phi 60$ mm); (b) 标定波面中一维数据结果 (最大值 3.8λ)

Fig. 10 Calibration result of one point source. (a) Calibrated wavefront map of one point source ($\Phi 60$ mm);

(b) one-dimensional map of the calibrated wavefront (the maximum value is 3.8λ)

用研制的非零位干涉系统对一种自由曲面式眼镜片进行面形测量。自由曲面眼镜片的顶点曲率半径为 142.8 mm, 口径为 $\Phi 60$ mm, 最大梯度偏差角为 6.2735° 。将镜片放在测试系统中, 调整镜片顶点曲率中心与系统球面补偿透镜组焦点重合。为了防止各个点源干涉图相互重叠发生干扰, 在透镜阵列后方设置了子孔掩模板用于对点源进行合理选取。图 11 为选取得到的满足补偿条件的六个点源阵列干涉图。图 12 为该镜片面形测量结果。图 12(a) 为测量得到的被测件与其最佳拟合球面的矢高偏差波面, 可知该被测件与其最佳拟合球面的矢高偏离达 1.4 mm。图 12(b) 为将测量得到的矢高偏差波面去除设计该被测件时的理想矢高偏差后的残余波面即实际元件与其设计值的面形偏差, 可知该元件的面形偏差为 0.433λ (PV 值), 且该被测件具有马

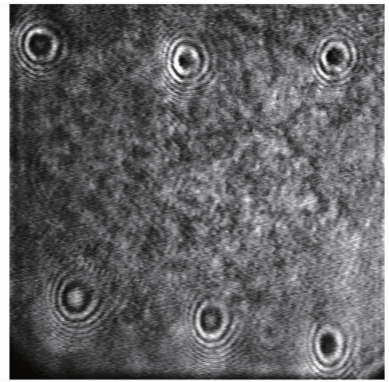


图 11 被测件为自由曲面眼镜片时干涉图

Fig. 11 Interferogram of eyeglass with freeform surface 鞍面特征, 是典型的自由曲面。同时, 用探针式轮廓仪 (型号 Taylor Hobson PGI 840) 对该眼镜片面形的某一截面进行测量 (测量位置做了标志), 获得测量结果如图 13 所示。将轮廓仪的测量数据去除该

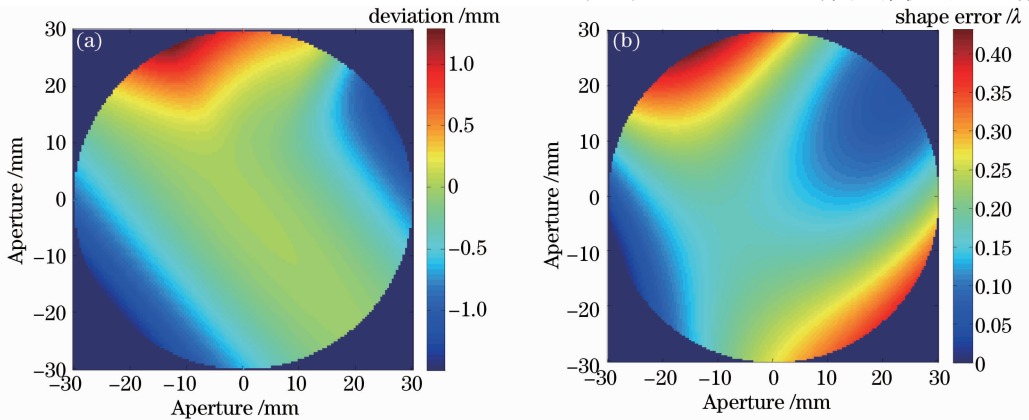


图 12 自由曲面眼镜片面形测量结果。(a) 与最佳拟合球面的矢高偏差波面 (最大偏离为 1.4 mm);

(b) 面形偏差 (与设计理论面形的偏差, 最大为 0.433λ)

Fig. 12 Experimental results of freeform eyeglass. (a) Measured deviation from the best-fit sphere amounts to approximately 1.4 mm; (b) shape error amounts to 0.433λ (deviation from the design)

位置的轮廓理论设计值,即可得到被测件该位置的一维面形偏差,如图 14 中的红色曲线所示。在干涉测量得到的二维面形偏差[图 12(b)]中的相同位置处取出一维测量数据,如图 14 中的黑色曲线所示。由图 14 可知,非零位干涉系统测量数据曲线与轮廓

仪测量数据曲线形状基本相同。图 15 为非零位干涉系统测量数据与轮廓仪测量数据的残差数据曲线图,可知两者测量误差为 0.098λ (PV 值)。测试结果表明,设计的干涉系统能够实现自由曲面元件的非零位干涉图采集及测量。

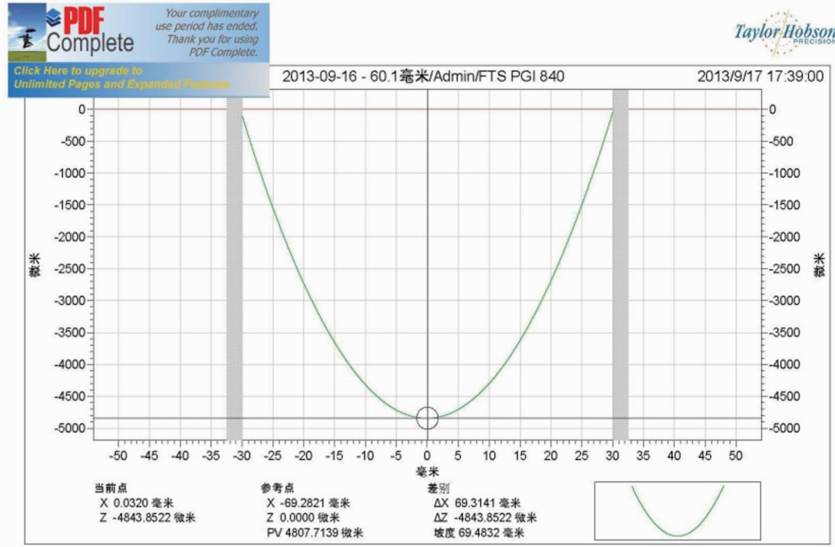


图 13 轮廓仪测量眼镜片一维轮廓数据

Fig. 13 Measured result of eyeglass by profilometer

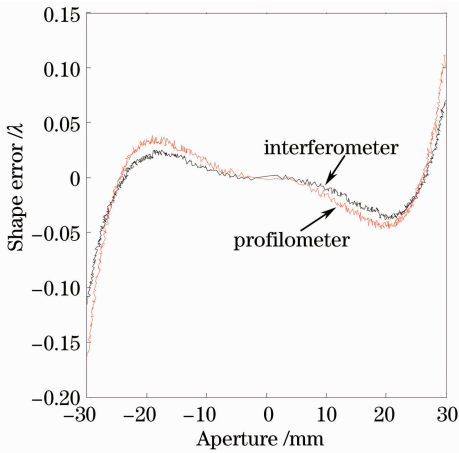


图 14 一维面形偏差曲线(轮廓仪结果与干涉测量结果)

Fig. 14 One-dimensional shape error measured by interferometer and profilometer

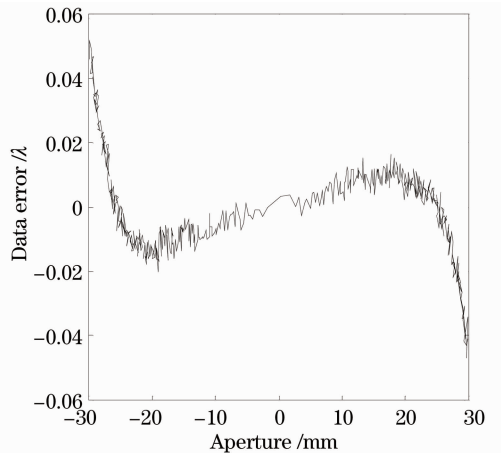


图 15 轮廓仪数据与干涉测量数据残差曲线

Fig. 15 Measurement error between the results of interferometer and profilometer

5 结 论

利用给测试波前预载倾斜量的思想,针对自由曲面非旋转对称的特点,提出了基于“黑匣子”思想的逆向光路设计方法,建立了系统光学设计的数学模型,设计出了适合自由曲面面形测量的点源阵列非零位干涉系统并进行了实验。实验结果表明,提出的设计方法所构建的干涉系统能够实现自由曲面元件的非零位干涉图采集及测量。

参 考 文 献

- Zhang Xin, Xu Yingchao. Study on free-form optical testing [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2008, 1(1): 92-99.
- 张 新, 许英朝. 光学自由曲面的检测方法[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 92-99.
- Li Sheng-yi, Chen Shangyong, Dai Yifan. Inspection of free-form optics [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3 (2): 126-136.
- Xu Yingchao, Zhang Xin, Zhou Ping. Optical design for unsymmetrical aspherical cubic phase plate testing system [J].

- Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 971–975.
- 许英朝, 张 新, 周 平. 一种三次非旋转对称的相位板的检测系统设计 [J]. 光学学报, 2008, 28(5): 971–975.
- 4 V N Chekal, Y I Chudakov, S E Shevtsov. The use of coordinate-measurement machines to optimize the technology of automatic shaping of optical surfaces [J]. J Opt Technol, 2008, 25(11): 755–759.
- 5 J E Greivenkamp, R O Gappinger. Design of a nonnull interferometer for aspheric wave fronts [J]. App Opt, 2004, 43(27): 5143–5151.
- 6 W M Cheng, M Y Chen. Transformation and connection of subapertures in the multiaperture overlap-scanning technique for large optics tests [J]. Opt Eng, 1993, 32(8): 1947–1950.
- 7 Hua Shen, Rihong Zhu, Zhishan Gao, *et al.*. Design and fabrication of computer-generated holograms for testing optical freeform surfaces [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(3): 032201.
- 8 Hengzheng Lu. Automatic measurement of 3D object shapes based on computer-generated reference surfaces [J]. Bull JSPE, 1987, 21(4): 251–257.
- 9 C Pruss, S Reichelt, H J Tiziani, *et al.*. Computer generated holograms in interferometric testing [J]. Opt Eng, 2004, 43(11): 2534–2540.
- 10 S Reichelt, C Pruss, H J Tiziani. Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms [J]. App Opt, 2003, 42(22): 4468–4479.
- 11 Ping Su, Guoguo Kang, Qiaofeng Tan, *et al.*. Estimation and optimization of computer-generated hologram in null test of freeform surface [J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(12): 1–4.
- 12 Jun Ma, Christof Pruss, Rihong Zhu, *et al.*. An absolute test for axicon surfaces [J]. Opt Lett, 2011, 36(11): 2005–2007.
- 13 P Su, J Ma, Q Tan, *et al.*. Computer generated hologram null test of a freeform optical surface with rectangular aperture [J]. Opt Eng, 2012, 51(2): 025801.
- 14 Zhang Hongwei, Zhang Guoxiong, Qin Peng, *et al.*. Application on the binocular visual inspection technology of free-form surface [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 110–113. 张宏伟, 张国雄, 秦 鹏, 等. 双目视觉检测技术在自由曲面测量中的应用 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 110–113.
- 15 J Pan, P Huang, F Chiang. Color-coded binary fringe projection technique for 3-D shape measurement [J]. Opt Eng, 2005, 44(2): 023606
- 16 Wansong Li, Xianyu Su. Phase unwrapping algorithm based on phase fitting reliability in structured light projection [J]. Opt Eng, 2002, 41(6): 1365–1372.
- 17 Catherine E Towers, David P Towers, Julian D C Jones. Time efficient Chinese remainder theorem algorithm for full-field fringe phase analysis in multi-wavelength interferometry [J]. Opt Express, 2004, 12(6): 1136–1143.
- 18 E B Li, X Peng, J Xie, *et al.*. Multi-frequency and multiple phase-shift sinusoidal fringe projection for 3D profilometry [J]. Opt Express, 2005, 13(5): 1561–1569.
- 19 Chenggen Quan, Cho JuiTay, Xin Kang, *et al.*. Shape measurement by use of liquid-crystal display fringe projection with two-step phase shifting [J]. Appl Opt, 2003, 42(13): 2329–2335.
- 20 Kemao Qian, Seah Hock Soon, AnandAsundi. Phase-shifting windowed Fourier ridges for determination of phase derivatives [J]. Opt Lett, 2003, 28(18): 1657–1659.
- 21 D Liu, Y Yang, C Tian, *et al.*. Non-null interferometric system for general aspheric test [C]. SPIE, 2009, 7283: 728305.
- 22 D Liu, Y Yang, Y Luo, *et al.*. Non-null interferometric aspheric testing with partial null lens and reverse optimization [C]. SPIE, 2009, 7426: 74260M.
- 23 D Liu, Y Yang, C Tian, *et al.*. Practical methods for retrace error correction in non-null aspheric testing [J]. Opt Express, 2009, 17(9): 7025–7035.
- 24 E Garbusi, C Pruss, J Liesener, *et al.*. New technique for flexible and rapid measurement of precision aspheres [C]. SPIE, 2007, 6616: 661629.
- 25 E Garbusi, G Baer, W Osten. Advanced studies on the measurement of aspheres and freeform surfaces with the tilted-wave interferometer [C]. SPIE, 2011, 8082: 80821F.
- 26 Eugenio Garbusi, Wolfgang Osten. Perturbation methods in optics: application to the interferometric measurement of surfaces [J]. Optical Society of America, 2009, 26(12): 2538–2549.
- 27 Eugenio Garbusi, Goran Baer, Christof Pruss, *et al.*. Rapid and flexible measurement of precision aspheres [C]. 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology, 2009: 1–9.
- 28 G Baer, E Garbusi, W Lyda, *et al.*. Automated surface positioning for a non-null test interferometer [J]. Opt Eng, 2010, 49(9): 095602.
- 29 G Baer, E Garbusi, W Lyda, *et al.*. Automated alignment of aspheric and freeform surfaces in a non-null test interferometer [C]. SPIE, 2011, 8082: 80821L.

栏目编辑：张 腾