

确定非球面检测中最佳参考球面波的方法

莫卫东 范琦 贾晋超 张海防 冯明德 杨百遇 李均盛

(空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051)

摘要 通过计算被测非球面反射波与参考球面波在干涉图记录平面 CCD 上的干涉条纹密度, 分析参考球面波波源在不同位置时 CCD 上干涉条纹密度的分布, 比较参考球面波波源在不同位置的最大干涉条纹密度, 使得在 CCD 上的最大干涉条纹密度最小的参考球面波的波源位置, 便是非球面干涉检测时最佳的参考球面波波源的位置, 由此位置发出的球面波便是非球面检测中所需要的最佳参考球面波。此时计算所得到的最大干涉条纹密度又是数字全息非球面检测系统中 CCD 选型的重要依据, 同时也是对一个非球面测试系统的精度进行评价的重要技术指标。本方法可以用于任意非球面检测中最佳参考球面波波源位置的确定, 且不需要对非球面面型函数进行任何解析计算。

关键词 测量; 光学干涉检测; 非球面; 最接近比较球面; 条纹密度; 最佳参考球面波

中图分类号 O436; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s108003

A Method of Fixing on Best Position of Reference Spherical Wave Source to Test Aspheric Surface

Mo Weidong Fan Qi Jia Jinchao Zhang Haifang Feng Mingde
Yang Baiyu Li Junsheng

(College of Science University of Engineering of Air Force, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

Abstract By calculating the interference fringe density of the tested aspheric surface reflected wave and reference spherical wave in the CCD to record interference pattern, the distribution of fringe density is gotten when source of reference spherical wave is in different positions. To compare the maximum fringe density, the position of source of reference spherical wave while the maximum fringe density is the smallest in CCD is the position of best-fit spherical surface. The spherical wave emitted in above position is the best reference spherical wave. At the same time, the maximum fringe density is also the important basis for choosing CCD in system of testing aspheric surface by digital holography, which is an important technology parameter to evaluating accuracy of a testing system for aspheric surface. The method can be used to fix on best position of reference spherical wave source for inspecting any aspheric surface, which does not require any analytical calculations about aspheric surface function.

Key words measurement; optical interference measurement; aspheric surface; best-fit spherical surface; fringe density; best-fit reference spherical wave

OCIS codes 090.1995; 120.2880; 120.2650; 220.1250

1 引言

为了保证非球面光学系统的性能, 必须提高非球面光学元件的加工精度, 而要提高非球面光学元件的加工精度, 必须有更高精度的非球面面型检测的技术作保证。在众多非球面光学元件面型检测技术中, 光学干涉及其计算全息方法是其中重要的技术手段^[1~6]。对于现代数字化的干涉技术来说, 若

记录干涉图像的 CCD 分辨率不能大于干涉条纹密度, 也就无法准确地记录干涉条纹, 也就不能实现对非球面面型的高精度检测。为此, 在非球面的干涉检测中, 选用球面波作为干涉参考光波。参考球面波的具体参数直接决定了非球面面型检测系统的精度。也就是说, 在检测前需要确定参考球面波的具体参数, 使之与被测非球面表面的反射波干涉条纹

收稿日期: 2011-07-13; 收到修改稿日期: 2011-09-08

基金项目: 陕西省自然科学基金(2010JM8012)资助课题。

作者简介: 莫卫东(1959—), 男, 教授, 主要从事精密光学检测方面的研究。E-mail: mwd1999@126.com

密度最小。该参考球面波可称之为“最佳参考球面波”或“最佳干涉参考球面”，它决定于发出该球面波的波源相对于记录干涉条纹 CCD 平面的位置。

2 最佳参考球面波与非球面最接近比较球面

最佳参考球面波与常用的非球面最接近比较球面是不同的两个定义，后者完全是基于非球面加工目的而引入的，与所谓的非球面度直接相关^[6~10]，而最佳参考球面波完全基于检测目的提出来的，“最佳”的条件是使参考球面波与被测非球面表面的反射波干涉形成干涉条纹的最大密度最小。

谢枫等^[7]提出了用斜率非球面度确定最佳接近比较球面的方法，试图找到用于检测的非球面最接近比较球面。根据斜率非球面度的定义，考察的基准点非球面上。对于非球面的加工来说，这样的定义没有问题，但对于干涉检测来说，问题可能并非如此。

首先，检测时需要记录的干涉图并不在非球面上，而是记录在某个平面 $M(\text{CCD})$ 上。如图 1 所示，可以清楚地看到，在记录平面 M 上所记录的干涉图并不是在非球面上某个参考球面波与非球面产生的干涉，而是不同半径的参考球面波与被测非球面的反射波的干涉。在 $M(\text{CCD})$ 上被测非球面反射波与参考球面波的夹角，随着参考球面波半径的增大或减小，相对于在非球面上二者的夹角在不断改变。即，非球面上某点的斜率非球面度在干涉图的记录平面 $M(\text{CCD})$ 上并不相同，也就是说，在记录平面 $M(\text{CCD})$ 上所记录的干涉条纹密度实际上不同于定义在某个参考球面波上的斜率非球面度估算的干涉条纹的密度。

对于平面干涉仪来说，干涉图像记录平面 $M(\text{CCD})$ 的位置不会影响干涉条纹的分布。而对于采

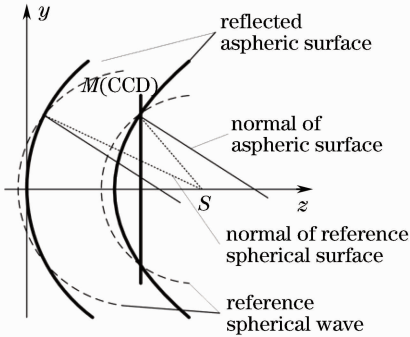


图 1 在 $M(\text{CCD})$ 上的非球面波和球面参考波
Fig. 1 Aspheric wave and reference spherical wave in $M(\text{CCD})$

用参考球面波的非球面干涉检测系统，干涉图记录平面 $M(\text{CCD})$ 的位置直接影响着参考球面波与被测非球面反射波的夹角——干涉条纹的密度。可见，用于非球面检测目的的任何最接近比较球面，将不再仅仅与非球面的面型函数以及口径大小等参数有关，还与干涉图的记录平面位置直接相关。因此，采用斜率非球面度确定最佳参考球面波以及用斜率非球面度评价非球面检测的难度可能有一定的局限性与偏差。

因此，本研究试图换一种思路，即通过直接计算在干涉图记录平面 CCD 上参考球面波与被测非球面反射波的干涉条纹密度的方法，确定非球面检测的最佳参考球面波(最佳参考球面波波源的位置)。

3 非球面检测的干涉条纹密度与最佳参考球面波

干涉条纹密度 d_i 为干涉条纹宽度 l 的倒数： $d_i=1/l$ 。干涉条纹的密度直接对应于记录干涉图像 CCD 的分辨率。如果能够在进行非球面的测量之前，通过理论计算分析参考球面波与被测非球面反射波在 CCD 上干涉的条纹密度分布，寻找到参考球面波波源的一个最佳位置，使得在干涉图记录平面上记录的最大干涉条纹密度最小，则由该位置上发出的球面波就是所要确定的最佳参考球面波。

最佳参考球面波不是常用的非球面最接近比较球面那样的一个确定球面，而是一个球面波源的位置，由此位置发出的球面波为用于非球面检测的参考球面波，在 CCD 上记录的干涉图为由该球面波波源发出的一系列球面波与被测非球面反射波的相干叠加。

为了确定参考球面波源最佳位置，需要全面分析与 CCD 上干涉条纹密度有关的所有技术参数，由此得到的最大干涉条纹密度是 CCD 选型的重要依据，同时也是非球面测试系统检测精度评价的重要技术指标。可见，对非球面反射波与参考球面波干涉条纹密度的计算以及最佳参考球面确定，是非球面干涉检测系统设计必须要解决的关键技术问题之一。

4 非球面反射波函数

为了使 CCD 能够完全记录整个非球面的面型信息，需要通过光路设计将非球面的反射波“缩小”，使之最大口径不能超过 CCD 的尺寸，以保证 CCD 可完整记录非球面反射波与参考球面波的干涉图像(如图

2所示)。可见, CCD所记录的干涉图,并未能 1:1地获得被测非球面与参考球面波的干涉图,实际得到的是非球面反射波与参考球面波的干涉图。

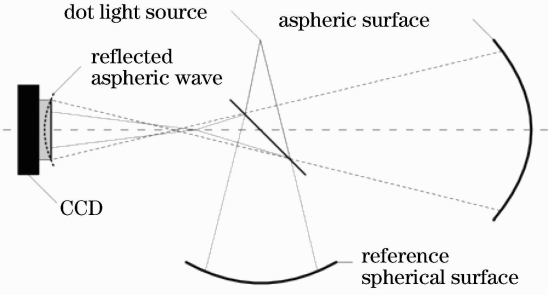


图 2 数字全息检测非球面原理图

Fig. 2 Theory graphic to inspect aspheric surface in digital holography

然而,非球面反射波与非球面面型并非存在有确定的数学镜像变换,不同的入射波,经非球面反射后的反射波会有很大的差异,有的反射波可能与面型具有相同的或近似描述函数,只是边界条件或某个常量不同。而有的反射波可能与非球面面型函数差别很大,二者是完全不同的两类函数。但无论怎么样,非球面反射波波面与被测非球面面型,依据光路设计总能找到二者之间对应关系,从而能够通过非球面的反射波反推得到被测非球面的面型信息。

本研究选择的入射波为一个点光源发出的球面波,只要该点光源的位置选择合适,其反射波函数可近似于非球面面型函数,反射波函数按照其所选边界与非球面的口径的比例“缩小”。假设被测非球面的基本面型为二次旋转对称曲面,其反射波仍近似于二次旋转对称曲面函数,即

$$(x^2 + y^2) - 2r_0z + (k+1)z^2 = 0, \quad (1)$$

式中 z 轴是旋转对称轴,曲面的顶点位于坐标原点 O 处, k 为二次曲面系数,与被测非球面面型函数一致。 r_0 为被测非球面反射波波面(二次曲面)顶点的曲率半径,但 r_0 并不是被测非球面面型函数顶点的曲率半径 R_0 。一般情况下, r_0 需要事先根据检测光路结构参数以及被测非球面面型函数与反射波波面函数的关系计算得到。根据图 2 的非球面检测方案,反射波顶点的曲率半径 r_0 近似地按照反射波的口径 ϕ (CCD 的尺寸)与被测非球面的口径 Φ 的比例

缩小为 $r_0 = \frac{\phi}{\Phi}R_0$ 。从(1)式中可解出 z 为

$$z = \frac{r_0 - \sqrt{r_0^2 - (k+1)(x^2 + y^2)}}{k+1} = \frac{(x^2 + y^2)/r_0}{1 + \sqrt{1 - (k+1)[(x^2 + y^2)/r_0^2]}} \quad (2)$$

取不同的 k 值代表不同的二次非球面。偏离二次曲面的非球面称为高次非球面,一般表示为

$$z = \frac{(x^2 + y^2)/r_0}{1 + \sqrt{1 - (k+1)(\sqrt{x^2 + y^2}/r_0)^2}} + A_4(x^2 + y^2)^2 + A_6(x^2 + y^2)^3 + \dots + A_{2n}(x^2 + y^2)^n, \quad (3)$$

式中 A_4 、 A_6 及 A_{2n} 为高次非球面多项式系数。

考虑到非球面旋转对称性,以下非球面采用 $x=0$ 平面与非球面交线——二次曲线或高次非圆曲线表示。则(3)式变为

$$z = \frac{y^2/r_0}{1 + \sqrt{1 - (k+1)(y/r_0)^2}} + A_4y^4 + A_6y^6 + \dots + A_{2n}y^{2n}, \quad (4)$$

5 CCD 上干涉条纹密度的计算

记录干涉图的平面 M (CCD)可位于非球面反射波顶点前后任意位置。具体的位置由两个因素决定:一是干涉图记录平面的有效面积(如 CCD 的尺寸);二是非球面光学镜片的有效口径大小。如图 3 所示,假设记录干涉图平面 M (CCD)位于被测非球面反射波顶点的右侧,距原点的距离为 b ; S 为参考球面波的波源位置,距原点的距离为 a 。

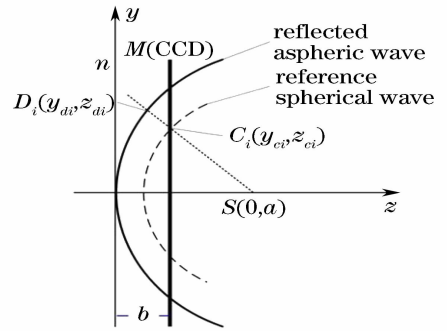


图 3 非球面反射波与参考球面波的光程差

Fig. 3 Optical path difference of reflected aspheric wave between reference spherical wave

从 S 发出的球面波在记录平面 M (CCD)上各点的球面波半径并不相同。也就是说,在 M (CCD)上与非球面反射波干涉的球面波并不是相同的球面波波阵面,相对于半径为 a 的那个波面具有一定的相位差。可见,在 CCD 上记录的是不同的参考球面

波与非球面反射波的干涉结果, $M(\text{CCD})$ 上某点干涉波的强弱决定于非球面反射波与参考球面波在此点的相位差。

非球面反射波与参考球面波在 CCD 上的相位差严格来说等于两者从分束开始之后的光程差, 由于两者所走的光路不同, 精确计算难度很大。为此, 采取了回避计算非球面反射波与参考球面波的初相位差的方法, 以非球面反射波顶点到达 CCD 开始计时, 同时到达的参考球面波 R_{c0} 也由此开始计时, 相当于参考球面波与非球面反射波由此开始分束。这样, 非球面反射波其他各点到达 CCD 的 $C_i(y_{ci}, b)$ 处落后的光程为

$$\delta_{1i} = b - \overline{D_i C_i}, \quad (5)$$

同时到达 CCD 上 $C_i(y_{ci}, b)$ 点的参考球面波, 与开始计时的参考球面波面 R_{c0} 的光程差 δ_{2i} 为

$$\delta_{2i} = \overline{SC} - (a - b) = \sqrt{y_{ci}^2 + (a - b)^2} - (a - b), \quad (6)$$

式中 δ_{1i} 与 δ_{2i} 之差便是所要求的非球面反射波与球面参考波在 CCD 上的光程差 $\delta_i = \delta_{1i} - \delta_{2i}$ 。

不过, 经过认真推敲会发现, 上述方法所计算的实际相位差并不准确, 缺少了二者之间的初相位差以及实际的光程差。但对于本研究最关注的非球面反射波与参考球面波干涉条纹来说, 最大的误差也就是一个条纹位置, 并不影响对干涉条纹密度的分析, 可以看成是一次合理的近似。最终计算分析的结果证明了上述假设与近似的合理性。

当 $\delta_i = \pm j\lambda (j = 1, 2, 3 \dots)$ 时, 非球面反射波与参考球面波干涉加强为亮条纹。通过(6)式便可确定记录平面 M 上干涉亮条纹中心的位置, 由此计算出不同位置的干涉条纹宽度以及干涉条纹的密度, 也就不难找到在参考球面波波源位置一定的条件下最大干涉条纹密度及其位置。

6 非球面干涉检测最佳参考球面波——参考球面波波源位置的确定

连续改变球面参考波波源位置, 分别计算参考球面波波源在不同位置干涉图记录平面 CCD 上干涉条纹密度的分布以及最大条纹密度和位置。比较其最大干涉条纹密度, 使得干涉图记录平面 CCD 上的最大干涉条纹密度最小的球面参考波波源位置, 便是所要求得到的非球面干涉检测最佳参考球面波波源的位置。

7 实例计算与分析

按照上述理论分析和计算方法, 对文献[7,8]选用的二次非球面, 采用图 2 所示数字全息检测系统所要求的最佳参考球面波波源位置进行了预判, 其计算过程与结果如下:

1) 被测非球面的基本参数: 被测非球面口径 $\Phi = 580 \text{ mm}$; 非球面顶点的曲率半径 $R_0 = 1179.447 \text{ mm}$; 二次曲面系数 $k = -0.499365$ 。

2) CCD 的基本参数: 分辨率为 $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$; 像素大小为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$; 最大尺寸长边为 12.7000 mm , 短边为 9.488506 mm 。

3) 被测非球面反射波的基本参数: 取 CCD 的短边作为非球面反射波口径(直径) $\phi = 9.488506 \text{ mm}$; 根据被测非球面顶点半径与口径大小的比例关系推得非球面反射波顶点半径 $r_0 = 19.29515 \text{ mm}$; 非球面反射波二次曲面系数保持不变 $k = -0.499365$ 。这样, 非球面反射波的波面函数为

$$z = \frac{(x^2 + y^2)/19.29515}{1 + \sqrt{1 - 0.500635[(x^2 + y^2)/19.29515^2]}}. \quad (7)$$

4) CCD 的位置: 假设 CCD 被最大限度地用于接收非球面反射波的波面, 为此把非球面反射波口径的半径作为反射波在 y 方向的最大坐标代入(7)式中, 便可求得 CCD 位于被测反射波右侧的最佳位置 $b = 0.587735 \text{ mm}$ 。

5) 参考球面波波源位置的规划: 参考球面波波源的位置 S 均取在 z 对称轴上, 坐标为 $(a, 0)$, a 的范围为 $[r_0 - r_0/2, r_0 + r_0/2]$, 变化步长为 $r_0/100$ 。

6) 参考球面波与非球面反射波在 CCD 上干涉的光程差 δ 的计算: 在 CCD 上连续取点 $C_i(y_{ci}, b)$, y_{ci} 的取值间隔小于 CCD 的信源尺寸, 本研究开始取 CCD 短边的万分之一作为 y_{ci} 的取值间隔, 大约是 CCD 信源尺寸的五分之一。也就是说, 本数值计算可分辨的条纹宽度为 CCD 信源的五分之一。

根据 $C_i(y_{ci}, b)$ 与参考球面波波源的位置 S 的连线方程, 求出该直线非球面波的交点 $D_i(y_{di}, z_{di})$ 。则非球面反射波其他各点到达 CCD 的 $C_i(y_{ci}, b)$ 点, 由此可计算落后该非球面反射波顶点的光程 δ_{1i} 。相对应地可计算同时到达 CCD 的 $C_i(y_{ci}, b)$ 点的参考球面波与开始计时的参考球面波面 R_{c0} 的光程差 δ_{2i} 以及参考球面与非球面反射波在 CCD 上 $C_i(y_{ci}, b)$ 各点干涉的光程差 $\delta_i = \delta_{1i} - \delta_{2i}$ 。

按照一定的精度要求, 检验每一个 δ_i 是否是波长的整数倍。那些是波长整数倍的点就是所求的干

涉条纹的亮纹中心,相邻两亮纹中心的距离便是条纹宽度,并由此可得到干涉图的最大条纹密度及其位置。

7) 把参考球面波波源位置 S 从 $0.5r_0$ 变化到 $1.5r_0$, 计算其每一个位置参考球面波在 CCD 上与被测非球面反射波的最大条纹密度, 并由此得到不同参考球面波波源位置 a 的最大条纹密度的关系曲线(如图 4 所示)。

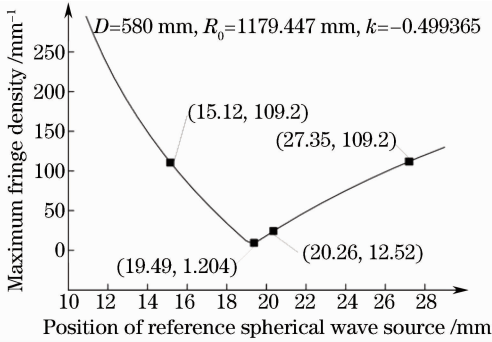


图 4 最大条纹密度与参考球面波波源位置的关系
Fig. 4 Relation between maximum fringe density and position of reference spherical wave source

表 1 不同非球面检测时最佳参考球面波波源的位置

Table 1 Best position of reference spherical wave source to inspect different aspheric surfaces

	Aspheric surface 1	Aspheric surface 2	Aspheric surface 3	Aspheric surface 4
Parameters of aspheric surface	$D=110.0000\text{mm}$	$D=188.11036\text{ mm}$	$D=310.0000\text{ mm}$	$D=580.0000\text{ mm}$
	$R_0=455.4000\text{ mm}$	$R_0=1400.0000\text{ mm}$	$R_0=413.6523\text{ mm}$	$R_0=1179.4470\text{ mm}$
	$k=-1.3060$	$k=-64.4400$	$k=-2.3081$	$k=-0.499365$
r_0	39.2824 mm	70.6176 mm	12.6611 mm	19.2952 mm
a_{best}	39.6752 mm	74.8547 mm	13.6740 mm	19.4881 mm
R_c	459.954 mm	1484.001 mm	446.745 mm	1191.262 mm
δ_{max}	0.0174 mm	0.0377 mm	0.4905 mm	0.1161 mm
α_{max}	0.0004513	0.0009195	0.007774	0.0007617

8) 进一步的研究

从图 4 可发现,当参考球面波波源的位置偏离 a_{best} 约 5%, 干涉条纹密度将急剧增加 10 倍, 说明在非球面检测前确定参考球面波波源位置的重要性。不过, 进一步的研究分析发现, 在目前所采用的 CCD 分辨率条件下, 参考球面波波源的位置冗余相当大。以本研究所采用的 CCD 为例, 其分辨率约为 109 pixel/mm, 根据图 4 曲线容易得到, 只要参考球面波波源的位置不小于 a_{best} 的 20% (4 mm) 或大于 a_{best} 的 40% (7.5 mm) 均可非欠采样记录全息图。由图 4 还可看到, 当参考球面波波源的位置 $a < a_{\text{best}}$ 时, 条纹密度变化梯度相对于 $a > a_{\text{best}}$ 时大。也就是说, 调试时, 从 $a < a_{\text{best}}$ 端开始调试更利于找到最佳参考球面波波源的位置。

根据图 4 的曲线, 其最大条纹密度的最小极值点所对应的参考球面波波源的位置 a , 便是该非球面干涉检测最佳参考球面波波源的位置 a_{best} , 即: 对非球面面型进行干涉检测时, 最大条纹密度最小(干涉条纹最疏)的参考球面波波源的位置。

参照图 3, 最佳参考球面反射波的位置坐标可以视为被测非球面反射波的最接近比较球面的半径, 反算回去, 便可估算出被测非球面面型的最接近比较球面的半径 R_c 以及非球面度的大小 δ_{max} 和斜率非球面度的大小 α_{max} 。

表 1 是在所使用 CCD 参数的条件下, 对文献[7, 8]中相同参数的非球面进行的最佳参考球面波位置、最接近比较球面半径和非球面度等参数的计算结果。把表 1 中计算的非球面度与文献[7, 8]的相关结果进行比较会发现, 本表数据与它们存在一定的偏差, 但数量级基本相同, 其原因是本研究的计算基准是 CCD 平面, 而其他文献则是最接近比较球面。

此外, 还进一步做了一些与非球面干涉检测调试相关的分析研究。如研究了被测非球面口径一定的情况下, 连续改变二次曲面系数 k , 分别估算了大、中、小口径的非球面的最佳球面参考波的位置与二次曲面系数 k 的关系以及与非球面反射波顶点曲率半径的关系等。研究发现, 在二次曲面系数的绝对值很小(小于 2)的情况下, 无论口径大小如何, 最佳球面参考波的位置与非球面反射波顶点曲率中心很接近, 相差均不到 1%, 可以近似等于非球面反射波顶点曲率半径, 即 $a_{\text{best}} \approx r_0$ 。而当二次曲面系数 k 不断增大时, 最佳球面参考波的位置将远离非球面反射波顶点曲率中心($a > r_0$ 或 $a < r_0$), 且最大条纹密度也将不断变大。总之, 借助于本研究提出的上述理论和方法, 可研究更多用于指导非球面干涉检

测调试的相关问题。

8 结 论

从非球面干涉检测出发,提出了一种确定参考球面波波源最佳位置的新思路及其方法。该方案直接分析在记录被测非球面反射波与参考球面波干涉图的 CCD 平面上干涉条纹密度,确定参考球面波波源的最佳位置——非球面干涉检测最佳参考球面波。球面中心位于此位置的参考球面波与被测非球面反射波干涉形成的条纹密度最低,不但有利于 CCD 对干涉条纹的记录,同时也是 CCD 的分辨率能否胜任一个非球面面型干涉检测的评判条件。采用根据上述理论开发的计算程序,不仅可全面分析任意非球面与参考球面波干涉后条纹密度的分布,而且可用于分析非球面干涉检测调试中可能遇到的诸多问题,为非球面的检测调试过程提供理论指导,在实现非球面的数字化高精度快速检测方面具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 1~9
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 1~9
- 2 Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011202
朱勇建, 潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011202
- 3 Xi Qingkui, Zhu Rihong, Chen Lei *et al.*. Methods on testing an

- aspheric with a computer generated hologram[J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(6): 67~69
席庆奎, 朱日宏, 陈 磊 等. 计算全息用于非球面检测的方法[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(6): 67~69
- 4 Toshihito Takahashi, Kunio Konno, Masaharu Kawai *et al.*. Computer generated holograms for testing aspheric lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(2): 546~549
- 5 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1313~1317
谢 意, 陈 强, 伍 凡 等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1313~1317
- 6 Lu Yonggui, Yang Jiandong. Discussing on the definition of optical asphericity[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2005, **28**(4): 16~18
陆永贵, 杨建东. 光学非球面度的探讨[J]. *长春理工大学学报*, 2005, **28**(4): 16~18
- 7 Xie Feng, Hao Qun, Zhu Qiudong. Best-fit spheric surface definition Based on slope asphericity for aspheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3197~3202
谢 枫, 郝 群, 朱秋东. 基于斜率非球面度的非球面最接近比较球面定义[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3197~3202
- 8 Liu Huilan, Sha Dingguo, Hao Qun *et al.*. A method for calculating asphericity of high order optical aspheric surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6): 44~47
刘惠兰, 沙定国, 郝 群 等. 一种高次光学非球面度的计算方法[J]. *光电工程*, 2004, **31**(6): 44~47
- 9 Cheng Haobo, Wang Yingwei, Feng Zhijing. Methods to determine best fit sphere for large off-axis aspheric lenses[J]. *J. Tsinghua University (Science & Technology)*, 2004, **44**(8): 1040~1042, 1046
程灏波, 王英伟, 冯之敬. 大偏离量非球面最接近球面的确定方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, **44**(8): 1040~1042, 1046
- 10 Du Yujun, Ren Haixia, Liu Zhongben. The method of calculation to asphericity of optical aspheric surface component [J]. *J. Applied Optics*, 2002, **23**(5): 42~45
杜玉军, 任海霞, 刘中本. 光学非球面元件非球面度计算方法[J]. *应用光学*, 2002, **23**(5): 42~45

栏目编辑: 何卓铭