

用干涉条纹密度确定非球面检测点光源的最佳位置

莫卫东, 范琦, 贾晋超, 张海防, 冯明德, 杨百愚, 李均盛
(空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 在对非球面的干涉检测中,记录干涉图的 CCD 的选型、光路中光学器件的选择和干涉图的分析计算以及检测系统的精度评价等,都与干涉入射点光源和参考点光源的位置直接相关。为了能够准确地预判非球面检测时入射球面光波和参考球面光波的最佳位置,采用计算和分析在点光源与被测非球面反射光波的干涉条纹密度的方法,确定非球面干涉检测时入射球面光波和参考球面光波的最佳位置。通过上述方法不仅能够确定非球面检测时点光源的最佳位置,还可用于全面地分析干涉条纹密度的分布,并用于制定检测系统 CCD 等光路元件选型的基本策略,也可用于对非球面检测的调试过程进行理论指导。

关键词 非球面;干涉条纹密度;入射球面波;参考球面光波;点光源

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.01.018

中图分类号 TN957 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)01-0085-06

非球面光学元件在现代光学系统中的应用极大地提高了光学系统的成像质量和系统的整体性能。非球面光学元件的制造在理论上涉及两方面的问题,其一是非球面光学元件的设计和加工,其二是非球面光学元件的检测。没有高精度的检测技术的保证,就不可能制造出高精度的非球面光学元件,也就不能制造出高性能的光学系统。

非球面光学元件设计的核心是使非球面面型能够满足光学系统的功能要求,而非球面的加工关注的是非球面的非球面度以及最接近比较球面的确定。采用非球面与最接近比较球面的横坐标之差定义计算的非球面度为非球面加工中需要定义的去量分布函数,采用非球面与最接近比较球面在其法线上的偏离量定义计算的非球面度则恰好为用于数控机床磨头的控制函数^[1]。可见,确定最接近球面成为非球面加工过程中的关键环节之一。但基于非球面加工目的定义最接近比较球面是否适用于非球面的干涉检测呢?

光学干涉及其计算全息方法是非球面光学元件面型检测中重要的技术手段^[2-6]。在对非球面的干涉检测系统设计中,需要解决两个关键的问题,一是采用怎样的入射光波,使被测非球面反射后的光波波面函数更简单或更接近于被测非球面的面型函数;二是采用怎样的参考光,使之与被测非球面反射光干涉后形成的干涉条纹密度适中,以便干涉条纹能够被准确记录。

在光学干涉检测中,所采用的入射光通常是平行光或者是点光源形成的球面光。若采用平行光入射时,被非球面反射后将不可能是球面波或接近于被测非球面面型函数的反射光波。因此,在非球面的各种干涉检测系统中均采用由点光源形成的球面波作为入射光波。特别当点光源位于非球面的焦点时,反射光波将可能是球面波。利用该反射球面波与平面波干涉或与参考球面光波干涉都可用于非球面面型的检测。但由于非球面的焦点位置通常不在检测光路的范围之内,从而使得非球面的检测变得比较困难。由于入射该球面波的点光源不能位于被测非球面的某个焦点上,根据其对称性,非球面检测入射球面波点光源的最佳位置显然只能位于非球面对称轴线上。若该点光源在某个位置能使得反射光波波面函数更接近于被测非球面面型函数,不妨把由该点光源发出的球面波称为非球面干涉检测的“最佳入射球面光”,该点光源的位置就是非球面检测的入射球面光点光源的最佳位置。

* 收稿日期:2011-08-29

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2010JM8012)

作者简介:莫卫东(1959-),男,广西合浦人,教授,主要从事精密光学检测的研究. E-mail:mwd1999@126.com

CCD 能否准确地记录干涉图像是实现非球面面型高精度检测的核心技术问题。为此,在非球面的干涉检测中,为了减小干涉条纹密度,选用球面光作为干涉参考光,并使之与被测非球面的反射光干涉条纹密度最小。不妨把该参考球面光称为“最佳参考球面光”。最佳参考球面光决定于发出该球面光的点光源相对于记录干涉条纹 CCD 平面的位置,且满足与被测非球面反射光波干涉的条纹密度最小的条件。一旦确定了最佳参考球面光,方才可明确 CCD 的选型、光学器件与光路参数的选择以及深化干涉图的分析计算和对非球面检测系统的精度评价等。

1 入射球面光点光源最佳位置的确定

首先,非球面干涉检测的入射球面光应位于被测非球面的中心轴线上(见图 1)。至于位于轴线上的什么位置,由从该位置发出的球面光经被测非球面反射后的波面函数是否最接近于被测非球面的面型函数决定。如何判断点光源的某个位置满足上述条件是本研究的核心问题。

由于要求满足最佳入射球面光条件的被测非球面反射光波面函数应最接近于被测非球面的面型函数。为此,通过计算分析在被测非球面中心对称轴线上不同位置的点光源发出球面光与最接近非球面面型函数的反射光波产生干涉的条纹密度(分析计算时可直接采用被测非球面的面型函数作为

该反射光的波面函数),以便获得满足最佳入射球面光条件的点光源的位置。该干涉条纹的密度决定于入射球面光与被测非球面反射光波之间的夹角,等价于文献[7]所提出的斜率非球面度。由于该干涉是由球面光波与非球面光波的干涉,干涉条纹的密度是不均匀的。因此,不同位置的点光源发出的球面光波与非球面反射光波干涉的最大干涉条纹密度并不一样。当两者形成的干涉条纹的最大密度最小时,表明该球面光波最接近于被测非球面反射光波,该球面光波面的法线与该非球面反射光波面的法线最大夹角最小。由于上述计算中所取的非球面反射光波函数为被测非球面的面型函数,因此该位置点光源发出的球面光便是非球面干涉检测的最佳入射球面光,该点光源的位置就是所要求的非球面检测入射球面光点光源的最佳位置。

确定最佳入射球面光点光源位置 r_{best} (在对称轴上距被测非球面顶点的距离)的具体计算方法,可参照下面更复杂的关于参考球面光点光源最佳位置的确定方法,两者的基本思路与算法相同。

2 参考球面光点光源最佳位置的确定

2.1 通过干涉条纹密度确定最佳参考球面光

由于检测时所记录的干涉图并不在非球面上,而是记录在某个平面 M (CCD)上,见图 2。显然在记录平面 M 上所记录的干涉图并不是在非球面附近某个参考球面光波与非球面产生的干涉,而是不同半径的参考球面光波与被测非球面的反射光波的干涉。在 M (CCD)上被测非球面反射光波与参考球面光波的夹角,随着参考球面光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 (CCD)上并不相同,也就是说,在记录平面 M (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光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 (CCD)的位置不会影响干涉条纹的分布。而对于采用参考球面光波的非球面干涉检测系统,干涉图记录平面 M (CCD)的位置直接影响着参考球面光波与被测非球面反射光波的夹角——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

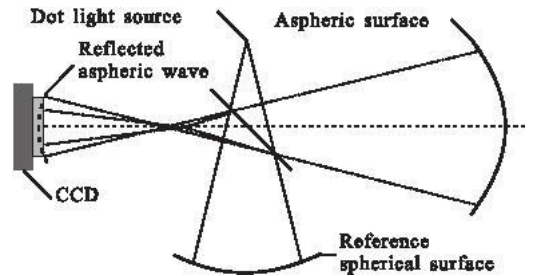


图 1 数字全息检测非球面原理图

Fig. 1 Theory graphic to inspect aspheric surface in digital holography

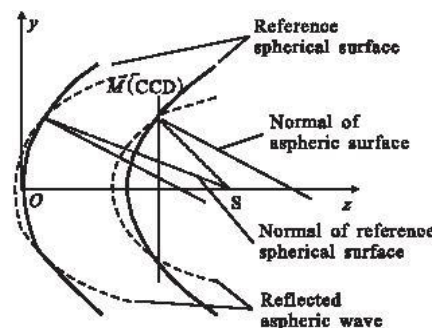


图 2 在 M (CCD)上的非球面波和球面参考波

Fig. 2 Aspheric wave and reference spherical wave in M (CCD)

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光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,本研究换了一种思路,试图通过直接计算在干涉图记录平面 M (CCD) 上被测非球面反射光波与参考球面光波的干涉条纹密度的方法,确定参考球面光点光源的最佳位置。

2.2 非球面反射光波函数

由于非球面反射光波的波面函数与非球面的面型函数并非存在有确定的数学变换关系,不同的入射光波,经非球面反射后的反射光波会有很大的差异。有的反射光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。而有的反射光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,非球面反射光波波面与被测非球面面型函数,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光波反推得到被测非球面的面型信息。本研究选择的入射光波为上述的最佳入射球面光,因此在被测非球面表面的反射光波最接近于非球面面型函数,该反射光波传播到 CCD 时,可近似地按照 CCD 的大小与被测非球面的口径比例“缩小”。以被测非球面的面型为二次旋转对称曲面为例,其反射光波函数同样也为二次曲面:

$$(x^2 + y^2) - 2r_0z + (k+1)z^2 = 0 \tag{1}$$

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的一致; r_0 为被测非球面反射光波波面(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光波波面函数的关系计算得到。按照图 1 的非球面检测方案,反射光波顶点的曲率半径 r_0 近似地按照反射光波的口径 ϕ (CCD 的尺寸)与被测非球面的口径 Φ 的比例缩小为: $r_0 = \frac{\phi}{\Phi}R_0$ 。从式(1)中解出 z :

$$z = \frac{r_0 - \sqrt{r_0^2 - (k+1)(x^2 + y^2)}}{k+1} = \frac{\frac{(x^2 + y^2)}{r_0}}{1 + \sqrt{1 - (k+1)\left(\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right)}} \tag{2}$$

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,一般的表示为:

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

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,以下非球面使用采用 $x=0$ 平面与非球面交线——二次曲线或高次非圆曲线表示。式(3)变换为:

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

2.3 CCD 上干涉条纹密度的计算

记录干涉图的平面 M (CCD) 可位于非球面反射光波顶点前后任意位置。具体的位置由 2 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。见图 3,假设记录干涉图平面 M (CCD) 位于被测非球面反射光波顶点的右侧,距原点的距离为 b ; S 为参考球面光波的波源位置,距原点的距离为 a 。

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) 上与非球面反射光波干涉的球面波并不是相同的球面光波波阵面,相对于半径

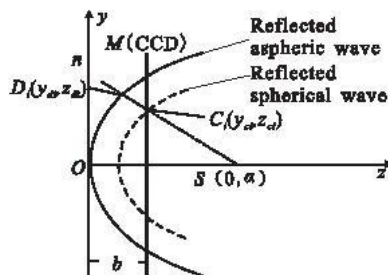


图 3 非球面波反射波与参考球面波的光程差
Fig. 3 Optical path difference of reflected aspheric wave between reference spherical wave

为 a 的那个波面具有一定的位相差。可见,在 CCD 上记录的是不同的参考球面光波与非球面反射光波的干涉结果, $M(\text{CCD})$ 上某点干涉波的强弱决定于非球面反射光波与参考球面光波在此点的相位差。

非球面反射光波与参考球面光波在 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,本研究采取了回避计算非球面反射光波与参考球面光波的初相位差策略,以非球面反射光波顶点到达 CCD 开始计时,同时到达的参考球面光波 R_0 也由此开始计时,相当于参考球面光波与非球面反射光波由此开始分束。这样,非球面反射光波其他各点到达 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 $C_i(y_{ci}, b)$ 点的参考球面光波,与开始计时的参考球面光波面 R_0 的光程差为:

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

本研究取 CCD 短边的万分之一作为的 y_{ci} 的取值间隔,大约是 CCD 信源尺寸 $1/5$ 。也就是说,本数值计算可分辨的条纹宽度为 CCD 信源的 $1/5$ 。 δ_{1i} 与 δ_{2i} 之差便是所要求的非球面反射光波与球面参考波在 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光波与参考球面光波干涉条纹来说,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 $\delta_i = \pm j\lambda$ ($j = 1, 2, \dots$) 时,非球面反射光波与参考球面光波干涉加强为亮条纹。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。

连续改变参考球面光波波源的位置 $S(0, a)$, a 从 $0.5r_0$ 变化到 $1.5r_0$, 变化步长取 $r_0/100$ 。计算在每一个位置的参考球面光波与被测非球面反射光波在 CCD 上干涉的最大条纹密度 $D(\lambda)$, 并由此得到不同参考球面光波波源位置 a 与最大条纹密度的关系曲线(见图 4)。在图 4 曲线中,最大条纹密度的最小极值点所对应的参考球面光波波源的位置 a , 便是该非球面干涉检测最佳参考球面光波波源的位置 a_{best} , 即:对非球面面型进行干涉检测时,使得最大条纹密度最小(干涉条纹最疏)的参考球面光波波源的位置,由该点发出的球面波就是所要求的最佳参考球面光波。

表 1 为按照上述理论分析和计算方法,采用图 1 所示的数字全息检测系统,对文献[1,7]选用的二次非球面进行检测时所要求的最佳参考球面光波波源位置以及最佳入射球面波位置的预判结果。

表 1 不同非球面检测时的最佳入射球面波和最佳参考球面光波的波源位置

Tab. 1 The best position of incident spherical wave source and reference spherical wave source to testing different aspheric surface

不同非球面	r_0/mm	$r_{\text{best}}/\text{mm}$	$a_{\text{best}}/\text{mm}$
非球面 1	39.282 4	459.954	39.675 2
非球面 2	70.617 6	1484.000	74.854 7
非球面 3	12.661 1	446.745	13.674 0
非球面 4	19.295 2	1 191.241	19.488 1

注:表中计算所采用的 CCD 的基本参数:分辨率为 $1\ 392 \times 1\ 040$, 信源大小为 $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$, 最大尺寸的长边为 $12.700\ 0\ \text{mm}$, 短边为 $9.488\ 506\ \text{mm}$ 。非球面 1: $D = 110\ \text{mm}$, $R_0 = 455.4\ \text{mm}$, $k = -1.306$; 非球面 2: $D = 188.110\ 36\ \text{mm}$, $R_0 = 1\ 400\ \text{mm}$, $k = -64.44$; 非球面 3: $D = 310\ \text{mm}$, $R_0 = 413.652\ 3\ \text{mm}$, $k = -2.308\ 1$; 非球面 4: $D = 580\ \text{mm}$, $R_0 = 1179.447\ \text{mm}$, $k = -0.499\ 365$ 。

2.4 讨论

1) 当对某个非球面检测时,根据图 4 参考球面光波波源位置 a 与最大条纹密度的关系曲线,可知不同参

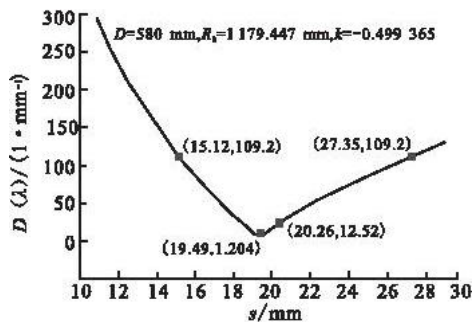


图 4 最大条纹密度与参考球面波源位置的关系

Fig. 4 The relation between maximum fringe density and position of reference spherical wave source

考球面光波在 CCD 上与被测非球面反射光波干涉条纹的最大密度。该干涉条纹最大密度便是选择 CCD 分辨率的临界条件。即,数字化干涉检测系统对非球面进行面型检测时,其 CCD 的分辨率必须大于相应参考球面光波与被测非球面反射光波干涉的最大干涉条纹密度,否则,将不能满足干涉条纹采样精度要求。进而根据所选择的 CCD 最大尺寸,可确定检测光路中参考球面镜的参数等。

2)从图 4 的关系曲线可发现,当参考球面光波源的位置偏离 a_{best} 约 5%,而干涉条纹密度将急剧增加到 10 倍。这足以说明,在非球面检测前确定参考球面光波波源位置的重要性。不过,进一步的分析发现,在目前所采用的 CCD 分辨率条件下,参考球面光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 pixels/mm,根据图 4 曲线可很容易得到,只要参考球面光波源的位置不小于 a_{best} 的 20% (4 mm)或大于 a_{best} 的 40% (7.5 mm)均做到非欠采样记录全息图。由图 4 还可看到,可当参考球面光波源的位置 $a < a_{\text{best}}$ 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 $a < a_{\text{best}}$ 端开始调试更有利于找到最佳参考球面光波波源的位置。

3)本研究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 ,分别预判了大、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光波顶点曲率半径的关系等。研究发现,当二次曲面系数的绝对值很小 (< 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光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光波顶点曲率半径,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光波顶点曲率中心 ($a > r_0$ 或 $a < r_0$),且最大条纹密度也将不断变大。同样,在二次曲面系数 k 很小的情况下,最佳入射球面波波源的位置将位于被测非球面面型函数顶点曲率中心 R_0 附近。

可见,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。

3 结束语

本研究从非球面干涉检测出发,提出了一种新的确定入射球面波和参考球面光波点光源最佳位置的思路及其方法。该方案采用直接计算干涉条纹密度的方法,分析球面波与非球面之间的相互关系,从而确定非球面检测时入射球面光波点光源最佳位置。同样通过计算被测非球面反射光波与参考球面光波在 CCD 平面上的干涉条纹密度,确定参考球面光波点光源的最佳位置。应用本研究的理论基础和计算方法,不需要任何解析计算,而采用计算机数值计算技术全面分析任意非球面(包括高次非球面)反射光波与参考球面光波干涉后的条纹密度的分布,为解决非球面干涉检测调试中可能遇到的诸多问题提供理论依据,为优化非球面的检测调试过程提供理论指导。因此,本研究的成果对于实现非球面的数字化高精度快速检测具有重要的应用价值。

参考文献(References):

- [1] 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.
LU Yonggui, YANG Jiandong. Discussing on the definition of optical asphericity [J]. Journal of Changchun university of science and technology, 2005,28(4):16-18. (in Chinese)
- [2] 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.
PAN Junhua. The design manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow university press, 2004. (in Chinese)
- [3] 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.
ZHU Yongjian, PAN Weiqing. Measurement of aspheric surface [J]. Laser & optoelectronics progress, 2010,47(1):011202. (in Chinese)
- [4] 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.
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. (in Chinese)
- [5] Toshihito Takahashi, Kunio Konno, Masaharu Kawai, et al. Computer generated holograms for testing aspheric lenses [J]. Appl opt, 1976, 15(2):546-549.

- [6] 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.
XIE Yi, CHEN Qiang, WU Fan, et al. Concave aspherical surface testing with twin computer generated holograms [J]. Acta photonica sinica, 2008, 28(7): 1313-1317. (in Chinese)
- [7] 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.
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. (in Chinese)
- [8] 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.
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. (in Chinese)
- [9] 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):44-47.
CHENG Haobo, WANG Yingwei, FENG Zhijing. Methods to determine best fit sphere for large off-axis aspheric lenses [J]. Journal tsinghua univ: natural science edition, 2004, 44(8): 1040-1042, 1046. (in Chinese)
- [10] 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.
DU Yujun, REN Haixia, LIU Zhongben. The method of calculation to asphericity of optical aspheric surface component [J]. Journal appl opt, 2002, 23(5): 42-45. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Fix Dot Light Sources of Incident Spherical Wave and Reference Spherical Wave in Testing Aspheric Surface by Fringe Density

MO Wei-Dong, FAN Qi, JIA Jin-chao, ZHANG Hai-fang, FENG Ming-de, YANG Bai-yu, LI Jun-sheng
(Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The positions of dot light source of incident spherical wave and reference spherical wave are directly related to the selection of CCD, optics, analysis of interferogram and the evaluate accuracy of a testing system for aspheric surface. In order to predefine the best position of sources of incident spherical wave and reference spherical wave, a new method is adopted to fix dot light source of spherical wave by calculating and analyzing the fringe density. By using the above method, the best source position of spherical wave not only can be predefined but also the interferogram be fully analyzed, simultaneously the specific strategies of selecting CCD and optics can be determined. The results of the research also can be used as a theoretical guidance debugging in the process of testing aspheric surface.

Key words: aspheric surface; fringe density; incident spherical wave; reference spherical wave; dot light source