

中心遮拦光学元件检测中调整误差的精确去除

王孝坤 郑立功

(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 分析了用干涉仪检测中心遮拦光学元件时仍采用圆泽尼克(Zernike)多项式表述相位和求解赛德尔像差的弊端,在环形域上,圆泽尼克多项式不再具有正交性和明确的物理意义。给出了环域泽尼克多项式的求解方式和表达形式,这些表达式具有和圆泽尼克同样的性质和意义。利用 Zygo 数字干涉仪对口径为 300 mm,中心遮拦比为 0.23 的非球面进行了零位补偿检验,用编制的计算程序对其进行环域泽尼克多项式波面拟合,得到的前 4 项分布可以作为调整误差而消去,进而获得较准确的面形信息,从而为超精加工提供了依据。

关键词 光学检测;中心遮拦;泽尼克多项式;调整误差

中图分类号 TQ171.65;O436.1

OCIS 120.6650, 240.6700

文献标识码 A

Accurate Removal of Misalignment Errors from Testing Central Obstructed Optics

Wang Xiaokun Zheng Ligong

(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 The limitations of current interferogram reduction software with circular Zernike polynomials in analyzing obstructed interferogram are illuminated. The Zernike circle polynomials are no longer orthogonal over an annular region and have no explicit physical meanings. The Zernike annular polynomials are discussed and illustrated, which have orthogonality and the similar natures with the Zernike circle polynomials. The experiment is carried out with a Φ 300 mm aspherical mirror with 0.23 obscuration by null-compensation, and the obstructed wavefronts are fitted with Zernike annular polynomials. The first four terms are regarded as misalignment errors and eliminated from the original phase distribution directly, and thus an accurate surface map is gained, which provides a guarantee for the superprecision fabrication.

Key words optical testing; central obstruction; Zernike polynomial; misalignment errors

1 引言

R-C 系统和 Gregory 系统具有结构简单、无色差等优点,在大口径天文望远镜系统、红外或紫外光学系统中这些两镜系统得到了广泛的应用^[1]。但是共轴两镜系统的主镜一般存在中心遮拦,在检测过程中将得到一有中心遮拦的干涉图。通常的商业化干涉仪的数据处理软件使用泽尼克多项式来描述像差,这是因为泽尼克多项式在单位圆上加权正交,同时它的各项系数可以和传统的赛德尔(Seidel)像差联系起来。

通用的数字干涉仪的处理软件一般使用圆泽尼克多项式来描述像差,但对于有中心遮拦的光学元件,其拟合结果所计算出的赛德尔像差将存在一定的误差^[2]。Mauro 等^[3,4]初步研究了用标准干涉拟合软件分析环形光学元件:在遮拦比较小时,其圆泽尼克多项式的拟合结果仍具有一定的意义;高阶拟合遮拦比阈值时将产生较大的误差,而低阶拟合所获得的结果较准确;当遮拦比较大时,为了获得较准确的检测结果,应当选用环域泽尼克多项式基底来进行拟合。Restaino 等^[5]应用环域泽尼克多项式分析了美国弗拉格斯塔夫海军

收稿日期: 2010-02-05; **收到修改稿日期:** 2010-03-26

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期基金(083Y32J080)重点资助课题。

作者简介: 王孝坤(1980—),男,博士,副研究员,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

天文台(Naval Observatory Flagstaff Station)1 m 量级望远镜中中心遮拦比为 0.45 的主镜的像差,得到了很好的结果。

在检测没有中心遮拦的圆形光学元件时,用泽尼克多项式能很好地表述相位分布,而且其对应的各项有明确的物理意义,通常把检测结果的前 4 项作为调整误差直接消去。但是在检验有中心遮拦的光学元件时,若仍用圆泽尼克多项式来描述面形将会带来一定的误差,因为圆泽尼克多项式在环形域上不正交,不再具有明确的物理意义,而且其系数之间也存在耦合现象^[6,7]。本文对圆泽尼克多项式做了修正,使其在环域上正交。修正后的多项式即为环域泽尼克多项式,它与圆泽尼克多项式具有相同的性质和意义,可以把其前 4 项当作调整误差而消除,得到确切的加工残差分布,为超精加工提供保障。本文阐述了具体的实现过程,并结合实例进行了实验分析。

2 基础理论

2.1 环域泽尼克多项式

假定所检测的中心遮拦光学元件的外半径为 1,内半径为 $\epsilon(\epsilon < 1, \text{中心遮拦比为 } \epsilon)$ 。利用构成雅可比多项式的方法,使序列 $1, r^2, r^4, \dots, r^{2n}$ 在环域 $[\epsilon, 1]$ 上正交,则可得 $m=0$ 时环域泽尼克多项式的径向表达式^[8,9]

$$R_{2j}^0(r, \epsilon) = P_j^{(0,0)} \left[\frac{2(r^2 - \epsilon^2)}{1 - \epsilon^2} - 1 \right], \quad (1)$$

式中 P_j 为勒让德多项式, $j=0, 1, 2, \dots$ 。

当 $m > 0$ 时,径向多项式可由递推公式求解

$$R_{2j+m}^m(r, \epsilon) = \left[\frac{1 - \epsilon^2}{2(2j + m + 1)h_j^m} \right]^{1/2} r^m Q_j^m(r^2), \quad (2)$$

式中

$$Q_j^0(r^2) = R_{2j}^0(r, \epsilon), \quad (3)$$

$$h_j^0 = \frac{1 - \epsilon^2}{2(2j + 1)}, \quad (4)$$

$$Q_j^m(r^2) = \frac{2(2j + 2m - 1)h_j^{m-1}}{(j + m)(1 - \epsilon^2)Q_j^{m-1}(0)} \sum_{i=0}^j \frac{Q_i^{m-1}(0)Q_i^{m-1}(r^2)}{h_i^{m-1}}, \quad (5)$$

$$h_j^m = -\frac{2(2j + 2m - 1)Q_{j+1}^{m-1}(0)}{(j + m)(1 - \epsilon^2)Q_j^{m-1}(0)} h_j^{m-1}. \quad (6)$$

当 $m < 0$ 时,可由关系式 $R_{2j+m}^m(r, \epsilon) = R_{2j+m}^{|m|}(r, \epsilon)$ 来求解径向多项式,则环域泽尼克多项式可以表示为

$$U_k^m = R_{2j+m}^m(r, \epsilon) H_{2j+m}^m(\theta), \quad (7)$$

式中

$$H_{2j+m}^m(\theta) = \begin{cases} \cos(m\theta), & m \geq 0 \\ -\sin(m\theta), & m < 0 \end{cases}, k = [(2j + m)(2j + m + 1)/2] + j + 1.$$

显然,当 $\epsilon=0$ 时,环域泽尼克多项式就退变为圆泽尼克多项式,因此它可以看作为圆泽尼克多项式的特殊形式。

2.2 调整误差的去除

用干涉法测量任一中心遮拦比为 ϵ 的光学元件,假定系统高阶误差可以忽略,则波前误差的相位测量值可表示为

$$w(x, y) = e(x, y) + \varphi(x, y), \quad (8)$$

式中 $e(x, y)$ 为待测光学元件表面误差, $\varphi(x, y)$ 为定位误差。通常在装调过程中会引入 4 项定位误差,分别对应为平移、 x 方向倾斜、 y 方向倾斜和离焦项,即为

$$\varphi(x, y) = a + bx/(1 + \epsilon^2)^{1/2} + cy/(1 + \epsilon^2)^{1/2} + d(2x^2 + 2y^2 - 1 - \epsilon^2)/(1 - \epsilon^2). \quad (9)$$

将相位分布 $w(x, y)$ 在环形域上进行环域泽尼克多项式拟合来估算装调定位误差,即得

$$\sum_{i=1}^N \left[w(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^k a_j u_j(x_i, y_i) \right]^2 = \min, \quad (10)$$

式中 $w(x_i, y_i)$ 为从环域中采集的具有调整误差和加工误差的相位数据,总的采样点为 N , $u_j(x_i, y_i)$ 为环域

泽尼克多项式, a_j 为其系数。由最小二乘拟合和广义逆矩阵理论可以求得

$$\mathbf{a} = (\mathbf{u}^T \mathbf{u})^{-1} \mathbf{u}^T \boldsymbol{\omega}, \quad (11)$$

其前 4 项分别对应为平移、 x 方向倾斜、 y 方向倾斜和离焦, 可以将其作为检测中的调整定位误差, 因此将 $\boldsymbol{\omega}$ 减去该误差就可得到待测光学元件准确的表面残差分布, 从而完成对整个面形的测量。

3 实 验

对一口径为 300 mm, 中心遮拦比为 0.23 的非球面反射镜进行了零位补偿干涉测量, 检测的原理图如图 1 所示。干涉仪出射的平面波或球面波经过补偿器后转换为非球面波并与被检非球面的理论形状重合, 因此所有光线都垂直入射到被检非球面上, 并沿原路返回与参考

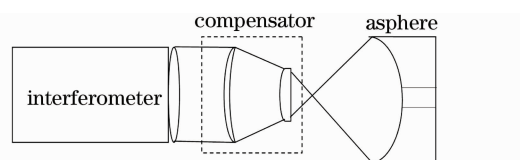


图 1 零位补偿检测非球面示意图

波面形成干涉条纹。 Fig. 1 Schematic of testing asphere by null-compensation

所得的面形分布和干涉图如图 2 所示。将其用干涉仪数据处理软件 MetroPro 进行分析, 消去平移、倾斜、离焦等调整误差后的相位分布为图 3 所示, 其峰谷(PV)值为 0.490λ , 均方根(RMS)值为 0.037λ 。利用 Matlab 计算软件编制误差去除程序, 将所得的干涉数据进行最小二乘拟合, 消除调整误差, 获得精确的表面误差分布如图 4 所示, 其面形相位分布的 PV 值为 0.501λ , RMS 值为 0.039λ 。同时通过分析和计算获得两种方法的调整误差系数如表 1 所示。

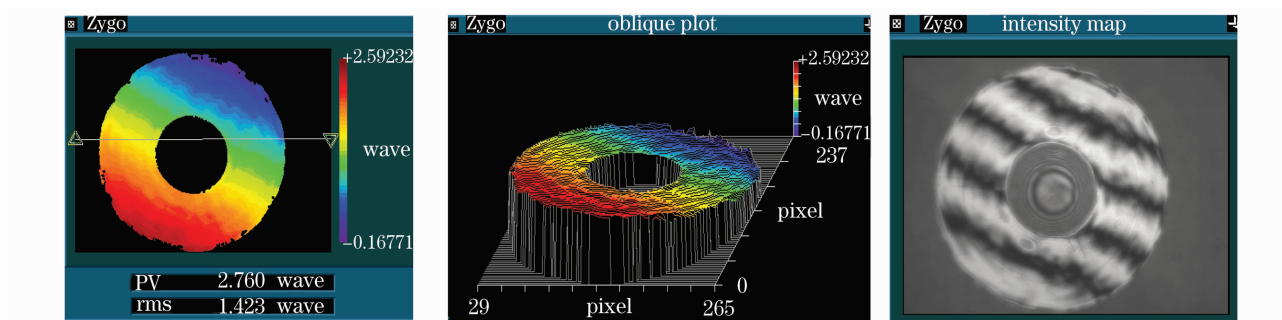


图 2 非球面零位补偿检测未去调整误差的面形图和相应的干涉图

Fig. 2 Experimental results for an obstructed aspherical mirror before removing misalignment errors

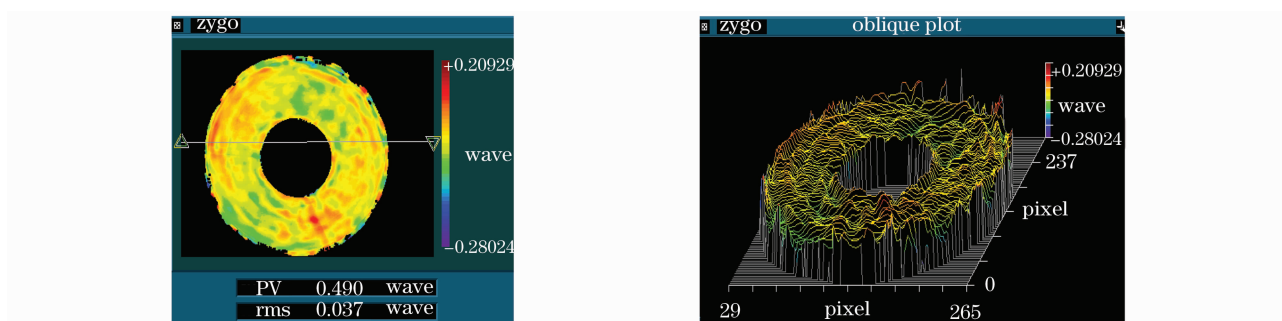


图 3 用 MetroPro 软件消去调整误差后的面形图

Fig. 3 Surface map after removing piston, tilt and power by MetroPro software

比较分析可知, 用干涉仪 MetroPro 软件获得的调整误差系数和用环域泽尼克多项式拟合的误差系数存在一定的差异, 分离调整误差后的相位分布与其 PV 值和 RMS 值也有一些差别。这是因为通常干涉仪的数据处理软件, 对于有中心遮拦的干涉图仍然把它当作圆域进行圆泽尼克多项式拟合, 并当作圆域进行赛德尔像差系数计算, 所得的系数与环域泽尼克多项式拟合求解的系数必将存在差别, 将其前 4 项作为调整误差而剔除, 这是不太科学的。因为, 用圆泽尼克多项式拟合有中心遮拦的干涉图和计算赛德尔像差系数是存在一定误差的, 而且随着遮拦比的增加, 拟合面形残留误差和赛德尔系数误差会变大, 其变化规律与被测元件

的像差类型和大小有关。

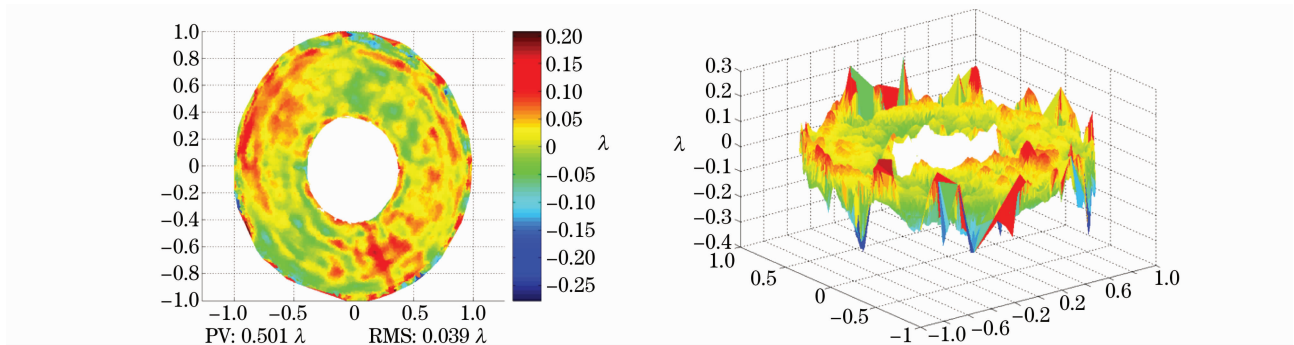


图 4 用环域泽尼克多项式拟合后去调整误差后面形分布

Fig. 4 Surface map after removing misalignment errors by Zernike annular polynomials fitting

表 1 两种方法调整误差系数的对比

Table 1 Comparison of the misalignment coefficients of two methods

	Piston	x tilt	y tilt	Power
Coefficients calculated by MetroPro	1.268	-0.536	-1.140	-0.002
Coefficients calculated by Zernike annular polynomials	1.263	-0.555	-1.179	-0.004

4 结 论

给出了环域泽尼克多项式的求解方式和表达形式,并结合具体实例进行了实验分析。结果表明,用环域泽尼克多项式作为基底拟合中心遮拦的干涉图,可以更精确地表述相位信息和计算赛德尔像差,并将调整误差做了修正,能够更好地剔除调整误差,获得更为准确的面形分布,从而为超精加工和检测提供手段。

参 考 文 献

- 1 Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of Optical Aspheres[M]. Beijing: Science Press, 1994
潘君骅. 光学非球面的设计、加工和检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994
- 2 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics[M]. New York: Pergamon Press, 1993. 464~468
- 3 Mauro Melozzi, Luca Pezzati. Interferometric testing of annular apertures[C]. *SPIE*, 1992, **1781**: 241~248
- 4 Hou Xi, Wu Fan. Optimum analysis of seidel aberrations calculated with Zernike circle polynomials for the obscured aspherical primary mirror[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(5): 568~572
侯 溪, 伍 凡. 中心遮拦非球面主镜 Seidel 像差拟合分析的优化[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(5): 568~572
- 5 Sergio R. Restaino, Scott W. Teare, Michael Di Vittorio *et al.*. Analysis of the naval observatory flagstaff station 1 m telescope using annular Zernike polynomials[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(9): 2491~2495
- 6 V. N. Mahajan. Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(1): 75~85
- 7 San Diego. Zemax Manual; ZEMAX Development Corporation[M]. New York; San Diego, 2003
- 8 Zhang Shenghua, Zhang Xiaohui. Interferogram processing system for obstructed aperture interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1404~1407
张圣华, 张晓辉. 中心遮拦干涉图处理[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1404~1407
- 9 B. Tatian. Aberration balancing rotationally symmetric lenses[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1083~1091