

文章编号: 0253-2239(2006)01-0054-7

# 中心遮拦干涉图的圆泽尼克拟合对计算 赛德尔像差的影响分析\*

侯 溪<sup>1,2</sup> 伍 凡<sup>1</sup> 杨 力<sup>1</sup> 吴时彬<sup>1</sup> 陈 强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 从波像差的幂级数和圆泽尼克多项式展开理论入手,介绍了圆泽尼克多项式和赛德尔多项式之间的联系,理论上分析了圆泽尼克多项式在环域的相关性,着重讨论了以中心遮拦干涉图的圆泽尼克多项式拟合系数计算赛德尔像差系数的影响。对理论分析进行了实验验证,其结果与理论分析具有良好的一致性,并提出了一种简单直观的误差容限设定方法。研究表明,随着遮拦比的增加,赛德尔系数误差增加,其变化规律和被测元件的像差类型和大小有关。当遮拦比达到某一特定的阈值时,误差曲线将产生较大的变化,为了获得较准确的赛德尔系数,圆泽尼克拟合时应选择适当的阶数;当遮拦比继续增加时,为了计算出准确的赛德尔系数,拟合时应选择环泽尼克多项式。此外,遮拦比对赛德尔系数中畸变、像散的影响较弱,对彗差、场曲、球差的影响较强。

**关键词:** 测量; 泽尼克多项式; 波面拟合; 中心遮拦干涉图; 赛德尔像差

中图分类号: O436.1; TB96 文献标识码: A

## Effect of Central Obscuration Interferograms Fitted with Zernike Circle Polynomials on Calculating Seidel Aberrations

Hou Xi<sup>1,2</sup> Wu Fan<sup>1</sup> Yang Li<sup>1</sup> Wu Shibin<sup>1</sup> Chen Qiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** Based on the power-series and Zernike circle polynomials' decomposition theory of wavefront aberration, the relationship between Zernike circle polynomials and Seidel polynomials is illuminated. The correlation Zernike circle polynomials on the annular domain is analyzed theoretically, and the effect of central obscuration interferograms fitted with Zernike circle polynomials on calculating Seidel aberrations is emphasized. The experimental results are consistent with the theoretical analysis, and a simple and intuitionistic enactment method of error tolerance is provided. With the increase of obscuration ratio, it is found that the error of Seidel coefficients is increased, and its changing rule depends on the aberration type and magnitude of the optical element under test. When the obscuration ratio reaches a certain threshold value, the error curves would greatly change. For achieving the accurate Seidel coefficients, the order number of the Zernike circle polynomial fitting should be selected appropriately, and the Zernike annular polynomials should be selected in a large obscuration-ratio case. Additionally, the effect of the obscuration ratio on the tilt and astigmatism along Seidel aberrations is less than that on the coma, focus and spherical terms.

**Key words:** measurement; Zernike polynomials; wavefront fitting; obscuration interferogram; Seidel aberration

### 1 引 言

两镜系统<sup>[1]</sup>是指由两个反射镜组成的光学系统,由于该光学系统具有无色差、体积小等优点正得

到越来越广泛的应用。然而,共轴两镜系统中的主镜均存在中心遮拦,在光学制造过程中对其进行干涉测试时将得到一中心遮拦的干涉图形。在干涉精

\* 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 侯 溪(1980~),男,四川阆中人,博士研究生,主要从事大口径非球面检测技术的研究。

E-mail: hxxh6776@sohu.com

收稿日期: 2005-03-16; 收到修改稿日期: 2005-05-08

密计量技术中,对数字化后的干涉图像进行拟合分析是数据处理以得到所需要的信息和结果的重要环节。通常选用圆泽尼克多项式<sup>[2]</sup>作为基底函数系,因为它在单位圆域里加权正交,函数正交的性质使其系数相互独立,有利于消除偶然误差的影响;并且其系数能与光学设计者惯用的赛德尔像差容易建立联系。

圆泽尼克多项式对波面拟合的收敛性好、精度高,提供的有用信息多,大部分干涉仪数据处理软件(如 MetroPro<sup>[3]</sup>、Wisp<sup>[4]</sup>)和光学设计软件(如 Zemax<sup>[5]</sup>、Code V<sup>[6]</sup>)都使用圆泽尼克多项式来描述像差。对于中心遮拦(环孔径)光学元件时,圆泽尼克多项式将失去其正交性,使得系数之间存在交叉耦合<sup>[7]</sup>现象,不再具有明确的物理含义,甚至可能给出错误的拟合结果。Tatian<sup>[8]</sup>, Mahajan<sup>[9]</sup>, Barakat<sup>[10]</sup>推导出了环泽尼克多项式(annular Zernike Polynomials)基函数,它在单位圆域里加权正交,与圆泽尼克多项式具有类似的性质;文献[11~13]中应用该多项式分析中心遮拦干涉图。然而,从 20 世纪 70 年代初 Bruning<sup>[14]</sup>等提出相移干涉技术到现在,几乎所有的干涉图分析软件中均使用圆

泽尼克多项式,环泽尼克多项式还没有被广泛应用。

Melozzi 等<sup>[15]</sup>初步研究了用标准干涉仪数据处理软件分析中心遮拦干涉图所引入的问题,并指出了一些标准干涉拟合软件所存在的限制。本文在此基础上,深入分析了圆泽尼克多项式在存在交叉耦合情况下拟合干涉图对计算赛德尔像差系数的影响。

## 2 基本理论

通常用两组多项式系来描述出瞳面波像差,第一种是光学设计者惯用的用来描述成像系统中像差的赛德尔多项式系,另一种为光学测试者所常用的泽尼克多项式系。

### 2.1 像差函数的幂级数展开及赛德尔像差<sup>[2]</sup>

像差函数  $\Phi(h', r, \theta)$  可幂级数展开为

$$\Phi(h', r, \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} {}_{(2l+m)} a_{nm} h'^{2l+m} r^n \cos^m \theta, \quad (1)$$

其中  ${}_{(2l+m)} a_{nm}$  为展开系数,  $l, n, m$  为正整数,阶数  $i = 2l + m + n$ 。

当  $i = 4$  时,(1) 式对应于 5 项赛德尔像差函数

$$\Phi_{\text{Seidel}}(h', r, \theta) = {}_0 a_{40} r^4 + {}_1 a_{31} h' r^3 \cos \theta + {}_2 a_{22} h'^2 r^2 \cos^2 \theta + {}_2 a_{20} h'^2 r^2 + {}_3 a_{11} h'^3 r^2 \cos \theta, \quad (2)$$

其中  ${}_0 a_{40}$ ,  ${}_1 a_{31}$ ,  ${}_2 a_{22}$ ,  ${}_2 a_{20}$ ,  ${}_3 a_{11}$  分别表示球差、彗差、像散、场曲和畸变系数。前三项影响点扩展函数(PSF)的质量,后两项则影响其横向和纵向位置。

定义  $\rho = r/a$  为归一化的半径不变量,  $a$  为出瞳半径,则(2) 式可简化为

$$\Phi_{\text{Seidel}}(\rho, \theta) = a'_{40} \rho^4 + a'_{31} \rho^3 \cos \theta + a'_{22} \rho^2 \cos^2 \theta + a'_{20} \rho^2 + a'_{11} \rho \cos \theta. \quad (3)$$

### 2.2 干涉测试中的泽尼克多项式拟合及赛德尔系数的计算<sup>[3]</sup>

干涉法是一种重要的出瞳面波像差测试方法,对干涉测试结果进行圆泽尼克多项式拟合是一种分析未知波前像差类型和大小的常用方法。

$$w(\rho, \theta) = \sum_{i=0}^N a_i Z_i(\rho, \theta), \quad (4)$$

其中  $w$  为未知波前像差的测量数据,  $N$  为多项式的项数,  $a_i$  为第  $i$  项拟合系数,  $Z_i$  为第  $i$  项泽尼克多项式。

圆泽尼克系数与赛德尔系数存在联系,其关系如表 1 所示。 $a_0 \sim a_8$  为前 9 项圆泽尼克拟合系数。一旦圆泽尼克拟合系数被求得,赛德尔系数可由表 1 中所示关系得到,表 2 为对应的前 9 项泽尼克多项

式表达式。

表 1 赛德尔系数与泽尼克系数的关系

Table 1 The relationship between Seidel coefficient and Zernike coefficient

Description	Magnitude	Angle
It	$\sqrt{(a_1 - 2a_6)^2 + (a_2 - 2a_7)^2}$	$\arctan\left(\frac{a_2 - 2a_7}{a_1 - 2a_6}\right)$
Focus	$2a_3 - 6a_8$	
Astigmatism	$2\sqrt{a_4^2 + a_5^2}$	$\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{a_5}{a_4}\right)$
Coma	$3\sqrt{a_6^2 + a_7^2}$	$\arctan\left(\frac{a_7}{a_6}\right)$
Spherical	$6a_8$	

表 2 前 9 项泽尼克多项式  
Table 2 The first 9-term Zernike polynomials

Term	Polynomial	Meaning
$Z_0$	1	Piston
$Z_1$	$\rho \cos \theta$	$x$ tilt
$Z_2$	$\rho \sin \theta$	$y$ tilt
$Z_3$	$2\rho^2 - 1$	Focus
$Z_4$	$\rho^2 \cos 2\theta$	Astigmatism $0^\circ$ or $90^\circ$
$Z_5$	$\rho^2 \sin 2\theta$	Astigmatism $\pm 45^\circ$
$Z_6$	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	$x$ coma and tilt
$Z_7$	$(2\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	$y$ coma and tilt
$Z_8$	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Spherical and focus

### 3 理论分析

圆泽尼克多项式在单位圆域 ( $0 \leq \rho \leq 1$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ) 内具有正交性:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 Z_i(\rho, \theta) Z_j(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta = \pi \delta_{ij}, \quad (5)$$

$\delta_{ij}$  为克罗内克  $\delta$  符号。该多项式在环域里 ( $\epsilon \leq \rho \leq 1$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ) 将不再具有正交性<sup>[8]</sup>, 为了描述其相关性, 定义该多项式系相关矩阵  $\Gamma$  为

$$\Gamma_{ij} = \frac{1}{\pi} \int_{\epsilon}^1 \int_0^{2\pi} Z_i(\rho, \theta) Z_j(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta. \quad (6)$$

其中  $\Gamma_{ij}$  为矩阵  $\Gamma$  的第  $i$  行第  $j$  列元素,  $\epsilon$  为中心遮拦比, 为遮拦半径与外半径之比, 如图 1 所示。 $Z_i$  为第  $i$  项圆泽尼克多项式。

为了进一步认识圆泽尼克多项式在存在交叉耦合情况下拟合干涉图对计算赛德尔像差系数的影响, 我们用具有强大符号和数值计算功能的软件 Mathematica5.0 分别计算了圆泽尼克多项式前 9 项, 16 项和 36 项在不同遮拦比情况下的相关矩阵。其代码为

```
Table[Integrate[Z[i] * Z[j] * r, {r, 1}, {theta, 0, 2pi}]/pi, {i, 1, 36}, {j, 1, 36}];
```

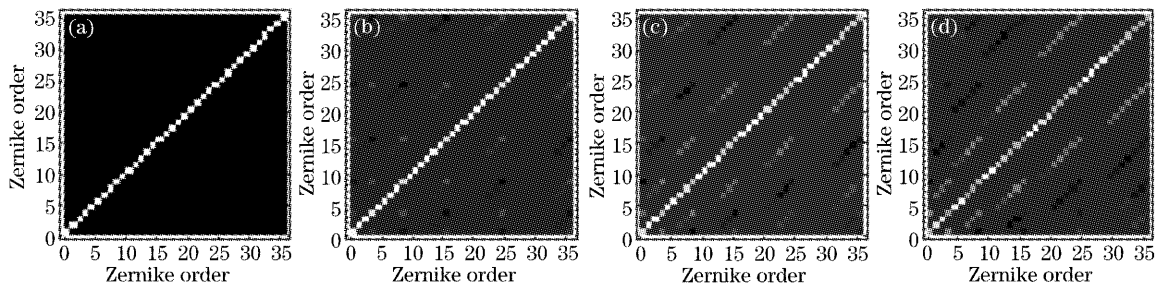


图 2 前 36 项圆泽尼克多项式不同遮拦比下相关性 (□ 1 ■ 0)

Fig. 2 The correlation of the first 36-term Zernike polynomials with different obscuration ratios.

(a)  $\epsilon=0$ , (b)  $\epsilon=0.2$ , (c)  $\epsilon=0.4$ , (d)  $\epsilon=0.6$

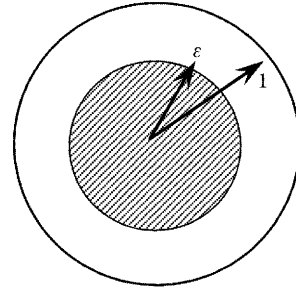


图 1 遮拦比为  $\epsilon$  的单位环域

Fig. 1 A normalized annular domain with obscuration ratio  $\epsilon$   
List Density Plot[ $a$ , Plot Range  $\rightarrow$  All].

分别让  $\epsilon$  为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 图形化的相关矩阵如图 2 所示, 白色网格表示 1, 完全相关; 黑色网格表示 0, 无相关性; 灰色网格表示 0 和 1 之间, 部分相关。从图中容易看出: 1) 当遮拦比为零时, 图 2(a), 相关矩阵仅对角线元素为 1, 其余元素为 0, 说明该多项式此时具有(5)式所描述的标准正交性。2) 当遮拦比不为零时, 图 2(b)~图 2(d), 非对角线区域中出现灰色网格, 说明此时多项式间存在耦合现象。3) 随着遮拦比的增加, 这些灰色网格更加趋向于白色网格 1, 说明耦合性增强。4) 并非所有区域都存在灰色网格, 说明耦合现象有一定规律性, 并非任意两项都存在耦合, 这种特性使得其对赛德尔系数的影响不一致。

从图 3 可以看出圆泽尼克多项式前 9 项间 ( $Z_0 \sim Z_8$ ), 仅有 ( $Z_0, Z_3$ ), ( $Z_0, Z_8$ ), ( $Z_1, Z_6$ ), ( $Z_2, Z_7$ ), ( $Z_3, Z_8$ ) 间存在耦合现象。从图中的灰度值可以看出 ( $Z_3, Z_8$ ) 间耦合较强, ( $Z_1, Z_6$ ), ( $Z_2, Z_7$ ) 耦合较弱。表 1 中赛德尔系数计算公式可以看出场曲和球差与  $Z_3, Z_8$  有关, 由于它们之间存在强耦合现象使得其计算误差较大。而像散和  $Z_4, Z_5$  有关, 而这两项不与其他项耦合, 所以其计算结果具有较高的准确性。

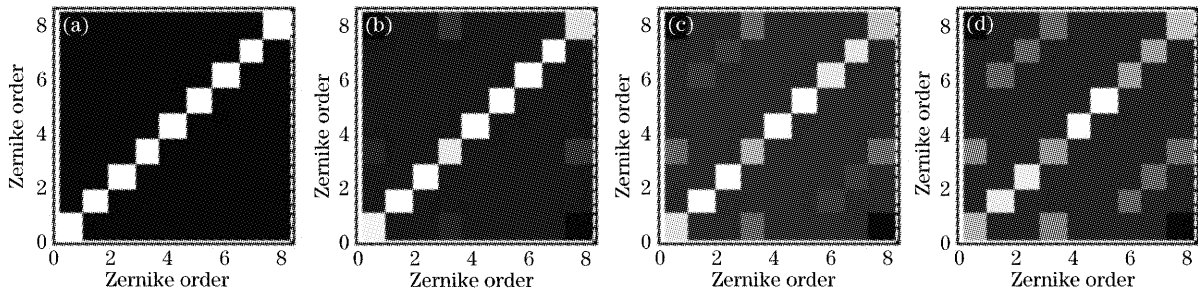


图 3 前 9 项圆泽尼克多项式不同遮拦比下相关性

Fig. 3 The correlation of the first 9-term Zernike polynomials with different obscuration ratios.

(a)  $\epsilon=0$ , (b)  $\epsilon=0.2$ , (c)  $\epsilon=0.4$ , (d)  $\epsilon=0.6$ 

当选择前 16 项圆泽尼克拟合时,各项之间的相关性如图 4 所示。此时,除了上述前 9 项间存在的耦合外,  $(Z_0, Z_{15})$ ,  $(Z_1, Z_{13})$ ,  $(Z_2, Z_{14})$ ,  $(Z_3, Z_{15})$ ,  $(Z_4, Z_{11})$ ,  $(Z_5, Z_{12})$ ,  $(Z_6, Z_{13})$ ,  $(Z_7, Z_{14})$ ,  $(Z_8, Z_{15})$  间也存在耦合现象。随着拟合选用多项式项数的增加,存在耦合的项也将增加,使得拟合系数受到更多的影响,导致所计算的赛德尔系数误差增大。

$(Z_4, Z_{11})$ ,  $(Z_5, Z_{12})$  间的耦合将影响像散的计算准确度;当遮拦比小于等于 0.4 时,图中几乎看不到这一耦合现象,说明该耦合较弱,可以忽略不计;当遮拦比为 0.6 时,才能从图中看到该耦合现象。而对于影响场曲、球差、彗差系数的  $Z_3, Z_6, Z_7, Z_8$  项间的耦合现象可以明显从图 4 中看到,说明其耦合性较强,影响较大。

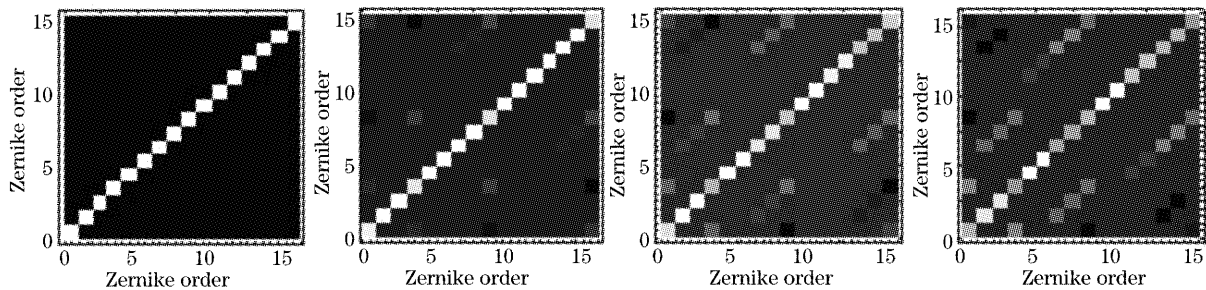


图 4 前 16 项圆泽尼克多项式不同遮拦比下相关性

Fig. 4 The correlation of the first 16-term Zernike polynomials with different obscuration ratios.

(a)  $\epsilon=0$ , (b)  $\epsilon=0.2$ , (c)  $\epsilon=0.4$ , (d)  $\epsilon=0.6$ 

低阶拟合时多项式间耦合现象较少,使得耦合对拟合系数的影响因素较少;但当被测光学系统中含有高阶项像差时,如果选择低阶拟合,高阶项将被迫向低阶项分解,进而影响低阶项拟合系数。可见,它们共同影响着赛德尔系数的计算精度。当被测元件不存在大量高阶像差时,多项式的高阶项将对结果起主要的影响作用,且选用低阶拟合时各项间的耦合现象比高阶拟合时少,故低阶拟合计算精度较高。当被测元件存在大量高阶像差时,多项式的高阶项将对结果起一定的影响作用,如果仍选用低阶拟合,虽然此时项间耦合现象较少,同样可能引起较大的计算误差。综合以上分析,用来拟合中心遮拦干涉图的圆泽尼克多项式项数的选择存在一个优化问题。

## 4 实验及结果分析

为了分析用中心遮拦干涉图的圆泽尼克多项式拟合系数来计算赛德尔像差系数的影响,我们用 Zygo 公司制造的 GPI 4' 相移干涉仪分别检验了一块平面和球面反射镜,其检测结果如图 5、图 6 所示。由于该实验中所使用的被测样品没有中心遮拦,干涉仪数据处理软件对相位值进行泽尼克多项式拟合并计算赛德尔像差符合其使用条件,所得到的结果准确可信。该平面和球面的赛德尔像差系数分别为畸变 1.083,场曲 -0.096,像散 0.102,彗差 0.057,球差 0.112;畸变 0.299,场曲 -0.192,像散 0.022,彗差 0.362,球差 0.030。图 7 为 MetroPro 软件中所提供的 Mask 编辑器窗口,可以方便地创建和修改 mask 区域以定义出感兴趣的分析区域;我们利用该功能构造出任意遮拦比的中心遮拦干涉

图,这里使遮拦比从 0 以 0.05 增加到 0.9。

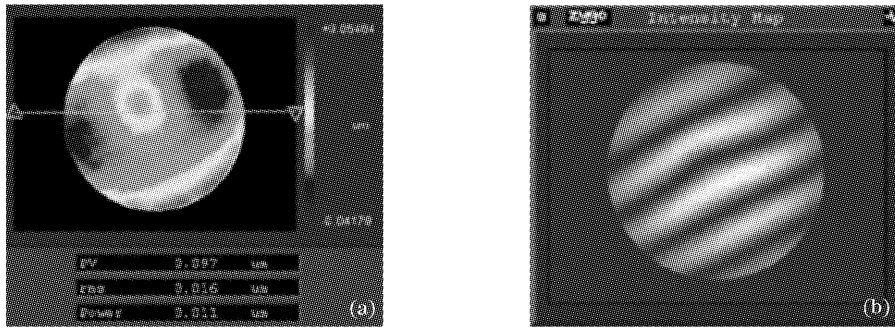


图 5 一平面的检测结果。(a)面形图,(b)光强图

Fig. 5 The measurement result of a flat surface. (a) Surface map, (b) intensity map

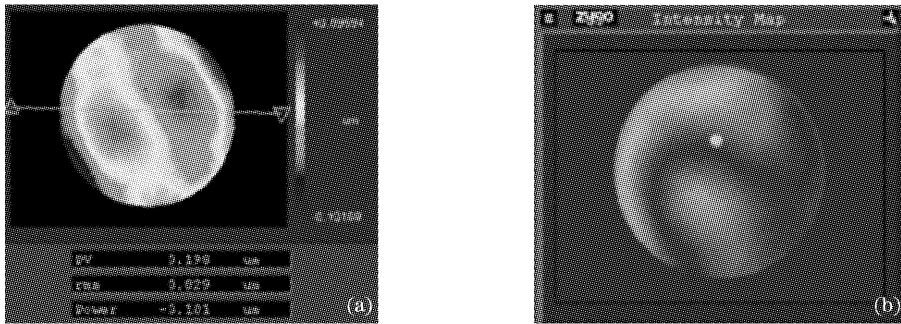


图 6 一球面的检测结果。(a)面形图,(b)光强图

Fig. 6 The measurement result of a spherical surface. (a) Surface map, (b) intensity map

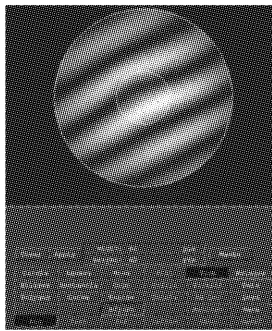


图 7 MetroPro 中的 Mask 编辑器

Fig. 7 The mask editor of MetroPro software

MetroPro 软件将计算出不同遮拦比情况下的泽尼克系数,此时的多项式拟合在非圆域进行,多项式间存在交叉耦合现象,不满足该多项式系的使用条件,所得到的泽尼克系数和根据该系数所计算的赛德尔像差系数将存在误差。为了分析选用不同阶数的泽尼克多项式拟合时对计算赛德尔系数(至少为 9 项拟合)的影响,对每个遮拦比,分别设定拟合项数为 9,16,25,36。定义赛德尔系数相对误差为

$$\Delta = \frac{S_\epsilon - S_0}{S_0} \times 100\%, \quad (7)$$

式中  $S_\epsilon$  表示遮拦比为  $\epsilon$  时的赛德尔系数,  $S_0$  表示没

有遮拦时的赛德尔系数。

我们用 Matlab6.5 编写了分析计算和图形化程序,首先读入 Metropro 软件计算的泽尼克系数,由表 1 中的公式计算赛德尔系数(也可以由 MetroPro 软件直接得到),然后由(7)式计算出赛德尔系数相对变化值,最后将计算结果可视化。Matlab6.5 中有一个对图形对象属性进行设置的图形属性编辑界面,可以在友好的图形窗口中通过设定纵坐标的取值范围限定其赛德尔系数的误差容限,如图 8 所示,取消 limits 中 auto 勾选,在右边的输入框中输入要设定的容限值,图形输出窗口将仅显示出该容限下的曲线。

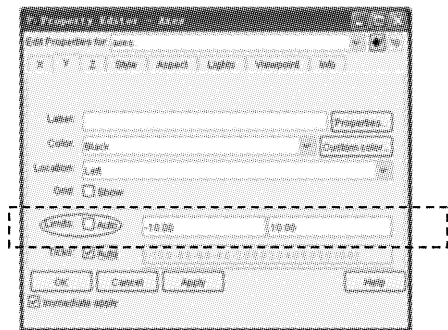


图 8 Matlab6.5 中的图形属性窗口

Fig. 8 The axes' property editor of Matlab6.5

图 9 和图 10 分别为实验中所测平面和球面在不同项数泽尼克拟合和不同遮拦比的情况下的赛德尔系数相对误差变化曲线。从图中可以看出：1) 遮拦比较小的情况下，误差曲线变化较平坦；当遮拦比达到某一特定的阈值时，误差曲线将产生较大的变化；当遮拦比继续增加时所计算的赛德尔系数将有较大的误差。图 9 中对于畸变，像散其遮拦比阈值大约为 0.6；对于场曲、彗差、球差，其阈值大约为 0.2 甚至更小。2) 赛德尔系数误差和所选用的泽尼克多项式拟合项数有关，文献[16]中指出，对于一般的光学系统，高阶波差、面形误差不会太大，用泽尼克多项式的前 36 项来拟合具有足够的精度。这并不意味着对于中

心遮拦干涉图所选用的泽尼克拟合项数越多，其所计算的赛德尔系数误差就越小；相反，当遮拦比达到阈值后，低阶拟合所计算出的部分赛德尔系数更准确，这与文献[15]中所得到的结论一致。比如图 9 中 16 项拟合计算像散较 25, 36 项拟合更准确；16 或 9 项拟合计算球差比 25, 36 项拟合更准确。3) 在遮拦比较小的情况下，所选用的泽尼克拟合项数对计算赛德尔像差系数影响不大；当遮拦比增加到阈值时，所选用的泽尼克拟合项数对计算赛德尔像差系数有较大的影响。也就是说，当遮拦比较大时，用圆泽尼克多项式拟合计算赛德尔像差系数，应该选择适当的拟合项数以获得较准确的结果。

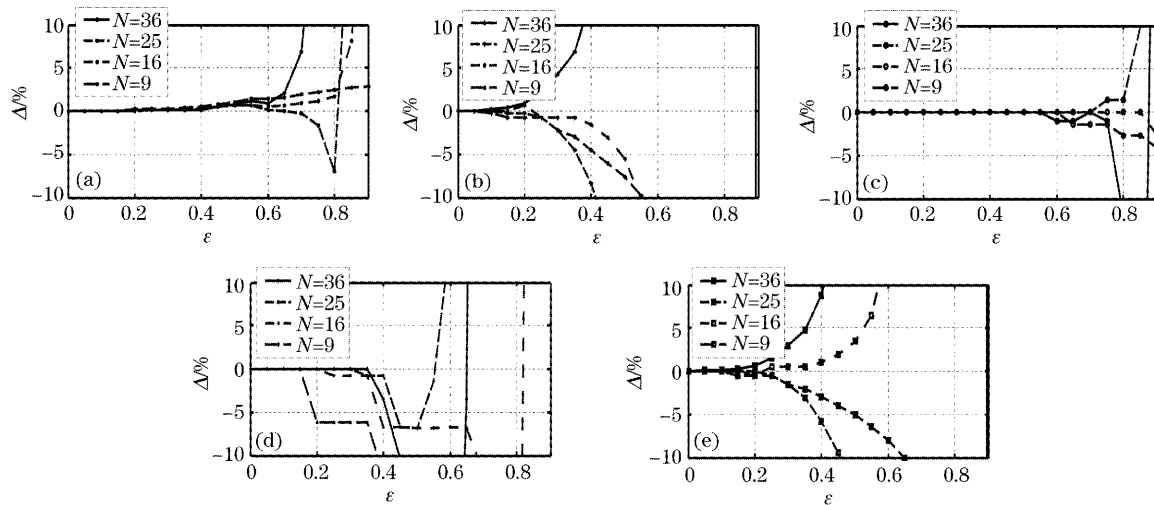


图 9 实验中平面的赛德尔系数相对误差与遮拦比的关系曲线

Fig. 9 The relation between the relative error  $\Delta$  of Seidel coefficients and the obscuration ratio  $\epsilon$  with different Zernike fitting order for the flat surface in this experiment. (a) Tilt, (b) focus, (c) astigmatism, (d) coma, (e) spherical

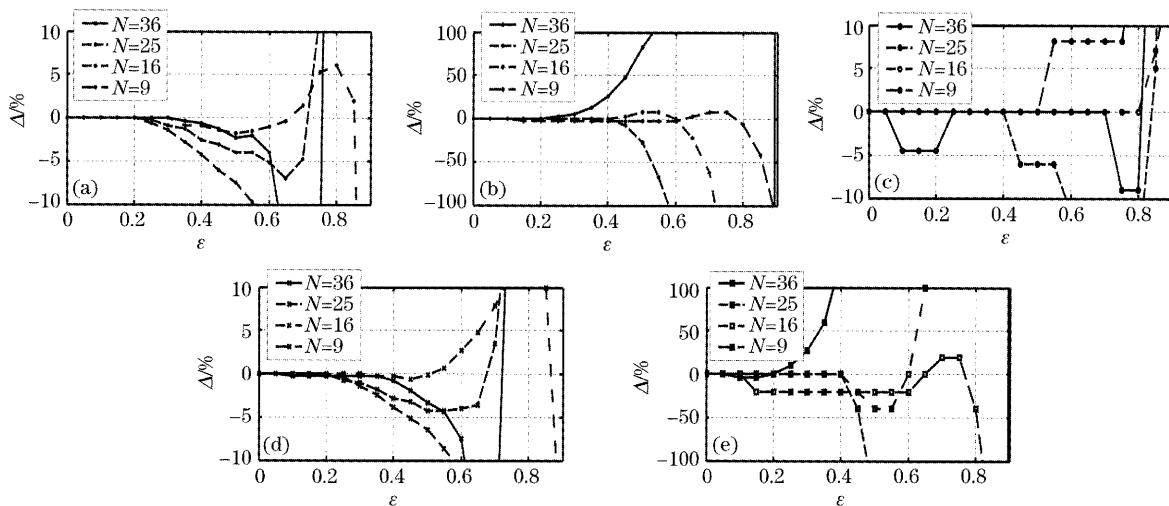


图 10 实验中球面的赛德尔系数相对误差与遮拦比的关系曲线

Fig. 10 The relation between the relative error  $\Delta$  of Seidel coefficients and the obscuration ratio  $\epsilon$  with different Zernike fitting order for the spherical surface in this experiment. (a) Tilt, (b) focus, (c) astigmatism, (d) coma, (e) spherical

从图 9 与图 10 的对比中发现:1)随着遮拦比的增加,赛德尔系数误差增加,但其变化规律和被测元件的赛德尔像差类型和大小有关。2)它们都存在遮拦比阈值,但两者的阈值不一样。图 9 中,对于彗差,当遮拦比为 0.4 时,最大误差约为 10%,而图 10 中误差约为 5%;对于畸变,当遮拦比为 0.6 时,图 9 中最大误差约为 2%;而图 10 中的误差约为 10%。这种现象不具有普遍性,和被测元件有关。3)遮拦比对赛德尔系数中畸变和像散的影响较弱,对彗差、场曲、球差的影响较强,与上述理论分析结果一致,这也是耦合现象规律性的必然结果。4)在相同的误差容限条件下,对于赛德尔系数中不同的像差项,其遮拦比阈值不同。5)对于不同的被测元件,相同的像差项在同样的误差容限条件下所对应的遮拦比阈值也不同。

## 5 结 论

本文从波像差的幂级数和圆泽尼克多项式展开理论入手,揭示出了赛德尔系数和泽尼克系数的内在联系,简要介绍了标准干涉图分析软件中圆泽尼克多项式的应用及其赛德尔系数的计算公式。定义了一个描述圆泽尼克多项式在环域里的相关性的相关矩阵,应用 Mathematica5.0 软件计算了不同遮拦比时的相关矩阵并将其图形化,直观分析了各项间的相关性及其对赛德尔像差系数的影响,另外还考虑了用来拟合的多项式项数的选择对计算赛德尔像差系数的影响。实验中分别检测了一圆口径的平面和球面光学元件,利用干涉仪数据处理软件中的 Mask 功能构造出了一系列不同遮拦比的中心遮拦干涉图,用 Matlab6.5 编写了分析及图形化程序,并提出了一种简单直观的误差容限设置方法,其结果与理论分析具有良好的一致性。研究表明,随着遮拦比的增加,赛德尔系数误差增加,其变化规律和被测元件的像差类型和大小有关。当遮拦比达到某一特定的阈值时,误差曲线将产生较大的变化,为了获得较准确的赛德尔系数,圆泽尼克拟合时应选择适当的阶数;当遮拦比继续增加时,为了计算出准确的赛德尔系数,拟合时应选择环泽尼克多项式。

此外,遮拦比对赛德尔系数中畸变、像散的影响较弱,对彗差、场曲、球差的影响较强。以上研究结果揭示出了标准干涉仪数据处理软件对中心遮拦干涉图的泽尼克拟合分析能力,为正确理解该情况下所计算出的泽尼克、赛德尔系数的意义及其准确性具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Hao Peiming, Kong Xianglei. Research of beam expander with a two-mirror system [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(2): 179~183 (in Chinese)  
郝沛明,孔祥蕾. 两镜系统扩束器的研究[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(2): 179~183
- 2 Born M, Wolf E. *Principles of Optics* [M]. New York: Pergamon Press, 1993. 464~468
- 3 MetroPro Manual. Version 7.4.2, 2001, Zygo corporation, www.zygo.com
- 4 Wisp Manual, Version 3.8B Wyko corporation, Tucson, AR, 1986
- 5 The Zemax optical design program is developed by the Zemax development corporation, www.zemax.com
- 6 The CODE V optical design program is developed by Optical Research Associates, www.opticalres.com
- 7 J. Herrmann. Cross coupling and aliasing in modal wave-front estimation[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(8): 989~992
- 8 B. Tatian. Aberration balancing in rotationally symmetric lenses [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1083~1091
- 9 V. N. Mahajan. Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(1): 75~85
- 10 Richard Barakat. Optimum balance wave-front aberrations for radially symmetric amplitude distributions: generalizations of Zernike polynomials [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(6): 739~742
- 11 R. G. Lyon, J. E. Dorband, J. M. Hollis. Hubble space telescope faint object camera calculated point-spread functions [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(8): 1752~1765
- 12 Zhang Shenghua, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Interferogram processing system for obstructed aperture interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1404~1407 (in Chinese)  
张圣华,张晓辉,韩昌元. 中心遮拦干涉图的处理[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1404~1407
- 13 S. R. Restaino, S. W. Teare, M. Divittorio *et al.*. Analysis of the naval observatory flagstaff station 1-m telescope using annular Zernike polynomials [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(9): 2491~2495
- 14 J. H. Bruning, D. R. Herriot, J. E. Gallagher *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer of testing optical surfaces and lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- 15 M. Mauro, P. Luca. Interferometric testing of annular apertures [C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1781**: 241~248
- 16 Aspden R, Donough R M. Computer assisted optical surfacing [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(12): 2739~2747