

一种修正子孔径拼接中系统误差的方法

周游¹ 王青² 刘世杰¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 通过对子孔径拼接中系统误差放大效应的分析研究, 提出一种修正由干涉仪参考平晶引入的系统误差的方法。该方法只需利用三面互检获取参考平晶在拼接轴上(水平和垂直方向)的面形数据, 再用该数据构建参考平晶的面形误差修正波面, 即运用 Zernike 多项式(离焦和像散项)对误差修正波面进行低阶二次曲面的拟合, 并在子孔径拼接测量中进行实时修正。实验证明, 该方法能够消除由干涉仪参考平晶所引起的系统误差对拼接的影响, 有效提高拼接波面的精度。

关键词 子孔径拼接; 系统误差; 三面互检; Zernike 多项式拟合

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.051202

A Method to Modify Systematic Errors in the Stitching

Zhou You¹ Wang Qing² Liu Shijie¹

¹Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

²School of Electronic and Optical Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract This paper describes a method that can correct systematic errors in the subaperture stitching measurement after analyzing the absolute test of three-flat testing. The testing gets a vertical profile of data and horizontal profile of data along the diameter of the reference flat, and then using the data to fit an error correction wavefront of the reference flat, namely the use of Zernike polynomials (defocus and ast) for low-level fitting. Experiments show that this method can eliminate the systematic errors caused by the interferometer reference flat, and effectively improve the accuracy of wavefront stitching.

Key words sub-aperture stitching; system errors; three mutual inspection; Zernike polynomial fitting

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 350.4600

1 引言

在大尺寸光学元件面形的拼接测量中, 各个子孔径是独立调整与测量的, 因此将引入不同的倾斜量, 拼接即是将子孔径准确定位, 并消除倾斜量的差异。最常用的拼接方法重叠子孔径法, 以相邻子孔径之间的重叠区域求出其相对倾斜并将它消除^[1-2]。在子孔径的拼接测试中, 经常会出现由外界环境因素造成的干涉仪测量的采样点阵错位误差、随机误差, 由机械结构引起的子孔径定位误差等, 这些误差通常表现为封闭子孔径循环拼接时的剩余误差, 针对此问题国内外已有多种误差均化算法被提出^[3-5], 并已经取得良好的效果。

然而, 在实际的检测中, 使用子孔径拼接干涉仪去测量大口径元件的面形, 与直接使用大口径干涉仪测量相比, 被测面形的相对误差仍然比较大, 分析造成这种结果的原因, 发现不仅存在上述子孔径测量中的随机误差和剩余误差, 还存在由所使用的干涉仪标准平晶面形误差而引起的系统误差, 而且这种系统误差随着子孔径的拼接会被放大, 最终会影响拼接的精度。

收稿日期: 2013-12-19; 收到修改日期: 2014-01-03; 网络出版日期: 2014-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(11104295)

作者简介: 周游(1987—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事光学干涉测量技术方面的研究。E-mail: zhouyou@siom.ac.cn

对干涉仪标准平晶的面形误差检测有多种绝对检验方法,但在实际测量中,除了传统的三面互检方法外,其他大多数检测的方法均未走出实验室。分析其中的原因,首先是其他绝对检验的方法的测量过程相对比较复杂,其次是测试的数据会受到外界环境条件制约和影响,因此不能将对标准平晶的绝对检验数据预存下来作为后续修正使用,当测试的环境变化,或者是说将标准平晶移植到其他干涉仪上进行测试时,所标定的数据结果将不可以继续使用。因此在子孔径拼接时需要一种操作简单、稳定、稳健性好的方法。

本文通过对三面互检绝对检验方法的分析研究,提出一种利用三面互检获取标准平晶在拼接轴上的二维轮廓曲线,利用该轮廓曲线数据构建标准平晶的面形误差修正波面,即用 Zernike 多项式对误差修正波面进行低阶的拟合,并在子孔径拼接测量中进行实时修正。

2 子孔径拼接中误差分析

如图 1 和 2 所示,标准面为低光圈(凹球面),面形系统误差为 E_{PV1} ,则拼接后的系统误差为 E_{PV2} : $E_{PV2} = E_{PV1} D_2^2 / D_1^2$,其中 D_1 、 D_2 分别为标准平面、被测平面的口径。对于子孔径拼接来讲,当被测光学元件的直径大于干涉仪的标准镜的直径时,可以发现在拼接的过程中系统误差会被放大。一般来说,当系统误差表现为二次曲面如柱面球面等情况时,就会符合上述系统误差的放大公式^[6]。

在用干涉仪测量实验中,如果要检测面形偏差相当小的平面度(与标准平晶面形相当量级),由于它的标准镜不是严格意义上的趋于理想,所以这里讨论的系统误差是指干涉仪自身标准平晶面形偏差,导致在单个

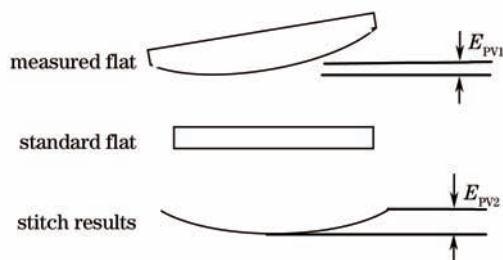


图1 标准平晶无系统误差

Fig.1 Standard flat without systematic errors

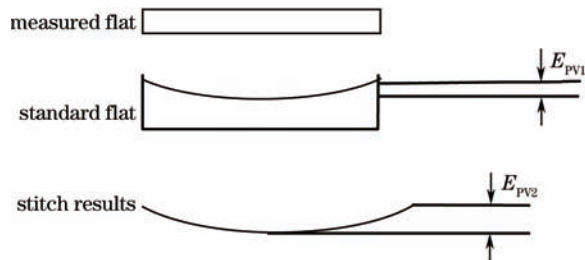


图2 标准平晶含有系统误差

Fig.2 Standard flat with systematic errors

子孔径的测试过程中,会引入标准平晶平面度的误差而无法区分。假设在子孔径拼接测量过程中不考虑其他因素造成的误差,把所有影响拼接精度的误差来源全部归结于被测试平晶的面形误差或干涉仪标准平晶面形偏差这两种情况,最后都会得到完全相同的被测波面面形,因此必须去寻找一种能够修正标准平晶的面形偏差的新方法,在拼接测试的过程中对每一个子孔径加以修正,这样才可以把拼接测试的精度提到最高。

3 三面互检的实验原理

标准平晶的面形误差有多种绝对检验方法可以获得,但在实际上除了简单的三面互检外,大多数方法均未走出实验室,其中的原因已经在引言中给出分析,因此本论文选择了传统的三面互检方法。

G.Schulz 和 J.Schwider^[7,8]提出并发展了无基准平面的绝对检验法,即三面互检法。如图 3 所示,预先利用两块辅助平晶 B、C 对参考平晶 A 进行三面四次互检的绝对检验,获得通过中心的两个垂直方向的线轮廓数据。通过增加一次测量,就可以得到参考平晶在两个垂直方向的线轮廓数据。

由于拼接子孔径是以阵列方式构建的,因此对于标准平晶的偶对称误差的敏感方向(拼接轴)在水平和垂直方向。而对平晶的绝对检验在水平和垂直两个方向上进行,则系统误差修正波面的拟合对于 $\pm 45^\circ$ 方向的控制弱,因此需要通过两个平晶的相对旋转来找到特征轴截面,利用 Matlab 做波面仿真分析如下。

首先仿真一个像散波面,如图 4 所示,波面的峰谷(PV)值 E_{PV} 为 0.025λ ,抽取其水平和垂直方向的面形数据,分别计算 E_{PV} 。把波面旋转 θ 后,得到旋转后的波面,然后在抽取其水平和垂直方向上的面形数据,分别计算 E_{PV} 。

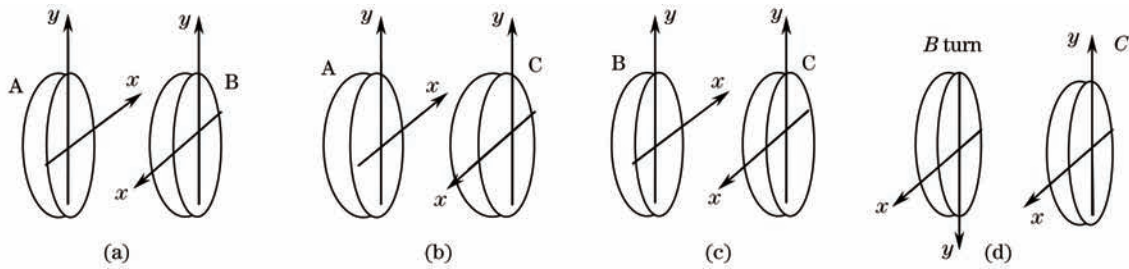


图3 三面互检示意图

Fig.3 Three-flat testing schematic of interferometer

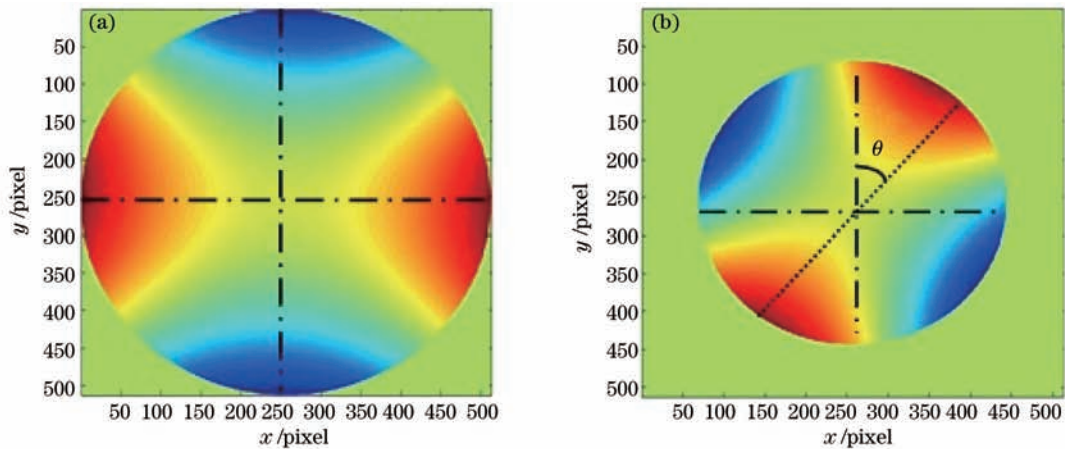


图4 原始像散波面和旋转 θ 后波面图

Fig.4 Original astigmatism wavefront and rotation θ wavefront

在波面没有旋转时,其水平和垂直方向上的面形偏差如图5所示。

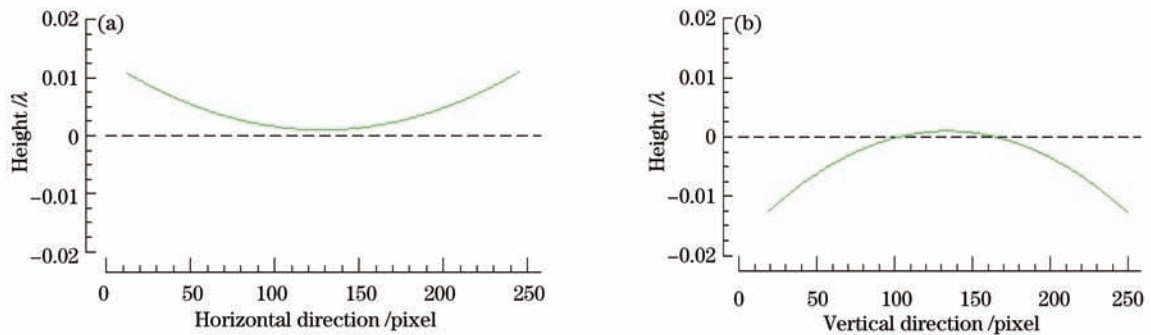


图5 水平方向($E_{pv}=0.01\lambda$)和垂直方向($E_{pv}=0.014\lambda$)面形偏差

Fig.5 Horizontal direction ($E_{pv}=0.01\lambda$) and vertical direction ($E_{pv}=0.014\lambda$) surface shape deviation

计算结果如表1所示。

表1 仿真波面特征轴上的面形偏差

Table 1 Deviation of a simulation of the surface shape on the characteristic axis

		0°	30°	45°	60°	90°
Full aperture wavefront	$X E_{pv} / \lambda$	0.010	0.006	0.001	0.007	0.014
	$Y E_{pv} / \lambda$	0.014	0.009	0.003	0.004	0.010
	Flatness estimate / λ	0.024	0.015	0.004	0.011	0.024

参考国家标准《JJG 28-2000 平晶检定规程》,评定平面度时,当所检定二截面出现的平面度符号相同时,取其中最大的绝对值为平面度;符号相反时,则取两者绝对值之和为平面度。工作面呈凸形时平面度取正号,工作面呈凹形时取负号。

从表中可以看出,随着对波面不同角度的旋转,其平面度估计大小会出现显著的变化,在没有旋转的情

况下,即波面的像散轴方向在水平(或垂直)的时候,得到的平面度估计与全口径 E_{pv} 值相对误差为0.01。这说明在三面互检之前必须要找到平晶的特征截面,通过干涉仪所测到的波面图来找出平晶像散的最大(或最小)方向,然后通过相对的旋转来标定标准平晶的像散轴方向为水平(或垂直)。

4 系统误差波面的获取

为了得到标准平晶的系统误差修正波面,就要用数学的方法来推导出泽尼克多项式系数的大小。如何求出泽尼克多项式拟合光学干涉波面的系数,在数学上有两种方法可选:1)最小二乘法,这种方法既通用又相对简洁,计算相对简单。2) Gram-Schmidt 正交化方法,这个方法被认为稳定性比较好,但是计算过程比较复杂,在绝大多数有关干涉波面拟合的文献中,几乎都采用此正交化方法。

经过研究可知,在使用最小二乘法拟合波面和使用正交化方法拟合波面时,在求解稳定的泽尼克多项式拟合系数解方面并没有太大的区别,结果是一致的。即当对一干涉波面进行拟合计算时,在实际应用中更倾向采用的算法是相对简洁的最小二乘法^[9,10]。

通过误差分析可知,根据系统误差放大公式,需要对球面、柱面等二次曲面误差进行校正,所以只考虑选择泽尼克多项式的第3、4、5项的二次低阶项(对应的离焦和像散)进行系统误差波面的拟合,并且这些初级像差在测量中方便控制,而不是对整个参考平晶的全面形波面进行拟合。

利用三面互检测得的平晶二维平面度数据,选择 Zernike 多项式的第3、4、5低阶项作为基底函数拟合,根据最小二乘法,只要求出拟合系数,就可以得到系统误差修正波面。

由于没有更高一级仪器或更好的标准样品来标定高精度干涉仪的标准平晶,为此,只能采用在理论和实践上均比较合理,并且能更客观地确定系统精度的方法。选择 Zernike 多项式的第3、4、5低阶项作为基底函数仿真一个像散波面,对该波面进行不同角度的旋转,然后抽取其垂直和水平方向数据,利用上述方法进行拟合。应用误差分析理论,通过计算拟合波面和原波面的残差均方根(RMS)来确定拟合的精度大小。结果如表2所示。

表2 仿真波面的面形偏差

Table 2 Deviation of a simulation of the surface shape

	θ	0°	30°	45°	60°	90°
Original wavefront	E_{pv1} / λ	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
	RMS1 / λ	0.004	0.003	0.003	0.003	0.004
Fitting wavefront	E_{pv2} / λ	0.024	0.012	0.017	0.021	0.026
	RMS2 / λ	0.004	0.002	0.003	0.004	0.004
Residual wavefront	E_{pv} / λ	0.018	0.019	0.019	0.021	0.017
	RMS / λ	2.85×10^{-4}	0.003	0.004	0.004	4.57×10^{-4}

由表2可知,Zernike 低阶多项式拟合的精度受到平晶像散轴方向的影响,当像散轴方向为水平或垂直的时候,即原波面没有旋转,拟合的精度可以达到 10^{-4} 量级,证明了该修正方法的有效性。这也就说明为了使拟合的精度达到最高,在三面互检实验之前需要通过对比平晶像散轴方向进行校准,找到平晶的特征轴,而不是简单抽取平晶平面内任意条线进行计算。

5 实验结果

5.1 标准平晶的系统误差修正波面

首先对平晶像散轴方向进行校准,找到平晶的特征轴,再利用对标准平晶的三面互检所测得的特征轴上的二维平面度数据,代入程序计算求得干涉仪标准平晶的系统误差,修正波面 Zernike 低阶多项式(离焦项,0/90°和 $\pm 45^\circ$ 方向像散项)的拟合系数为: $a_1=-0.001$, $a_2=0.012$, $a_3=0.001$,得到系统误差修正波面如图6所示:PV值为0.024 λ ,RMS值为0.005 λ 。

平面拼接干涉仪的拼接范围为400 mm \times 400 mm,干涉仪基本口径为 $\phi 100$ mm,测试子孔径的数目为7 \times 7,各子孔径分布如图7所示。

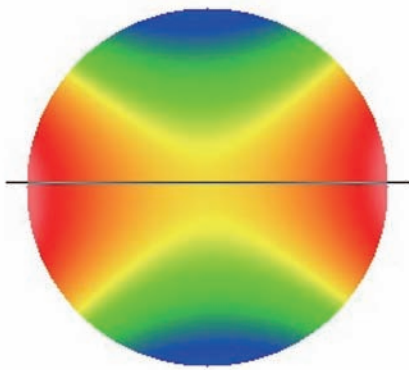


图6 系统误差修正波面图

Fig.6 Wavefront error correction system diagram

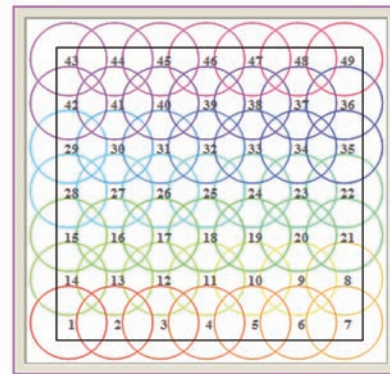


图7 子孔径分布示意图

Fig.7 Sub-aperture distribution diagram

修正系统误差的流程如图8所示。

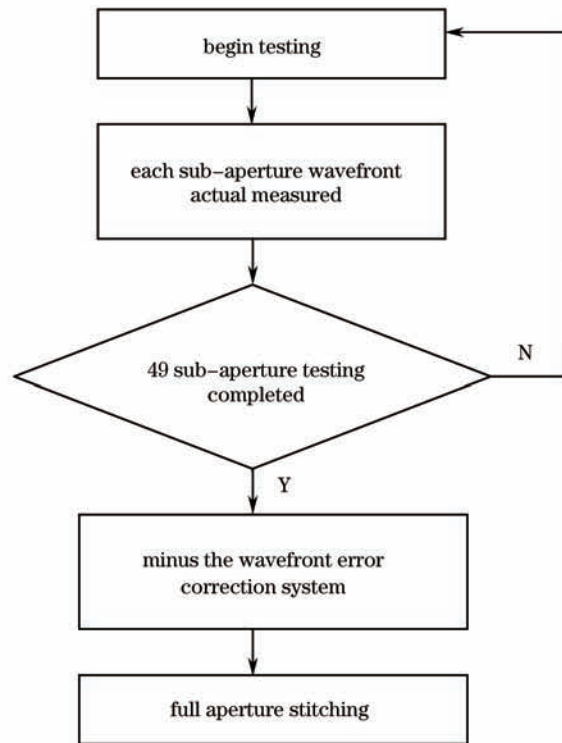


图8 子孔径拼接系统误差修正流程图

Fig.8 Stitching error correction system flowchart

5.2 对微晶平晶(口径 600 mm, 加工后 PV 值约 $1/10\lambda$) 的拼接实验

把测量得到的 49 个子孔径利用拼接软件进行拼接, 得到未修正系统误差拼接的微晶平晶全口径的波面

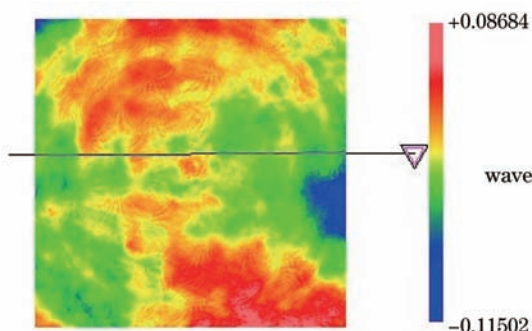


图9 未修正系统误差的拼接波面

Fig.9 Uncorrected systematic errors stitching wavefront

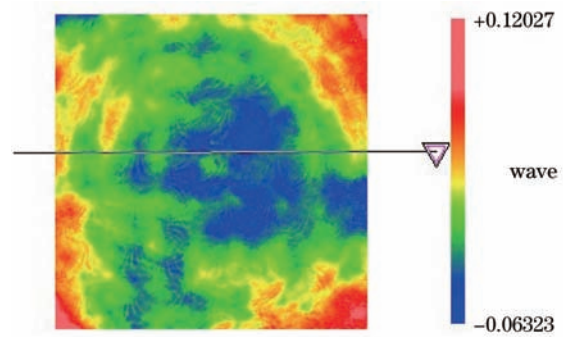


图10 修正系统误差后的拼接波面

Fig.10 Corrected systematic errors stitching wavefront

如图9所示:PV值为 0.219λ ,RMS值为 0.023λ ;修正系统误差后,拼接得到的微晶平晶全口径的波面如图10所示:PV值为 0.154λ ,RMS值为 0.016λ 。

6 结 论

由于标准平晶的偶对称误差的敏感方向(拼接轴)在水平和垂直方向,提出了在平晶特征轴上进行三面互检的方法,并建立了保障三面互检结果有效性的平面特征截面获取的基本方法。与现有的方法不同之处在于,并不是抽取平晶平面内的任意条线进行计算,而是寻找平晶的特征轴上的面形数据进行计算,提出了平晶像散轴方向校准的新方法。

用三面互检所得到的平晶在拼接轴方向上的二维平面度数据,用Zernike低阶多项式构建了系统误差修正波面。在实际研制的 7×7 子孔径平面拼接干涉仪中,可以获取干涉仪参考平晶的系统误差修正波面并进行实时的修正。该方法不仅可以消除干涉仪系统误差对测量所带来的影响,实现对被测面形的绝对准确的测量,还可以提高子孔径拼接的精度,以便能够准确高效地测量更大的面形。

参 考 文 献

- 1 Jensen S C, Chow W W, Lawrence G N. Subaperture testing approaches: a comparison [J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 740-745.
- 2 Michael Bray. Stitching interferometer for large optics: recent developments of a system [C]. SPIE, 1999, 3492: 946-956.
- 3 Masashi Otsubo, Katsuyuki Okada, Jumpei Tsujiuchi. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture inteferograms [J]. Opt Eng, 1994, 33(2): 608-613.
- 4 Zhang Rongzhu, Yang Chunlin, Shi Qikai, *et al.*. Principle and accuracy of the stitching interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1241-1244.
张蓉竹, 杨春林, 石琦凯, 等. 子孔径拼接干涉检测及其精度分析[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1241-1244.
- 5 Cheng Weiming, Lin Youlue, Chen Mingyi. Factors having influence on the accuracy of multiaperture overlap-scanning technique (MAOST) and analysis [J]. Acta Optica Sinica, 1993, 13(8): 711-716.
程维明, 林有略, 陈明仪. 多孔径扫描波面恢复技术的精度评定及影响因素[J]. 光学学报, 1993, 13(8): 711-716.
- 6 Fu Ying. The Index Homogeneity of Optical Materials Research with Sub-Aperture Stitching Technique [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
傅 英. 光学材料折射率均匀性的子孔径拼接技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- 7 G Schulz, J Schwider, C Hiller, *et al.*. Establishing an optical flatness standard [J]. Appl Opt, 1971, 10(4): 929-934.
- 8 G Schulz, J Schwider. Precise measurement of plainness [J]. Appl Opt, 1967, 6(6): 1077-1084.
- 9 Mo Weidong. Research on error and precision of the system to inspect surface of optical plane [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(7): 879-883.
莫卫东. 数字平面检测系统误差和精度评价方法的研究[J]. 光学学报, 2003, 23(7): 879-883.
- 10 Mo Weidong, Fan Qi, Qu Shaobo, *et al.*. Research on algorithm and reliability to fit interference wave surface with Zernike polynomials [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 267-272.
莫卫东, 范 琦, 屈少波, 等. 泽尼克多项式拟合干涉波面算法的等价性与可靠性研究[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 267-272.