

# 平面绝对检测闭环自检实验研究

张凌华<sup>1,3</sup>, 韩 森<sup>2,3,4</sup>, 吴泉英<sup>1</sup>, 唐寿鸿<sup>2,3</sup>, 李雪园<sup>3,4</sup>, 王全召<sup>4</sup>

(1. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215009; 2. 上海理工大学, 上海 200093;

3. 苏州慧利仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123; 4. 苏州维纳仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123)

**摘要:** 基于 Ai C 和 Wyant J C 的奇偶函数法, 提出了 4 步旋转绝对检测方法, 减少了旋转次数, 将第二次测量的旋转角度选为 90°。实验基于 HOOL L9600A-HS3 干涉仪, 采用 4 步旋转绝对检测方法, 将 3 个平面两两互检, 算出 3 个平面的绝对面形。其中平面 C 的表面面形起伏高度均方根 (RMS) 值和峰谷 (PV) 值分别为 3.460 nm 和 35.227 nm, 经闭环自检后的测量结果分别为 3.783 nm 和 34.305 nm 以及 3.669 nm 和 34.252 nm, 数据基本一致, 表明测量数据能够实现闭环自检。使用该方法对中国计量科学研究院的标准平面镜进行测量, 平面的 RMS 值和峰谷 PV 值分别为 2.400 nm 和 19.600 nm, 与该院测量结果 2.000 nm 和 16.000 nm 对比, 两者的测量偏差在 nm 量级, 充分证明了实验的有效性及高重复性; 此外实验还分析了温度对测量结果的影响。

**关键词:** 计量学; 面形测量; 4 步旋转绝对检测法; 闭环自检; 重复性

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2019)02-0208-05

## Absolute Test of Optical Planar by Closed Loop

ZHANG Ling-hua<sup>1,3</sup>, HAN Sen<sup>2,3,4</sup>, WU Quan-ying<sup>1</sup>, TANG Shou-hong<sup>2,3</sup>,

LI Xue-yuan<sup>3,4</sup>, WANG Quan-zhao<sup>4</sup>

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China; 2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Suzhou H&L Instruments LLC, Suzhou, Jiangsu 215123, China; 4. Suzhou W&N Instruments LLC, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

**Abstract:** Based on the Ai C and Wyant J C method of odd and even functions, a four-step rotary absolute test method is proposed to reduce the number of rotations and select the rotation angle of the second measurement as 90°. Experiment is based on HOOL L9600A-HS3 interferometer, using four-step rotation absolute measurement method, the three planes test with each other to calculate the absolute surface of the three planes, in which the plane C surface topography height root mean square (RMS) value and peak valley (PV) are 3.460 nm and 35.227 nm. After closed-loop self-test, measurement results are 3.783 nm and 34.305 nm, 3.669 nm and 34.252 nm, it indicating that the measurement data can be closed-loop self-test. Using this method, the plane of National Institute of Metrology in China is measured. The RMS value and the PV value of the plane are 2.400 nm and 19.600 nm, respectively, which are compared with the measurement results of 2.000 nm and 16.000 nm of National Institute of Metrology. The measurement deviation is on the order of nm, the measurement results fully proves the effectiveness of the experiment and high repeatability. In addition, the experiment also analyzes the influence of temperature on the measurement results.

**Key words:** metrology; surface topography; four-step rotary absolute test method; closed-loop self-test; repeatability

## 1 引言

在光学加工领域, 光学检测的水平决定了光学加工的水平。面形检测分为相对检测和绝对检

测<sup>[1]</sup>。相对检测将被测面面形相对于参考面面形的偏差作为检测结果, 参考面的面形误差被叠加到测量结果中, 所以测量精度受到参考面面形精度的制约。高精度光学平面的加工必须要有更高精度的检测技术作为支撑<sup>[2]</sup>。光学干涉测量方法是检测

高精度光学平面的有效手段。在干涉测量中, 检验一块高精度的平面需要更高精度的平面作为参考基准<sup>[3,4]</sup>。当面形检测的峰谷(peak valley, PV)值要求高于 $\lambda/30$  ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ), PV值 $\lambda/20$ 的标准参考面已经不能满足测量精度的要求, 这就提出了光学平面的绝对检测要求。绝对检测消除了参考面面形误差和干涉仪系统误差的影响, 得到被测面形形的绝对值。检测精度可达到纳米量级, 基本能满足现代光学制造的高精度面形检测需求<sup>[5,6]</sup>。绝对检测是面形的溯源方法, 绝对检测的精度直接影响面形检测以及加工的精度<sup>[7]</sup>。

关于绝对检测的研究一直是光学领域的一个热点。1967年和1971年, Schulz G和Schwider J<sup>[8]</sup>等人提出并发展了传统的三平面绝对检测, 可得到平面上沿径向轴线上的绝对面形分布, 但在检测全口径绝对面形分布时需要增加较多的测量次数; 1984年, Keenan P B<sup>[9]</sup>提出了一种伪剪切干涉计量测试技术, 通过两平面在互相垂直的方向平移相减再累加求出被检平面的绝对面形分布; 1984年, Fritz B S<sup>[10]</sup>提出了泽尼克多项式拟合法, 结合最小二乘法拟合成被检平面的绝对面形; 1992年, Ai C和Wyant J C<sup>[11]</sup>提出了奇偶函数法, 这种方法将平面面形分解为偶-奇、奇-偶、偶-偶、奇-奇函数项, 再根据6次测量的结果分别求出这4项的值, 然后相加得到平面绝对面形; 2001年由Freischlad K R<sup>[12]</sup>提出了旋转剪切的方法, 这种方法也是在传统三平面绝对检测的基础上提出的。国内研究多是在伪剪切法和三表面互检法的基础上进行的<sup>[13-15]</sup>。

经绝对检测得到的绝对面形结果能够实现闭环自检是本文实验的最终目的。基于此目的, 本文运用HOOL L9600A-HS3干涉仪搭建了实验系统进行测量。实验结果验证了经4步旋转绝对检测方法<sup>[16-18]</sup>得到的绝对面形结果能够实现闭环自检, 表明该方法可以消除干涉仪器的系统误差和参考平面误差对测量结果的影响, 得到被测平面的绝对面形。

## 2 测量原理

实验的研究方法是基于Ai C和Wyant J C的奇偶函数法<sup>[11]</sup>。用奇偶函数法得到平面绝对面形, 需进行6次组合, 旋转3次( $180^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ )。多次组合, 受环境因素影响大; 多次旋转, 测量误差大。为了减小旋转和环境因素对测量结果的影响, 实验设计了4步旋转绝对检测法, 将6步相互测量减至4

步测量, 第2步测量的旋转角度选择 $90^\circ$ 。

首先设3个平面A、B、C, 如图1所示, X、Y表示平面方向。将这3个平面两两进行干涉, 得到4组干涉测量后的数据, 测量步骤如图2所示, 其中平面A顺时针旋转 $90^\circ$ 得到 $A^{90}$ , 平面B与平面C沿X轴翻转得到 $B^X$ 与 $C^X$ 。在所有组合中,  $B^X$ 与 $C^X$ 为参考镜。

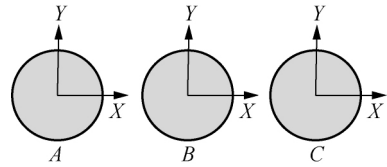


图1 3个平面正视图

Fig. 1 Front view of three planes

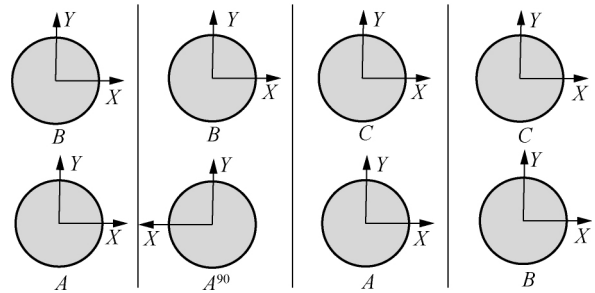


图2 4步旋转测量方法

Fig. 2 Four steps rotation measurement method

4步旋转测量方法的函数表示为:

$$\begin{aligned} M_1 &= A + B^X, & M_2 &= A^{90} + B^X, \\ M_3 &= A + C^X, & M_4 &= B + C^X \end{aligned} \quad (1)$$

在笛卡尔坐标系中, 任何平面可以表示为奇偶项、偶奇项、偶偶项和奇奇项之和, 即:

$$\begin{aligned} A &= A_{ee} + A_{oe} + A_{eo} + A_{oo} \\ B &= B_{ee} + B_{oe} + B_{eo} + B_{oo} \\ C &= C_{ee} + C_{oe} + C_{eo} + C_{oo} \end{aligned} \quad (2)$$

但是各分量之间是线性相关的, 因此无法从新的函数式中求解奇奇项分量。直角坐标系中的奇奇项函数在极坐标系中是关于 $\theta$ 的奇函数, 其基频为 $2$ (周期为 $180^\circ$ )。因此 $F_{oo}(x, y)$ 可以用Fourier级数表示为:

$$\begin{aligned} F_{oo}(x, y) &= \sum_{m=1} f_{2m} \sin(2m\theta) \\ [F_{oo}(x, y)]^{90^\circ} &= - \sum_{m=\text{odd}} f_{2m} \sin(2m\theta) + \sum_{m=\text{even}} f_{2m} \sin(2m\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: odd表示奇数; even表示偶数;  $f_{2m}$ 是相应的展开项系数。 $F_{oo}(x, y)$ 加入下标 $2\theta$ , 因此式(3)可以写成:

$$F_{oo} = F_{oo\ 2\theta} = F_{oo\ 2odd\theta} + F_{oo\ 2even\theta} \quad (4)$$

$$[F_{oo}]^{90^\circ} = -F_{oo\ 2odd\theta} + F_{oo\ 2even\theta}$$

对于光滑的表面,取  $F_{oo\ 2odd\theta}$  项就可以描述平面的奇奇项分量了。通过旋转  $90^\circ$  可以求出 3 个平面的奇奇项分量中的  $2odd\theta$  项。

因此通过 4 次组合测量就能得到 3 个平面的绝对面形误差分布,即:

$$A = A_{ee} + A_{oe} + A_{eo} + A_{oo\ 2odd\theta}$$

$$B = B_{ee} + B_{oe} + B_{eo} + B_{oo\ 2odd\theta} \quad (5)$$

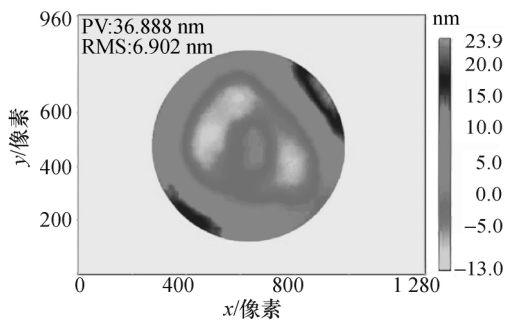
$$C = C_{ee} + C_{oe} + C_{eo} + C_{oo\ 2odd\theta}$$

闭环自检是一个全新的概念,测量结果能否实现自检是进一步检验绝对检测方法的准确性的关键。相对测量结果减去任意面的绝对面形得到的是被测面的面形,再将此面形结果与经三表面互检计算得到的绝对面形进行比较,如果一致,表明测量数据能够实现闭环,也能进一步验证 4 步旋转绝对检测方法的正确性和可行性。

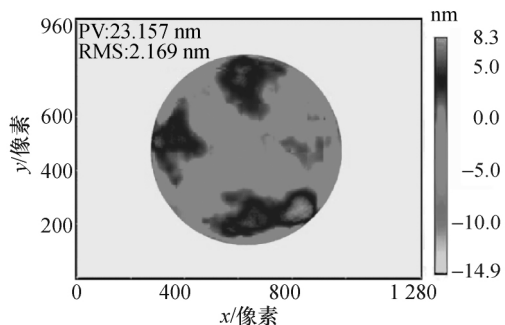
### 3 实 验

根据 4 步旋转绝对检测方法,选取标准平面镜 A、标准平面镜 B、标准平面镜 C 在 HOOL 干涉仪上进行实际测量。图 3 为标准平面镜 A、B、C 经 4 步旋转绝对检测法计算得到的绝对面形, PV 值分别为 36.888 nm、23.157 nm 和 35.227 nm, RMS 值分别为 6.902 nm、2.169 nm 和 3.460 nm。PV 值指波前的最高点与最低点的差值,通常被用于描述元件或系统的光学质量; RMS 表示波前的均方根误差 (root mean square)。这两个数值被用来评价实验数据的可重复性和实验检测精度。

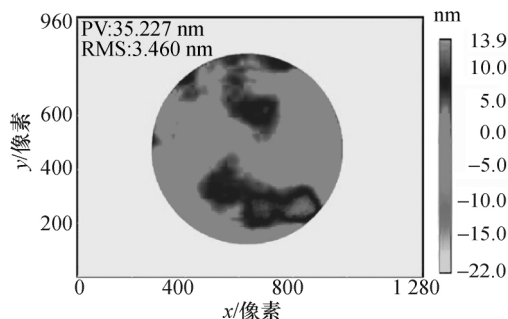
既然 4 步旋转绝对检测消除参考镜和干涉仪系统误差,那么任意一组测量结果去除参考镜的绝对面形后的结果应该等于被测平面经 4 步旋转绝对检测的面形结果。如果结果一致,那么经 4 步旋转绝对检测方法得到的绝对面形结果能够实现闭环自检,可进一步验证四步旋转绝对检测的正确性和可行性。图 4 是将相对测量结果减去任一标准平面镜绝对面形后的结果,不难发现,平面镜 C 与平面镜 A 的相对测量结果减去平面镜 A 的绝对面形,平面镜 C 与平面镜 B 的相对测量结果减去平面镜 B 的绝对面形以及平面镜 C 的绝对面形,3 者 PV 值和 RMS 值均很接近,且面形比较一致,实验结果验证了经 4 步旋转绝对检测方法得到的平面绝对面形能



(a) 标准平面镜 A 绝对面形



(b) 标准平面镜 B 绝对面形



(c) 标准平面镜 C 绝对面形

图 3 A、B、C 绝对面形

Fig. 3 Surface profile of flat A, B and C

够实现闭环自检。

为了进一步验证 4 步旋转绝对检测方法,将实验设备与经中国计量科学研究院(简称计量院)测量的标准平面镜放在同一环境下,恒温 24 h 后进行测量比对。将 HOOL L9600A-HS3 干涉仪光轴水平放置,采用 4 步旋转测量法( $90^\circ$ 转位)测量计量院某标准平面镜,其测量结果为  $PV = 19.600$  nm,  $RMS = 2.400$  nm; 计量院 Zygo GPI 系统采用全表面绝对法( $60^\circ$ 多转位)的测量结果为  $PV = 16.000$  nm,  $RMS = 2.000$  nm。两者测量结果接近。

### 4 温度对测量结果的影响

实验过程中为尽量减小周围环境温度的变化对

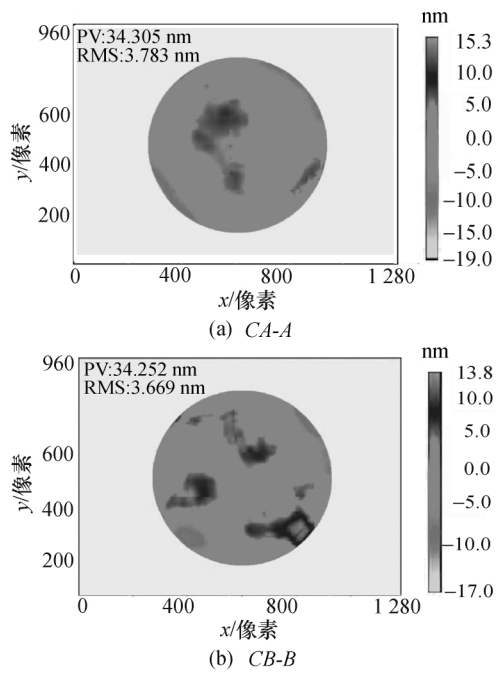


图 4 闭环自检结果

Fig. 4 Results by closed loop test

平面的表面形貌造成影响,不仅减少人为因素的扰动,而且尽可能保持恒温恒湿。当平面周围温度变化时,因为应力的存在,平面会发生翘曲或变形,其表面形貌的变化会对测量结果造成一定的影响。平面镜材料的不同,温度变化造成的影响也不相同。为了减少温度变化产生的应力影响,应选择导温率较高的材料进行绝对检测。导温率不同于热导率,它表征材料中热量的得失产生的温度升降的快慢的能力,导温率 $\alpha$ 和热导率 $\lambda$ 成正比,而与材料的比热 $c$ 和密度 $d$ 成反比,即:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot d} \quad (6)$$

由式(6)可以看出:当平面周围温度变化时,选用的平面材料的导温率越高,温度变化对测量结果的影响越小。因为当除了温度条件以外的各条件均相同时,导温率高的平面可以较快地均衡某两点之间的温度变化,形成较小的温差。

表 1 为使用熔融石英材料和 K9 材料加工的平面温度变化与测量结果的关系。温度条件为:超净实验室的温度处于变化的状态,温度从 20℃ 上升到 25℃。表中 $\Delta PV$ 值为 PV 值的变化量。

当恒温温度从 20℃ 上升到 25℃ 时,由表 1 可看出:熔融石英材料测量干涉图的 PV 值变化约为 7.594 nm; K9 材料测量干涉图的 PV 值变化约为 52.522 nm。可见在高精度测试过程中,使用熔融石

英材料并采用一定的温控措施,在干涉图稳定的情况下进行多次测量,通过平均效应就可有效降低温度变化带来的影响。以 20℃ 时多次测量的平均值作为参考值,将不同温度时的测量结果与参考值进行点对点相减,获得表面形貌的变化值,见图 5。

表 1 温度变化与面形测试结果

Tab. 1 Results of temperature change and surface test nm

测试 序号	温度 /℃	熔融石英材料		K9 材料	
		PV 值	$\Delta PV$ 值	PV 值	$\Delta PV$ 值
1	20	24.046	参考值	36.070	参考值
2	20	24.679	0.633	42.398	6.328
3	20	25.945	1.899	49.359	13.289
4		27.843	3.797	62.014	25.944
5	25	29.742	5.696	69.608	33.538
6	25	31.640	7.594	88.592	52.522

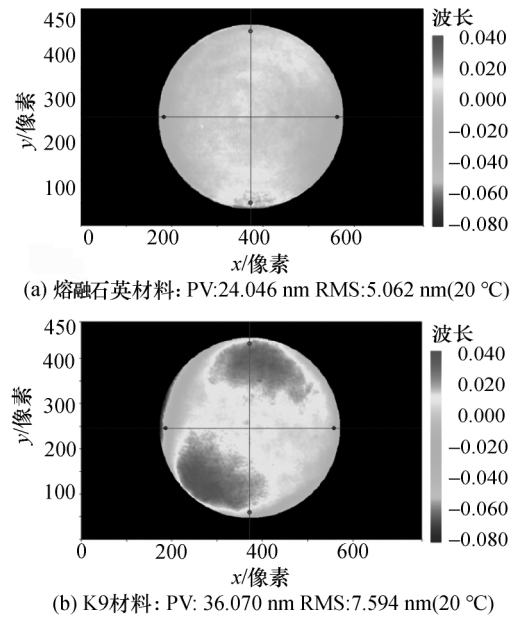


图 5 20℃ 时两种镜面材料的测量结果

Fig. 5 Test results of two different materials in 20℃

## 5 结 论

平面绝对检测可减小干涉仪器的系统误差和参考平面误差对测量结果的影响,得到被测平面的绝对面形,而闭环自检可以验证测量数据和测量方法是否正确。

4 步旋转绝对检测法,其优势为:减少旋转次数可以降低工作量,减少组合次数可以减少环境因素对整个测量结果的影响。基于 HOOL L9600A-HS3

数字化激光干涉仪,使用十字线校准装置进行中心定位,利用旋转装置对平面进行 $90^\circ$ 旋转,从而得到误差较小的实验结果。本文使用4步旋转绝对检测法对3个高精度平面镜进行测量的结果,以及利用该方法对计量院某标准平面镜测量结果的比对,验证了该方法的有效性和可行性,可为高精度光学平面面形的测量提供有效的方法。

#### [参 考 文 献]

- [1] 徐洋,唐锋,王向朝,等. 平面面形绝对检验技术测量误差分析[J]. 中国激光, 2011, 1008009: 21-26.  
Xu Y, Tang F, Wang X C, et al. Measurement error analysis of absolute flatness surface test [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2011, 1008009: 21-26.
- [2] 孙文卿,陈磊,徐晨. 两平晶方法平面绝对检验技术[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 326-330.  
Sun W Q, Chen L, Xu C. Absolute measurement of planarity with two-flat test [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)* 2010, 40(1): 326-330.
- [3] 张之江,于瀛洁,张善钟. 高精度平面度测量方法的研究[J]. 计量学报, 2000, 21(2): 119-124.  
Zhang Z J, Yu Y J, Zhang S Z. Study on the Method of High Accuracy Flatness Measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica* 2000, 21(2): 119-124.
- [4] 张恒,黄杨,康岩辉. 高精度激光平面干涉测量系统误差的研究分析方法[J]. 计量学报, 2010, 31(1): 124-127.  
Zhang H, Huang Y, Kang Y H. The Error Analysis Method for a Laser Plane Interferometer [J]. *Acta Metrologica Sinica* 2010, 31(1): 124-127.
- [5] 苏东奇. 光学面形绝对检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [6] 朱郁葱,杨国光,董太和. 标准光学面形的建立与绝对检测[J]. 计量学报, 1989, 10(4): 285-289.  
Zhu Y C, Yang G G, Dong T H. Absolute Calibration and Fabrication of Standard Optical Surface [J]. *Acta Metrologica Sinica* 1989, 10(4): 285-289.
- [7] Liu Xiao mei. Absolute measurement of optical flat [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004.
- [8] Schulz G, Schwider J. Precise measurement of planeness [J]. *Applied Optics* 1967, 6(6): 1077-1084.
- [9] Keenan P B. Pseudo-shear interferometry [C]//Proceedings of SPIE, 1983, 429: 2-9.
- [10] Fritz B S. Absolute calibration of an optical flat [J]. *Opt Eng* 1984, 23(4): 379-383.
- [11] Ai C, Wyant J C. Absolute testing of flats decomposed to even and odd function [C]//Proceedings of SPIE, 1992, 1776: 73-83.
- [12] Klaus R. Freischlad. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear [J]. *Applied Optics* 2001, 40(10): 1637-1648.
- [13] 孙佳媛,陈磊,徐晨. 平晶平面度测量方法的研究[J]. 计量学报, 2010, 31(1): 204-207.  
Sun J Y, Chen L, Xu C. Study of Planeness Measurement of Optical Flat [J]. *Acta Metrologica Sinica* 2010, 31(1): 204-207.
- [14] 郑显锋,田爱玲,刘丙才,等. 三平面互检方法的研究[C]//2011 西部光子学学术会议论文摘要集,西安, 2011.
- [15] 田爱玲,郑显锋,刘丙才,等. 三维面型的绝对测量[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(6): 431-436.  
Tian A L, Zheng X F, Liu B C, et al. An absolute measurement of three-dimensional shape [J]. *Journal of Xi'an Technology University* 2012, 32(6): 431-436.
- [16] Han S, Novak E. High accuracy absolute flatness testing using a commercial interferometer [C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4231: 277-282.
- [17] 贾辛,邢廷文,魏豪明,等. 采用奇偶函数法的平面面形绝对测量技术仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 500-505.  
Jia X, Xing T W, Wei H M, et al. Analysis and simulation of absolute test of flats decomposed to even and odd functions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 500-505.
- [18] 李宇琛,韩森,吴泉英,等. 基于奇偶函数法的绝对检测实验研究[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 469-475.  
Li Y C, Han S, Wu Q Y, et al. Absolute test of flats based on even or odd functions [J]. *Journal of Applied Optics* 2017, 38(3): 469-475.



第一作者: 张凌华(1992-),江苏泰兴人,苏州科技大学硕士研究生,主要研究方向为面形检测。

Email: 1206690210@qq.com



通信作者: 韩森(1961-),黑龙江哈尔滨人,上海理工大学教授,主要从事光学精密测量技术方面研究。

Email: senhanemail@126.com