

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.02.01

光学面形绝对检测方法发展综述

胡源, 侯禛敏*, 蒋红梅

(长春理工大学 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 详细介绍了三平(球)面互检法、双球面法、旋转平均法、平移差分法(伪剪切干涉法)、奇偶函数法、随机球法和旋转平移法等光学面形绝对检测方法的测量原理, 针对不同方法简述了国内外绝对检测技术的发展动态, 并对比了不同绝对检测方法的适用领域以及存在相应的技术限制。从物理实现和算法两方面对绝对检测技术的未来发展趋势进行展望, 提出了通过提高外部机械结构精度来增加面形绝对检测精度, 分析了深度神经网络算法与计算光学成像技术两种方法在绝对检测过程中的优势, 并提出通过将两种方法与绝对检测技术相结合可进一步提高光学面形的绝对检测精度, 为绝对检测相关领域的研究提供有益参考。

关键词: 光学测量; 绝对检测; 面形精度

中图分类号: TB96; O436; TN247

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 02-0001-12

Review on the development of optical surface absolute detection methods

HU Yuan, HOU Zhenmin*, JIANG Hongmei

(Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: This paper makes a detailed introduction to the measurement principles of the optical surface absolute detection methods such as three-plane (spherical) mutual detection method, bispherical method, rotating average method, translational difference method (pseudo-shear interference method), parity function method, random ball method and rotation-translational method. It also describes the development status of absolute detection methods at home and abroad, and discusses the application fields of each absolute detection method and the corresponding technical limitations by comparison. Then it makes prospects to the future trends of absolute detection technology from both physical implementation and algorithmic perspectives and proposes to increase the absolute detection accuracy of surface shape by improving the accuracy of external mechanical structure. Finally, it analyzes the advantages of deep neural network algorithm and computational optical imaging technology in the absolute detection process, and proposes that the absolute detection accuracy of optical surface shape can be further improved by combining the two technologies with the absolute detection methods. It can provide a useful reference for the research of absolute detection.

Key words: optical measurement; absolute detection; surface accuracy

0 引言

目前光学加工领域中, 光学检测的水平决定

了光学加工的水平。如果光学加工的面形残差均方根值误差不超过 ± 1 nm, 检测的面形残差均方根值误差不超过 (0.4 ± 0.1) nm。绝对检测在光学面

收稿日期: 2024-03-16; 修回日期: 2024-03-29

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20240101360JC)

引用格式: 胡源, 侯禛敏, 蒋红梅. 光学面形绝对检测方法发展综述[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 1-12.

Citation: HU Y, HOU Z M, JIANG H M. Review on the development of optical surface absolute detection methods[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 1-12.



形检测中扮演着关键源头角色,其精度效能直接影响几何测量与制品加工的精确度层级。光学干涉仪的精度受制于基准镜片的质量,因此,研究者们利用绝对检测技术进行多次测量的数据整合,旨在抵消或最小化参考面的微小失真效应。这一方法显著提高了面形检测精度,且特别适用于高精度光学元件的制造。

绝对检测的思路最早起源于1893年,当时, RAYLEIGH L^[1-3]提出了液面基准法,该方法将液体平面作为干涉测量的参考平面,当液体尺寸较小时,液面非常接近于理想平面,可有效减少参考平面的偏差。此后,陈进榜、POWELL I等人^[4-5]利用液面基准法对光学平面进行标定。在此基础上, VANNONIAND M、武旭华等人^[6-7]对液面稳定性进行研究,陈佳等人^[8]通过设计对比实验,分析了影响液面平整度与稳定性的重要因素。

由于液面基准法易受外界环境因素的影响,液面在检测过程中很难保持稳定,振动、温度和灰尘颗粒等因素均会对平面的检测精度造成很大影响。为了消除参考面误差对检测结果的影响,研究学者提出了三平面互检法,推动绝对检测研究迈出了关键性的一步。三平面互检法虽然无法满足全口径面形测量需求,但可作为其他绝对检测技术的精度衡量标准。此后,双球面法、旋转平均法、平移差分法、奇偶函数法、随机球法和旋转平移法也被陆续提出,这些方法消除了参考镜的面形偏差,从而得到全口径面形结果。

本文以面形绝对检测为研究方向,对现阶段使用的各类绝对检测方法进行综述。首先对多种绝对检测法的基本原理、优缺点以及应用领域进行系列讨论,然后对绝对检测方法进行对比分析,最后对绝对检测技术在先进光学制造及光学元件检测领域的应用现状进行总结,探讨当前绝对检测技术发展存在的问题,对未来绝对检测技术的研究方向进行展望。

1 绝对检测方法

光学干涉检测以标准镜为基准实现测量,干涉仪的测量精度主要受标准镜面形精度的限制。绝对检测技术的优势在于能够消除标准镜面形误

差的影响,因此在高精度面形检测领域备受关注。国内外关于绝对检测技术的研究如图1所示,主要包括三平(球)面互检法、双球面法、平移差分法(单边平移差分法和共轭平移差分法)、旋转平均法、奇偶函数法、随机球法和旋转平移法。

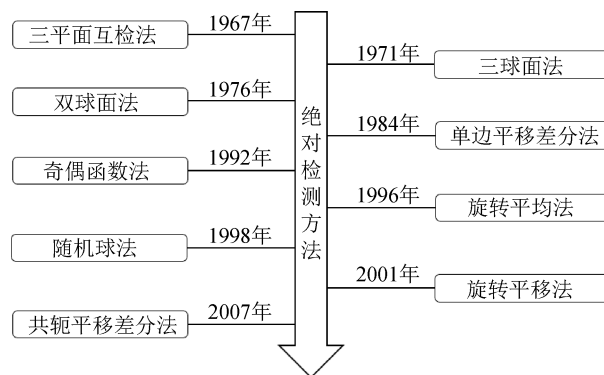


图1 绝对检测技术发展历程图

Fig.1 Chronological chart of the evolution of absolute detection technology

1.1 三平(球)面互检法

三平面互检法及其变形方法是最经典、最常用的绝对检测方法^[3, 9-23]。SCHULZ G、SCHWIDER J等人^[24]于1967年提出了三平面互检法,该方法将3个口径一致且面形精度近似的平面镜两两组合进行测量,通过简单的运算可以分别得到3个平面在轴线方向上的轮廓线面形信息。3块平面镜编号依次设为A_镜、B_镜、C_镜,测量过程中对3个平面镜进行两两组合测量,得到3个干涉波面 $D(x, y)$ 、 $E(x, y)$ 、 $F(x, y)$,检测过程如图2所示。

如图3所示,再增加一组测量,将光学平面A

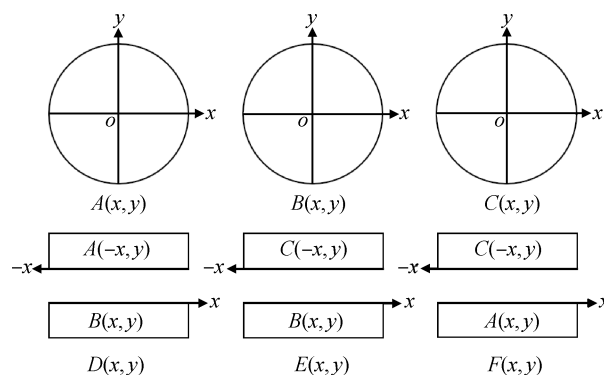


图2 三平面互检法测量示意图^[25]

Fig.2 Measurement diagram of three-plane mutual detection method^[25]

以几何中心为轴旋转 180° ，得到另一个波面 $G(x, y)$ ，即

$$G(x, y) = C(-x, y) + A(-x, -y) \quad (1)$$

通过4次相对测量及数据运算，可以获得各平面沿正交方向的绝对面形信息。

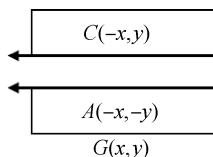


图3 被测镜旋转 180° 示意图

Fig.3 Schematic diagram of 180° rotation of measured mirror

三平面互检法能够快速获得3个平面镜在坐标轴方向上的轮廓线，但无法获取整个光学元件的面形分布，无法满足对全口径面形测量需求。然而，由于其理论精度较高且不涉及近似误差，可作为其他绝对检测技术的精度衡量标准，是面形绝对检测对比分析的理想方法。

HARRIS J S 等人^[26]于1971年将三平面法引入球面检测领域，发展成三球面法。ELSSNER K E 等人^[27]于1989年对三球面法进行了详细的理论研究和实验测试，该方法需要将被测镜旋转多个角度进行测量，以获取近似完整面的数据，同时，需要额外的2个参考面，导致测量误差的来源较复杂。

在传统三平面法的基础上，通过结合不同算法提高检测精度。1984年，FRITZ BERNARD S^[28]提出了基于Zernike多项式拟合的三平面绝对检测法，通过Zernike多项式拟合复原波面，得到面形数据。基于Zernike多项式拟合的波面复原法，利用Zernike多项式表述光学平面面形，将Zernike多项式代入平移剪切法的组合检测过程，建立关于Zernike多项式的方程式，通过求解Zernike多项式系数，拟合得到被测镜全口径面形数据。

2009年，徐晨等人^[29]提出了一种基于两平面的绝对检测技术，有效解决了因寄生条纹影响而导致的被测镜前后表面绝对面形难以测量的问题。2013年，苏东奇^[30]通过对3组差分面形的Zernike多项式拟合，实现了对被测面绝对面形的重建，并定量分析了定位误差、被测面面形分布及Zernike多项式项数的选取等因素对重建面形结果

的影响。同年，HAN Z G 等人^[31]提出了基于三面互检法的斜入射法，通过斐索干涉仪进行1次干涉测量和2次斜入射测量，用Zernike方法得到整个待测面的绝对面形分布。

高飞等人^[32]在2017年利用Zernike多项式拟合三平面互检法，对光轴偏离、旋转角度以及有效面积对不同面形精度平面的测量误差影响进行了理论分析。研究表明，旋转角度误差和有效面积对测量精度无明显影响，而光轴偏离对测量精度影响较明显，在高精度面形绝对检测中应对其进行严格校准。

1.2 双球面法

1976年JENSEN A E^[33]提出了基于三位置的双球面法，该方法至少要将被测面做1次平移和1次旋转，如图4所示，3处位置分别为 0° 的初始位置、旋转 180° 后的旋转位置以及猫眼位置（被测面顶点位置）。这种方法利用双球面法对多方位数据进行采集，能够有效消除非接触区域的参考面形差异。然而，由于旋转向心点定位的不确定性，猫眼位

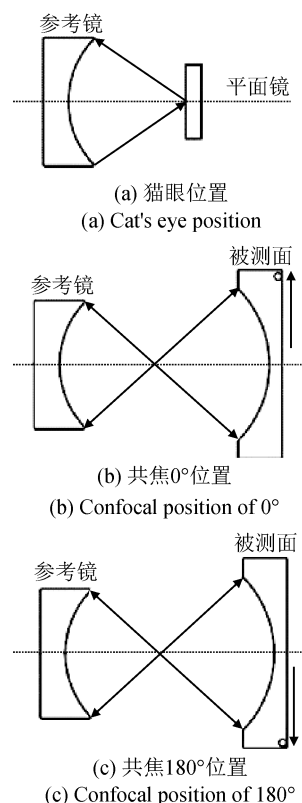


图4 三位置双球面法绝对检测示意图^[33]

Fig.4 Schematic diagram of absolute detection by three-position bispherical method^[33]

置与其旋转 180° 后得到的平均值可能产生测量偏移, 导致测量结果存在一定误差。

在三位置双球面法的基础上, SELBERG L A^[34]于1994年提出了基于五位置的双球面法, 该方法增加了 90° 和 270° 两处旋转角度测量, 消除了旋转轴和光轴之间未对准的影响。SCHREINER R 等人^[35-37]于2008年结合奇偶函数法改进了三位置法中猫眼位置的测量方法, 在测量猫眼位置时, 将遮挡板置于参考镜前挡住一半入射光。该方法虽避免了猫眼位置的非共光路误差, 但因遮挡板衍射效应会牺牲一些检测精度。

2011年, HOU X (侯溪) 等人^[38]提出了双球面法误差分配和控制方法, 发展了结合猫眼测量迭代寻优方法以及高精姿态控制系统的双球面法绝对检测技术系统, 并且提出基于多特征匹配的数据处理优化算法, 该算法具有更好的稳定性。

由于猫眼位置的测量属于非共光路测量, 存在猫眼位置的调整误差, 测量精度受到了很大的制约。双球面法猫眼位置的测量很容易产生像散和球差, 因此研究学者提出通过旋转方法^[10, 39-43]避免测量猫眼位置产生误差。

1.3 旋转平均法

旋转法最早由 ROBERT E P^[44]于1978年提出。该方法一经提出就受到了学者们的广泛关注。经过大量扩展和深入研究后, 旋转法多与三平面互检法和平移剪切法结合使用^[39, 45-47]。1996年, EVANS C J 和 KESTNER R N^[48]提出了旋转平均法, 其测量原理如图5所示。

旋转平均法需要将被测面绕光轴进行多次等

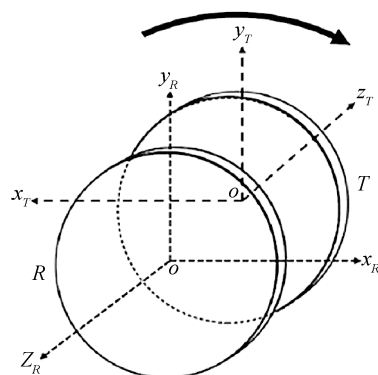


图5 旋转平均法检测示意图^[49]

Fig.5 Diagram of detection using rotating average method^[49]

间隔的旋转测量。设测量次数为 N , 每次的旋转角度为 $\phi = 2\pi/N$, 则 N 个测量结果为

$$\begin{cases} W_1 = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta) \\ W_2 = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta + \phi) \\ \vdots \\ W_N = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta + (N-1)\phi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: W 为测量结果, R 为参考面面形误差, T 为被测面面形误差, R 、 T 均用极坐标表示。

被测面表示为旋转对称项和非对称项之和, 则可得 N 个测量结果的平均值, 将测量数据进行平均作差即可得到较为完整的面形信息。

旋转平均法的面形计算结果存在一个缺陷, 即会丢失有关 $kN\theta$ 项的旋转非对称面形信息。理论上, 旋转次数 N 值越大, 实验丢失的面形信息越少。然而, 如果旋转次数过多, 计算机运算中的旋转插值误差会增加, 同时实验中引入外部误差的概率也会增大。通常情况下, 选择8次及以上旋转次数可以满足检测精度的要求。

针对旋转平均法存在的面形缺失问题, SONG W H (宋伟红) 等人^[50]于2013年提出了一种改进算法, 该算法能够补偿 $kN\theta$ 项的角度误差, 从而提高旋转对称项的解算精度。此外, 张艳微等人^[51]提出 $N+1$ 次旋转法, 通过增加一次额外角度的旋转数据求解幅角为 $kN\theta$ 的面形信息, 从而对旋转非对称面形进行有限次的 $kN\theta$ 项面形补偿。

2014年, HE Y H 等人^[52-53]提出奇偶迭代算法, 提升了迭代算法的计算效率, 并在2016年通过仿真实验验证了旋转平移法的迭代计算方法在处理非旋转对称和旋转对称两部分绝对面形分布时的可行性。

2022年, 李若琨等人^[54]在奇偶函数法与 N 次旋转法的算法仿真过程中加入待测平晶重力形变的有限元分析, 并对100 mm口径平晶进行奇偶函数法与 N 次旋转法实验, 将面形恢复结果与液面法测量结果对比, 研究表明存在重力影响时, N 次旋转法恢复面形精度优于奇偶函数法。

1.4 平移差分法

1.4.1 单边平移差分法

在光学领域, 单边平移差分法又称伪剪切干涉 (Phantom Shear Interferometry, PSI), 它通过水平

方向的轻微位移生成差分面图,接着使用波面重建技术集成这些差分信息,求解出绝对面形。该方法基于斐索光路对平面光学元件进行面形检测,通过组合测量消除参考镜面形误差影响,实现对被测镜的绝对面形测量或对参考镜进行原位标定。其光路图如图6所示。

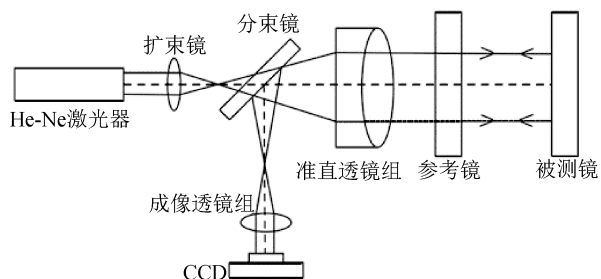


图6 斐索干涉光路图

Fig.6 Light path of Fizeau interference

KEENAN P B^[55]在1984年首先提出基于两平晶的单边平移差分法,对被测镜进行1次原位测量和2次平移测量,对采集到的3组相对干涉结果进行差分 and 积分数据处理后,计算得到被测镜的绝对面形误差,其测量原理如图7所示。

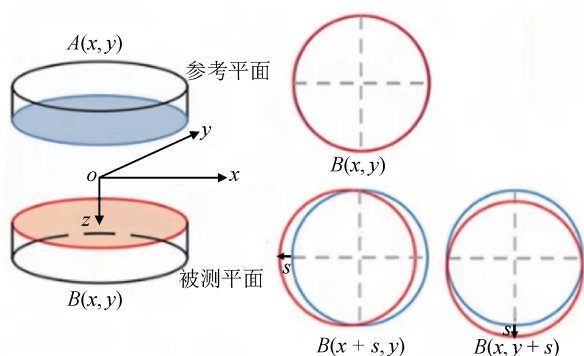


图7 单边平移差分法测量原理图^[61]

Fig.7 Measurement principle of single side translation difference method^[61]

1989年,朱郁葱等人^[56]对平移差分法的重建过程进一步研究,实验表明基于路径积分法的平移差分测量误差不超过 $\pm \lambda / 100$ (λ 为波长, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$),并利用参考面为 1λ 的低精度干涉仪,实现了对峰谷值(Peak to Valley, PV)为 $\lambda / 50$ 的高精度标准平面镜的测量。

1.4.2 共轭平移差分法

共轭平移差分法在单边平移差分法的基础上

对其进行优化,通过被测镜相对参考镜正交方向上的共轭移动,提高平面镜的面形检测精度。图8为共轭平移差分法的测量原理图。

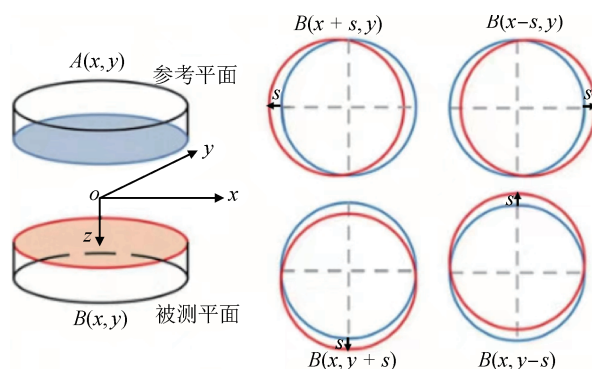


图8 共轭平移差分法测量原理图^[61]

Fig.8 Measurement principle of conjugate translation difference method^[61]

FRANCK M等人^[57]在2007年基于傅里叶积分的共轭平移差分法对600 mm大口径标准平面镜进行面形标定,并对平移量进行优化选取,实验表明平移量越小,面形重建丢失的频谱成分越少。2011年,MA J(马骏)等人^[58]提出了忽略原始位置测量而改为正交方向上共轭处测量的共轭差分法,从原理及实验角度均提高了测量精度。此后,蔡慧娟^[59]对差分波面重建算法进一步研究,结论显示共轭平移差分法面形残差均方根值重复性误差不超过 $\pm 0.2 \text{ nm}$ 。

2019年,黄亚等人^[60]提出了基于零位干涉的共轭差分平面绝对检测技术,由两正交方向的共轭位置上的4次测量结果得到待测面在2个方向上的差分面形,并通过差分波面复原算法解算得到待测面的绝对面形。此外,张梦瑶等人^[61]在2022年提出了一种基于逆向优化策略的平移量最优解确定方法,有效地提高了平面光学元件的面形检测精度。

1.5 奇偶函数法

CHIAYU A等人^[62-63]于1992年提出了奇偶函数法,其测量过程如图9所示,图中 B^x 表示待测镜B沿x轴翻转, A^θ 表示待测镜A旋转 θ 角度, C^x 表示待测镜C沿x轴翻转。该方法在传统的三面互检法的基础上,利用3个待测镜进行6次组合测量,将6次测量结果分解为奇偶函数的形式,由于函数的

对称性,在镜面翻转或旋转的过程中,可以消除一部分系统误差,通过组合测量和数据处理,可得到三平面的面形结果。

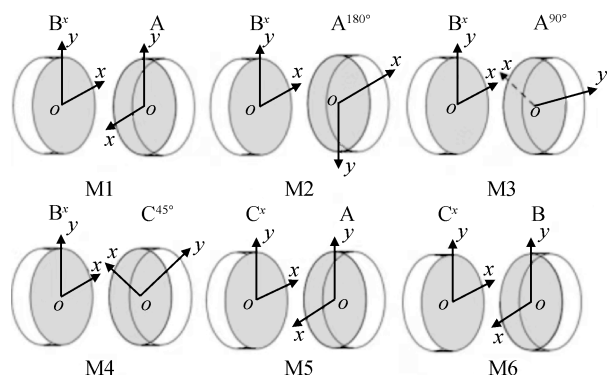


图9 奇偶函数法测量原理图

Fig.9 Measurement principle of parity function method

在奇偶函数法中,函数 $F(x, y)$ 可表示为

$$F(x, y) = F_{ee} + F_{oe} + F_{eo} + F_{oo} \quad (3)$$

式中: F_{ee} 为偶偶函数项, F_{oe} 为奇偶函数项, F_{eo} 为偶奇函数项, F_{oo} 为奇奇函数项。

F_{ee} 、 F_{oe} 、 F_{eo} 性质明确易于辨识,可精确计算, F_{oo} 需利用傅里叶正弦级数第一项 $F_{oo, 2\text{odd}}$ 近似估算,通过旋转 90° 计算出 F_{oo} 中的第一项。在此基础上,通过联立方程组,可分别解出平面A、B、C的 F_{ee} 、 F_{oe} 、 F_{eo} 、 F_{oo} 。

奇偶函数法因其函数的对称特性,常与三平(球)面互检法、旋转平均法相结合进行面形检测。2007年,MAURIZIO V等人^[64-65]提出了基于三平面互检的迭代算法,能快速精确地计算并合成干涉图,同样适用于球面测试。CHLOE M等人^[66]针对不同的旋转角度和迭代因子进行了对比和验证。

2017年,刘欢欢等人^[67]为获得全口径、全频段的绝对面形,提出基于N位旋转测量的绝对检测方法,在传统三面互检法的基础上,增加一组N位旋转测量,利用奇偶函数理论获取完整的面形信息。

王云涛等人^[68]于2019年提出一种基于奇偶函数和Fourier级数的三球面形重建方法,在三球面法的基础上增加待测面旋转 90° 的测量,将待测面面形以奇偶函数形式分解为正交基函数再求解,实现了球面三维面形绝对分布的检测,为多个球面镜的同步全口径检测提供了一种方法。

1.6 随机球法

ROBERT E P等人^[69]在1998年提出了随机球标定法,将标定球放置于干涉仪的共焦位置,在多处随机位置对标定球进行相对检测,并对面形数据求平均,从而消除被测球的面形误差以及外部噪声的干扰,测量原理如图10所示,TS为简化的干涉仪标准镜头, W^R 为由参考面反射的波前, W_n^B 为由随机球反射的波前, W_n 为 W^R 和 W_n^B 两束干涉光波叠加的测量波前。标定球的面形误差随着检测次数的增加逐渐趋于零,平均结果则主要反映标准镜头的面形误差信息。

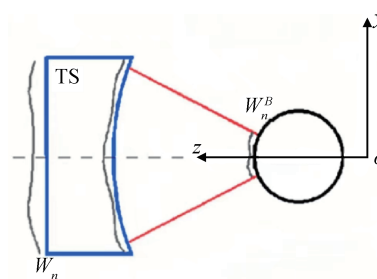


图10 随机球法原理示意图^[70]

Fig.10 Schematic diagram of random ball method^[70]

GRIESMANN U等人^[70]分析了校准参考波前的精度与测量次数之间的关系,发现所需的测量次数与干涉仪的测量不确定度有关,当测量不确定度较低时,则需进行更多的测量。理论上,只要进行足够多的检测就可以获得理想的球面面形。然而,曲率半径大且面形能到达 $1/4$ 波长的球很难得到,对于曲率半径较大的参考面来说,小球半径不够大会导致较大的几何误差^[71-73]。

2012年,陆黎明^[74]等人针对随机球标定方法的两种方法(静态法和动态法),分别分析了标定误差与测量次数之间的关系,理论分析表明静态法是一种特殊的动态法,两种方法的标定误差随测量次数增加呈 $N^{-1/2}$ 递减。此后,侯溪^[75]等人发展了基于球调谐函数和相移算法的动态随机球法理论分析模型,对球面标准镜进行3组独立标定,结果表明,参考面的面形残差均方根值误差不超过 $\pm 3 \text{ nm}$,主要表现为初级和三叶形像散,单次测量结果与3组独立标定的平均结果之间偏差的面形残差均方根值不超过 $\pm 0.5 \text{ nm}$ 。

1.7 旋转平移法

2001年, DORBAND B等人^[76]首次提出旋转平移法, 该方法将面形分解为旋转对称项和旋转非对称项。如图11所示, 在精确测量条件下, 确保被测面的几何中心与参考平面的对应点处于共焦状态, 随后绕被测镜光轴等角度旋转 N 次, 收集一系列数据。在这个过程中, 计算旋转过程导致的非对称面形变化, 得到旋转非对称面形误差, 并通过平移参考面计算待测面的旋转对称误差^[77]。

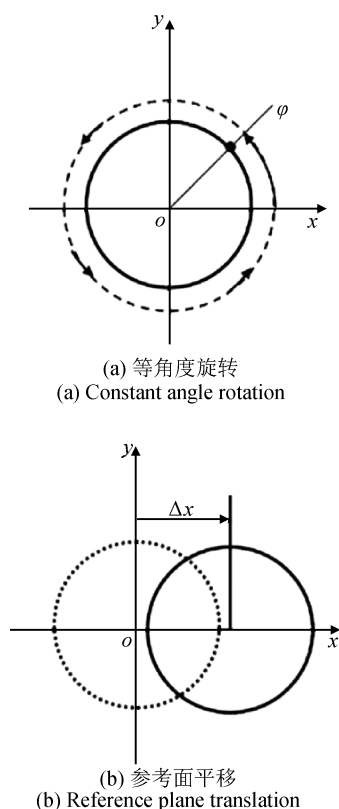


图11 旋转平移法测量原理示意图^[77]

Fig.11 Schematic diagram of measurement principle of rotation and translation method^[77]

旋转平移法操作简单, 且检测精度高, 文献[39, 45, 78-84]在该方法的基础上做了进一步研究。2012年, FUJIMOTO I等人^[85]通过引入旋转测量来补偿平移误差对测量结果的影响, 实验结果表明旋转角度与测量误差成反比。同年, SU D Q等人^[39]提出了旋转平移法的多位置测量改进方法, 原理如图12所示, 分别采集被测镜处于初始位置、纵横方向上平移后以及旋转一定角度时的测量结果, 通过使用更多的测量数据计算, 提高了重复

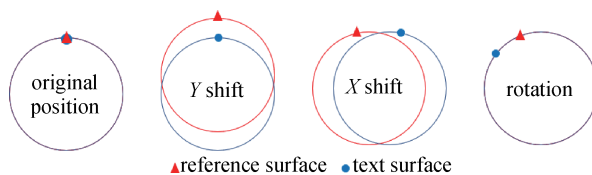


图12 旋转平移法的多位置测量原理示意图^[39]

Fig.12 Schematic diagram of multi-position measurement principle of rotating translation method^[39]

性精度。

2014年, SONG W H(宋伟红)等人^[86]利用平移旋转的结果, 在像素级空间分辨力的基础上建立了矩阵, 并重点消除中高频偏差, 从而获得了两个平面的绝对面形分布。这一方法通过将矩阵代入每个像素点的位置, 能够获取整个表面的信息。

张培洁等人^[87]在2019年提出一种基于特征提取及匹配的平移旋转算法, 通过利用尺度不变特性和设定的合理阈值, 求解出测量过程中的非精准位移, 采用Zernike多项式拟合法对被测面的低频面形进行重建。

2021年, 沈帆帆等人^[88]针对平移旋转法中的偏心误差问题, 提出了一种基于图像配准的偏心误差获取及补偿算法。该方法对偏心误差特点进行分析, 构造了相似度函数, 利用求解得到的偏心误差值对面形重建结果进行修正。

2 绝对检测技术方法对比

高精度平面面形检测技术发展至今, 国内外相关的研究方法主要包括三平(球)面互检法、双球面法、旋转平均法、平移差分法、奇偶函数法、随机球法和旋转平移法, 表1为上述7种具有代表性的绝对检测方法的对比。

随着先进光学制造领域的迅速发展, 大口径光学元件的检测需求不断提高。由于三平(球)面互检法在测量中需对被测镜进行大幅度姿态调整, 增大了位置匹配误差对测量精度的影响, 而双球面法采用了猫眼位置, 容易产生像散和球差, 精度受限, 因此这两种方法被逐渐淘汰。共轭平移差分法和旋转平移法具有较高的检测精度, 同时可结合多种算法对面形进行补偿, 适用范围更广, 成为目前光学元件面形绝对检测的主流方法。

表1 绝对检测方法对比
Tab.1 Comparison of absolute detection methods

绝对检测法	适用范围	优点	缺点
三平(球)面互检法	小口径光学系统	理论精度较高, 不含近似误差	旋转多次测得完整面的数据, 需要两个参考面, 误差来源多, 精度低
双球面法	通用	检测对象较少, 操作步骤简单	猫眼位置对误差不敏感, 易产生像散和球差; 无法标定发散标准镜头
旋转平均法	通用	操作简单, 检测精度和重复性精度高	多次旋转只能消除非旋转对称项; 存在幅角为 $kN\theta$ 项的面形缺损, 旋转次数较小时, 会丢失低频成分
平移差分法	大口径光学系统	可用于低精度的干涉仪	存在较大的平移误差
共轭平移差分法		提高差分逼近精度, 减少机械漂移和环境改变对测量结果的影响	存在频谱响应缺失问题
奇偶函数法	小口径光学系统	减少干涉仪器的系统误差和参考平面误差的影响	对旋转偏心误差敏感
随机球法	不适合大 F 数标准镜头	测量操作简单	需高精度球和大量测量才能获得低不确定度
旋转平移法	通用	不含幅角为 $kN\theta$ 项的面形缺损, 检测精度和重复性精度高	需分别消除旋转对称项和非旋转对称项误差, 算法较为复杂; 无法标定离焦项面形

3 总结与展望

高精密光学元件是决定先进制造领域高端装备性能的核心部件, 光学元件的高精度面形检测技术是实现先进光学制造的重要保证。目前主要从物理实现和算法两个方面进行高精度面形检测技术的拓展研究, 以提高检测精度。

大口径光学元件在高精密光学元件中的使用日益广泛, 此类元件平行度、形貌精度和材料均匀一致性等方面的加工要求极高, 传统的绝对检测手段面临着极大的技术挑战, 因此在物理实现方面, 需要设计一种更为精密的外部机械调整装置测量被测面的位置变化量, 达到提高检测精度的效果。

在算法方面, 随着计算机的进一步发展, 数字化信息的处理能精确到像素级别, 绝对检测与Zernike方法、奇偶函数法、迭代算法、矩阵分析等算法的结合, 使绝对检测中大量的计算工作能够快速有效地进行, 而深度神经网络算法和计算光学成像技术的快速发展也将推动未来高精度绝对检测技术的发展。

深度学习算法在模型构建与解析方面展现出了巨大的优势, 利用深度学习算法可以弥补在绝

对检测过程中产生的待测面无法精准解析、镜面损耗无法计算及面形函数过于复杂等问题。通过利用较少的面形原始数据即可逐步提取更高级别的面形特征, 将其运用于绝对检测技术可以更快更精确地对全口径面形进行解析。

计算光学成像技术通过信息编码/解译获得超越几何光学成像的极限, 使用算法根据编码探测光强计算重建出物体的图像, 攻克了低照度、宽视场、高分辨力三个成像条件不能同时提高的关键难点。因此, 强化计算光学与绝对检测技术的集成及算法创新, 对于提升面形检测精度并将之作为高精度检测技术的发展驱动力, 具有深远的战略意义。

综上所述, 高精度检测不仅需要聚焦于物理层面的改良, 算法层面的扩展也尤为重要。两者的深度融合既是解决实际光学检测难题的关键, 也是光学制造技术持续升级的动力源泉。因此, 加强光学算法与绝对检测技术的协同创新, 将是未来光学工业前进的方向。

参考文献

[1] RAYLEIGH L. Interference bands and their applications [J]. Nature, 1893, 48(1235): 212-214.
[2] DEW G D. The measurement of optical flatness [J]. Sci.

- Instrum., 1966, 43: 409-415.
- [3] SCHULZ G, SCHWIDER J, HILLER C, et al. Establishing an optical flatness standard[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(4): 929-934.
- [4] CHEN J B. Large-aperture high-accuracy phase-shifting digital flat interferometer [C]// *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 1996, 35(7): 367-375.
- [5] POWELL I, GOULET E. Absolute figure measurements with a liquid-flat reference[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2579-2588.
- [6] VANNONI M, MOLESINI G. Validation of absolute planarity reference plates with a liquid mirror[J]. *Metrologia*, 2005, 42(5): 389-393.
- [7] 武旭华, 夏江涛, 肖韶荣, 等. 液面基准法标定干涉仪系统误差[J]. *光子学报*, 2010, 39(3): 485-489.
WU X H, XIA J T, XIAO S R, et al. Calibration of system error for interferometer through absolute liquid reference method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 485-489. (in Chinese)
- [8] 陈佳, 陈磊, 王冲, 等. 基于动态干涉仪的液面基准建立研究[J]. *光学技术*, 2020, 46(6): 684-689.
CHEN J, CHEN L, WANG C, et al. Research on the establishment of liquid reference based on dynamic interferometer[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(6): 684-689. (in Chinese)
- [9] CHIAYU A, JAMES C W. Absolute testing of flats by using even and odd functions[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(25): 4698-4705.
- [10] FREISCHLAD K R. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(10): 1637-1648.
- [11] MAURIZIO V, GIUSEPPE M. Absolute planarity with three-flat test: an iterative approach with Zernike polynomials[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 340-354.
- [12] ELSSNER K E, VOGEL A, GRZANNA J, et al. Establishing a flatness standard[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(13): 2437-2446.
- [13] XU C, CHEN L, YIN J Y. Method for absolute flatness measurement of optical surfaces[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(13): 2536-2541.
- [14] SCHULZ M, WIEGMANN A, MARQUEZ A, et al. Optical flatness metrology: 40 years of progress[J]. *Opt. Pura Apl*, 2008, 41(4): 325-331.
- [15] SCHULZ G, GRZANNA J. Absolute flatness testing by the rotation method with optimal measuring-error compensation[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(19). DOI: 10.1364/AO.31.003767.
- [16] SCHULZ G. Absolute flatness testing by an extended rotation method using two angles of rotation[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(7): 1055-1064.
- [17] JIA X, XING T W. Error analysis of absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1466(346): 620-626.
- [18] MARIOGE J P, BONINO B, MULLOT M. Standard of flatness: its application to Fabry-Perot interferometers[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(9): 2283-2285.
- [19] VANNONI M, MOLESINI G. Three-flat test with plates in horizontal posture[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2133-2145.
- [20] GRIESMANN U, WANG Q D, SOONS J. Three-flat tests including mounting-induced deformations[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(9). DOI: 10.1117/1.2784531.
- [21] 顾洋, 王青, 石慧. 基于相移干涉仪的平面度测量软件设计[J]. *计测技术*, 2017, 37(5): 7-11.
GU Y, WANG Q, SHI H. Absolute measurement comparison between isoclinic interferometer and phase shift interferometer[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2017, 37(5): 7-11. (in Chinese)
- [22] MERCIER R, MICHEL L. Experimental comparison of the two-and the three-flat methods for absolute optical surface testing[J]. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 1997, 6(6): 773.
- [23] 王青, 顾洋. 等倾与相移两种干涉仪的平面度绝对测量比对[J]. *计测技术*, 2018, 38(2): 30-33.
WANG Q, GU Y. Design of flatness measurement software based on the phase-shift interferometer[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(2): 30-33. (in Chinese)
- [24] SCHULZ G, SCHWIDER J. Precise measurement of planeness[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1077-1084.
- [25] SCHULZ G, SCHWIDER J. IV interferometric testing of smooth surfaces[J]. *Progress in Optics*, 1976, 13(6): 93-167.
- [26] HARRIS J S. The universal Fizeau interferometer[D]. Reading: University of Reading, 1971.
- [27] ELSSNER K E, BUROW R, GRZANNA J, et al. Absolute sphericity measurement[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(21): 4649-4661.
- [28] FRITZ BERNARD S. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Proceedings of SPIE*, 1984, 433(4): 379-383.

- [29] 徐晨. 动态干涉测试技术与应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- XU C. Study of dynamic interferometry technology and application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [30] 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.
- SU D Q. Research on absolute testing of the optical surface figure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [31] HAN Z G, CHEN L, WULAN T Y, et al. The absolute flatness measurements of two aluminum coated mirrors based on the skip flat test[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(19): 3781–3785.
- [32] 高飞, 李晋惠, 田爱玲, 等. 基于Zernike多项式拟合三平面互检的误差分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(9): 187–194.
- GAO F, LI J H, TIAN A L, et al. Error margin analysis of three-flat test based on Zernike polynomials fitting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 187–194. (in Chinese)
- [33] JENSEN A E. Absolute calibration method for laser Twyman-Green wave front testing interferometers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1973, 63: 1313A.
- [34] SELBERG L A. Absolute testing of spherical surfaces[J]. *Opt Fabricat Test OSA Techn Digest Ser*, 1994, 13: 181–184.
- [35] SCHREINER R, SCHWIDER J, LINDLEIN N, et al. Absolute testing of the reference surface of a Fizeau interferometer through even/odd decompositions[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(32): 6134–6141.
- [36] WANG W, TAN J, WANG T, et al. Reference surface calibration of a Fizeau interferometer through even/odd synthesis[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(20): 3482–3487.
- [37] BURKE J, WU D S. Calibration of spherical reference surfaces for Fizeau interferometry: a comparative study of methods[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): 6014–6023.
- [38] HOU X, YANG P, WU F, et al. Comparative experimental study on absolute measurement of spherical surface with two-sphere method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 833–840.
- [39] SU D Q, MIAO E L, SUI Y X, et al. Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3198–3200.
- [40] SOONS J A, GRIESMANN U. Absolute interferometric tests of spherical surfaces based on rotational and translational shears[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012.
- [41] WANG W B, LIU P F, XING Y L, et al. Error correction for rotationally asymmetric surface deviation testing based on rotational shears[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(26): 7428–7433.
- [42] WANG W B, ZHANG M Q, YAN S W, et al. Absolute spherical surface metrology by differencing rotation maps[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(20): 6186–6189.
- [43] KEENAN P B. Pseudo-shear interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 429: 2–7.
- [44] ROBERT E P. Removal of test optics errors[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 1978. DOI: 10.1117/12.938216.
- [45] SONG W, LI S, HOU X, et al. Absolute calibration for Fizeau interferometer with the global optimized shift-rotation method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 49–54.
- [46] FRITZ, BERNARD S. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Optical Engineering*, 1984, 23(4). DOI: 10.1117/12.7973304.
- [47] GRECO V, TRONCONI R, VECCHIO C D, et al. Absolute measurement of planarity with Fritz's method: uncertainty evaluation[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(10): 2018–2027.
- [48] EVANS C J, KESTNER R N. Test optics error removal[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7): 1015–1021.
- [49] 张艳微. 光学面形的旋转绝对检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- ZHANG Y W. Research on rotational absolute testing of the optical surface[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [50] SONG W H, WU F, HOU X, et al. Optimized absolute testing method of shift rotation[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(28): 7028–7032.
- [51] 张艳微, 苏东奇, 隋永新, 等. 基于旋转平均补偿算法的旋转非对称面形绝对检测[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 216–221.
- ZHANG Y W, SU D Q, SUI Y X, et al. Absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of rotation-averaging and compensation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 216–221. (in Chinese)

- [52] HE Y H, GAO B, XU K Y, et al. Iterative algorithm for absolute planarity calibration in three-flat test[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27669–27674.
- [53] HE Y H, LI Q, WAN D M, et al. New reconstruction algorithm for absolute shape calibration in two-flat test[C]// *Proceedings Volume 9684, 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test, Measurement Technology, and Equipment*. Suzhou, China: SPIE, 2016.
- [54] 李若琨, 陈磊, 马致遥, 等. 基于奇偶函数分解算法的绝对检验对比研究[J]. *光学技术*, 2022, 48(6): 684–689.
- LI R K, CHEN L, MA Z Y, et al. Comparative study of absolute test method based on odd-even function decomposition algorithm[J]. *Optical Technique*, 2022, 48(6): 684–689. (in Chinese)
- [55] KEENAN P B. Pseudo-shear interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 1984, 123(4): 2–9.
- [56] 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. (in Chinese)
- [57] FRANCK M, STEPHANE B. Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat[C]// *Proceedings volume 6616, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection*, SPIE, 2007.
- [58] MA J, PRUSS C, ZHU R H, et al. An absolute test for axicon surfaces [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2005–2007.
- [59] 蔡慧娟. 基于共轭差分法的光学平面面形绝对测量的关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- CAI H J. Research on key techniques of absolute measurement of optical plane surface shape based on conjugate difference method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [60] 黄亚. 基于零位干涉的共轭差分面形绝对检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- HUANG Y. Study of null interferometry based on conjugate differential method for absolute test of optical surfaces [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [61] 张梦瑶. 基于平移差分法的光学平面面形绝对检测研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- ZHANG M Y. Absolute testing of optical plane surface based on shift differential method[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022. (in Chinese)
- [62] CHIAYU A, JAMES C W. Absolute testing of flats decomposed to even and odd function [J]. *SPIE*, 1992, 1776: 73–83.
- [63] CHIAYU A, JAMES C W. Absolute testing of flats by using even and odd function [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(25): 4698–4705.
- [64] MAURIZIO V, GIUSEPPE M. Iterative algorithm for three flat test[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6809–6816.
- [65] MAURIZIO V, GIUSEPPE M. Absolute planarity with three-flat test: an iterative approach with Zernike polynomials[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 340–354.
- [66] CHLOE M, STEPHANE B. Absolute calibration of three reference flats based on an iterative algorithm: study and implementation[C]// *Optical fabrication, testing, and metrology IV*. CEA, DAM, CESTA, F-33114 Le Barp, France, 2011.
- [67] 刘欢欢. 基于N位旋转测量的光学平面绝对检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- LIU H H. Research on optical plane absolute detection technology based on N-bit rotation measurement [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [68] 王云涛, 陈磊, 孔璐, 等. 基于奇偶函数和Fourier级数的三球面法绝对检验[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 222–230.
- WANG Y T, CHEN L, KONG L, et al. Absolute test via three-sphere method based on odd/even functions and fourier series[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 222–230. (in Chinese)
- [69] ROBERT E P. A practical implementation of the random ball test[Z]. 2006.
- [70] GRIESMANN U, WANG Q D, SOONS J, et al. A simple ball averager for reference sphere calibrations [C]// *Optical Manufacturing and Testing VI*. International Society for Optics and Photonics, 2005. DOI: 10.1117/12.614992.
- [71] ZHOU P, JAMES H B. Limits for interferometer calibration using the random ball test[Z]. 2009.
- [72] ZHOU P. Error analysis and data reduction for interferometric surface measurements [D]. Tucson: The University of Arizona, 2009.
- [73] SYKORA D M. A model for cavity induced errors with

- wavefront slope in high accuracy spherical fizeau metrology [J]. OSA Technical Digest, 2008. DOI: 10.1364/OFT.2008.OWB7.
- [74] 陆黎明, 伍凡, 侯溪, 等. 动态随机球的标定误差与测量次数的关系[J]. 光电工程, 2012, 39(3): 83-87.
LU L M, WU F, HOU X, et al. The relation between residual error and the number of measurements in the random ball test[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(3): 83-87. (in Chinese)
- [75] 侯溪, 张帅, 胡小川, 等. 超高精度面形干涉检测技术进展[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 18-30.
HOU X, ZHANG S, HU X C, et al. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(8): 18-30. (in Chinese)
- [76] DORBAND B, SEITZ G. Interferometric testing of optical surfaces at its current limit[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2001, 112(9): 392-398.
- [77] QUAN H Y, HOU X, WU G F, et al. Absolute interferometric testing of an ultra-precise flat substrate with a liquid mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2019.
- [78] SONG W H, HOU X, WU F, et al. Absolute interferometric shift-rotation method with pixel-level spatial frequency resolution[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 54(3): 68-72.
- [79] SONG W H, HOU X, WU F, et al. Experimental study on absolute measurement of spherical surfaces with shift-rotation method based on Zernike polynomials [J]. Proceedings of SPIE, 2015.
- [80] SONG W H, WU F, HOU X, et al. Optimized absolute testing method of shift-rotation [J]. Applied Optics, 2013, 52(28): 7028-7032.
- [81] YAN F T, FAN B, HOU X, et al. Absolute subaperture testing by multiangle averaging and Zernike polynomial fitting method [J]. Optical Engineering, 2013, 52(8). DOI: 10.1117/1.OE.52.8.085101.
- [82] SONG W H, WU F, HOU X, et al. Absolute measurement of flats with the method of shift-rotation[J]. Optical Review, 2013, 20(5): 374-377.
- [83] SONG W H, WU F, HOU X, et al. Absolute calibration of aspherical reference surface for a Fizeau interferometer with the shift-rotation method of iterative algorithm [J]. Optical Engineering, 2013, 52(3). DOI: 10.1117/1.OE.52.3.033601.
- [84] SONG W H, WU F, HOU X. Experimental study on absolute test of spherical surfaces with shift-rotation method [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8417. DOI: 10.1117/12.974971.
- [85] FUJIMOTO I, TAKASUJI T, NISHIMURA K, et al. Autonomous calibration method of the reference flat surface of an interferometer without using a standard flat surface [J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4754-4767.
- [86] SONG W H, HOU X, WU F, et al. Absolute interferometric shift-rotation method with pixel-level spatial frequency resolution[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 68-72.
- [87] 张培洁, 赵维谦, 杨帅, 等. 无需精确调整被测镜的平面面形检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 43-50.
ZHANG P J, ZHAO W Q, YANG S, et al. Flat measurement method without high precision adjustment of tested flat [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 43-50. (in Chinese)
- [88] 沈帆帆, 田爱玲, 王大森, 等. 旋转平移法平面绝对检测的偏心误差修正[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 169-176.
SHEN F F, TIAN A L, WANG D S, et al. Correction of eccentricity error in absolute flat surface testing by shift-rotation method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 169-176. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩, 贾长逸)



第一作者: 胡源(1981—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学测量、光学设计以及光学仪器开发。



通信作者: 侯禛敏(1998—), 女, 硕士, 主要研究方向为先进光学设计与成像技术。