

光学自由曲面面形检测方法进展与展望

朱日宏^{1,2*}, 孙越^{1,2}, 沈华^{1,2**}¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;²南京理工大学先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210094

摘要 光学自由曲面具有强大的矫正像差和优化系统结构的能力, 被誉为现代光学系统的变革性元件。但是, 自由曲面面形过于复杂, 其高精度检测存在巨大的难度, 这限制了自由曲面面形的制造水平, 其大规模应用也受到限制。目前, 光学自由曲面的检测技术主要是从非球面检测技术发展而来的。回顾了近年来光学自由曲面检测方法的发展历程, 着重分析了几种典型的检测方法及其特点, 并展望了自由曲面检测技术的未来发展趋势。

关键词 测量; 光学自由曲面; 面形检测; 轮廓法; 结构光; 干涉法

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0112001

Progress and Prospect of Optical Freeform Surface Measurement

Zhu Rihong^{1,2*}, Sun Yue^{1,2}, Shen Hua^{1,2**}

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

² MIIT Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract An optical freeform surface has been recognized as a revolutionary element in a modern optical system because of its powerful ability of simultaneous aberration correction and structural optimization. However, the complex shape of its surface brings enormous difficulties and challenges to the precise measurement, which limits its manufacture level and has been one of the bottlenecks of its broad applications. Currently, the main measurement methods of an optical freeform surface are mainly developed from the ideas of aspheric measurement technologies. In this paper, we reviewed the development of the optical freeform surface measurement methods, especially focused on several typical measurement methods and their characteristics, and looked forward to the development trend of freeform surface measurement in future.

Key words measurement; optical freeform surface; surface measurement; profilometry; structured light; interferometry

OCIS codes 120.3180; 120.3940; 120.6650; 220.4840

1 引言

光学自由曲面一般指缺少统一对称轴、具有非旋转对称结构的复杂曲面^[1]。从数学角度来讲, 光学自由曲面难以用统一的表达式进行描述。早在 1954 年, Alvarez 就利用自由曲面发明了用于眼科

的变焦镜头, 但是直到 2004 年, 研究者才第一次在光学领域正式提出了“自由曲面”的概念^[2]。现代光学系统中常用的自由曲面主要包括离轴非球面、柱面、XY 多项式曲面、Zernike 多项式曲面、Q-type 多项式曲面、径向基函数自由曲面、NURBS 自由曲面、微结构表面和衍射结构光学表面等。

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-06-30; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(61775096)、装备发展部预研领域基金(61404140105)

* E-mail: zhurihong@njjust.edu.cn; ** E-mail: edward_bayun@163.com

与传统的球面、非球面光学元件相比,自由曲面光学元件具有更多的设计“自由度”,能够针对性地矫正光学系统的各类像差,可提升系统的光学性能,同时有助于大幅减少系统镜片的使用数量并优化系统的结构。随着人们对光学系统性能要求的不断提高,越来越多的光学系统采用自由曲面元件作为关键器件,自由曲面元件在众多领域发挥了重要作用。在照明领域,自由曲面被大量用于路灯和车灯的结构设计中,增大了有效照明范围,提高了能量利用率^[3-6]。在显示领域,自由曲面被大量应用于头戴式显示器^[7-11]、微型投影仪^[12-16]等系统中。例如,北京理工大学设计了基于自由曲面的 AR 头盔显示器[图 1(a)],自由曲面在保证高质量显示效果的同时减小了系统的体积和质量^[7];布鲁塞尔大学等机构使用自由曲面设计了一种折反式超短焦投影系统,该投影系统具有超短投影距离、宽投影角和高紧凑性的特点^[16]。在成像领域,自由曲面主要应用于天文观测和空间光学系统中^[17-20]。例如美国航天局在三反望远系统中使用自由曲面成功平衡了像散^[18];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所使用

XY 多项式自由曲面,设计了一款具有超宽视场的离轴三反光学系统[图 1(b)],该系统的主镜和三镜为同一自由曲面的不同部分,视场提升至 $80^\circ \times 4^\circ$,波像差的均方根(RMS)值仅有 25 nm ^[20]。

在各类光学应用领域中,照明、显示等领域对自由曲面面形质量的要求一般在微米量级,自由曲面光学元件已经发展成熟并被广泛应用于该类领域。然而,在成像领域中,自由曲面的应用相对有限,这是由于成像领域对自由曲面的面形质量提出了亚微米量级的高精密要求,高精度的加工和检测技术是自由曲面的应用前提。但是,自由曲面面形难以用统一的数学表达式进行描述,这种高复杂性、非旋转对称性等特性给其高精度检测带来了巨大的挑战,往往需要耗费巨大的人力、财力和大量时间才能制造出高精密的自由曲面元件。因此,精密检测技术已经成为当今测试领域的研究热点问题之一。本文对目前世界上主要的光学自由曲面的检测方法进行了研究和分析,并结合各方法的特点和存在的问题,展望了光学自由曲面检测方法未来的发展趋势。

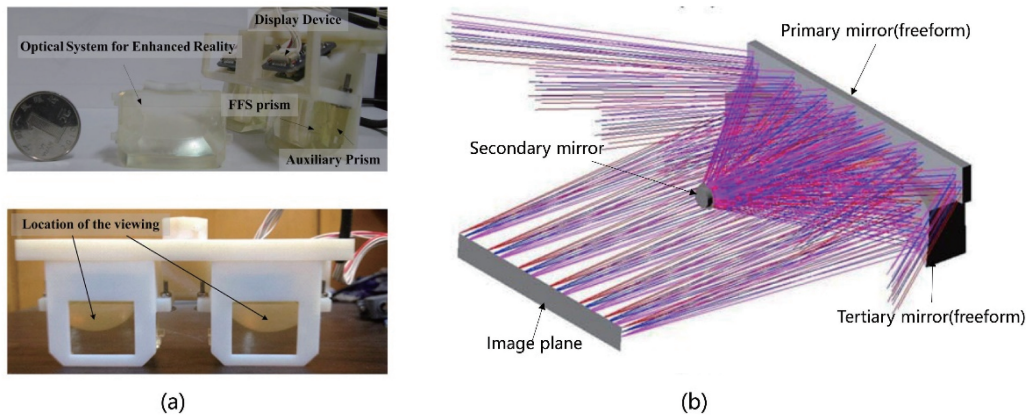


图 1 光学自由曲面的典型应用案例。(a)AR 头盔显示器^[7];(b)超宽视场离轴三反光学系统^[20]

Fig. 1 Typical applications of optical freeform surfaces. (a) AR head-mounted display^[7]; (b) off-axis three-mirror system with ultra-wide field of view^[20]

2 光学自由曲面的高精度检测方法

光学自由曲面没有统一的对称轴,表面形状复杂,梯度大,给其高精度检测带来了诸多难题。目前,该类元件的检测方法是在传统非球面的面形检测技术基础上发展而来的,主要分为点线式测量和面式测量两大类。

2.1 点线式测量

点线式测量法是一类传统的面形检测方法,主要用于自由曲面元件加工过程中的铣削和研磨阶

段^[21]。该类方法原理相对简单,通过探针(机械式探针或光学式探针)在横向上对被测件矢高进行逐点或逐线的扫描(即探针的纵向位移就为被测件在扫描路径上的矢高),最后通过“点云”数据的拼接拟合得到被测曲面的全面形信息。目前,典型的点线式测量方法主要有三坐标测量机(Coordinate Measurement Machine, CMM)法、轮廓仪法、摆臂式轮廓扫描法等。

2.1.1 三坐标测量机法

1973 年,蔡司公司成功地制造了世界上第一台

全自动三坐标测量机。CMM 法的基本原理是利用探针扫描精确获取被测件表面各个离散点在测量空间中的三维坐标,将其整合成点云数据,再通过数值处理方法拟合得到其面形。CMM 法是大口径高次非球面加工过程中的主要面形测量手段,其中机械臂研磨工序中的主要面形检测方式就是三坐标轮廓测量。该方法的检测优势在于对镜面粗糙度和精度没有要求,在镜面反射率和面形残差较差的条件下,可以在反复迭代的研磨工序中获取稳定的微米级精度的镜面面形数据^[22]。经过半个世纪的发展,CMM 法早已发展成熟,是许多光学加工企业检测曲面元件面形的主要手段。

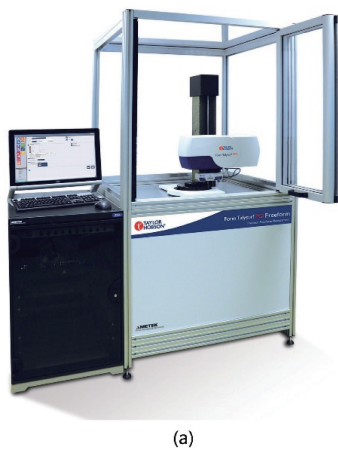
CMM 法测量范围广,通用性强,可以测量任意面形的自由曲面元件。但是 CMM 法采用逐点扫描的方式进行测量,测量速度慢,无法一次性得到被测元件的全场面形数据。为了得到被测元件的全场三维形貌,必须采用数据拼接的方式。然而,被测件口径越大,测量数据量就越大,测量效率越低,全场面形的测量精度也越低。蔡司公司(ZEISS)生产的 XENOS 三坐标测量机(图 2)在 900 mm×1500 mm×700 mm 的测量范围内实现了最小 0.3 μm 的测量精度,是当前 CMM 测量精度最高的产品之一^[23]。目前,CMM 法主要向智能工业化方向发展,即与现今的人工智能技术(AI)、大数据技术相结合,具有灵活、效率高及智能化的特点。如 Spitz 等^[24]提出了一种基于启发式算法的 CMMs 高效无碰撞路径生成方法;Spyridi 等^[25]提出与人工智能技术相结合的 CMM,在部件设置、可访问性分析、探头定位等方面具有很大的灵活性;Fang 等^[26]提出了一种集成立体视觉和 CMM 的智能检测系统。



图 2 ZEISS 的 XENOS 型商用 CMM 系统图^[23]
 Fig. 2 ZEISS XENOS commercial CMM system^[23]

可以实现多种类型自由曲面的面形检测,其最大测量口径只有 28 mm,最大测量坡度为 55°,测量分辨率为 0.8 nm,但其测量精度并未明确给出^[27]。

与机械探针轮廓仪相比,光学探针轮廓仪与被测件之间没有接触,不会产生应力作用,因此具有更高的测量精度。Taylor-Hobson 公司开发了一款 LumphoScan 非接触三维形貌扫描测量系统^[28],如图 3(b)所示,它在径向轮廓扫描的基础上,增加了环向轮廓的测量,通过径向与环向的轮廓数据的拼接得到了全面形,并且利用多波长干涉(MWLI)点传感器,可连续测量传感器与被测件之间的距离,其单点定位精度达到±1 nm。LumphoScan 轮廓仪对最大口径为 420 mm×100 mm 的自由曲面的检测精度优于±50 nm,测量重复性优于±20 nm,最大可测坡度达到 90°^[29]。但是,该轮廓仪只能测量面形与球面基或非球面基偏离度较小的自由曲面。荷兰 TNO 公司开发的 NANOMEFOS 轮廓仪利用两个干涉仪在线测量探头在径向和垂直方向上的位移,以确保其定位精度^[30]。NANOMEFOS 轮廓仪



(a)



(b)

图 3 泰勒-霍普森的商用轮廓仪。(a) PGI Freeform 轮廓仪^[27]; (b) LumphoScan 轮廓仪^[29]

Fig. 3 Taylor Hopson's commercial profilometers. (a) PGI Freeform profilometer^[27]; (b) LumphoScan profilometer^[29]

对最大口径为 500 mm×100 mm 的自由曲面的测量不确定度达到 30 nm,被用于测量包括欧洲极大望远镜主镜的各类自由曲面的面形^[31]。

轮廓仪法测量通用性较强,既可测量凸面,又可以测量凹面,相比于 CMM 法,其测量效率和测量精度均较高。但是,轮廓仪法仍然存在一些问题:第一,因为需要测量多个轮廓线,其绝对测量速度仍然较慢,如 LuphoScan 轮廓仪测量口径为 130 mm 的球面需要 5.5 min,NANOMEFOS 轮廓仪测量口径为 135 mm×20 mm 的自由曲面需要 20 min;第二,轮廓仪法目前只能测量梯度变化较小的自由曲面(局部梯度与全局梯度的偏离小于 5°);第三,拼接过程会引入拼接误差,导致面形整体测量精度的下

降。因此,轮廓仪法若要在自由曲面测量中发挥更大的作用,需要解决上述三个问题。例如,基于面形的整体梯度分布,合理规划轮廓检测路径,动态控制轮廓的“疏密”和采样频率,并改进拼接算法,进而提高该方法的检测能力。

2.1.3 摆臂式轮廓扫描法

摆臂式轮廓扫描(Swing arm Optical CMM,简称 SOC)法由 Anderson 等^[32]首次提出。该方法的检测原理如图 4 所示,将探针安装在摆臂的一端,探针绕其旋转轴旋转,且旋转轨迹经过待测元件的光学中心,扫描轨迹为最佳拟合球面上的圆弧轨迹,因此利用探头可以准确读取被测面的非球面偏离。

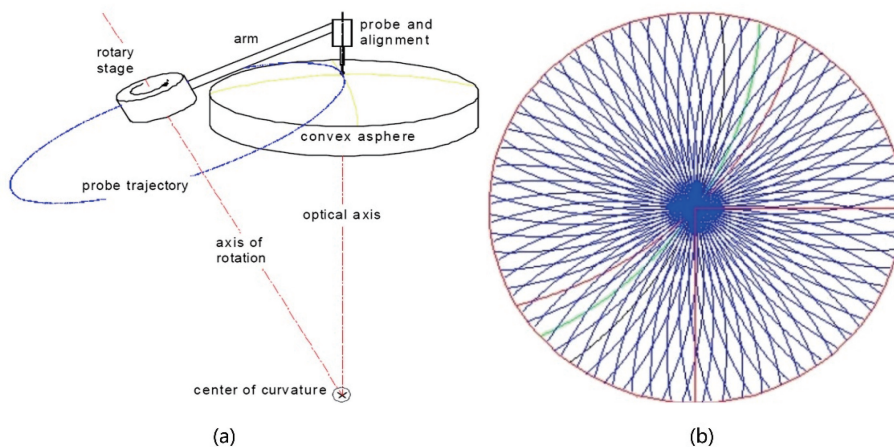


图 4 SOC 测量面形示意图^[35]。(a) SOC 的测量原理; (b) SOC 的扫描路径

Fig. 4 Schematic of optical surface measurement with SOC^[35]. (a) Measurement principle of SOC; (b) scanning path of SOC

摆臂式轮廓扫描法测量精度高,可达纳米级;测量口径不受限制,只需增加臂长,即可实现对大口径非球面和离轴非球面的检测,且可测量凹面和凸面;测量装置可以直接安装在光学加工机床旁,将加工机床转台作为工件转台进行镜面面形的在位检测,提高了镜面加工效率,避免了搬运风险。美国亚利桑那大学的 Su 等^[33-34]使用摆臂式轮廓仪对口径为 1.4 m 的离轴凸抛物面的面形进行了测量,去除像散、慧差和三叶像散后,其测量误差 RMS 值仅为 9 nm。摆臂式轮廓仪使用干涉传感器测量探头与被测面间的距离,测量精度高,但只适用于镜面加工的抛光阶段。为了进一步提高光学加工效率,将精密测量推广到镜面加工的磨削阶段,Wang 等^[35]使用精确标定的激光三角传感器代替干涉传感器,对口径为 1 m 的非球面面形进行测量,测量精度 RMS 值优于 100 nm。国防科技大学是国内最早对摆臂式轮廓仪展开研究的单位之一,贾立德等^[36]对影响

系统测量不确定度的各种因素进行了分析建模,计算了系统的合成标准不确定度,对口径为 200 mm 的凹抛物面面形进行了测量,测量不确定度为 ±0.5 μm。中国科学院光电技术研究所的景洪伟团队采用该方法测量了离轴量为 360 mm,口径为 410 mm 的离轴抛物面,检测精度在微米级^[37];随后,利用激光跟踪仪对摆臂式轮廓仪进行校准和臂长测量,研制了一台基于双测头扫描数据拼接的摆臂式轮廓仪,实现了工件转台的误差分离^[38]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在大口径非球面、离轴非球面的加工和检测方面处于国内领先水平。Xiong 等^[39]建立了摆臂式轮廓检测装调项误差分析模型,采用多测头进行系统误差在线标定,提高了面形检测精度;同时提出了一种基于非球面梯度的采样密度可变的参数优化方法,采用双位置双测头拼接式检测,提高了检测的动态范围;该团队对研磨阶段的口径为 1.5 m 的离轴非球面面形进

行了测量,检测精度 RMS 值为 $0.5 \mu\text{m}$,对粗抛光阶段的口径为 2 m 的非球面面形的检测精度 RMS 值达 $0.17 \mu\text{m}$ ^[40-41]。

摆臂式轮廓扫描法与轮廓仪法相似,虽然前者在测量大口径(几百毫米甚至米级)元件方面更具优势,但同样面临着测量效率偏低及整体面形拼接过程中存在误差等问题,且目前只能测量离轴非球面类型的自由曲面,关于测量形状复杂、局部梯度变化大、面形数学表达较难的高自由度曲面的研究鲜有报道。因此,摆臂式轮廓仪法今后研究的重点是提升测量效率,拓展检测对象范围,进一步提高测量精度。

2.2 面式测量

点线式测量法由于需要逐点或逐线的扫描,测量速度慢,效率低,因此面式测量方法(即一次测量

就能得到面形数据)备受关注,目前得到较多研究的方法主要有夏克-哈特曼(Shack-Hartmann)波前检测法、结构光三维测量法和干涉测量法。

2.2.1 夏克-哈特曼波前检测法

夏克-哈特曼波前检测技术是在德国天体物理学家 Johannes Hartman 提出的哈特曼检测法的基础上发展得到的,20 世纪末桑迪亚国家实验室最早将其应用于光学元件的面形误差测量中^[42]。该方法的基本原理如图 5 所示,通过透镜阵列对被测表面反射回来的空间波面(将局部波面视作平面波)进行采样,利用 CCD 焦平面上的光斑阵列的位置变化并结合透镜焦距参数,计算求取波面斜率,再通过多项式拟合得到待测波面面形,最终获得被测表面的形貌。

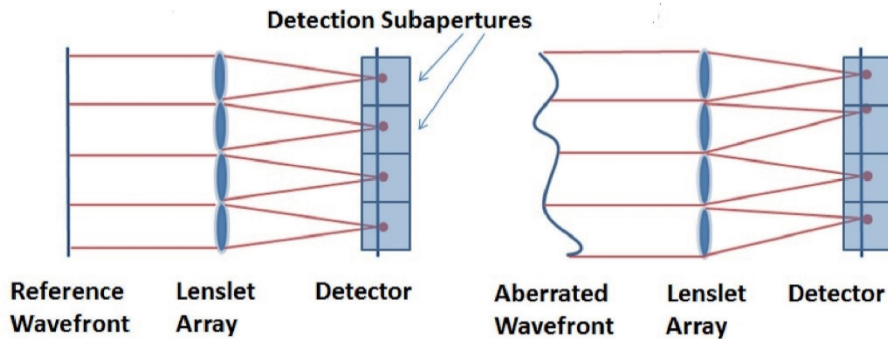


图 5 夏克-哈特曼波前探测法的原理图^[44]

Fig. 5 Schematic of Shark-Hartman wavefront detection^[44]

夏克-哈特曼波前检测法通过分析系统中微透镜成像光斑相对参考位置的偏移来得到待测波面的数据,无需借助其他辅助设备,具有简洁高效、可实时测量、动态测量范围较大等诸多优点,因此被广泛应用于自由曲面面形的测量中。南洋理工大学采用自适应中心判定法,分别实现了口径为 $18 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 且曲率分布不一致的自由曲面和口径为 60 mm 的双曲率环形面的面形测量,测量精度 RMS 值达到 27 nm ^[43]。2018 年, Aftab 等^[44]提出一种适应大波前变化的自适应夏克-哈特曼波前传感器,该传感器尤其适用于波阵面局部具有高度畸变的情况,为大口径自由曲面元件的检测提供了可能。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用这种方法对口径为 400 mm 的离轴非球面进行了检测,检测精度 RMS 值优于 100 nm ^[45];天津大学利用夏克-哈特曼波前探测法检测了口径为 2 mm 的立方相位板,与 Veeco 白光干涉仪相比,检测结果的相对误差优于 0.2% ^[46]。

夏克-哈特曼波前检测法相比于点线式测量法,

具有测量速度快、测量精度高的优势,同时其动态测量范围大于干涉法,因此适用于处于精研及粗抛光阶段的自由曲面面形检测,能有效衔接点线式测量法和干涉测量法的测量范围。但是,受透镜尺寸的限制以及大梯度自由曲面测量时光斑交叠的影响,该方法的横向测量分辨率不高,相应的测量精度易受分辨率的影响。因此,进一步研究高精度的波前重构算法,优化透镜阵列的设计与制作,发明新结构的阵列成像器件是提高该方法测量分辨率和测量精度的关键。

2.2.2 结构光三维测量法

结构光三维测量法的基本思想:向被测表面投射某一调制光场,并在光的反射方向上用 CCD 相机来接收该反射光场(如图 6 所示^[47]),物体表面的起伏会造成在其表面反射光场的相位发生改变,通过测量并计算出光场相位的改变量,就能得到物体表面的三维面形信息。根据被测元件表面是否发生镜面反射,将这种复杂面形测量的方法分为用于漫反射表面的条纹投影法和用于镜面反射的相位偏折测

量法 (Phase measuring deflectometric method, 简称 PMD 法)。由于结构光法需要对比测量前后的光场变化, 因此测量前的系统标定至关重要, 这也是该方法多年来的研究重点, 系统的最终标定精度直接决定了最后的测量精度。

条纹投影法的研究和应用日渐成熟, 德国 GOM 公司的 Atos 系列三维测量系统是目前国内市场上比较常见的三维测量系统^[48], 其测量精度达到 50 μm 。此外, 国内的四川大学^[49]和南京理工大学^[50-52]较早开展了该项技术的研究, 清华大学^[53]、上海交通大学^[54]和华中科技大学^[55]等单位对条纹投影法的发展及其工业化推广进行了大量研究。由于精度的限制, 目前条纹投影法在光学元件面形检测方面的应用较少, 其应用主要集中于机器视觉、汽车工业、人脸识别等领域。

PMD 法相较于条纹投影法更适用于光学元件的面形检测, 其由德国的 Knauer 等^[47]首次提出。图 6 所示为结构光三维测量法的原理图, 该方法根据结构光的相位信息来确定光线偏折, 利用计算出的被测表面的梯度信息, 通过积分重建出镜面物体的三维面形轮廓。德国 3D-Shape 公司利用该技术测量自由曲面渐进式眼镜片的轮廓, 全局精度达到 1 μm ^[56]。亚利桑那大学的 Su 等^[57]在此基础上提出了 SCOTS 系统, 并将其成功应用于口径为 8.4 m 的球面镜的面形检测中, 在消除与测试系统对准有关的低阶像差后, 在 95% 以上的口径范围内, 其 RMS 测量精度达到 25 nm。2008 年开始, 四川大学与中国科学院光电技术研究所合作, 对该技术展开了研究, 对一个口径为 40 mm 的非球面进行了测量, 测量结果与 CMM 测量结果之间的 RMS 偏差为 1.8 μm ^[58-61]。上海科技大学研制了基于 PMD 的自由曲面轮廓测量系统, 该系统可测量口径为 300 mm、倾斜角度为 $\pm 20^\circ$ 的自由曲面, 对倾斜角度达 $\pm 16^\circ$ 的椭球面的测量结果显示, 其残余误差的峰谷(PV)值约为 30 μm ^[62]。上海理工大学提出了一种零位 PMD 方法, 并利用该方法对口径为 108 mm 的抛物面进行了测量, 测量精度的 RMS 值为 1.3 μm ^[63]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所使用该方法测量了大口径非球面, 针对其中的关键技术展开了研究, 并对有效口径为 821.65 mm 的离轴抛物面进行了测量, 其结果与零位干涉法的偏差小于 15 nm^[64]。

PMD 方法的主要优势: 1) 非接触式测量, 可实现无损检测; 2) 全面形测量, 投射的光场能覆盖被测

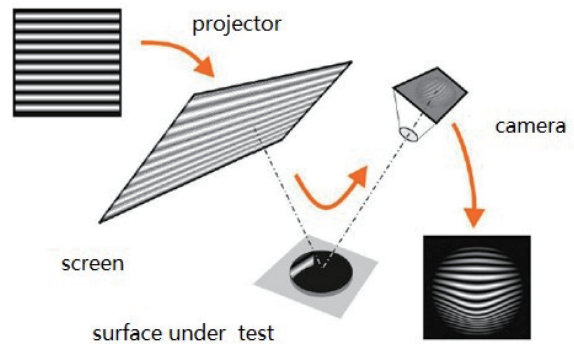


图 6 结构光三维测量法原理图^[47]

Fig. 6 Schematic of structured light 3D measurement^[47]

件, 无需经过拼接就能获取全部面形数据, 测量效率高, 适用于加工现场的在线测量; 3) 适合测量大口径凹面元件。目前, 该类方法主要用于测量非球面及少量离轴非球面面形, 其对被测元件全场三维形貌的测量精度大多在微米量级, 有的可以达到亚微米级。该方法的测量精度主要受到系统标定精度的限制, 与计算光学、深度学习等相结合来提高系统相位标定的精度, 从而最终提高测量精度是目前研究的重要方向之一。

2.2.3 干涉测量法

干涉测量法是目前公认的光学元件面形高精度检测的有效方法之一。自由曲面面形的干涉检测方法主要分为两类: 一类是零位干涉法, 如计算全息法 (computer-generated hologram, CGH); 另一类是非零位干涉法, 主要包括部分零位补偿法、子孔拼接法和倾斜波面法。这些方法各具特色, 在自由曲面的高精度测量中都发挥了重要作用, 下面结合这些方法具体分析自由曲面干涉检测的研究进展。

2.2.3.1 计算全息法

计算全息法的原理是利用光波的数学描述, 就能得到任意形状的波前, 从而实现被检光学面的零位补偿测量。1971 年, 美国亚利桑那大学光学中心的 Macgovern 等^[65]首次将计算全息法应用于非球面检测。计算全息法的检测原理如图 7 所示, 测试光经过 CGH 处理后, 被调制为表征被测件面形的波前, 波前经被测件反射后沿原路返回至干涉系统中, 与参考波发生干涉。

经过多年的发展, 计算全息法已经成为非球面检测中最常用且精度最高的方法之一。因此, 众多研究机构开始尝试利用 CGH 检测自由曲面元件面形。日本名古屋大学利用计算全息技术, 成功检测了 3.8 m 望远镜中口径为 1.2 m 的离轴抛物面主

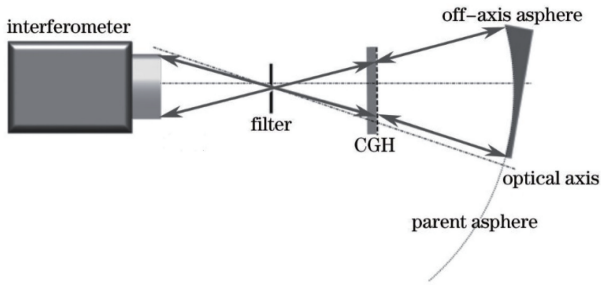


图 7 计算全息法的测量原理图^[70]

Fig. 7 Measurement principle of CGH method^[70]

镜的面形,测量精度 RMS 值达到 15 nm ^[66]。清华大学利用计算全息技术成功测量了矩形孔径自由曲面元件,面形检测精度 PV 值为 440 nm ^[67]。南京理工大学研究了 CGH 器件的设计方法和加工工艺,解决了 CGH 同一圆环线宽不均匀的问题,在离轴椭球面的面形检测中取得了 60 nm 的测量精度^[68-69]。为了测量口径为 $846 \text{ mm} \times 630 \text{ mm}$ 的自由曲面,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所设计了相位型 CGH,测量精度 RMS 值达到 12.7 nm ^[70],并且针对 CGH 测量中存在的畸变,提出了映射畸变矫正方法,在一个反射望远镜的第二和第四片镜子的面形检测中,取得了 27.4 nm 的检测精度^[71]。罗切斯特大学报道了一种利用高分辨率空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 来产生计算全息图的方法,对一个与最佳拟合球面偏离 $150 \mu\text{m}$ 的自由曲面进行了仿真,由 SLM 像素化和相位量化引起的理论不确定度的 RMS 值为 50.62 nm ^[72]。北京理工大学基于偶氮液晶材料的

光控技术,提出了一种新型液晶 CGH 技术,并针对抛物面和柱面设计了相应的液晶全息图^[73-74]。此外,德国斯图加特大学^[75-76]及国内的中国科学院西安光学精密机械研究所^[77-78]、西安科技大学^[79]、国防科技大学^[80-81]、中国科学院光电技术研究所^[82]等研究机构也都在该领域展开研究并取得了重要成果。

虽然计算全息法在自由曲面检测领域中取得了令人瞩目的成果,但其也面临着以下几个问题:1) 一对一的补偿测量模式(即需要设计与每个被测自由曲面一一对应的 CGH 器件)造成其测量通用性较差,从而检测成本较高;2) 针对梯度较大的曲面元件,作为补偿器的 CGH 需要通过密度很高的衍射结构来实现大梯度波面的输出,因此 CGH 的刻线密度受限于目前的微结构加工工艺水平。因此,要使计算全息法在自由曲面面形检测中发挥更广泛的作用,需要结合新方法或新技术(例如液晶调制)生成动态变化的 CGH,这是计算全息法突破测量通用性局限以及提高衍射分辨率的关键。

2.2.3.2 部分零位补偿法

2003 年,北京理工大学的 Liu 等^[83]提出了部分零位补偿法,并将其应用于非球面面形检测中。随后,亚利桑那大学^[84]和浙江大学^[85]分别在该领域展开了研究。部分零位补偿法的原理如图 8 所示,在泰曼格林干涉结构中利用部分补偿镜(图 8 中的 PCL)补偿被测件的大部分法线像差,测试波前虽不能原路返回,但其位相斜率处于探测器的可分辨范围内,从而产生可解算的干涉条纹。

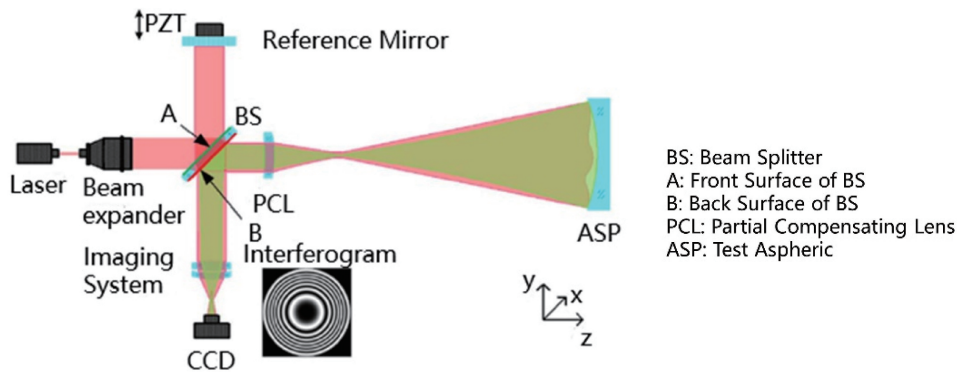


图 8 部分零位补偿干涉检测系统^[92]

Fig. 8 Layout of partial-null compensating interferometric system^[92]

2014 年,美国罗切斯特大学的 Fuerschbach 等^[86]使用变形镜对 Zernike 自由曲面反射镜进行补偿,如图 9 所示,利用 Offner 镜补偿球差,使测试光线斜入射到被检面上,通过控制入射角度来实现像

散补偿,再利用变形镜补偿慧差和高阶像差,对口径为 80 mm 的 Zernike 自由曲面面形的检测误差 RMS 值为 156 nm 。南京理工大学基于类似思想,对口径为 44 mm 、最大偏离度为 6λ ($\lambda = 633 \text{ nm}$,下

同)的像散面的测量误差 RMS 值为 9.5 nm ^[87]。安徽大学 Zhang 等^[88-90]也对自由曲面的补偿方式开展了研究,如图 10 所示,他们利用部分零位镜和变形镜,提出了 MANI(Model-based adaptive non-null interferometry)测量系统,实现了对自由曲面的灵活动态补偿;对同一抛物面进行测量,与 ZY-

GO 干涉仪的测量结果相比较,测量误差 RMS 值仅相差 2.5 nm 。另外,如图 11 所示,他们利用一个可移动的反射球面和两个对旋式的光学楔组成像差发生器,通过光学楔的旋转和反射球面的平移(倾斜)产生低阶像差,进而实现被测件的部分补偿^[91],对离轴抛物面的测量误差 PV 值为 34 nm 。

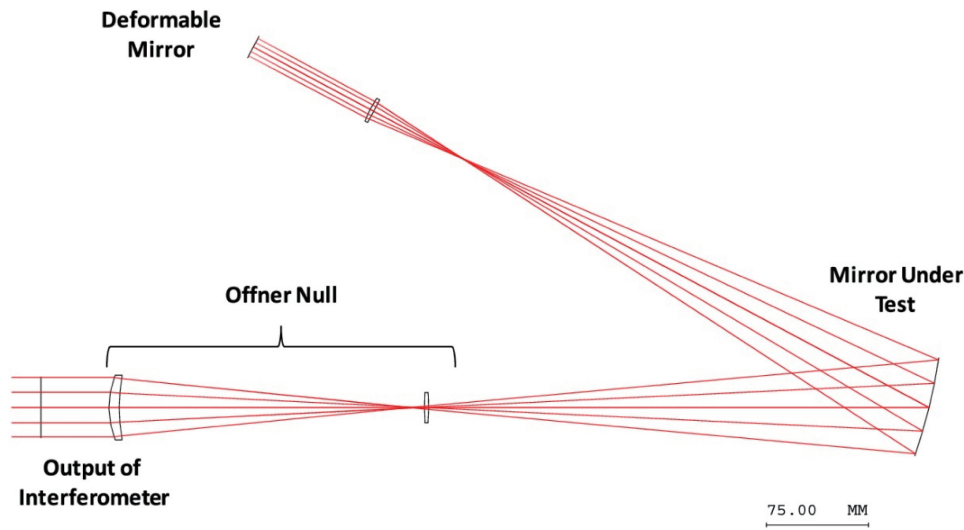
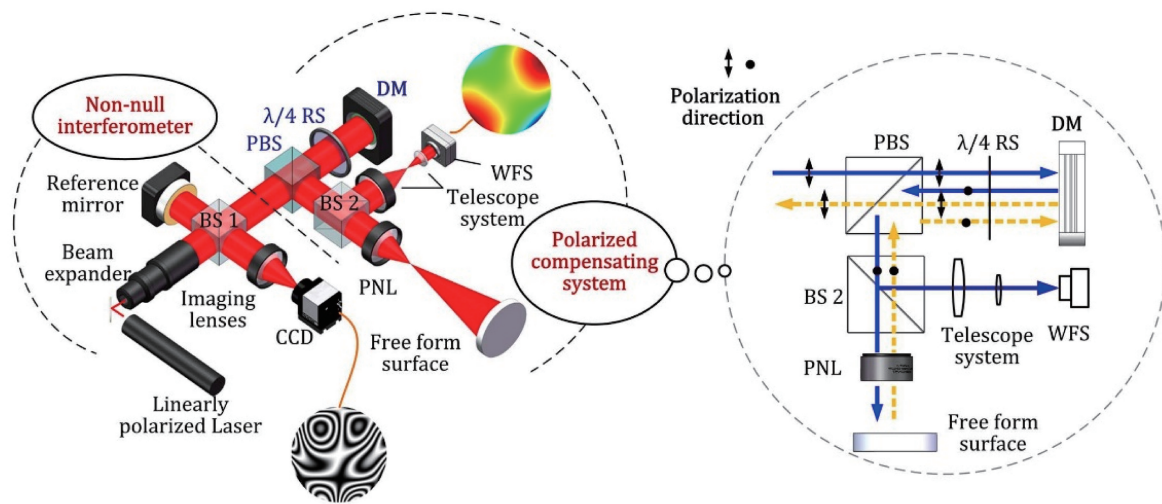


图 9 罗切斯特大学检测 Zernike 自由曲面原理图^[86]

Fig. 9 Test principle of Zernike freeform surface in Rochester University^[86]



BS_{1,2}: Beam Splitter; PBS: Polarized Beam Splitter; RS: Retardation Sheet
DM: Deformable Mirror; PNL: Partial Null Lens; WFS: Wavefront Sensor

图 10 MANI 系统原理^[88]

Fig. 10 Principle of MANI system^[88]

部分零位补偿法不能满足零位条件,因此产生了一定的回程误差,且测试光路越偏离零位条件光路,回程误差就越大,这为被检面形的高精度恢复带来了很大的难题。浙江大学杨雨英课题组基于系统建模和光线追迹,先后提出了理论参考波前法(TRW)^[93]和逆向优化重构技术(ROR)^[92,94],通过

矫正回程误差,实现了高精度面形重构^[95-96]。北京理工大学 Hao 等^[97]提出了虚拟干涉仪校准技术,成功消除了离轴非球面面形测试中的回程误差,测量重复性达到 30 nm 。

在部分零位补偿法检测自由曲面的过程中,待测件的对准较为困难,对准误差是影响其面形检测

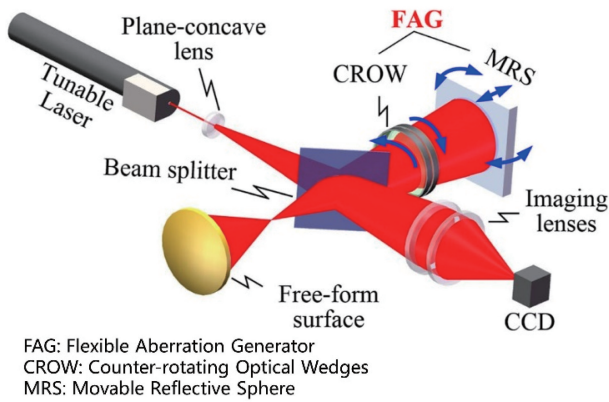


图 11 安徽大学灵活像差发生器补偿自由曲面原理示意图^[91]

Fig. 11 Schematic of flexible aberration generator used for compensating freeform surface in Anhui University^[91]

精度的主要因素之一。此外,自由曲面的非旋转对称性会导致干涉图产生非旋转对称形变,从而影响面形恢复精度。浙江大学研究团队基于系统建模,对由轴向定位误差、旋转误差和非轴向姿态误差引起的轴向像差进行了建模,通过逐步矫正消除了测试波前的对不准像差,对口径为 20 mm 的双圆锥面进行了检测,测量结果与轮廓仪相差 20 nm^[98]。安徽大学团队利用卷积神经网络有效矫正了对准误差和干涉图形变^[99-100]。

与零位干涉法相比,部分零位补偿法在保证测量精度的同时,提升了系统的动态测量范围,系统的测量能力得到提升。但是,目前部分零位补偿法的成功案例主要还是针对旋转对称非球面、离轴非球

面、小口径双圆锥面这类相对简单的自由曲面,对于更复杂的大梯度变化的自由曲面,其成功应用案例较少。针对该问题,一种解决思路是设计大梯度的部分零位补偿元件,但设计难度和制作成本较高;另一种解决思路是将该方法与子孔径拼接法、倾斜波面法等测量方法相结合,从而测量大梯度自由曲面。

2.2.3.3 子孔径拼接法

子孔径拼接的基本原理^[101]是将被测面分割为多个局部梯度变化较小的子孔径区域,分别检测每个子孔径面形,将所有子孔径数据进行拼接从而得到全面形偏差。目前常用的子孔径拼接技术包括环形子孔径拼接术(Annular subaperture stitching interferometry, ASSI)和圆形子孔径拼接术(Circular subaperture stitching interferometry, CSSI)。

ASSI 的测量原理如图 12 所示,沿着径向将被测面分割为多个环带,通过轴向移动被检面测得各环带的数据,采用合适的拼接算法即可得到全面形数据。美国的 ZYGO 公司利用该方法研制了 Verifire 型环形子孔径扫描干涉仪^[102]。中国科学院光电技术研究所^[103-104]、国防科技大学^[105]和北京理工大学^[106]分别对 ASSI 的拼接算法进行了研究。浙江大学将部分零位补偿法和 ASSI 相结合^[107-108],以非球面波作为参考波前,在减少子孔径数目的同时提高了检测精度和动态测量范围。但是,该方法的工作原理是基于被测面的旋转对称性的,因此只能用来测量旋转对称的面形,并不适用于非旋转对称的自由曲面。

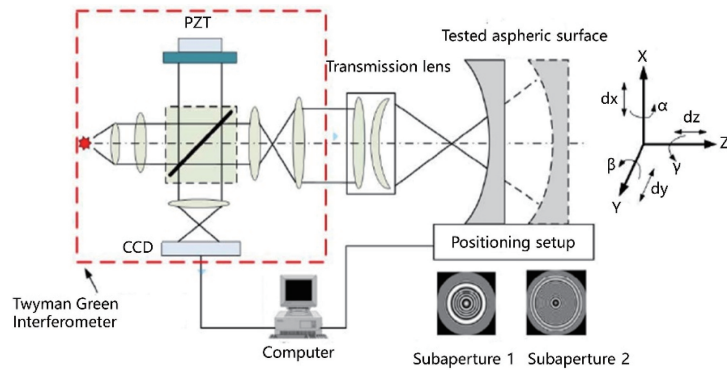


图 12 ASSI 的检测原理示意图^[106]

Fig. 12 Test principle of ASSI^[106]

CSSI 将待测面分为多个圆形子孔径区域(如图 13 所示),通过六维工作台调整被测件与干涉仪的相对位置,测出不同子孔径区域内的局部面形,最后采用拼接算法恢复出完整的面形。美国 QED 公司采用该方法成功研制出一款自动拼接干涉仪,可

以测量最大非球面度为 1000λ 的面形,并将该技术应用于多片自由曲面面形的检测,结果与零位干涉测量一致^[109-113]。韩国基础研究院利用 CSSI 测量了口径为 200 mm 的自由曲面,与商用干涉仪相比,测量误差 RMS 值为 20 nm^[114]。中国科学院长春光

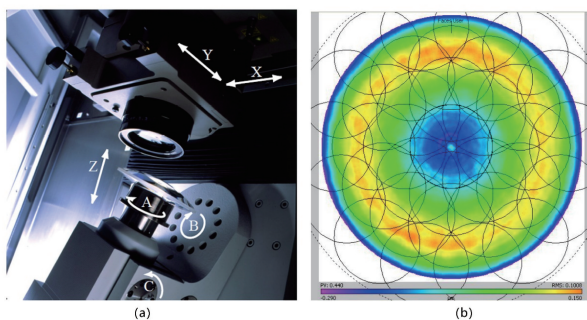


图 13 CSSI 的检测原理^[110]。(a) CSSI 的系统示意图；
(b) 圆孔径划分示意图

Fig. 13 Measurement principle of CSSI^[110]. (a) Schematic of CSSI system; (b) schematic of circular aperture partition

学精密机械与物理研究所基于 CSSI, 提出了一种迭代三角拼接算法, 成功测量了口径为 1450 mm 的离轴抛物面和口径为 130 mm 的凸双曲面^[115], 测量精度 RMS 值优于 3.2 nm。国防科技大学也对 CSSI 的拼接算法进行了研究^[116-117]。

对于非旋转对称的自由曲面, 常规的环形子孔

径和圆形子孔径划分往往不能满足其测量要求。浙江大学团队提出了一种非常规子孔径拼接干涉检测技术 (Irregular subaperture stitching interferometry, ISSI)^[118-119], 利用不规则形状的子孔径对待测自由曲面进行拼接干涉测量, 并将该技术应用于口径为 20 mm 的双圆锥面的面形测量, 孔径划分如图 14 所示, 测量结果与 CMM 测量结果一致, 测量精度 RMS 值为 50 nm。

子孔径拼接法降低了每次测量的局部偏差, 提升了系统的局部测量精度和测量分辨率。但是, 过多的子孔径划分会极大降低测量效率, 也会给面形拼接带来困难, 导致全面形拼接精度的下降。因此, 在测量过程中, 需要平衡检测精度和效率。在保证检测精度的前提下, 提高测量效率是子孔径拼接法研究的主要内容, 具体可以从两方面入手: 第一, 研究高精度子孔径拼接算法, 降低相邻子孔径的“重叠率”, 减少子孔数量; 第二, 研究更灵活子孔径划分方法, 如基于被检面的梯度分布将面形自适应划分为不同形状和大小的子孔径。

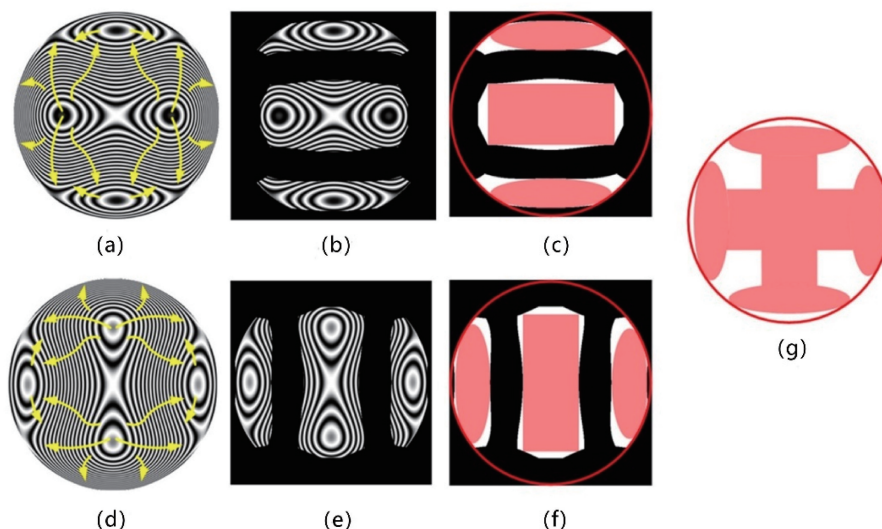


图 14 干涉图的非常规子孔径划分^[119]。(a)(d) 双圆锥面干涉图; (b)(e) 可分辨的子孔径;
(c)(f) 对图 14(b)、(e) 修剪后的子孔径; (g) 子孔径划分的最终结果

Fig. 14 Irregular sub-aperture partition of interferograms^[119]. (a)(d) Interferograms of biconic surface; (b)(e) resolvable sub-apertures; (c)(f) trimmed sub-apertures of Fig. 14(b), (e); (g) ultimate result of sub-aperture partition

2.2.3.4 倾斜波面法

2007 年, 研究者提出了倾斜波面干涉法 (Tilted wave interferometer, TWI), 并将其应用于大梯度变化的非球面面形测量中^[120]。如图 15 所示, 与传统的零位干涉方法不同, 该技术基于被检面的表面梯度分布, 在干涉光路里利用微透镜阵列引入多个轴外点源, 通过点源产生的不同倾角的多束球面波

来补偿被检面在各个局部区域的梯度, 从而得到各局部区域对应的可分辨干涉图, 最后通过相位恢复算法得到完整面形。该方法通过将光学元件表面分割成若干子孔带, 降低了干涉图的条纹密度, 实现了局部面形偏差的测量。但有别于子孔径拼接测量, 其测量时无需改变被测件和干涉仪的相对位置, 即避免了整个系统的定位误差和运动误差, 在保证测

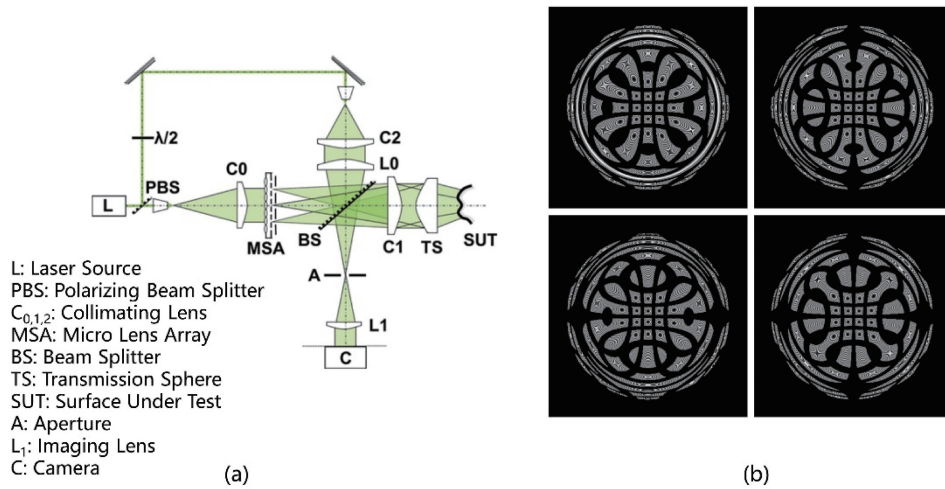


图 15 TWI 的测量原理^[121]。(a)光路示意图;(b)干涉图阵列

Fig. 15 Measurement principle of TWI^[121]. (a) Optical path layout; (b) interferogram array

量效率的同时能得到较高的测量精度。

斯图加特大学研究团队对 TWI 展开了深入研究^[122-129]。2008 年,该团队利用 TWI 对非球面度为 900 μm 的非球面进行了测量,测量精度 PV 值达到 82 nm^[122];2010 年,针对非零位测量中被测自由曲面难以对准的问题,该团队提出了一种自动定位方法,大大降低了被测件的对准难度^[124];2014 年,该团队提出了一种 TWI 系统的标定方法,能够减少测量中的回程误差并降低了对准精度的要求,进一步提高了测量精度^[126];同年,该团队用 TWI 对像散达到 1 mm 的自由曲面进行了测量,测量精度 PV 值优于 125 nm^[121];2019 年,该团队提出了一种消除 TWI 系统误差的方法,系统在有干扰的情况下测量重复性优于 10 nm^[128]。

南京理工大学的研究团队从 2013 年开始对 TWI 进行了一系列的研究并取得了重要成果。2013 年,

该团队提出了基于“黑匣子”思想的逆向光路设计方法,成功测量了口径为 60 mm 的渐进式眼镜片,测量精度 PV 值为 60 nm^[130-131];2015 年,针对倾斜波面法测量自由曲面时的大量回程误差的问题,该团队提出了计算生成波面法与回程误差逆向消除算法相结合的自由曲面面形重构方法,有效消除了干涉系统中的回程误差^[132];该团队提出的虚拟莫尔条纹旋转匹配法解决了自由曲面被测件的空间六维姿态精确定位问题,将被测件的平移误差控制在 5 μm 以内,旋转误差小于 0.4°^[133];2018 年,该团队分析了 TWI 系统中点源阵列分布与被测件的关系模型,提出用光纤阵列代替透镜阵列,大大提高了系统的灵活性和通用性^[134],并对光纤阵列的关键参数进行了分析^[135-136];2019 年,该团队又提出了基于偏摆镜的新型 TWI 系统,如图 16 所示,实现了补偿角度的灵活控制^[137],进一步提高了系统的测量通用性;

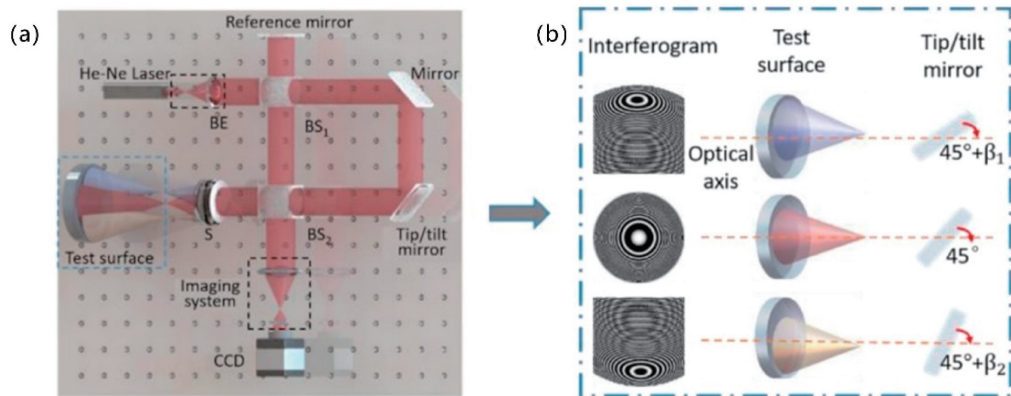


图 16 基于偏摆镜的 TWI 测量原理^[137]。(a)光路图;(b)偏摆镜不同角度对应的测量区域的干涉图

Fig. 16 Measurement principle of TWI based on tip/tilt mirror^[137]. (a) Optical path layout; (b) interferograms under different angles of tip/tilt mirror

同年,为了消除泰曼格林型干涉结构引入的大量系统误差,该团队提出了共光路型的 TWI,如图 17 所示,利用共光路干涉结构的系统误差自消除特性,大大降低了系统误差,对柱面镜的测量精度 RMS 值优于 20 nm^[138-139]。

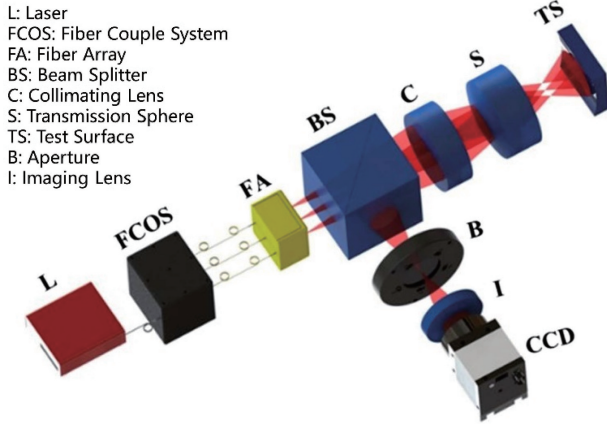


图 17 共光路型 TWI 系统原理图^[138]

Fig. 17 Layout of common-path TWI system^[138]

倾斜波面法测量大口径自由曲面时,需要使用大口径标准补偿镜头,但是大口径标准补偿镜头的加工非常困难,这就限制了系统的测量口径。制作高精度的大口径标准补偿镜头是该方法今后的一个重要研究内容。目前,产生点源阵列的方法主要是透镜阵列、光纤阵列和偏摆镜三种。透镜阵列在测量过程中需要通过调整针孔掩模阵列来控制点源状态,以避免出现干涉条纹的重叠现象,操作复杂;光纤阵列相对简单,能灵活控制点源的状态,但是光纤长度的一致性会引入额外的光程差,且各光纤出射波前质量的一致性难以保证;偏摆镜一次只能产生一个点源,测量效率相对较低。如何借助新技术手段(如液晶调制)灵活生成一致性较好且具有各种分布状态的点源阵列是进一步提高该方法测量效率和精度的关键。

3 结束语

自由曲面光学元件比球面、非球面元件具有更多的设计“自由度”,具备更强的像差矫正能力,能够大幅提升光学系统的性能并大幅优化系统结构,使系统具有空间布局的灵活性,满足现代光学系统高性能、轻量化和小型化的发展趋势。因此,越来越多的光学系统采用自由曲面元件作为核心器件。过去十年,光学自由曲面得到了快速发展,但是与设计 and 加工技术相比,自由曲面的高精度测量技术相对滞后,这已成为制约其广泛应用的瓶颈问题之一。

基于轮廓仪思想发展起来的点线式测量方法和基于波面重构思想发展起来的面式测量方法虽然在自由曲面测量方面都取得了长足的进步,但都面临着“三高”问题,即如何进一步提高检测精度、检测效率、检测通用性以满足应用领域对光学自由曲面的高性能、低成本的要求。因此高精度、高效率、高通用性是光学自由曲面检测技术未来发展的总体趋势,也是光学自由曲面发挥更大作用的关键。结合新材料(如具有特殊光场效能的超表面元件)、新方法(如新型调制器件与方法)及新技术(如基于深度学习的智能算法),从波前补偿、测量路径规划、相位计算处理等方面对现有测量技术进行改进,将是光学自由曲面检测技术未来发展的重点。

参 考 文 献

- [1] Wills S. Freeform optics: notes from the revolution[J]. Optics & Photonics News, 2017, 28(7): 34-41.
- [2] Thompson K P, Rolland J P. Freeform optical surfaces: a revolution in imaging optical design[J]. Optics & Photonics News, 2012, 23(6): 30-35.
- [3] Wei S L, Zhu Z B, Fan Z C, et al. Multi-surface catadioptric freeform lens design for ultra-efficient off-axis road illumination[J]. Optics Express, 2019, 27(12): A779-A789.
- [4] Wu R M, Ding Z H, Yang L, et al. Precise light control in highly tilted geometry by freeform illumination optics[J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2887-2890.
- [5] Zhu Z B, Ma D L, Hu Q M, et al. Catadioptric freeform optical system design for LED off-axis road illumination applications[J]. Optics Express, 2018, 26(2): A54-A65.
- [6] Wu H B, Zhang X M, Ge P, et al. A high-efficiency freeform reflector for a light-emitting diode low-beam headlamp [J]. Lighting Research & Technology, 2016, 48(8): 1005-1016.
- [7] Wang Q F, Cheng D W, Wang Y T, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements [J]. Applied Optics, 2013, 52(7): C88.
- [8] Meng X X, Liu W Q, Zhang D L, et al. Design of wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0418004.
孟祥翔, 刘伟奇, 张大亮, 等. 双自由曲面大视场头盔显示光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418004.
- [9] Wei L D, Li Y C, Jing J J, et al. Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface[J]. Optics Express,

- 2018, 26(7): 8550-8565.
- [10] Liu J, Huang W. Optical system design of reflective head mounted display using freeform surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1018001.
刘军, 黄玮. 反射式自由曲面头盔显示器光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1018001.
- [11] Wang J H, Liang Y C, Xu M. Design of a see-through head-mounted display with a freeform surface[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2015, 19(6): 614-618.
- [12] Bian Y X, Li H F, Wang Y F, et al. Method to design two aspheric surfaces for a wide field of view imaging system with low distortion[J]. Applied Optics, 2015, 54(27): 8241-8247.
- [13] Zhao W, Liu X, Li H. Design of laser projection display illumination system based on freeform surface array[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0622001.
赵伟, 刘旭, 李海峰. 基于自由曲面阵列的激光投影显示照明系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0622001.
- [14] Yu B H, Tian Z H, Su D Q, et al. Design and engineering verification of an ultrashort throw ratio projection system with a freeform mirror[J]. Applied Optics, 2019, 58(13): 3575-3581.
- [15] Yu B H. Research on key technology of ultra-short-focus projection objective system based on freeform surfaces[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
于百华. 基于自由曲面的超短焦投影物镜关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [16] Nie Y F, Mohedano R, Benitez P, et al. Multifield direct design method for ultrashort throw ratio projection optics with two tailored mirrors[J]. Applied Optics, 2016, 55(14): 3794-3800.
- [17] Cayrel M. E-ELT optomechanics: overview[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8444: 84441X.
- [18] Howard J M, Wolbach S. Improving the performance of three-mirror imaging systems with Freeform Optics[C]//Renewable Energy and the Environment, Tucson, Arizona. Washington, D. C.: OSA, 2013: FT2B. 6.
- [19] Meng Q Y, Wang H Y, Wang K J, et al. Off-axis three-mirror freeform telescope with a large linear field of view based on an integration mirror[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 8962-8970.
- [20] Meng Q Y, Wang H Y, Liang W J, et al. Design of off-axis three-mirror systems with ultrawide field of view based on an expansion process of surface freeform and field of view[J]. Applied Optics, 2019, 58(3): 609-615.
- [21] Zhang X, Xu Y C. Study on free-form optical testing [J]. Chinese Optics and Applied Optics Abstracts, 2008, 1(1): 92-99.
张新, 许英朝. 光学自由曲面的检测方法[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 92-99.
- [22] Li A, Wang Y G, Wu Z Q, et al. Data processing of high-order aspheric surface measurements using CMM in optical fabrication[J]. Chinese Optics, 2020, 13(2): 302-312.
李昂, 王永刚, 邬志强, 等. 光学加工过程中高次非球面的三坐标测量数据处理[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 302-312.
- [23] Werner K. XENOS-the new standard[J]. Advanced Technologies in Mechanics, 2014, 1(1): 28-31.
- [24] Spitz S N, Requicha A A G. Multiple-goals path planning for coordinate measuring machines[C]//Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings, April 24-28, 2000, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2000: 2322-2327.
- [25] Spyridi A J, Requicha A A G. Automatic programming of coordinate measuring machines[C]//Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 8-13, 1994, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 1994: 1107-1112.
- [26] Fang Y, Chen K N, Lin Z H. Stereo vision and CMM-integrated intelligent inspection system in reverse engineering [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3521: 115-122.
- [27] Gao H, Zhang X, Fang F. Axicon profile metrology using contact stylus method[J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2018, 14(2): 177-191.
- [28] Stover E, Berger G, Wendel M, et al. Fast optical 3D form measurement of aspheres including determination of thickness and wedge and decenter errors[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9633: 96331O.
- [29] Berger G, Petter J. Non-contact metrology of aspheric surfaces based on MWLI technology[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8884: 88840V.
- [30] Henselmans R, Cacace L A, Kramer G F Y, et al. The NANOMEFOS non-contact measurement machine for freeform optics[J]. Precision Engineering, 2011, 35(4): 607-624.
- [31] Bos A, Henselmans R, Rosielle P C J N, et al. Nanometre-accurate form measurement machine for E-ELT M1 segments[J]. Precision Engineering, 2015, 40: 14-25.
- [32] Anderson D S, Burge J H. Swing-arm profilometry of aspherics[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2536: 169-179.

- [33] Su P, Oh C J, Parks R E, et al. Swing-arm optical CMM for aspherics[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7426: 74260J.
- [34] Burge J H, Benjamin S, Caywood D, et al. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7426: 74260L.
- [35] Wang Y, Su P, Parks R E, et al. Swing arm optical coordinate-measuring machine: high precision measuring ground aspheric surfaces using a laser triangulation probe[J]. Optical Engineering, 2012, 51(7): 073603.
- [36] Jia L D, Wang J W, Zheng Z W, et al. Uncertainty analysis on swing-arm profilometer for optical aspherics [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(17): 2040-2044.
贾立德, 王家伍, 郑子文, 等. 光学非球面形摆臂式测量不确定度分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(17): 2040-2044.
- [37] Jing H W, Lin C Q, Fan B, et al. Measurement of an off-axis parabolic mirror using coordinates measurement machine and swing arm profilometer during the grinding process[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8415: 84150K.
- [38] Wei Z W, Jing H W, Kuang L, et al. Error separation technique for measuring aspheric surface based on dual probes [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8905: 89051S.
- [39] Xiong L, Luo X, Liu Z Y, et al. Swing arm profilometer: analytical solutions of misalignment errors for testing axisymmetric optics[J]. Optical Engineering, 2016, 55(7): 074108.
- [40] Xiong L, Luo X, Liu Z Y, et al. Measurement of 2 m SiC asphere mirror based on swing arm profilometer [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1212002.
熊玲, 罗霄, 刘振宇, 等. 2 m 量级 SiC 非球面反射镜的摆臂轮廓检测[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1212002.
- [41] Xiong L. Research on swing-arm profilometer test for large-aperture complex optical surface[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
熊玲. 大口径复杂光学曲面的摆臂式轮廓测量术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [42] Neal D R, Armstrong D J, Tim Turner W. Wavefront sensors for control and processing monitoring in optics manufacture[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2993: 211-220.
- [43] Guo W J, Zhao L P, Tong C S, et al. Adaptive centroid-finding algorithm for freeform surface measurements[J]. Applied Optics, 2013, 52(10): D75-D83.
- [44] Aftab M, Choi H, Liang R G, et al. Adaptive Shack-Hartmann wavefront sensor accommodating large wavefront variations[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34428-34441.
- [45] Zhang J P. Research on testing aspherical surface using Shack-Hartmann wavefront sensor[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
张金平. 夏克-哈特曼波前传感器检测大口径非球面应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [46] Wu Q Q, Zhang X D, Fang F Z, et al. Shape measurement of the cubic phase plate with wavefront sensing technology[J]. Optical Technique, 2014, 40(2): 105-112.
吴青青, 张效栋, 房丰洲, 等. 基于波前传感法的立方相位板面形测量[J]. 光学技术, 2014, 40(2): 105-112.
- [47] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5457: 366-376.
- [48] Reich C, Ritter R, Thesing J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 224-231.
- [49] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [50] Cui Y J, Zhang W F, Li J X, et al. A method of Gamma correction in fringe projection measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112002.
崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112002.
- [51] Song Q, Chen Y, Zhu R G, et al. Research of 3D measurement technology based on gray code projection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 031203.
宋倩, 陈悦, 朱荣刚, 等. 基于格雷编码投影的三维测量技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031203.
- [52] Feng S J, Zuo C, Yin W, et al. Application of deep learning technology to fringe projection 3D imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303018.
冯世杰, 左超, 尹维, 等. 深度学习技术在条纹投影三维成像中的应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303018.
- [53] Long X, Zhong Y X, Li R J, et al. 3-D surface integration in structured light 3-D scanning[J]. Journal

- of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(4): 477-480.
- 龙玺, 钟约先, 李仁举, 等. 结构光三维扫描测量的三维拼接技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4): 477-480.
- [54] Pan W, Zhao Y. New method of phase calculation of fringe projection measurement[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(7): 1068-1071.
- 潘伟, 赵毅. 提高光栅投影测量精度的相移精确测量法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 1068-1071.
- [55] Complex object 3D measurement based on phase-shifting and a neural network[J]. Optics Communications, 2009, 282(14): 2699-2706.
- [56] Häusler G, Faber C, Olesch E. Deflectometry vs. interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8788: 87881C.
- [57] Su P, Wang S S, Khreishi M, et al. SCOTS: a reverse Hartmann test with high dynamic range for Giant Magellan Telescope primary mirror segments[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8450: 84500W.
- [58] Tang Y, Su X Y, Liu Y K, et al. 3D shape measurement of the aspheric mirror by advanced phase measuring deflectometry[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 15090-15096.
- [59] Tang Y, Su X Y, Wu F, et al. A novel phase measuring deflectometry for aspheric mirror test[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 19778-19784.
- [60] Zhao W C, Su X Y, Liu Y K, et al. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry[J]. Optical Engineering, 2009, 48(10): 103603.
- [61] Tang Y, Su X Y, Liu Y K, et al. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 965-969.
- 唐燕, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 965-969.
- [62] Wan X J, Bin B Y, Xie S P, et al. Development of an integrated freeform optics measurement system based on phase measuring deflectometry[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1084: 1084710.
- [63] Guo C F, Hu A D. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirrors with null phase measuring deflectometry[J]. Optical Engineering, 2019, 58(10): 104102.
- [64] Yuan T. Study on fringe-reflection optical surface shape measurement technology for large aspheric mirror[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 袁婷. 基于条纹反射法的大口径非球面反射镜面形检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [65] MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. Applied Optics, 1971, 10(3): 619-624.
- [66] Kino M, Kurita M. Interferometric testing for off-axis aspherical mirrors with computer-generated holograms[J]. Applied Optics, 2012, 51(19): 4291-4297.
- [67] Su P, Kang G G, Tan Q F, et al. Estimation and optimization of computer-generated hologram in null test of freeform surface[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(12): 1097-1100.
- [68] Shen H, Zhu R H, Gao Z S, et al. Design and fabrication of computer-generated holograms for testing optical freeform surfaces[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 032201.
- [69] Huang Y, Ma J, Zhu R H, et al. Investigation of measurement uncertainty of optical freeform surface based on computer-generated hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112007.
- 黄亚, 马骏, 朱日宏, 等. 基于计算全息的光学自由曲面测量不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112007.
- [70] Zhu D Y, Zhang X J. Design of high-precision phase computer-generated-hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712002.
- 朱德燕, 张学军. 高精度相位型计算全息图的设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712002.
- [71] Zeng X F, Zhang X J, Xue D L, et al. Mapping distortion correction in freeform mirror testing by computer-generated hologram[J]. Applied Optics, 2018, 57(34): F56-F61.
- [72] Chaudhuri R, Papa J C, Rolland J P. System design of a single-shot reconfigurable null test using a spatial light modulator for freeform metrology[J]. Optics Letters, 2019, 44(8): 2000-2003.
- [73] Hao Q, Wang S P, Hu Y. Design method of a liquid crystal based computer-generated hologram for freeform surface measurement[C]//2017 22nd Microoptics Conference (MOC), November 19-22, 2017, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2017: 244-245.
- [74] Hu Y, Wang S P, Wang Z, et al. Liquid crystal hologram for cylinder lens measurement[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 1118: 111850W.
- [75] Peterhansel S, Pruss C, Osten W. Phase errors in high line density CGH used for aspheric testing: beyond scalar approximation[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11638-11651.
- [76] Ma J, Pruss C, Häfner M, et al. Systematic analysis of the measurement of cone angles using high line density computer-generated holograms[J]. Optical Engineering, 2011, 50(5): 055801.

- [77] Xie Y J, Mao X L, Li J P, et al. Optical design and fabrication of an all-aluminum unobscured two-mirror freeform imaging telescope [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 833-840.
- [78] Pang Z H, Feng L J, Ding J T, et al. Design and fabrication of CGH for 820 mm diameter tertiary mirror surface figure testing without center hole [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 1084: 1084019.
- [79] Li S J, Zhang J, Liu W G, et al. Measurement investigation of an off-axis aspheric surface via a hybrid compensation method [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8220-8227.
- [80] Gan Z H, Peng X Q, Chen S Y, et al. Fringe discretization and manufacturing analysis of a computer-generated hologram in a null test of the freeform surface [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(34): 9913-9921.
- [81] Gan Z H, Peng X Q, Chen S Y. Key technology of CGH for complex surface measurement and calibration [J]. *China Metrology*, 2019, 6: 80-85.
甘子豪, 彭小强, 陈善勇. 用于复杂曲面检验校准的 CGH 关键技术 [J]. *中国计量*, 2019, 6: 80-85.
- [82] He Y W, Hou X, Wu F, et al. Analysis of spurious diffraction orders of computer-generated hologram in symmetric aspheric metrology [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20556-20572.
- [83] Liu H L, Zhu Q D, Hao Q, et al. Design of novel part-compensating lens used in aspheric testing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5253: 480-484.
- [84] Sullivan J J, Greivenkamp J E. Design of partial nulls for testing of fast aspheric surfaces [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6671: 66710W.
- [85] Liu D, Yang Y Y, Luo Y J, et al. Non-null interferometric aspheric testing with partial null lens and reverse optimization [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7426: 74260M.
- [86] Fuerschbach K, Thompson K P, Rolland J P. Interferometric measurement of a concave, φ -polynomial, Zernike mirror [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 18-21.
- [87] Dou Y M, Yuan Q, Gao Z S, et al. Partial null astigmatism-compensated interferometry for a concave freeform Zernike mirror [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(6): 065702.
- [88] Zhang L, Zhou S, Li D, et al. Model-based adaptive non-null interferometry for freeform surface metrology [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(8): 081203.
- [89] Zhang L, Zhou S, Li J S, et al. Model calibration by multi-null constraint for an optical freeform surface adaptive interferometer [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 726-734.
- [90] Zhang L, Li C, Huang X L, et al. Compact adaptive interferometer for unknown freeform surfaces with large departure [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1897-1913.
- [91] Zhang L, Li D, Liu Y, et al. Flexible interferometry for optical aspheric and free form surfaces [J]. *Optical Review*, 2017, 24(6): 677-685.
- [92] Liu D, Shi T, Zhang L, et al. Reverse optimization reconstruction of aspheric figure error in a non-null interferometer [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5538-5546.
- [93] Tian C, Yang Y Y, Zhuo Y M. Generalized data reduction approach for aspheric testing in a non-null interferometer [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(10): 1598-1604.
- [94] Shi T, Liu D, Zhang L, et al. Reverse optimization reconstruction method for aspheric testing in a non-null interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612007.
师途, 刘东, 张磊, 等. 非球面非零位检测的逆向优化面形重构 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0612007.
- [95] Shi T, Zang Z M, Liu D, et al. Retrace error correction for non-null testing of optical aspheric surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812006.
师途, 臧仲明, 刘东, 等. 光学非球面面形非零位检测的回程误差校正 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812006.
- [96] Shi T, Liu D, Zhou Y H, et al. Practical retrace error correction in non-null aspheric testing: a comparison [J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 378-385.
- [97] Hao Q, Wang S P, Hu Y, et al. Virtual interferometer calibration method of a non-null interferometer for freeform surface measurements [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 9992-10001.
- [98] Zang Z M, Liu D, Bai J, et al. Misalignment correction for free-form surface in non-null interferometric testing [J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 204-213.
- [99] Zhang L, Zhou S, Li J S, et al. Deep neural network based calibration for freeform surface misalignments in general interferometer [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33709-33723.
- [100] Zhang L, Li C, Zhou S, et al. Enhanced calibration for freeform surface misalignments in non-null interferometers by convolutional neural network [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4988-4999.
- [101] Chow W W, Lawrence G N. Method for subaperture testing interferogram reduction [J]. *Optics Letters*,

- 1983, 8(9): 468-470.
- [102] Kuechel M F. Interferometric measurement of rotationally symmetric aspheric surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 1031: 103160Q.
- [103] Hou X, Wu F, Yang L, et al. Full-aperture wavefront reconstruction from annular subaperture interferometric data by use of Zernike annular polynomials and a matrix method for testing large aspheric surfaces[J]. Applied Optics, 2006, 45(15): 3442-3455.
- [104] Hou X, Wu F, Yang L, et al. Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method[J]. Optics Express, 2007, 15(20): 12890-12899.
- [105] Chen S Y, Li S Y, Dai Y F, et al. Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm[J]. Optics Express, 2008, 16(7): 4760-4765.
- [106] Wen Y F, Cheng H B, Tam H, et al. Modified stitching algorithm for annular subaperture stitching interferometry for aspheric surfaces [J]. Applied Optics, 2013, 52(23): 5686-5694.
- [107] Zhang L, Liu D, Shi T, et al. Aspheric subaperture stitching based on system modeling[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19176-19188.
- [108] Zhang L, Tian C, Liu D, et al. Non-null annular subaperture stitching interferometry for steep aspheric measurement[J]. Applied Optics, 2014, 53(25): 5755-5762.
- [109] Fleig J F, Murphy P E. Measuring a nanometer-precision asphere with subaperture stitching interferometry[C]//Frontiers in Optics, Rochester, New York. Washington, D. C.: OSA, 2006: OFTuA6.
- [110] Murphy P, Fleig J, Forbes G, et al. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6293: 62930J.
- [111] Supranowitz C, Lormeau J P, Maloney C, et al. Freeform metrology using subaperture stitching interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 1015: 101510D.
- [112] Supranowitz C, Maloney C, Murphy P, et al. Enhanced resolution and accuracy of freeform metrology through Subaperture Stitching Interferometry [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1044: 1044818.
- [113] Murphy P, Supranowitz C. Freeform testability considerations for subaperture stitching interferometry [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11175: 111750Z.
- [114] Hyun S, Je S, Kim G H. High precision interferometric measurement of freeform surfaces from the well-defined sub-aperture surface profiles [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 1117: 111752B.
- [115] Yan L S, Wang X K, Zheng L G, et al. Experimental study on subaperture testing with iterative triangulation algorithm[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22628-22644.
- [116] Chen S Y, Xue S, Dai Y F, et al. Subaperture stitching test of large steep convex spheres[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29047-29058.
- [117] Chen S Y, Wu C C, Tie G P, et al. Stitching test of large flats by using two orthogonally arranged wavefront interferometers[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9193-9198.
- [118] Liu D, Zhou Y H, Bai J, et al. Aspheric and freeform surfaces test with non-null sub-aperture stitching [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 1002: 100210N.
- [119] Zang Z M, Bai J, Liu D, et al. Interferometric measurement of freeform surfaces using irregular subaperture stitching[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(5): 055202.
- [120] Garbusi E, Pruss C, Liesener J, et al. New technique for flexible and rapid measurement of precision aspheres [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6616: 661629.
- [121] Baer G, Schindler J, Pruss C, et al. Fast and flexible non-null testing of aspheres and free-form surfaces with the tilted-wave-interferometer[J]. International Journal of Optomechatronics, 2014, 8(4): 242-250.
- [122] Garbusi E, Pruss C, Osten W. Interferometer for precise and flexible asphere testing[J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 2973-2975.
- [123] Garbusi E, Osten W. Perturbation methods in optics: application to the interferometric measurement of surfaces[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, 26(12): 2538-2549.
- [124] Baer G, Garbusi E, Lyda W, et al. Automated surface positioning for a non-null test interferometer [J]. Optical engineering, 2010, 49(9): 095602.
- [125] Fortmeier I, Stavridis M, Wiegmann A, et al. Analytical Jacobian and its application to tilted-wave interferometry [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21313-21325.
- [126] Baer G, Schindler J, Pruss C, et al. Calibration of a non-null test interferometer for the measurement of aspheres and free-form surfaces [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 31200-31211.
- [127] Fortmeier I, Stavridis M, Wiegmann A, et al. Evaluation of absolute form measurements using a tilted-wave interferometer[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3393-3404.

- [128] Schindler J, Pruss C, Osten W. Simultaneous removal of nonrotationally symmetric errors in tilted wave interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(7): 074105.
- [129] Beisswanger R, Pruss C, Schober C, et al. Tilted wave interferometer in common path configuration: challenges and realization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 1105: 110561G.
- [130] Shen H, Li J, Zhu R H, et al. Design of non-null interferometer based on point source array for testing freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1222003.
沈华, 李嘉, 朱日宏, 等. 基于点源阵列的自由曲面非零位干涉检测系统设计方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1222003.
- [131] Shen H. Research on key techniques of tilted wave interferometer used in the measurement of freeform surfaces[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
沈华. 基于多重倾斜波面的光学自由曲面非零位干涉测量关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [132] Shen H, Zhu R H, Chen L, et al. Assessment of optical freeform surface error in tilted-wave-interferometer by combining computer-generated wave method and retrace errors elimination algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 074105.
- [133] Li J, Shen H, Zhu R H. Method of alignment error control in free-form surface metrology with the tilted-wave-interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(4): 044101.
- [134] Li J, Shen H, Zhu R H, et al. Interferometry with flexible point source array for measuring complex freeform surface and its design algorithm[J]. *Optics Communications*, 2018, 417: 67-75.
- [135] Li X L, Shen H, Li J, et al. Optical path difference calibration method of optical fiber array point source generator in tilted-wave-interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0512002.
李小柳, 沈华, 李嘉, 等. 倾斜波面干涉仪中光纤阵列型点源发生器的光程误差标定方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0512002.
- [136] Lu Q. Point source generator for dynamic generation of ideal interference point source array [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
路晴. 动态生成理想干涉点源阵列的点源发生器的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [137] Gao J M, Shen H, Li J, et al. A flexible angle compensation method for freeform surface testing based on tip/tilt mirror[J]. *Optics Communications*, 2019, 444: 21-27.
- [138] Li J, Shen H, Wang J S, et al. Common-path interferometry with tilt carrier for surface measurement of complex optics [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 1991-1997.
- [139] Wang J S. Design and development of common-path interferometer for complex surface based on optical fiber array[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
王劲松. 基于光纤阵列的复杂面形元件共光路型干涉测量系统设计与研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.