

## 计算机辅助光学偏折测量技术研究进展

吴振东<sup>1</sup>, 王道档<sup>1\*</sup>, 阮旸<sup>1</sup>, 梁荣光<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;<sup>2</sup>亚利桑那大学光学科学学院, 亚利桑那 图森 85721

**摘要** 光学偏折测量技术作为高精度的非接触式测量方式,可在不损伤被测元件表面的同时,具有较高的空间分辨率和较大的测量动态范围。光学偏折测量系统结构简单,在现今越来越注重高精度、高效率和高通用性的光学复杂自由曲面测量领域中有较好的应用前景。首先,回顾了近年来的复杂曲面测量方法,并分析其测量特点。然后,着重介绍了采用计算机辅助的光学偏折测量技术及其系统关键性能参数。接着,对光学偏折测量所涉及的测量模型的建立、结构误差的校正、相位的获取和曲面的重构等关键技术的研究进展进行了讨论。最后,总结了基于计算机辅助的光学偏折测量技术的几种典型应用。

**关键词** 测量; 光学偏折术; 光学检测; 大动态范围; 计算机辅助测量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1712001

## Review of Research on Computer-Aided Deflectometric Measurement Technology

Wu Zhendong<sup>1</sup>, Wang Daodang<sup>1\*</sup>, Ruan Yang<sup>1</sup>, Liang Rongguang<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;<sup>2</sup>James C. Wyant College of Optical Sciences, University of Arizona, Tucson 85721, Arizona, USA

**Abstract** As a high-precision non-contact measurement method, the deflectometric measurement technology can achieve the testing without damaging the surface of the measured components, and it has a high spatial resolution and a large dynamic range. The deflectometric measurement system is simple in configuration, and it has a good application prospect in the field of complex optical freeform surface measurement, which requires high precision, high efficiency, and high versatility. This paper firstly reviews the complex surface measurement methods in recent years and analyzes the corresponding measuring characteristics. Then, it focuses on the introduction to the computer-aided deflectometric measurement technology and the key performance parameters in the computer-aided deflectometric measurement system. After that, the research progress in the key techniques in the deflectometric measurement is discussed, including the measurement model construction, geometrical error calibration, phase acquisition, and surface reconstruction. Finally, the typical applications of computer-aided deflectometric measurement technology are summarized.

**Key words** measurement; deflectometry; optical testing; large dynamic range; computer-aided measurement

## 1 引言

随着光学设计和制造业的飞速发展,各种复杂自由曲面元件在现代超精密制造、航天航空、人工智能和医疗器械等领域中得到了越来越广泛的应用,其中元件轮廓形貌的有效测量是一个关键技术环节。随着先进光学加工技术的迅速发展,尤其是单晶金刚石超精

密切削加工技术的不断发展,复杂曲面光学元件轮廓形貌的测量已成为整个超精密加工精度实现的主要限制因素,是制约复杂曲面光学元件高精度制造和大范围应用的瓶颈,并对测量方法的测量精度、动态范围和效率提出了越来越高的要求<sup>[1-2]</sup>。

获取复杂曲面全貌的三维形貌检测技术从测量形式上主要可分为接触式和非接触式测量。常见的接触

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-06-13; 录用日期: 2022-06-30

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY21E050016)

通信作者: \*wangdaodang@sina.com; \*\*liang@optics.arizona.edu

式测量方法有轮廓仪法和三坐标测量机法等。接触式的位移传感器按照设定的运动轨迹和采样密度对被测表面上的离散点进行扫描测量,通过离散点的空间坐标拟合被测表面形状,这类方法通用性强、动态范围大,适用于复杂曲面元件的研磨和抛光初期阶段的面形测量。然而,这类方法需要进行数据拼接才能获得被测元件的全口径形貌,耗时较长,效率低下,测量精度会受到外界干扰的限制,精度只能达到微米量级<sup>[3]</sup>,并且接触式测量过程易损伤被测元件表面。

为了提高测量效率并避免接触带来的表面损伤,高精度元件表面测量往往采用非接触式测量技术,按测量原理可分为几何光线测量和光学干涉测量。常用的几何光线测量方法有光阑检验法和条纹调制法。光阑检验法主要包括哈特曼光阑检测法和夏克-哈特曼波前传感器检测法。哈特曼光阑检测法是由德国天体物理学家 Johannes Hartman 提出的,通过计算探测器中实际光斑和理想光斑的横向偏差来计算波前斜率,进而确定对应被测面形的偏差<sup>[4]</sup>。夏克-哈特曼波前测量技术是在哈特曼测试的基础上发展得到的,采用微透镜阵列代替哈特曼光阑提高了能量利用率和光斑定位精度,20世纪末美国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<sup>[5]</sup>。受透镜尺寸的限制和大动态范围复杂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影响<sup>[6]</sup>。条纹调制法可分为结构光法和光学偏折法。结构光法将调制的条纹光投影到被测面上,通过分析条纹相位与被测面高度的数学关系得到被测面的面形。该方法结构简单,测量范围大,但是测量精度不高。目前主流的高精度面形测量技术是光学干涉测量,这类方法的测量精度高,空间分辨率高,并且测量速度快<sup>[7]</sup>,高精度激光干涉仪已经成为世界通用的光学面形质量评价仪器<sup>[8]</sup>。然而,干涉测量方法存在测量动态范围小和测量口径有限的问题,并极大限制了其在自由曲面测量中的应用<sup>[9-10]</sup>。针对这些问题,补偿镜法、计算全息法、子孔径拼接法和倾斜波面干涉法等技术被应用于不同的干涉测量仪器中。补偿镜将球面参考波调制成与被测面匹配的波前,常用的补偿镜种类有 Dall 补偿镜<sup>[11]</sup>和 Offner 补偿镜。计算全息法采用计算机生产全息图(CGH),补偿元件可利用光学衍射效应生成任意形状的理想波前<sup>[12]</sup>。补偿镜法和计算全息法均可实现高精度的零位干涉测量,但是为了实现复杂曲面元件的高精度测量,对补偿元件的设计、加工精度和装调精度提出了很高的要求,并且这类元件均不具备通用性,测量成本高。子孔径拼接法将被测面划分成多个子孔径,以保证子孔径内干涉仪可完成测量,然后将全部子孔径测量结果进行拼接得到全口径测量结果<sup>[13]</sup>,该技术降低了测量成本,但是无法避免运动结构和拼接算法带来的误差。倾斜波面干涉法通过在干涉测量系统中引入轴外点光源阵列生成不同倾斜角度的球面波来与被测波前的不同位置形成干涉,从而减少条纹密度<sup>[14]</sup>。该方法避免了运动结构带来的误

差,有较好的通用性,但是系统复杂度高。因此,一种适用于复杂曲面元件面形测量的方法亟待被提出与发展。

光学偏折测量技术属于条纹调制法,其发展历程可以追溯到20世纪60年代用于测量表面轮廓与应力分析的莫尔法<sup>[15]</sup>,莫尔法通过使用莫尔条纹来测量物体表面的拓扑结构<sup>[16]</sup>,具有较高的抗干扰能力,但测量精度会受到光栅质量的影响,这限制了莫尔法的应用<sup>[17-18]</sup>。随着液晶屏的出现,文献<sup>[19-20]</sup>中使用液晶屏产生条纹测量反射自由曲面,并称之为结构光反射技术。它是将光强受调制的光投影到被测元件表面上,利用相机对经被测表面调制后的光进行成像,通过获取相位分布推导出条纹相位与面形表面高度的数学关系,从而获取被测元件的高度分布,再利用重构算法还原出面形。Knauer 等<sup>[21]</sup>首次提出了相位偏折测量法(PMD),采用与哈特曼光阑检测技术相逆的光路布局,利用条纹投影的方法实现了反射光学元件的面形测量。PMD方法的主要优势有:非接触式测量,可实现无损测量;全面形测量,投射的光场能覆盖被测件,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。

随着计算机技术的发展,计算机运算能力的提高给光学偏折测量技术注入了新的活力,利用计算机优化整体流程可以更快地处理复杂数据,这极大地提高了光学偏折测量技术的测量效率和通用性。本文主要介绍了采用计算机辅助的光学偏折测量技术的数学原理及其系统的关键性能参数。在此基础上,讨论了光学偏折测量所涉及的测量模型的建立、结构误差的校正、相位的获取、曲面重构的方法和测量动态范围的扩展等关键技术的研究进展。最后,对基于计算机辅助的光学偏折测量系统的典型应用进行了介绍。

## 2 计算机辅助的光学偏折测量基本原理

### 2.1 光学偏折测量系统结构布局及数学原理

光学偏折测量的基本思想是通过向被测表面投射调制正弦条纹,在光的反射方向上用电荷耦合器件(CCD)相机接收该反射光栅条纹,如图1所示。CCD相机采集到的反射条纹的相位分布与被测物表面的斜率直接相关。由采集图像与液晶显示(LCD)投影屏显示图像的相位对应关系可确定光线的传播路径,并通过计算相位的改变量得到物体表面的斜率分布,再利用斜率积分法等重构其三维形貌。

当投影屏的任一像素 $(x_{\text{screen}}, y_{\text{screen}})$ 被点亮,被测表面上也会亮起一个对应的亮点 $(x_m, y_m)$ ,固定被测反射面与投影屏的相对位置使CCD相机能获取被测物表面上的亮点 $(x_{\text{screen}}, y_{\text{screen}})$ 。基于投影屏亮点像素、被测曲面投影位置和CCD相机上亮点像素的一一对应关系,可以确定各条入射光线与其对应的反射光线,被测反射面各点在 $x$ 方向和 $y$ 方向的斜率 $w_x(x_m, y_m)$ 和 $w_y(x_m, y_m)$ 可以表示为

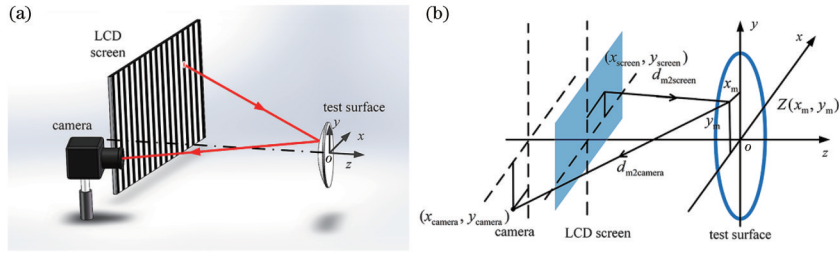


图 1 光学偏折测量的几何模型。(a)实物图;(b)原理图

Fig. 1 Geometric model of deflectometric measurement. (a) Physical drawing; (b) schematic diagram

$$\begin{cases} w_x(x_m, y_m) = \frac{\frac{x_m - x_{camera}}{d_{m2camera}} + \frac{x_m - x_{screen}}{d_{m2screen}}}{\frac{z_{m2screen} - Z(x_m, y_m)}{d_{m2screen}} + \frac{z_{m2camera} - Z(x_m, y_m)}{d_{m2camera}}} \\ w_y(x_m, y_m) = \frac{\frac{y_m - y_{camera}}{d_{m2camera}} + \frac{y_m - y_{screen}}{d_{m2screen}}}{\frac{z_{m2screen} - Z(x_m, y_m)}{d_{m2screen}} + \frac{z_{m2camera} - Z(x_m, y_m)}{d_{m2camera}}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中： $d_{m2camera}$  为被测面亮斑中心与 CCD 相机对应亮点像素中心之间的距离； $d_{m2screen}$  为被测面亮斑中心与投影屏对应的像素点之间的距离； $Z(x_m, y_m)$  为被测表面上点  $(x_m, y_m)$  的高度； $z_{m2screen}$  为  $z$  方向上被测表面到投影屏的距离； $z_{m2camera}$  为  $z$  方向上被测表面到相机小孔的距离。

在实际测量中，逐一确定投影屏亮点像素、被测曲

面投影位置和 CCD 相机上亮点像素的一一对应关系是极其耗时的一种方式，而通过正弦条纹投影可提高面形测量效率。当投影屏向被测曲面投影编码条纹时，CCD 相机获取经被测物反射后的变形条纹。基于 CCD 相机获取的变形条纹与 LCD 投影屏投影条纹相位的对应关系，通过相位解调可得到 CCD 相机像素与 LCD 投影屏像素的一一对应关系，如图 2 所示。

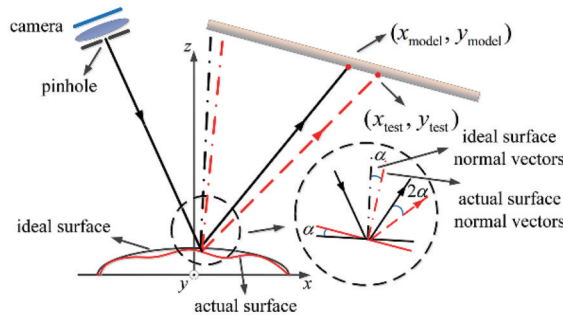


图 2 光学偏折面形测量原理模型

Fig. 2 Principle model of deflectometric surface measurement

为了测得被测表面的面形误差，可在建立测量系统光线追迹模型时根据光路可逆原理，将相机小孔作为点光源，将投影屏作为像面，并可在实际测量中利用正弦条纹投影技术与相移技术测得被测曲面在投影屏上的实际光斑分布  $(x_{test}, y_{test})$ 。同时，利用测量系统光线追迹模型，根据理想面情况下的被测面，得到像面上的理想光斑分布  $(x_{model}, y_{model})$ 。将被测面与其理想面的斜率偏差记为  $(\Delta w_x, \Delta w_y)$ ，理想光斑分布  $(x_{model}, y_{model})$  与实际光斑分布  $(x_{test}, y_{test})$  的坐标偏差对应着图 2 中实际反射光线与理想反射光线间的偏折角度  $2\alpha$ ，进而得到被测表面对应亮点的切线偏差为  $\alpha$ ，其具体关系可近似表示为

$$\begin{cases} \Delta w_x = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \approx \frac{x_{test} - x_{model}}{2d_{m2screen}} = \frac{\Delta x_{spot}}{2d_{m2screen}} \\ \Delta w_y = \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \approx \frac{y_{test} - y_{model}}{2d_{m2screen}} = \frac{\Delta y_{spot}}{2d_{m2screen}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： $(x, y)$  为测量系统中出瞳上的坐标； $W(x, y)$  为波前像差； $\Delta x_{spot}$  为  $x$  方向上实际光斑与理想光斑的偏差； $\Delta y_{spot}$  为  $y$  方向上实际光斑与理想光斑的偏差。被测曲面的面形误差可以通过对斜率偏差  $(\Delta w_x$  和  $\Delta w_y)$  进行积分求得。

## 2.2 光学偏折测量系统性能参数分析

光学偏折测量技术作为一种可应用于复杂自由曲

面测量的大动态范围测量手段,其测量动态范围、斜率分辨率和高度分辨率是重要的性能参数。光学偏折测量系统的动态范围表示系统最大可测的斜率范围,可根据投影屏可视区域尺寸与光线到被测面的距离的比值来计算,以反射测量系统为例,其对应的可测斜率动态范围  $\Delta S$  为

$$\Delta S = \frac{P}{2d_{m2screen}}, \quad (3)$$

式中:  $P$  为投影屏可视区域尺寸。

斜率分辨率表示系统所能测量的最小表面斜率。在光线追迹过程中,投影屏上所能分辨的最小距离为两像元之间的距离,即一个像元尺寸,因此被测表面可分辨的最小斜率的计算公式为

$$\Delta\theta = \frac{D_{pixel}}{2d_{m2screen}} \cdot R_{SN}, \quad (4)$$

式中:  $D_{pixel}$  为投影屏像元尺寸;  $R_{SN}$  为信噪比。

高度分辨率表示所能测量的被测表面由于斜率而产生的高度起伏的最小值,其数值上等于斜率分辨率  $\Delta\theta$  与空间采样尺寸  $\delta_x$  的乘积,即

$$\Delta h = \Delta\theta \cdot \delta_x, \quad (5)$$

其中,空间采样尺寸  $\delta_x$  的值为视场内样品尺寸与采样像素数的比值。

由式(3)~(5)可知:当对应液晶投影屏有效工作区域的直径为 64.80 mm,被测元件到显示屏的距离为 85.62 mm 时,由式(3)可得测量系统的测量动态范围为 0.3784 rad;当屏幕像元尺寸为  $3.63 \mu\text{m} \times 3.63 \mu\text{m}$ ,信噪比为 1/50,空间采样尺寸为  $1.19 \mu\text{m}$  时,由式(5)可得该系统对被测物可分辨的最小高度为 0.034 nm。由此可知,光学偏折测量系统的高度分辨率可优于亚纳米级,同时相对于干涉法具有较大的动态测量范围,可达干涉法的 1000 倍以上。

### 3 计算机辅助光学偏折测量关键技术

在光学偏折测量中,为了降低测量复杂性和经济成本,并提高测量精度和通用性,通常需要利用强大的计算机来辅助测量工作,包括:建立测量系统的测量模型;针对光学偏折测量精度易受系统结构参数标定误差的影响问题,进行系统结构误差的校正;在精确获取条纹相位信息后,进行曲面斜率计算和面形重构;针对大斜率范围和大梯度的被测曲面,需要进行系统动态测量范围的扩展。众多研究人员针对复杂自由曲面测量过程的各个环节提出了改进的方法,使计算机辅助光学偏折方法拥有了更高的精度和更大的测量范围。

#### 3.1 基于计算机辅助的光学偏折测量模型

由于镜面矢量高度不确定性问题的存在,故仅仅标定得到屏幕上亮点的位置、相机小孔的位置和被测元件照亮的区域对应的反射光线是不够的,还需要提供额外的信息来确定镜面的实际面形与斜率信息。目前主要采用 4 种测量模型来解决该问题,即逆向光线追迹模型、投影屏平移模型、立体光学偏折术和预知面形模型。

逆向光线追迹模型利用逆向光线追迹原理,引入贝塞尔多项式表示的模型面形来重建被测元件的面形<sup>[20]</sup>,如图 3 所示。该模型的测量精度主要取决于相机投影矢量的标定精度、相机光心的标定精度、屏幕像素点的标定精度和算法的精度等。这种测量模型的测量精度较低,并且可能会因为算法的不收敛而得到错误的结果。针对该问题,复旦大学 Xu 等<sup>[22]</sup>在逆向光线追迹模型的基础上提出了一种无需额外测量的在线光学偏折测量法,采用迭代优化算法,通过对齐反射点与角平分线位置的方式来定位被测元件的初始位置,该方法无需被测元件的特征点也可完成定位,提高了自由曲面的测量效率,并增大了自由曲面的测量范围。墨西哥国立自治大学 Huerta-Carranza 等<sup>[23]</sup>利用逆向光线追迹模型辅助设计投影的斑点图案,避免了图案经过反射后出现重叠的情况,实现了渐进式多焦镜头的测量,测量结果与 ESSILOR ALM 700 型焦度计的相对偏差仅为 3.55%。

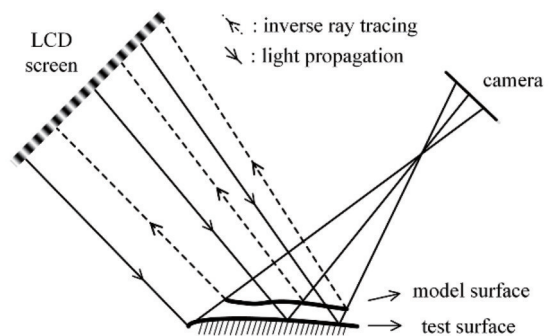
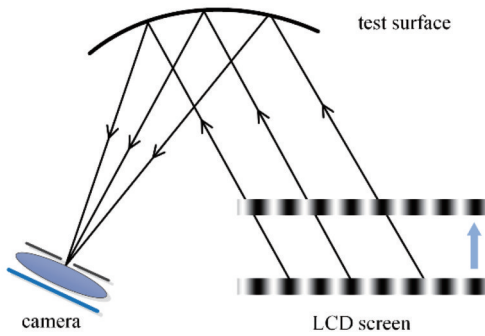


图 3 逆向光线追迹模型<sup>[20]</sup>

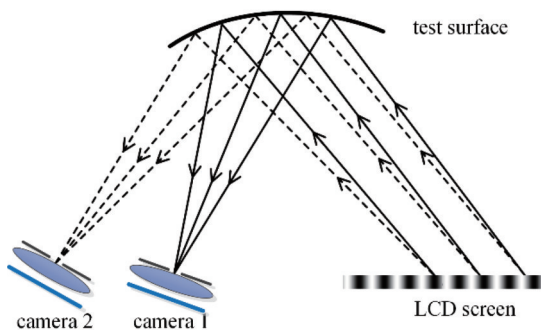
Fig. 3 Reverse ray-tracing model<sup>[20]</sup>

投影屏平移模型是通过平移用于投影条纹的 LCD 屏,获取同一相机像素点对应在显示屏位置 1 与显示屏位置 2 两个不同位置上的同相位点。如图 4 所示,连接同相位点获得与相机像素点对应的入射光线方向,入射光线与反射光线的交点位置即为镜面点的位置,从而得到被测面的面形<sup>[17]</sup>。为了扩大系统的景深,河北工业大学和英国哈德斯菲尔德大学提出了基于双侧远心镜头的光学偏折系统<sup>[24]</sup>,利用相机采集被辅助平面镜反射的三个不同位置的条纹图案,并以此来标定屏幕和双侧远心镜头的相对位置,进而提高测量系统的标定精度。该测量系统通过建立绝对相位和高度之间的数学关系,可直接通过绝对相位计算获取重构面形,无需对斜率信息进行积分。同时,该测量系统可以测量不连续的镜面物体,并实现了镜面台阶测量误差小于  $28.5 \mu\text{m}$ 。

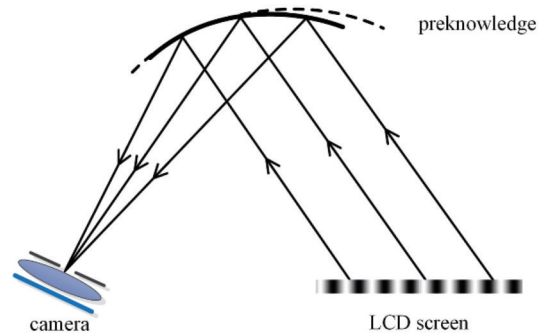
立体光学偏折术由 Knauer 等<sup>[21]</sup>于 2004 年提出,通过引入第二个相机来解决镜面矢高的不确定性问题,并实现了 20 nm 的重构精度。立体光学偏折测量基于两个相机对被测元件的同一采样点得到的法线方向一致的假设,通过不断寻找满足该条件的采样点,得到被测元件的法线与面形,如图 5 所示。基于该模型的光学偏折测量系统虽然对标定精度要求较低,但是

图 4 投影屏平移模型<sup>[17]</sup>Fig. 4 Projection screen shift model<sup>[17]</sup>

在法线计算过程中需要不断搜索点并计算其法线,计算过程复杂,且精度不稳定。复旦大学 Zhang 等<sup>[25]</sup>在此基础上提出了一种扩展测量范围的立体光学偏折方法,对被测表面的名义面形模型与立体测量系统测量范围的重叠区域进行测量,其他区域使用软件可调试光学测量系统(SCOTS)方法进行测量。这种方法结合了立体和单视场偏折法的优点,保证了测量的精度和灵活性。同样,为了扩大测量范围,四川大学 Wang 等<sup>[26]</sup>提出了一种无标记的拼接光学偏折法,基于立体光学偏折迭代算法,计算子孔径内的点云数据,并用点云基准确定重叠区域,再结合拼接算法,消除子孔径拼接误差,获得最终的全孔径面形。该方法与传统的光学偏折相比,测量面积明显变大,测量精度可以达到 100 nm。针对立体偏折重构被测表面的搜索过程耗时的问题,武汉科技大学和香港中文大学提出了基于立体相位偏折测量系统的迭代重构算法<sup>[27]</sup>,通过逐步收敛优化方法确定种子点,进而以种子点高度作为初始迭代高度逐步重构被测面形,该方法相较于传统方法无需对每个像素进行耗时的搜索,加快了重构面形的速度,在实验中重构时间为 72 s,仅为传统方法的 1/24。西班牙巴塞罗那自治大学对立体光学偏折系统进行了改进<sup>[28]</sup>,采用二阶多项式迭代拟合方法实现了相位差最小化来计算被测面各点信息,并进一步采用亚像素双三次插值与二维傅里叶积分结合的方法重构被测面形,测量精度达到 3.90  $\mu\text{m}$ ,重复性误差在 35.10 nm 以内,相较传统立体光学偏折法,该方法具有重构速度快和鲁棒性强的优点。

图 5 立体光学偏折术<sup>[21]</sup>Fig. 5 Stereo deflectometry<sup>[21]</sup>

预知面形模型由美国亚利桑那大学的 Su 等<sup>[29]</sup>提出,这种基于预知面形模型的条纹反射测量系统被称为软件可调试光学测量系统。预知面形模型根据镜面采样点处的法线与小孔相机的光心坐标、点亮被测镜面采样点的屏幕像素点坐标和镜面采样点坐标之间的函数关系,利用预知面形提供较好的初始值,最后根据函数关系迭代求得被测镜面的斜率与面形,如图 6 所示。该研究团队还提出了一种无模型迭代处理方法<sup>[30]</sup>,通过对被测面形的不断迭代可实现对未知模型的表面进行光学偏折测量。中国计量大学和美国亚利桑那大学提出了一种基于逆向哈特曼测量的光学偏折曲面测量方法<sup>[31]</sup>,采用计算机辅助测量方式,建立了“虚零位”测量系统,并有效消除了系统自身结构参数误差引入的波前像差,实现了对凸球面反射镜的纳米级精度测量。

图 6 预知面形模型<sup>[29]</sup>Fig. 6 Preknowledge model<sup>[29]</sup>

上述 4 个不同的测量模型均是为了解决镜面矢量高度不确定性的问题,其中:逆向光线追迹模型系统搭建方便,标定算法简单,但是测量精度会受到各个器件(如相机、投影屏)标定精度的限制,较难达到高精度,并且会因算法不收敛导致测量结果不可靠;投影屏平移模型通过移动屏幕获取入射光线方向,再根据入射光线与出射光线的关系获得镜面点的坐标与斜率,测量精度主要受限于入射光线与反射光线的位置和角度计算精度;立体光学偏折术通过不断地假设被测点位置,并且在两个相机假定的被测镜面点下分别求得对应的法线,直到找到一个点使在这个镜面点位置求得的两条法线相同,基于这种模型的检测系统对标定精度要求较低,但是在计算法线的过程中需要不断地假设点并计算法线,计算复杂度高,且精度不够稳定;预知面形模型根据镜面被测点的法线与相机的光心坐标、屏幕像素点坐标和镜面采样点坐标之间的函数关系,通常可以采用一个理想的模型来提供一个较好的初始面形,再根据函数关系迭代求得被测镜面的斜率与面形,这种方法具有较高的测量精度,但对系统的标定精度要求较高。

### 3.2 结构误差校正与相位获取

光学偏折系统测量精度易受系统结构参数标定误差的影响,其中倾斜标定误差、横向标定误差和轴向标定误差均会在测量结果中引入明显的测量误差。同

时,条纹投影作为光学偏折的常用手段,条纹的相位携带着面形的斜率信息,进而获取精确的相位也是高精度测量的必要前提。为了消除预标定引入的结构误差和相位获取不准确对波前测量结果的影响,可利用计算机辅助校正方法进行系统结构的误差校正和相位的准确获取。

计算机辅助结构误差校正方式主要有两类,一类是采用高精度标定元件,另一类是通过分析测得波前像差特征来完成校正。采用高精度标定元件的方式简化了校正的过程,降低了计算复杂度。四川大学 Ge 等<sup>[32]</sup>提出了一种基于相机镜头入瞳中心(EPC)的光学偏折相机标定方法,适用于广角镜头、鱼眼镜头等,使用参考平面和相机镜头的外部光阑来标定 EPC 的绝对坐标,再将 EPC 作为相机坐标用于光学偏折测量,并在 104 mm 口径的光学平面镜实验测量中实现了亚波长的测量精度。此外,也有研究人员采用参考面方式来标定系统结构参数。复旦大学和英国哈德斯菲尔德大学提出了一种简便的几何标定方法来校正离轴光学偏折系统的几何参数<sup>[33]</sup>,采用带标记的平面镜,只需采集一幅图像,即可标定投影屏和相机的位置,并且对镜面的测量精度达到了 100 nm,如图 7 所示。也可采用无标记的平面镜和光线追迹相结合的方法采集 4 幅图像,完成相机和屏幕位置的自校准<sup>[34]</sup>。

相较于采用高精度标定元件的方式,通过分析像差特征的方式在极大降低成本的同时,有效提高了测量精度。中国计量大学和美国亚利桑那大学针对系统建模误差所引入的系统误差,提出了一种基于计算机辅助逆向光线追迹的结构参数校准方法<sup>[31]</sup>。该方法在较大的结构误差情况下,也能达到与干涉法相当的测量精度。然而,该方法可能会引起过校正,即更适用于误差较小的曲面测量。针对该问题,该研究团队进一

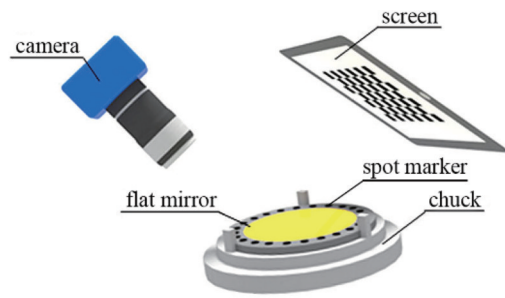


图 7 带标记镜面校正法<sup>[33]</sup>

Fig. 7 Calibration method of flat mirror with markers<sup>[33]</sup>

步提出了一种基于 Zernike 多项式的高精度结构误差校正方法<sup>[35]</sup>,针对不同结构误差类型对应引入不同的 Zernike 多项式系数权重分布,对不同类型结构误差进行分步校正,从而有效避免了过校正的问题,可实现大动态范围自由曲面的高精度测量,实验效果如图 8 所示。天津大学 Jiang 等<sup>[36]</sup>对波前像差测量中的系统误差进行了分析,并提出了相应的补偿方法,提高了波像差测量精度,在实验中补偿前的测量精度为 4.078  $\mu\text{m}$ ,经过补偿后测量精度提高至 0.1  $\mu\text{m}$ 。中国计量大学 Wang 等<sup>[37]</sup>在反射式光学偏折测量系统的基础上进一步讨论了透射波前测量中系统结构参数标定引入的几何像差,并提出了一种基于几何像差多项式优化的透射波前测量方法。针对离轴式测量系统中结构误差影响较为明显的问题,通过引入分光镜将系统光路改成同轴结构,如图 9 所示,可以大大降低球差、彗差和像散等几何像差的影响<sup>[38]</sup>。将同轴光路应用到显微光学偏折测量系统中同样可以降低系统对结构参数误差的灵敏度,结合计算机辅助优化测量系统模型可进一步提高形貌测量精度<sup>[39]</sup>。

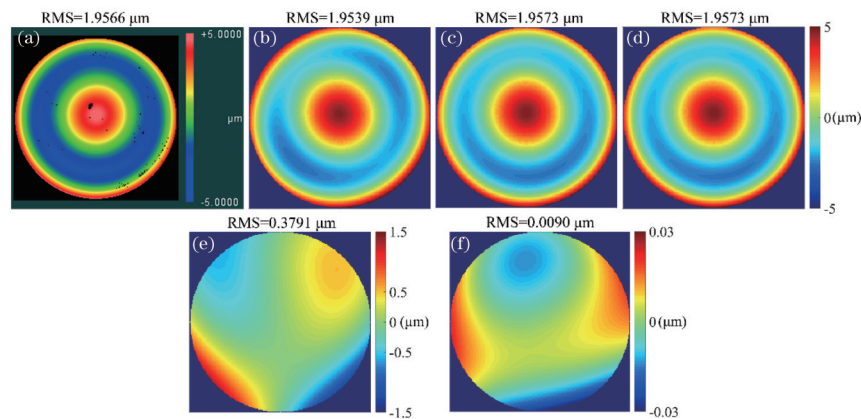
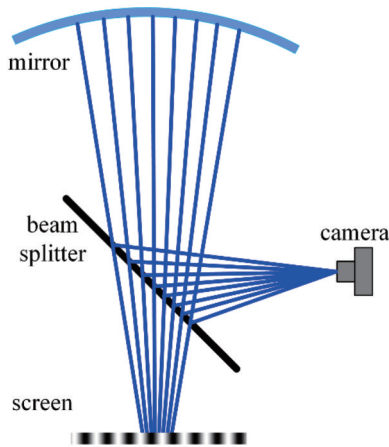


图 8 被测表面的实验结果<sup>[35]</sup>。(a) ZYGO 干涉仪测量结果;(b)基于三坐标标定的测量结果;(c)一步校正后的测量结果;(d)两步校正后的测量结果;(e)一步校正后的测量结果与基于三坐标标定的测量结果间的残差;(f)两步校正后的测量结果与基于三坐标标定的测量结果间的残差

Fig. 8 Experimental results of measured surface<sup>[35]</sup>. (a) Measurement result of ZYGO interferometer; (b) measurement result based on three-coordinate calibration; (c) measurement result after first-step correction; (d) measurement result after second-step correction; (e) residual error between measurement result after first-step correction and measurement result based on three-coordinate calibration; (f) residual error between measurement result after second-step correction and measurement result based on three-coordinate calibration

图 9 引入分光镜的同轴系统布局<sup>[38]</sup>Fig. 9 Layout of on-axis geometry with beam splitter<sup>[38]</sup>

光学偏折测量中利用条纹投影方法和相移技术可以快速计算出相位分布,相位的准确获取是实现高精度曲面测量的前提,众多学者针对相位的获取和解调进行了深入的研究。相位提取错误会导致测量失败,天津大学姜硕等<sup>[40]</sup>提出了一种折叠相位周期级数校正的方法,该方法能解决相位展开过程中的周期错位问题,保证了光学偏折术对相位的准确提取,避免了在缺陷检测应用中出现漏检和误检。针对获取低信噪比和小动态范围被测面的条纹相位信息较为困难的问题,西安交通大学 Qi 等<sup>[41]</sup>提出了一种改进相位调制的光学偏折缺陷的测量方法,采用双分支卷积神经网络,并从移相模式序列和调制中提取几何特征和光学特征,显著提高了缺陷测量能力。为了解决光学偏折测量中的寄生反射问题,香港科技大学 Leung 和 Cai<sup>[42]</sup>基于相移原理提出了一种多频移相方法来解调叠加相位,显著减少了图像采集和计算的时间,使计算机内存需求大大降低。为了获取超过调制传递函数限制的条纹,美国北卡罗来纳大学夏洛特分校 DeMars 等<sup>[43]</sup>提出了一种基于多频相位展开技术的超灵敏光学偏折测量系统。为了获取更精确的相位信息,复旦大学 Zhang 等<sup>[44]</sup>用获取的图像和空间移变点扩散函数模型进行前

向卷积来校正相位误差,该方法对除球差外的多种像差均有较好的校正效果,具有较高的灵活性和通用性,不需要引入额外的设备或改变系统的布局。

### 3.3 曲面重构

光学偏折测量中的曲面面形是通过获取的斜率计算得到的,基于斜率的曲面重构算法主要包括模式重构法、区域积分法、傅里叶变换全局积分法和基于深度学习的重构算法。

模式重构法是通过测量数据的拟合多项式进行积分从而得到面形的重构方法。Zernike 多项式与赛德尔像差有密切的关系,常用于光学元件的面形拟合,具有较高的拟合精度,因此模式重构法常用 Zernike 多项式进行波面拟合。Zhao 和 Burge 等<sup>[45]</sup>使用 Gram-Schmidt 正交化方法计算圆域内的 Zernike 多项式系数,并将其应用于 8.4 m 口径的巨型麦哲伦望远镜 (GMT) 主镜部件测量中。德国埃尔朗根-纽伦堡大学 Ettl 等<sup>[46]</sup>利用基于径向基函数的广义 Hermite 插值方法,可以在不规则的采样网格、存在噪声和数据缺失的情况下进行积分重构。虽然基于 Zernike 多项式拟合的波前重构法可以实现较高的重构精度和较快的重构速度,但是当对复杂自由曲面的重构采用高阶多项式拟合时,会导致重构效率下降,且高阶多项式在斜率拟合过程中会失去正交性,产生交叉耦合与噪声传播的问题。

区域积分法利用高度和斜率之间的局部关系,基于最小二乘原理来计算重构面形。根据测量点与重构点相对位置的不同,可将区域积分法分为 Hudgin 模式、Freid 模式和 Southwell 模式。从图 10 可以看出: Hudgin 模型将邻近重构点的相位差视为测量点;Freid 模型认为重构点区域中心为测量点;Southwell 模型中的重构点也是测量点。由于相位偏折测量中的采样点与波前重构点位于相同的位置,因此波前重构多用 Southwell 模型。天津大学 Zhang 等<sup>[47]</sup>将路径积分法和区域波前重构算法相结合,以交叉路径积分得到的被测面高度信息作为区域重构算法的初始值,可以有效提高测量系统的抗噪声干扰能力和运算效率。

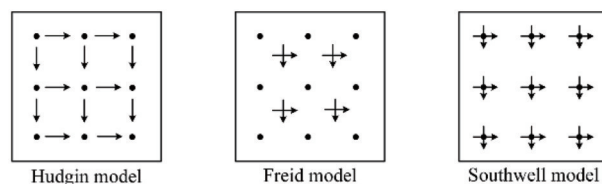


图 10 区域重构法模型

Fig. 10 Models of regional reconstruction method

傅里叶积分法将快速傅里叶变换算法应用于斜率数据的面形重构中<sup>[48]</sup>,该方法可以快速实现斜率积分运算,并且相较于路径积分法和全局最小二乘算法,其重构的波前更加平滑<sup>[49]</sup>。由于采用斜率数据进行面形重构未必会满足狄利克雷边界条件,故以色列学者 Talmi 和 Ribak<sup>[50]</sup>提出了基于傅里叶余弦级数的接近

最优算法,该方法重构波前的速度明显快于采用快速傅里叶变换的傅里叶积分法。

对于图像噪声、表面划痕和污渍等原因导致的面形不连续的情况,传统的光学偏折曲面积分方法会存在较大的重构误差。随着机器学习的快速发展和计算机算力的提升,深度学习技术被越来越多的学者证明

适用于波前重建<sup>[51-52]</sup>,相较于传统积分算法,其对噪声的敏感性更低,具有更高的计算效率和鲁棒性。加拿大多伦多大学的 Swanson 等采用类 U-Net 网络,将夏克-哈特曼波前传感器测得的波前的斜率信息作为输入数据,实现了波前重构与预测。DuBose 等<sup>[53]</sup>提出了一种基于深度卷积神经网络的重构方法,并使用夏克-哈特曼波前传感器测得的斜率信息和光强信息进行了波

前重建。Dou 等<sup>[54]</sup>提出了一种基于深度学习的光学偏折测量方法来精确测量自由曲面,通过设计一种采用全尺度跳跃连接获取不同层的全尺度图像信息的 D-UNet 网络,如图 11 所示,极大地提高了网络稳定性,并使得表面重建精度达到了  $0.0088\ \mu\text{m}$ 。同时,该方法具有较强的抗噪能力且可以极大地减小系统几何误差的影响,有效地提高光学偏折测量的效率和鲁棒性。

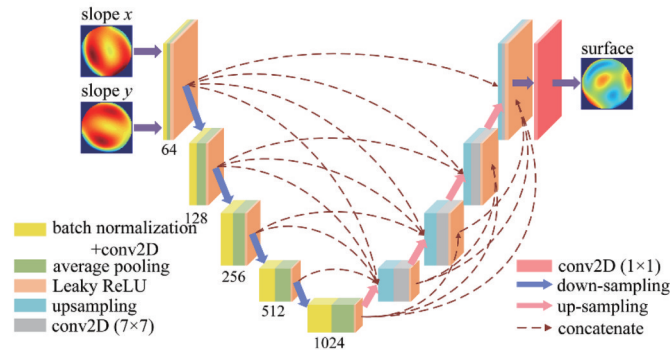


图 11 D-UNet 网络结构<sup>[54]</sup>

Fig. 11 Architecture of D-UNet<sup>[54]</sup>

### 3.4 测量动态范围扩展

由式(3)可知,光学偏折测量系统对于被测元件的测量动态范围主要受限于投影屏和系统的结构尺寸。为了实现对测量系统测量动态范围的扩展,中国计量大学相超等<sup>[55]</sup>提出了基于光学偏折法的子孔径拼接面形测量技术,该方法可对非圆形或环形子孔径进行拼接,提高子孔径划分拼接法的灵活性,同时对子孔径的重叠区域采用加权融合算法来实现拼接面形的平滑过渡,最终实现了大口径、大动态范围的测量。在小工作距离和大拍摄角度的情况下,子孔径拼接技术可以扩展系统的测量范围,采用多个相机可以突破测量区域受到屏幕大小的限制<sup>[56]</sup>,实现大口径球面镜的测量。同时,也可以采用曲面投影屏的方式将更多的条纹投影到被测元件上,从而在一定程度上扩展系统的测量动态范围<sup>[57]</sup>。美国亚利桑那大学的研究团队提出了一种新型的无限偏折法(具有无限的可测动态范围),在被测元件的四周建立多个虚拟屏幕<sup>[58]</sup>实现了  $2\pi\ \text{rad}$  的动态测量范围,并对 50 mm 口径大动态范围复杂曲面实现了全口径面形实验测量,实验如图 12 所示。由于相机镜头景深的限制,故对于测量深度较大的被测表面可能会出现离焦的问题。为了拓展曲面的可测量深度,河北工业大学 Shi 等<sup>[59]</sup>将光学偏折技术与二值条纹离焦投影技术相结合,提出了一种新的基于离焦二值条纹的红外光学偏折测量法,二值条纹可以允许更大深度的测量,在一定程度上突破了相机景深的限制,测量精度比正弦条纹提高了 30%。

## 4 基于计算机辅助光学偏折系统的典型应用

### 4.1 反射式宏观面形测量

美国亚利桑那大学 Su 等<sup>[60]</sup>于 2012 年提出了软件

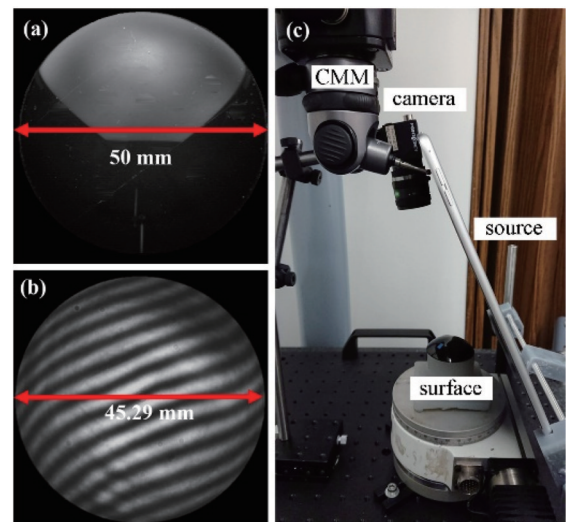


图 12 无限偏折系统测量实验照片<sup>[58]</sup>。(a) 50 mm 口径的凸球面被测元件;(b) Zygo 干涉仪测量得的干涉图;(c) 无限偏折系统实物图

Fig. 12 Photo of experimental measurement with infinite deflectometric system<sup>[58]</sup>. (a) Tested convex spherical optic with 50-mm diameter aperture; (b) interferogram acquired with Zygo interferometer; (c) photo of infinite deflectometric system

可调试光学测量系统,并成功将其运用于口径为 8.4 m 的巨型麦哲伦望远镜主镜的测量中,实现了和干涉仪相当的测量精度[均方根(RMS)为  $0.4\ \mu\text{m}$ ]。光学偏折方法也同样被应用于大双筒望远镜(LBT)的次镜<sup>[38]</sup>、凹球面镜<sup>[61]</sup>、标准量块<sup>[62]</sup>、台阶<sup>[63]</sup>和抛物面镜<sup>[64-65]</sup>的测量,以及金刚石切削加工的凸球面和凸非球面等各类复杂曲面元件的在线测量<sup>[66]</sup>。传统的测量系统结构参数标定需要采用高精度的辅助设备,并且



过程相当复杂费力。尤其是,对于凸面被测元件和小工作距离的情况,即便是采用微米级辅助测量设备仍会在测量结果中引入明显的结构像差。为了降低对标定设备的精度要求和实现结构参数标定误差的有效校正,中国计量大学和美国亚利桑那大学研究团队提出了一种基于逆向哈特曼的计算机辅助测量方法<sup>[35]</sup>,可在测量系统小工作距离的情况下实现凸反射镜的高精度面形测量,系统结构如图 13 所示,提出的两步校正方法,可以针对不同权重的几何像差进行有效校正,并避免了过校正问题。四川大学 Hong 等<sup>[67]</sup>在利用光学偏折技术测得球面元件的高度和斜率数据的基础上,实现了对被测表面各点平均曲率的测量。上海工程技术大学张凯龙等<sup>[68]</sup>针对传统机器视觉难以测量的镜面零件表面缺陷的问题,利用光学偏折测量技术将测量缺陷问题转换成基于绝对相位差提取突变区域的问题,并成功实现了 0.018 mm 精度的测量。河北工业大学王月霞等<sup>[69]</sup>使用一块普通液晶显示屏和一块透明显示屏组成的双屏系统,在增大了测量视场的同时,又减少了系统结构的复杂度,实现了如图 14 所示的环形台阶等非连续镜面的三维形貌测量。美国西北大学 Li 等<sup>[70]</sup>将光学偏折技术应用于文化遗产保护领域,提出了一种基于光学偏折法的大尺度镜面物体的低成本三维重建方法,能够较高精度地重构出三维表面细节,如图 15 所示,满足了文化遗产保护的应用要求。将光学偏折技术应用于虚拟现实(VR)领域中可实现眼球的精准追踪<sup>[71]</sup>,利用光学偏折测量提取得到的表面法线和光线三维特征来预测人眼的凝视方向,可以高精度地追踪人眼的目光方向,实验测得的凝视方向相对于真实的凝视方向的角度误差仅为 0.34°,且该方法具有较好的重复性。

#### 4.2 透射元件测量

Canabal 和 Alonso<sup>[72]</sup>于 2002 年率先将光学偏折技术应用于透射波前测量,根据被透射元件调制的条纹变化信息计算出被测元件透射波前斜率,由此可获得对应的透射波前信息。墨西哥国立自治大学 Diaz-Urbe 等<sup>[73]</sup>采用光学偏折自由曲面测量方法,实现了对渐进镜片和隐形眼镜的测量,测量精度能够达到数微米。天津大学 Pan 等<sup>[74]</sup>将光学偏折法、暗域照明法和透射测量原理相结合,设计出了透镜综合缺陷测量系统,该系统可实现对小型自由曲面透镜在实际大规模生产中可能出现的所有缺陷类型的高效、高精度测量,为光学透镜批量生产过程中的参数优化提供了有价值

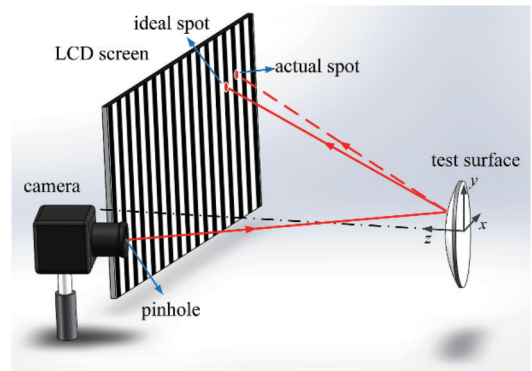


图 13 用于凸面反射测量的计算机辅助光学偏折测量系统<sup>[35]</sup>  
Fig. 13 Computer-aided deflectometric system for reflective convex surface measurement<sup>[35]</sup>

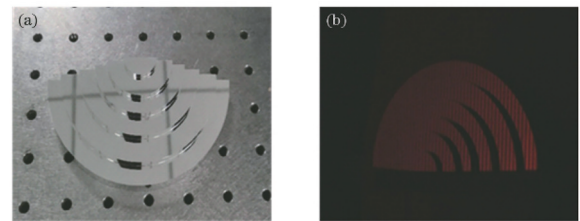


图 14 环形台阶<sup>[69]</sup>。(a) 台阶实物图; (b) 台阶反射的条纹图  
Fig. 14 Annular steps<sup>[69]</sup>. (a) Photo of steps; (b) fringe pattern reflected by steps

的参考。四川大学高锦瑞等<sup>[75]</sup>提出了一种将有像差透镜当作理想薄透镜与棱镜阵列组合的模型,为透镜的波前像差测量提供了一种在线检测方法。中国计量大学 Wang 等<sup>[76]</sup>提出了一种基于条纹投影的计算机辅助光学偏折方法以用于工业透射元件大动态范围透射波前像差的精确测量,透镜波前测量结果与 ZYGO 干涉仪相比,残差 RMS 值仅为 0.0007  $\mu\text{m}$ 。此外,他们对大动态范围的透明玻璃管进行了测量,对同一位置的测量结果有较好的一致性,采用了计算机辅助迭代优化算法来实现系统结构参数误差的有效校正,并在透射波前测量基础上,又进一步提出了透射元件的多曲面表面同步面形测量方法(SMM)<sup>[77]</sup>。采用计算机辅助光学偏折系统测量被测元件的透射波前,并基于光线追迹逆向迭代优化模型实现被测元件多表面的同步重构,系统原理图如图 16 所示,该方法对自由曲面透镜前后表面实现同步重构的同时,实现了亚微米量级的精度,实验测量效果如图 17 所示。该方法主要有

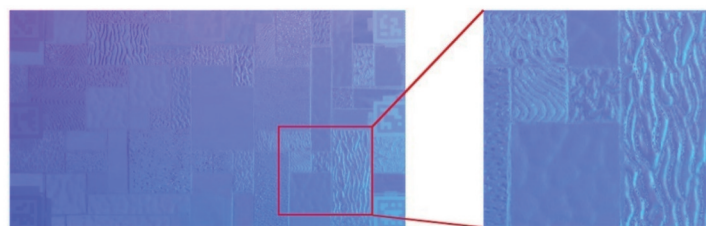


图 15 彩色玻璃表面的测量结果<sup>[70]</sup>  
Fig. 15 Measurement result of stained glass surface<sup>[70]</sup>

三方面的贡献:1)可实现基于透射场的自由曲面重构,克服了透射测量中反射率低的限制,且不需要消除额

外的寄生反射;2)可同时测量自由透射的多表面面形;3)提出的方法适用于多种光学元件,具有通用性。

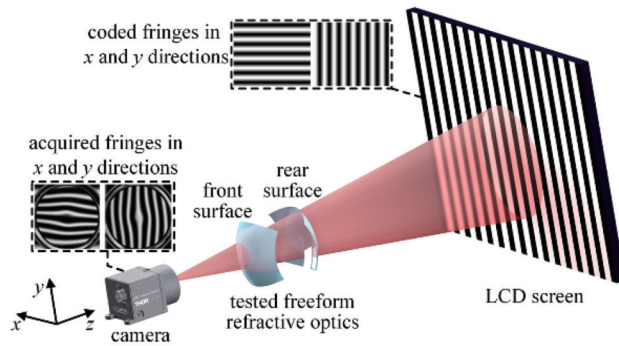


图 16 用于透射多表面测量的计算机辅助光学偏折测量系统<sup>[77]</sup>

Fig. 16 Computer-aided deflectometric system for transmitted multisurface measurement<sup>[77]</sup>

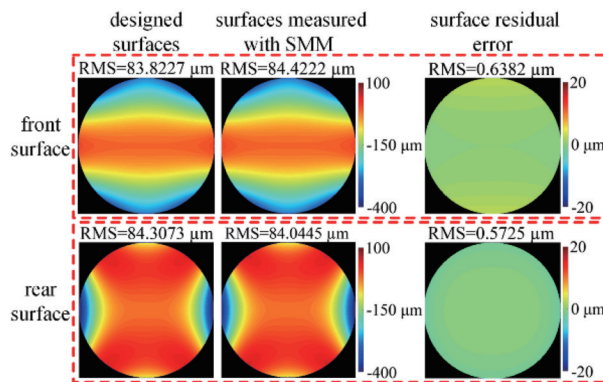


图 17 自由曲面透镜前后表面重构结果<sup>[77]</sup>

Fig. 17 Reconstruction results of front and rear surfaces of freeform refractive lens<sup>[77]</sup>

### 4.3 微观轮廓测量

德国埃尔朗根-纽伦堡大学 Häusler 等<sup>[78]</sup>于 2008 年提出了显微偏折法,在传统光学偏折光路中加入显微物镜以测量镜面表面的微观形貌,如图 18 所示,该

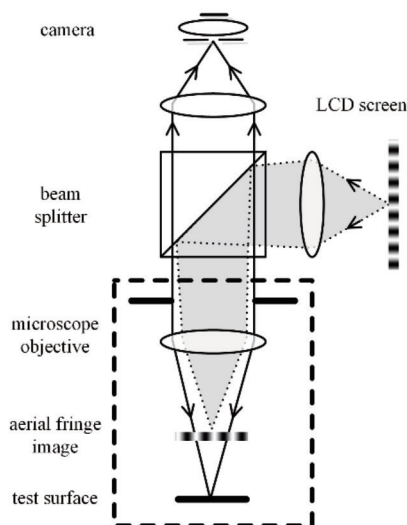


图 18 显微偏折系统布局<sup>[78]</sup>

Fig. 18 Experimental setup for microscopic deflectometric system<sup>[78]</sup>

系统能够达到  $1\ \mu\text{m}$  的横向分辨率和  $1\ \text{nm}$  的高度分辨率。显微物镜的工作距离较小,系统光路中将投影条纹成像至与被测面间有一定距离的位置处,可满足相机对被测面和投影条纹同时清晰成像的要求。Lu 和 Hua 等<sup>[79]</sup>针对显微相位偏折法景深有限的问题,提出了具有光学深度扫描功能的结构光辅助照明显微偏折测量系统,该系统的表面高度测量灵敏度为  $7.21\ \text{nm}$ ,经扩展后的景深可达到  $250\ \mu\text{m}$ ,是衍射极限景深的 15 倍。

针对上述结构光辅助照明显微偏折光路存在的测量灵敏度有限的问题,中国计量大学 Gu 等<sup>[80]</sup>提出了计算机辅助的离轴式显微偏折测量系统,如图 19 所示,其可测的表面斜率范围达到了亚弧度量级,高度分辨率优于  $0.05\ \text{nm}$ ,测量精度与 Wygo 干涉仪相当,如图 20 所示。该系统采用了 8 倍普通液晶显示屏亮度 ( $2000\ \text{cd}/\text{m}^2$ ) 的高亮显示屏,用于克服经过显微物镜后图像亮度较低引起的图像噪声较大的问题,同时具有高测量精度、大动态测量范围和高横向分辨率的特点,可用于干涉仪无法测量的小球球面、发光二极管(LED)灯罩和微结构元件等各类大动态范围表面的微观轮廓高精度测量。

该研究团队进一步提出了同轴式显微偏折测量系

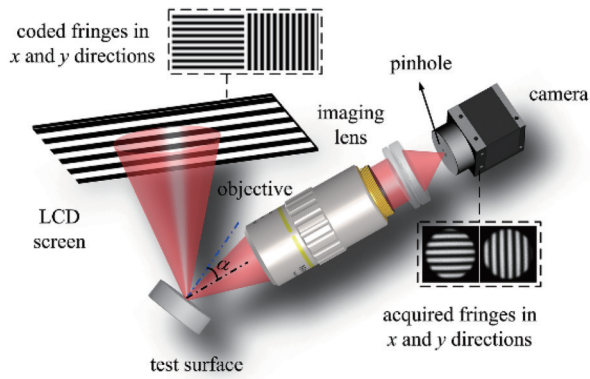


图 19 离轴式显微偏折测量系统原理图<sup>[80]</sup>

Fig. 19 Schematic diagram of off-axis deflectometric microscope system<sup>[80]</sup>

统<sup>[39]</sup>,如图 21 所示。该系统将分光棱镜置于显微物镜

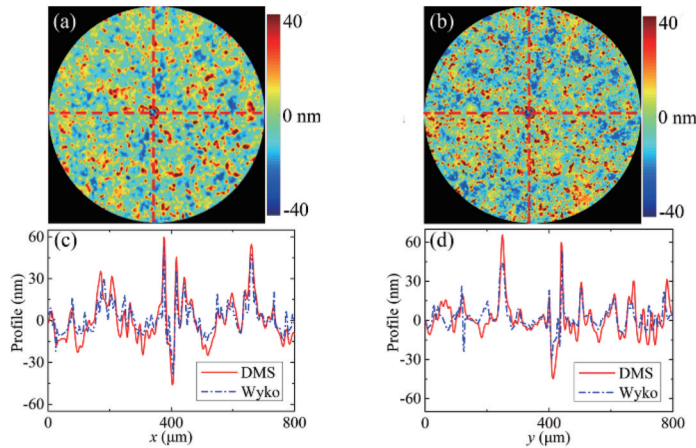


图 20 离轴式显微偏折测量系统与 Wyko 干涉仪测量结果的对比<sup>[80]</sup>。(a)离轴式显微偏折测量系统测得的表面粗糙度;(b) Wyko 干涉仪测得的表面粗糙度;(c)在  $x$  方向上的线轮廓比较;(d)在  $y$  方向上的线轮廓比较

Fig. 20 Comparison between measurement results obtained by off-axis deflectometric microscope system and Wyko profilometer<sup>[80]</sup>. (a) Surface roughness measured by off-axis deflectometric microscope system; (b) surface roughness measured by Wyko profilometer; (c) line profile comparison in  $x$  direction; (d) line profile comparison in  $y$  direction

电子科技大学 Wu 等<sup>[82]</sup>提出了一种基于傅里叶变换轮廓术的反射镜瞬态测量方法。同时,该方法利用颜色编码实现对在不同颜色通道正交方向的正弦条纹的调制,以此得到正交方向的斜率信息。墨西哥瓜达

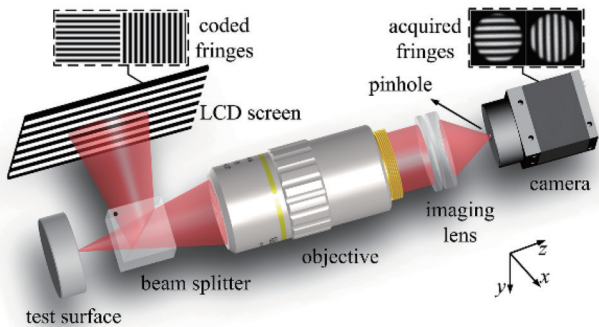


图 21 同轴式显微偏折测量系统原理图<sup>[39]</sup>

Fig. 21 Schematic diagram of on-axis deflectometric microscope system<sup>[39]</sup>

之前,使高亮显示屏投影的编码条纹不经过缩放变换而是直接投影到被测元件表面上,在保证测量灵敏度的同时,降低了离结构误差的影响,最终可提升系统的稳定性和抗干扰能力。

#### 4.4 瞬态相位偏折测量

基于条纹投影的光学相位偏折法通常需要连续投影多幅移相条纹图像,这会导致数据采集时间耗时较长,测量过程易受外界扰动影响,无法满足快速、瞬态测量的应用需求。单幅条纹投影测量技术在此需求背景下得以深入研究和发。目前实现瞬态测量的方法主要有傅里叶变换轮廓法和用于实现相移测量的瞬态编码法。傅里叶变换轮廓法利用傅里叶变换实现对单幅条纹的相位提取<sup>[81]</sup>,瞬态编码法则是通过调整条纹编码的方式,提高单幅图像的信息量,以此完成瞬态测量。

拉哈拉大学 Flores 等<sup>[83]</sup>利用彩色条纹对球面透镜进行了波前测量,将三幅移相条纹分别置于红、绿、蓝三颜色通道中,从而可将 6 幅正交移相投影条纹图像减少为两幅。美国亚利桑那大学 Kim 团队提出了一种瞬态相移光学偏折的测量方法,只需要投影一幅图像即可完成一次面形测量,进而实现了对可变形镜的实时测量<sup>[84-85]</sup>。该方法利用 RGB 三颜色通道将两个正交方向的三步移相条纹复合成彩色复合条纹,再利用傅里叶变换技术对反射条纹进行解调,如图 22 所示。

针对彩色相机对投影条纹 RGB 信息的响应不同而导致的不同通道信息混叠和串扰问题,一种频率载波原理的四步移相条纹编码方法被用于光学偏折透射场的瞬态测量中<sup>[86]</sup>,该方法利用正交方向上的频率载波将 8 幅移相条纹复合编码,如图 23 所示,同时可利用滤波原理将复合图案中的相位信息解调还原,为透射元件的瞬态测量问题提供了一种可行的解决方法。

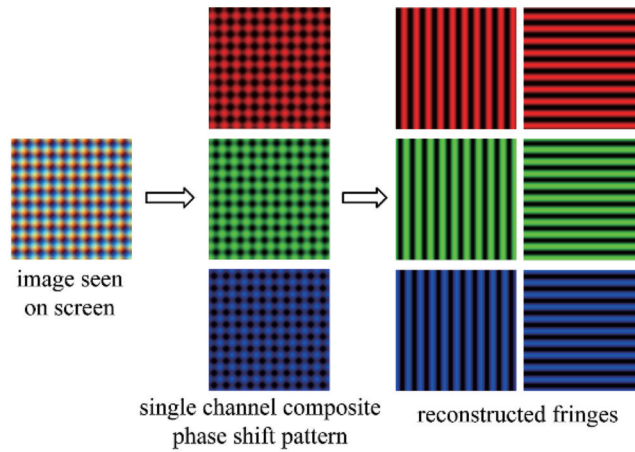


图 22 瞬态光学偏折条纹解调流程<sup>[80-81]</sup>

Fig. 22 Flow chart of fringe decoding in instantaneous deflectometry<sup>[80-81]</sup>

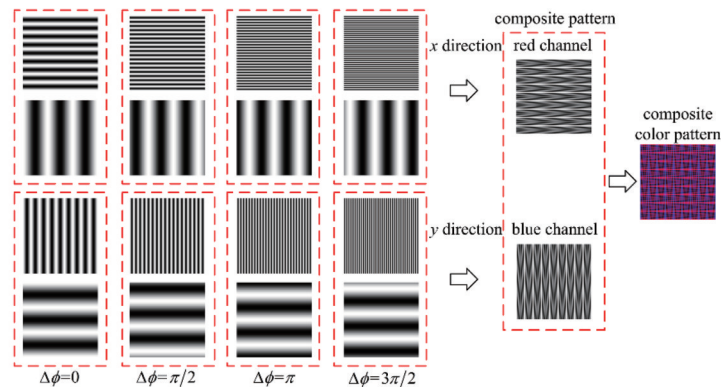


图 23 基于频率载波原理的瞬态光学偏折相移条纹编码过程<sup>[86]</sup>

Fig. 23 Fringe coding process in instantaneous deflectometry based on frequency carrier<sup>[86]</sup>

#### 4.5 光学偏折测量技术典型应用的总结和展望

光学偏折测量技术目前主要应用于光学复杂自由曲面反射镜与透镜的面形测量,其测量精度主要受到结构参数标定精度的影响。离轴式测量光路结构简单,但是由于被测元件与主光轴之间存在较大夹角,故被测元件角度和中心位置的标定误差会对测量结果带来较大影响。反射镜测量中也可采用分光镜将测量光路调整为同轴结构,以此减少结构参数标定误差所带来的影响。与此同时,加入分光镜会使系统变得更加复杂,其本身会引入像差,并且由于光线多次经过分光镜,故对投影屏的亮度提出了更高的要求。采用光学偏折技术测量透镜无法直接利用测得的斜率信息重构出面形,需要经过复杂的迭代计算才能求得被测透镜多个面的面形。在实际工业生产中,需要对产品进行在线测量,瞬态光学偏折技术具有重要意义,但是彩色信息通道之间的混叠和串扰,以及调制解调精度等问题限制了该方法的测量精度。未来光学偏折技术需要提升结构参数标定的精度,减少测量系统内部元件引入的误差,优化面形重构算法,提高检测效率,最终提升光学偏折测量技术的精度和实用性。

## 5 结束语

光学偏折测量技术因其动态范围大、测量精度高和结构简单,在复杂自由曲面的测量中有广阔的应用前景。计算机技术的高速发展也为计算机辅助的光学偏折测量技术提供了更多新的可能性。目前计算机辅助光学偏折测量主要是朝着测量精度和技术通用性的不断改进和提升的方向发展。提高精度需要通过针对所采用的模型,采用结构误差校正和精确相位获取技术。技术通用性则要求测量系统具有更大的动态范围、更大的测量范围和更快的测量速度,以更好地满足实际应用环境下对复杂自由曲面的测量需求。随着技术的不断改进和成熟,计算机辅助光学偏折测量方法正在不断的实用化,有望成为一种可靠、高精度的复杂自由曲面测量手段。

### 参 考 文 献

- [1] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112001.  
Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0112001.

- [2] 张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 283-299.  
Zhang L, Liu D, Shi T, et al. Optical free-form surfaces testing technologies[J]. Chinese Optics, 2017, 10(3): 283-299.
- [3] 吴石, 李荣义, 刘献礼, 等. 基于自适应采样的曲面加工误差在机测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 83-90.  
Wu S, Li R Y, Liu X L, et al. On-machine measurement method of processing error based on the mould surface adaptive sampling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 83-90.
- [4] Platt B C, Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. Journal of Refractive Surgery, 2001, 17(5): S573-S577.
- [5] Neal D R, Armstrong D J, Turner W T. Wavefront sensors for control and processing monitoring in optics manufacture[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2993: 211-220.
- [6] 饶学军, 凌宁, 王成, 等. 哈特曼-夏克传感器在非球面加工中的应用[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 491-494.  
Rao X J, Ling N, Wang C, et al. Application of Hartmann-shack sensor in aspheric process[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 491-494.
- [7] 权贵秦, 安毓英, 李庆国. 激光干涉法检测大口径抛物面反射镜[J]. 光子学报, 2008, 37(10): 2035-2038.  
Quan G Q, An Y Y, Li Q G. Test of large aperture parabola mirror by laser interferometric[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(10): 2035-2038.
- [8] 郝群, 宁妍, 胡摇. 基于干涉法的非球面测量技术[J]. 计测技术, 2018, 38(1): 1-8.  
Hao Q, Ning Y, Hu Y. Interferometric testing of aspheric surface[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(1): 1-8.
- [9] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26-46.  
Shi T, Yang Y Y, Zhang L, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 26-46.
- [10] Burge J H, Kot L B, Martin H M, et al. Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6273: 62730M.
- [11] Dall H E. A null test for paraboloids[J]. Journal of the British Astronomical Association, 1947, 57: 201.
- [12] Wyant J C, Bennett V P. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. Applied Optics, 1972, 11(12): 2833-2839.
- [13] Kin C J, Wyant J. Subaperture test of a large flat or a fast aspheric surface[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71: 1587.
- [14] Garbusi E, Pruss C, Osten W. Interferometer for precise and flexible asphere testing[J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 2973-2975.
- [15] Friedlaender M, Moore D H, Love R, et al. Studies with the electron microscope of virus-host relationships in Ehrlich ascites tumor cells. I. the identification and structure of anopheles A virus[J]. The Journal of Experimental Medicine, 1955, 102(4): 361-370.
- [16] 满玉春, 张忠玉, 李锐钢, 等. 移相数字莫尔条纹图像滤波方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(5): 051001.  
Man Y C, Zhang Z Y, Li R G, et al. Research on filtering method of phase shifting digital Moiré patterns [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(5): 051001.
- [17] Petz M, Ritter R. Reflection grating method for 3D measurement of reflecting surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4399: 35-41.
- [18] Petz M, Tutsch R. Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5869: 58691D.
- [19] Asundi A, Zhou W S. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill[J]. Applied Optics, 1998, 37(23): 5416-5420.
- [20] Perard D, Beyerer J. Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured-lighting reflection technique[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3204: 74-80.
- [21] 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.
- [22] Xu X Y, Zhang X C, Niu Z Q, et al. Extra-detection-free monoscopic deflectometry for the *in situ* measurement of freeform specular surfaces[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4271-4274.
- [23] Huerta-Carranza O, Avendaño-Alejo M, Díaz-Uribe R. Null screens to evaluate the shape of freeform surfaces: progressive addition lenses[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27921-27937.
- [24] Niu Z Q, Gao N, Zhang Z H, et al. 3D shape measurement of discontinuous specular objects based on advanced PMD with bi-telecentric lens[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1615-1632.
- [25] Zhang X C, Ren Y R, Chen Y N, et al. Large-area measurement with stereo deflectometry[C]//OSA Optical Design and Fabrication 2021 (Flat Optics, Freeform, IODC, OFT), June 27-July 1, 2021, Washington, DC. Washington, D. C.: OSA, 2021: OTh1B.6.
- [26] Wang R Y, Li D H, Zhang X W, et al. Marker-free stitching deflectometry for three-dimensional measurement of the specular surface[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41851-41864.
- [27] Han H, Wu S Q, Song Z, et al. 3D reconstruction of the specular surface using an iterative stereoscopic deflectometry method[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 12867-12879.
- [28] Zhang H L, Šics I, Ladrera J, et al. Displacement-free stereoscopic phase measuring deflectometry based on phase difference minimization[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31658-31674.

- [29] Su P, Parks R E, Wang L R, et al. Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [30] Graves L R, Choi H, Zhao W C, et al. Model-free deflectometry for freeform optics measurement using an iterative reconstruction technique[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2110-2113.
- [31] Wang D D, Zhang S, Wu R M, et al. Computer-aided high-accuracy testing of reflective surface with reverse Hartmann test[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19671-19681.
- [32] Ge R H, Li D H, Zhang X W, et al. Phase measuring deflectometry based on calibration of the entrance pupil center of the camera lens[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): 1156-1163.
- [33] Niu Z Q, Zhang X C, Ye J Q, et al. Flexible one-shot geometric calibration for off-axis deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): 3819-3824.
- [34] Xu X Y, Zhang X C, Niu Z Q, et al. Self-calibration of *in situ* monoscopic deflectometric measurement in precision optical manufacturing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7523-7536.
- [35] Wang D D, Gong Z D, Xu P, et al. Accurate calibration of geometrical error in reflective surface testing based on reverse Hartmann test[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8113-8124.
- [36] Jiang L L, Zhang X D, Fang F Z, et al. Wavefront aberration metrology based on transmitted fringe deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(26): 7396-7403.
- [37] Wang D D, Yin Y M, Dou J C, et al. Calibration of geometrical aberration in transmitted wavefront testing of refractive optics with deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 1973-1981.
- [38] Huang R, Su P, Horne T, et al. Optical metrology of a large deformable aspherical mirror using software configurable optical test system[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 085106.
- [39] Gu Z X, Wang D D, Ruan Y, et al. Design and error calibration of an on-axis deflectometric microscope system [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(10): 2856-2863.
- [40] 姜硕, 杨凌辉, 任永杰, 等. 基于相位偏折的类镜面物体表面缺陷检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 031201  
Jiang S, Yang L H, Ren Y J, et al. Defect detection in mirror-like object surface based on phase deflection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 031201.
- [41] Qi Z S, Wang Z, Huang J H, et al. Phase-modulation combined deflectometry for small defect detection[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 2016-2023.
- [42] Leung Y C, Cai L L. Untangling parasitic reflection in phase measuring deflectometry by multi-frequency phase-shifting[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(1): 208-222.
- [43] DeMars L A, Ramirez-Andrade A H, Porrás-Aguilar R, et al. Super sensitive phase measurement deflectometry with effective fringe periods beyond the MTF limit[C]// *Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT)*, June 10-12, 2019, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2019: OW4A.6.
- [44] Zhang X C, Niu Z Q, Ye J Q, et al. Correction of aberration-induced phase errors in phase measuring deflectometry[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2047-2050.
- [45] Zhao C Y, Burge J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, part I: basis set derived from gradients of Zernike polynomials[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 18014-18024.
- [46] Ettl S, Kaminski J, Knauer M C, et al. Shape reconstruction from gradient data[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(12): 2091-2097.
- [47] Zhang H W, Han S J, Liu S G, et al. 3D shape reconstruction of large specular surface[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7616-7625.
- [48] Freischlad K R, Koliopoulos C L. Modal estimation of a wave front from difference measurements using the discrete Fourier transform[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(11): 1852-1861.
- [49] Li W S, Bothe T, von Kopylow C, et al. Evaluation methods for gradient measurement techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5457: 300-311.
- [50] Talmi A, Ribak E N. Wavefront reconstruction from its gradients[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(2): 288-297.
- [51] Swanson R, Lamb M, Correia C, et al. Wavefront reconstruction and prediction with convolutional neural networks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10703: 107031F.
- [52] Hu L J, Hu S W, Gong W, et al. Deep learning assisted Shack-Hartmann wavefront sensor for direct wavefront detection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3741-3744.
- [53] DuBose T B, Gardner D F, Watnik A T. Intensity-enhanced deep network wavefront reconstruction in Shack-Hartmann sensors[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1699-1702.
- [54] Dou J C, Wang D D, Yu Q Y, et al. Deep-learning-based deflectometry for freeform surface measurement[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(1): 78-81.
- [55] 相超, 王道档, 窦进超, 等. 光学偏折子孔径拼接面形检测技术[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20210105.  
Xiang C, Wang D D, Dou J C, et al. Sub-aperture stitching deflectometric testing technology for optical surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210105.
- [56] Olesch E, Häusler G, Wörnlein A, et al. Deflectometric measurement of large mirrors[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(3): 335-343.
- [57] Liu C, Zhang Z H, Gao N, et al. Large-curvature specular surface phase measuring deflectometry with a curved screen[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 43327-43341.
- [58] Graves L R, Quach H, Choi H, et al. Infinite deflectometry enabling  $2\pi$ -steradian measurement range [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7602-7615.

- [59] Shi Y Q, Chang C X, Liu X H, et al. Infrared phase measuring deflectometry by using defocused binary fringe [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3091-3094.
- [60] 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: 332-340.
- [61] Zhou T, Chen K, Wei H Y, et al. Improved method for rapid shape recovery of large specular surfaces based on phase measuring deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2760-2770.
- [62] Han H, Wu S Q, Song Z. An accurate calibration means for the phase measuring deflectometry system[J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5377.
- [63] Liu Y, Huang S J, Zhang Z H, et al. Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10293.
- [64] 赵文川, 周敏, 刘海涛, 等. 离轴非球面的条纹反射检测技术[J]. *光电工程*, 2018, 45(7): 32-39.  
Zhao W C, Zhou M, Liu H T, et al. The off-axis aspheric mirror testing based on the fringe reflection technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 32-39.
- [65] 袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0212004.  
Yuan T, Zhang F, Tao X P, et al. Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212004.
- [66] Röttinger C, Faber C, Olesch E, et al. Deflectometry for ultra precision machining: measuring without rechucking[EB/OL]. [2021-02-05]. [https://www.dgao-proceedings.de/download/112/112\\_p28.pdf](https://www.dgao-proceedings.de/download/112/112_p28.pdf).
- [67] Hong T X, Li D H, Wang R Y, et al. Method for measuring the radius of mean curvature of a spherical surface based on phase measuring deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(6): 1705-1709.
- [68] 张凯龙, 钱莉, 朱春雷. 基于相位测量偏折法的类镜面缺陷检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0512004.  
Zhang K L, Qian L, Zhu C L. Defect detection in mirror-like surface based on phase measuring deflectometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0512004.
- [69] 王月霞, 张宗华, 高楠, 等. 透射显示双屏偏折系统中透明屏折射误差补偿方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(5): 0512003.  
Wang Y X, Zhang Z H, Gao N, et al. Compensation method of refraction error caused by transparent display screen in transmissive display dual-screen deflectometric system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 0512003.
- [70] Li Y H, Yeh C K, Xu B J, et al. A low-cost solution for 3D reconstruction of large-scale specular objects[C]// OSA Imaging and Applied Optics Congress 2021 (3D, COSI, DH, ISA, pcAOP), July 19-23, 2021, Washington, DC. Washington, D.C.: OPTICA, 2021: CW4H.3.
- [71] Wang J Z, Xu B J, Wang T F, et al. VR eye-tracking using deflectometry[C]//Computational Optical Sensing and Imaging 2021, July 19-23, 2021, Washington, DC. Washington, D.C.: OPTICA, 2021: CF2E.3.
- [72] Canabal H A, Alonso J. Automatic wavefront measurement technique using a computer display and a charge-coupled device camera[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(4): 822-826.
- [73] Diaz-Uribe R, Huerta-Carranza O, Rodríguez-Rodríguez M I, et al. Testing free forms with optical deflectometry [C]//Latin America Optics and Photonics Conference, November 12-15, 2018, Lima, Peru. Washington, D.C.: OSA, 2018: Th5B.1.
- [74] Pan J D, Yan N, Zhu L L, et al. Comprehensive defect-detection method for a small-sized curved optical lens[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(1): 234-243.
- [75] 高锦瑞, 李大海, 赖恒, 等. 基于相位测量偏折术的透镜波前像差测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0212001.  
Gao J R, Li D H, Lai H, et al. Measurement of wavefront aberration of lens based on phase measuring deflectometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0212001.
- [76] Wang D D, Xu P, Gong Z D, et al. Transmitted wavefront testing with large dynamic range based on computer-aided deflectometry[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(6): 065705.
- [77] Wang D D, Xu P, Wu Z D, et al. Simultaneous multisurface measurement of freeform refractive optics based on computer-aided deflectometry[J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1056-1064.
- [78] Häusler G, Richter C, Leitz K H, et al. Microdeflectometry: a novel tool to acquire three-dimensional microtopography with nanometer height resolution[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 396-398.
- [79] Lu S H, Hua H. Structured illumination assisted microdeflectometry with optical depth scanning capability [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4114-4117.
- [80] Gu H T, Wang D D, Gu Z X, et al. High-accuracy deflectometric microscope system with a large slope range [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2011-2014.
- [81] Su X Y, Xue L. Phase unwrapping algorithm based on fringe frequency analysis in Fourier transform profilometry[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(4): 637-643.
- [82] Wu Y X, Yue H M, Yi J Y, et al. Single-shot three-dimensional shape measurement of specular surfaces by orthogonal color fringe pattern reflection technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9276: 927603.
- [83] Flores J L, Legarda-Saenz R, Garcia-Torales G. Color deflectometry for phase retrieval using phase-shifting methods[J]. *Optics Communications*, 2015, 334: 298-302.
- [84] Trumper I, Choi H, Kim D W. Instantaneous phase shifting deflectometry[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27993-28007.

- [85] Trumper I, Choi H. Instantaneous phase mapping deflectometry for dynamic deformable mirror characterization[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10401: 104010S.
- [86] Xie Z M, Wang D D, Gu H T, et al. Instantaneous wavefront measurement based on deflectometry[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11185: 111850Q.

#### 约稿专家简介:



梁荣光(1968—), 博士, 教授/博士生导师, 美国亚利桑那大学光学学院终身教授, SPIE、OPTICA 会士。1985年考入浙江大学光学仪器工程学系光学仪器专业学习, 1989年本科毕业获学士学位; 之后在美国罗斯霍曼理工学院攻读应用光学硕士学位, 1998年毕业并获硕士学位; 之后在美国亚利桑那大学攻读光学科学博士学位, 2001年毕业并获博士学位。2001—2007年曾先后担任 Eastman Kodak 公司研发实验室高级、首席研究科学家; 2007—2011年曾任 Carestream Health 公司研究与创新实验室首席研究科学家; 2008—2014年曾任 *Applied Optics* 的专题编辑; 2015—2021年曾任 *Optica* 的专题编辑。2016年至今担任美国亚利桑那大学光学学院教授。长期从事光学工程和生物医学光学成像方面的教学和科研工作, 主要研究方向包括光学系统设计、自由曲面光学、光学计量、空间光学、三维成像、计算成像、先进成像技术、应用于临床的新型光学成像技术和设备, 以及用于生物医学研究的先进生物医学光学成像技术和设备等。出版专著 2 部, 授权发明专利 45 项。E-mail: rliang@optics.arizona.edu。