

光学学报

光学非球面面形误差和参数误差干涉测量

郝群*, 刘一鸣, 胡摇**, 宁妍, 王子琛, 徐楚恒, 董欣宇, 刘源恒

北京理工大学光电学院精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 光学非球面在先进光学系统中有着广泛的应用,其面形和参数的高精度测量是光学非球面加工和装调的基础。从面形误差和参数误差两类被测量的角度,阐述了各种典型的干涉测量方法,重点介绍了笔者在部分补偿法、数字莫尔干涉法中取得的成果,探讨了光学非球面干涉测量的发展前景和研究方向。

关键词 干涉法; 非球面; 面形误差; 参数误差

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230962

1 引言

非球面是对偏离球面的曲面的总称。在光学系统中使用非球面光学元件,不仅能增加光学设计的自由度,有利于校正像差、改善像质、提高光学系统性能,还能够减少光学元件的数量、减轻质量、简化仪器结构,显著缩小系统的尺寸、降低成本。目前,非球面光学元件已被广泛应用于军用^[1-3]、民用^[4-11]、医用^[12]等领域。

非球面根据表面类型通常分为旋转对称型和非旋转对称型,其中旋转对称型非球面包括二次非球面和高次非球面,非旋转对称型非球面包括面形规则的非旋转型非球面和面形不规则的自由曲面。本文主要讨论针对旋转对称非球面的检测技术,根据国际标准 ISO 10110-12 的规定^[13-14],回转对称非球面的一般表达方程为 $z = r^2 \sqrt{R + \sqrt{R^2 - (1 + K)r^2}} + \sum_{i=2}^n A_{2i} r^{2i}$, 其中 R 为非球面顶点曲率半径, K 为圆锥系数, A_{2i} 为高阶非球面系数。这些非球面参数共同描述了非球面的面形特征,决定了非球面的曲面形状。由于加工误差、机械载荷或热载荷的作用,非球面光学元件表面与理想表面之间将会产生偏差,或元件参数发生变化,改变非球面的基本属性,进而影响光学系统的成像质量。因此,在非球面光学元件投入使用前,通常需要进行检测来分析面形误差和参数误差,以验证元件加工质量是否满足光学成像要求。

现有常见的光学非球面检测方法有接触式测量法、几何检测法和干涉检测法。接触式测量法通过机械扫描的方式获得被测非球面的表面轮廓或点云信

息,进而实现非球面面形误差的测量。以三坐标机与轮廓仪为代表的接触式测量法,具有精度与自由度较高、通用性强的优点,其缺点主要包括:在测量时容易损伤镜面,且只能测量被检表面有限点的矢高,并且容易受到扫描非正交性的影响,引入较大的系统误差;对环境的要求较高,静电、灰尘和振动等都会使测量精度降低^[15-16];由于接触式测量方法采用逐点测量的形式,如果想提高空间分辨率,则会导致测量过程中数据的采集量增加,时间成本提高、效率降低。此外,接触式测量法在测量大口径非球面时,也将产生测量成本增加、仪器精度降低等问题,极大地限制了其应用范围。几何检测法^[17]主要包括刀口检验法、朗奇检验法、哈特曼检测法,以及激光偏转法^[18-19]。其中传统哈特曼检测法利用瞳面附近的哈特曼光阑对光线进行采样,在焦面附近用探测器对光线形成的光斑进行探测,由光线在哈特曼光阑和探测面上的位置得到所探测光线的斜率矩阵,复原出被测镜的面形。该方法的优点是对测量光没有相干性要求,无需参考光,结构相对简单。干涉检测法是一种高精度快速测量方法,在垂轴方向可以获得亚纳米级的分辨率。本文主要综述光学非球面面形误差和参数误差干涉测量方法,并重点介绍笔者在部分补偿、数字莫尔干涉方面的研究进展和成果。

2 面形误差干涉测量

根据干涉仪是否能够获得零位干涉图,目前面形误差干涉测量方法可以分为两大类:零位干涉检测法和非零位干涉检测法。

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-06-09; 录用日期: 2023-06-25; 网络首发日期: 2023-07-15

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2021YFC2202404)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020317)、国家自然科学基金(51735002, 51327005, 61705008)

通信作者: *qhao@bit.edu.cn; **huy08@bit.edu.cn

2.1 零位干涉检测法

零位干涉检测法主要包含无像差点法与补偿法。无像差点法在光学车间中应用广泛,可实现对二次非球面的高精度测量,但是无法用于高阶非球面的测量。补偿法通过带有补偿器的干涉系统实现,可以广泛地应用于各类非球面的检验^[20]。这类干涉系统的设计以消除系统的剩余波像差为目标,通常使用零位补偿镜或者零位计算全息图(CGH)来完全补偿非球面的法线像差,从而产生与被测非球面一致的波前。根据补偿器类型,补偿法可以分为零位补偿镜检测法和CGH检测法。零位补偿镜检测法是一种测量精度很高的方法,补偿镜的口径可以比被测非球面小很多,因此该方法在大口径非球面的测量中得到广泛应用。考虑到补偿镜会引入系统误差,零位补偿镜需要精确的设计、制

造和装配。CGH检测法由美国亚利桑那大学光学中心的MacGovern和Wyant^[21]于1971年提出,能精确地提供非球面检测中需要的标准样板,如果再辅以并不复杂的单透镜补偿系统,则可以满足面形特殊且相对口径比较大的非球面检测需要。CGH法目前已经可以实现亚纳米级的测量精度,正逐步取代传统零位补偿镜,成为新一代的零位补偿元件。非球面CGH的经典测量光路如图1所示,在斐索干涉仪中,一部分平行光入射到参考面并返回,形成参考光波,另一部分光透过参考面,经过CGH后形成非球面波垂直入射到非球面镜,形成测试光波,波面自准直反射,返回干涉仪,在分光镜处测量光波与参考光波干涉叠加,形成干涉图样。通过分析干涉图样的变化情况,即可获得非球面的面形信息。

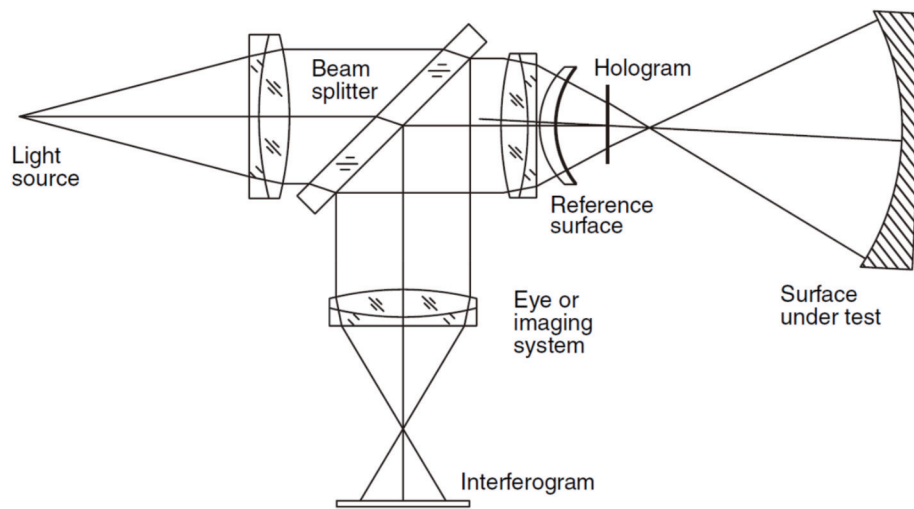


图1 斐索干涉仪非球面CGH检测光路图^[17]

Fig. 1 Lightpath of Fizeau interferometer utilizing a CGH^[17]

零位干涉检测法尽管测量精度高,但仍存在一些不能忽视的缺点。首先,一种补偿器只能测量一种特定面形的被测面,测量范围窄,对不同被测面进行测量时需要重新设计和制作补偿器,测量周期长、成本高。其次,补偿器的制造精度要优于被测面的精度,即补偿器的精度决定了测量精度,测量精度不容易保证。最后,由于需要完全抵消被测镜的像差,因此零补偿器的设计、加工和装调难度较大^[22]。

2.2 非零位干涉检测法

非零位干涉检测法不使用补偿器,或者不要求补偿器完全补偿法线像差,干涉仪采集的干涉图可有部分像差余量。非零位干涉检测法主要包括子孔径拼接法、亚奈奎斯特采样法、双波长测量法、剪切干涉法、倾斜波干涉法、点衍射干涉法、部分补偿法等^[17]。

1981年,美国亚利桑那大学光学中心提出子孔径拼接法^[23],这种方法最初用于测量大口径平面镜,后来该方法被用于解决传统干涉测试方法受限于系统空间频率分辨率的问题,但子孔径间的切换依赖于高精度

机械扫描机构和控制系统,随着被测非球面的口径和非球面度加大,子孔径拼接数量增加,检测误差随子孔径拼接数量增加而累积,从而限制了子孔径拼接法的测试范围,该方法的测量精度(PV)优 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。1987年,美国亚利桑那大学光学中心提出亚奈奎斯特干涉(SNI)方法^[24]来解决经典移相干涉(PSI)方法难以测量高于奈奎斯特频率的高密度干涉条纹的难题,并保持了PSI的优势,可用于测量高陡度非球面波前。1985年,Cheng等^[25]将双波长全息干涉技术与PSI方法结合,提出双波长移相干涉(TWPSI)方法,拓展了PSI的动态范围,并保持了PSI测量精度高的优点,在近乎零位测量时,能够同时保证高精度和大测量范围的面形测量要求,TWPSI方法的测量精度(PV)优于 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)^[26]。TWPSI方法应用时遇到的最大难题在于干涉仪和参考光学元件的色差,实际应用必须针对干涉仪和参考透镜进行消色差设计。剪切干涉法不需要标准参考样板,并且灵敏度可调,因此特别有利于非球面测量;但剪切不可逆会导

致信息丢失,且剪切干涉条纹不能直接反映待测相位,需要结合移相干涉技术才能实现高精度检测,剪切干涉法的测量精度(PV)可以优于 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)^[27]。

2007年,德国斯图加特大学提出倾斜波干涉(TWI)法^[28],并将其应用于大梯度变化的非球面面形测量。该技术基于被检面的表面梯度分布,在干涉光路中利用微透镜阵列引入多个轴外点源,使其产生不同倾角的多束球面波来补偿被检面的各个局部区域的梯度,得到各局部区域对应的可分辨干涉图,再通过相位恢复算法得到完整面形。如图2所示,二维点源阵列发出的光经过分光棱镜后被分成两束,其中一束为参考光束,另一束为测试光束。在测试光路中,二维点源阵列发出的多束入射光经过准直透镜组后产生多束具有不同倾角的平面波。多束倾斜平面波入射到待测样品上,对待测样品的局部区域进行梯度补偿,经待测样品反射回来的携带有待测样品面形偏差的倾斜波面再次经过准直透镜组后入射到分光棱镜上,在分光棱镜处与参考波面发生干涉,经成像透镜后所形成的干涉图被CCD相机接收。通过对获得的干涉图进行解算重构,获得待测样品的面形信息。该方法与子孔径拼接法类似,将光学表面分割成若干区域,从而降低干涉图的条纹密度,进而实现局部面形偏差的测量。该方法不需要高精度的机械扫描机构和控制系统,避免引入整个系统的定位误差和运动误差,在提高测量效率的同时能够得到较高的测量精度。但是,倾斜波干涉法还存在以下几个问题:首先,系统的测量口径受到大口径标准补偿镜头的限制,且目前对大口径标准补偿镜头的加工非常困难;其次,倾斜波干涉法大多采用标准补偿镜头产生标准球面波,而系统中大部分光路为轴外视场,则标准补偿镜头会引入大量波像差,导致系统误差过大。自2013年开始,南京理工大学团队对倾斜波干涉仪进行了一系列深入的研究^[29-31],将点衍射光源阵列引入到倾斜波干涉仪中,用于代替标准球面镜头产生标准球面波,从而避免轴外光束通过标准镜头引入像差。目前倾斜波干涉法的测量精度(RMS)可达 $\lambda/37$ 。

点衍射干涉法通过针孔(或光纤)产生近似的标准球面波作为参考波,突破了传统干涉法中参考镜的限制,理论上可以实现极高精度的面形误差测量。点衍射干涉法可以直接实现球面镜的高精度测量,但是在测量非球面时,非球面的表面梯度变化较大,使得干涉图条纹过密,CCD相机无法分辨,需要与子孔径拼接、倾斜波干涉等方法结合起来降低干涉图的条纹密度。日本超尖端电子技术开发机构(ASET)将点衍射干涉法与环形子孔径拼接技术结合^[32],用于极紫外光刻中的非球面元件检测,RMS精度可达 0.2 nm ;国内的西安交通大学随后也报道了对该方法的相关研究成果^[33-34]。

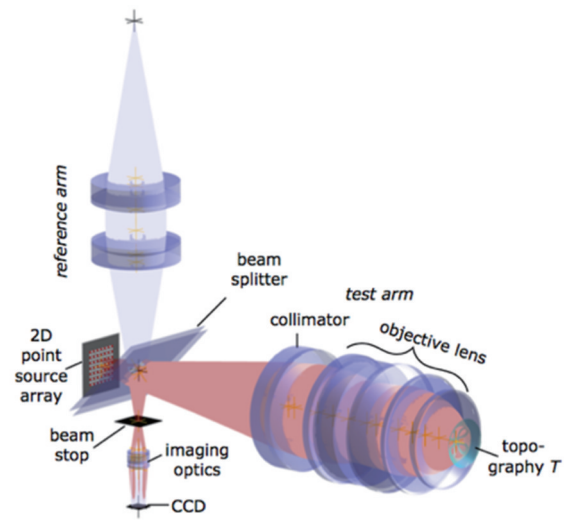


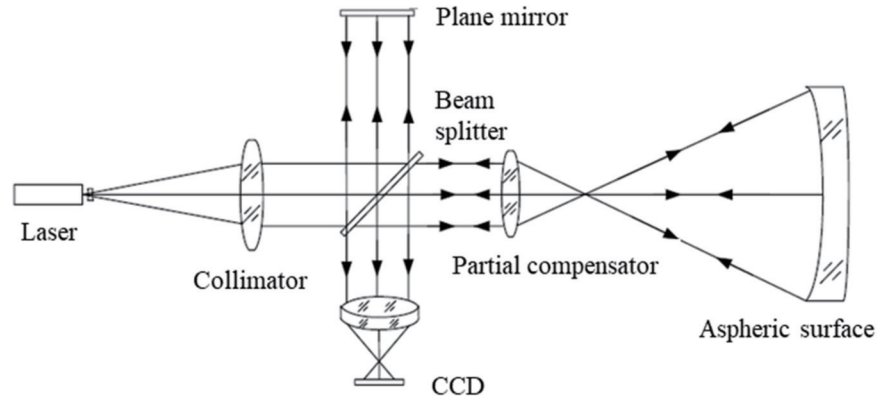
图2 倾斜波干涉仪原理装置图^[28]

Fig. 2 Principle diagram of tilted-wave interferometer^[28]

2003年,北京理工大学郝群、胡摇团队^[35]提出部分补偿法,该方法通过部分补偿镜对波前实现补偿。部分补偿镜无需像零位补偿镜一样完全补偿非球面全部法线的像差,法线像差可有部分余量,只需控制条纹密度在CCD相机的分辨范围内,即可有效恢复波前,进而实现对非球面的高精度测量,该方法最高可实现 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)的精度(PV)。常用的部分补偿法的测量光路如图3所示。激光器发出的激光光束经准直扩束后得到平行光,通过分束镜后,被反射的一部分光经参考镜反射后仍为平面光,形成参考光;另一部分透射光经过部分补偿镜补偿后,入射到待测非球面表面,由于通过补偿镜后仍存在固有的一部分像差,因此入射到被测面的波前与被测面并非完全一致,其反射回的波前携带着固有的剩余波前和非球面面形误差信息再次经过部分补偿镜,在分束镜处与参考光路返回的参考光发生干涉,经过成像透镜最终由CCD探测器采集。通过处理采集的干涉图并辅以解算算法即可得到待测非球面的面形误差。

由测量原理可知,部分补偿镜是部分补偿系统的关键元件^[36-39]。与零位补偿测量法不同,部分补偿法中允许系统存在较大的波像差,因此部分补偿镜的结构可以比零位补偿器简单,甚至可以是单透镜,部分补偿镜的设计方法和要求也不同于零位补偿器。当部分补偿后采集到的干涉图条纹过密时,因不满足采样定理的要求而无法记录分析,可以通过调节干涉仪参考平面镜引入倾斜来得到单调且利于后期处理的干涉条纹,而参考平面倾斜量的选择,同时也是对部分补偿透镜提出的设计原则。

补偿范围是衡量补偿镜通用性的重要指标之一。影响部分补偿镜补偿范围的最重要因素是被测非球面的非球面度,相同条件下非球面度的增大会使补偿范围缩小。经部分补偿透镜补偿后的剩余波像差可以比

图 3 部分补偿法测量原理^[35]Fig. 3 Principle of partial compensation method^[35]

较大,只要波像差的最大斜率满足采集干涉条纹的要求,就可以检测该非球面。这意味着 CCD 像元尺寸对部分补偿干涉系统通用性的影响较大,像元尺寸越小,像素数越多,所拍摄的干涉条纹可以更密集,补偿镜可以补偿的波像差更大;补偿范围会随着相对孔径减小而增加,相对孔径相同时,部分补偿透镜的补偿范围也会随着被测面非球面度的减小而增加。一种部分补偿镜可以测量 R 和 K 的多种组合的非球面,在 K 不变时,可测量变化较大的 R ^[40]。

部分补偿法允许补偿后的系统中存在较大的波像差,这就降低了对补偿器的要求,从而降低了补偿镜的设计、加工难度以及制造成本。在系统装调方面,相比于零位检测法,部分补偿法对装调精度和环境稳定性的要求较低。可以用一个部分补偿透镜对具有多种参数的多个非球面进行测量,有着较好的通用性,在大口径、深度非球面检测领域具有很好的应用前景。相应地,因为允许存在部分剩余波前(回程误差),因此非零位干涉法的测量精度一般低于零位干涉法。回程误差是非零位干涉检测法中最主要的误差源,为了提高非零位干涉检测法的测量精度,需要使用特殊的算法如逆向迭代优化算法^[41-42],或者消除装置的回程误差。

2.3 数字莫尔移相法

北京理工大学提出的数字莫尔移相干涉法^[43-45]是一种可以减小部分补偿法中剩余波前的影响、提高检测精度的较为切实可行的方案。基于部分补偿原理和数字莫尔移相技术的非球面检测方案采用部分补偿透镜作为补偿器件,利用改进的泰曼-格林干涉仪得到包含被测面误差信息的实际干涉图形,再利用数字莫尔技术使实际干涉图与计算机以设计值建模产生的虚拟干涉图进行叠加,消除剩余波前影响,处理出所需的非球面面形误差信息。数字莫尔移相干涉技术只需要采集一幅包含非球面面形误差信息的实际干涉图,通过与四步移相的理想干涉图莫尔相乘,并低通滤波,可将实际干涉仪像面波前中包含非球面面形误差信息的复杂波面解算出来,该复杂波前已经不包含剩余波前,但

是在面形误差较大时需要校准面形误差引入的回程误差^[46]。

数字莫尔移相干涉法的流程包含两条支路,一条是实际的干涉仪系统通过 CCD 相机采集实际干涉图,另一条是通过计算机生成理论干涉图。测量系统包括一台实际干涉仪以及一台通过计算机建立的虚拟干涉仪,如图 4 所示。系统整体分为 4 个模块:虚拟标准干涉仪、实际非零位干涉仪、图像传输系统、莫尔条纹实时合成与显示系统。在实际非零位干涉仪中,采用实际的部分补偿透镜补偿被测非球面,从而得到包含被测面误差信息的实际干涉图;在计算机中,根据实际干涉光路建立虚拟标准干涉仪,在被测面位置设置一个对应被测非球面理论参数的标准非球面,采用虚拟的部分补偿透镜补偿标准非球面,通过光线追迹得到像面处的波面,并得到虚拟理论干涉图,以此理论干涉图为基础,利用数字移相方法得到相位依次相差 $\pi/2$ 的 4 幅虚拟移相干涉图。利用数字莫尔技术,将实际干涉图与 4 幅理论干涉图分别进行莫尔合成,生成 4 幅移相莫尔图像,完成两条支路的连接。对 4 幅移相莫尔图像进行相位解算,最终可以得出非球面面形误差分布,包括 PV 值、RMS 值、二维或三维形貌图及拟合的泽尼克多项式系数等。

数字莫尔移相干涉法分为虚拟干涉仪建立和莫尔合成滤波两部分。北京理工大学提出的虚拟干涉仪是一种测量工具,用于准确描述光学系统并消除系统误差^[47]。如图 5 所示,针对不同的实际干涉仪构型可以构建不同的虚拟干涉仪,如检测大口径被测面专用的瑞奇康芒干涉仪^[48],以及子孔径拼接干涉仪^[49]。虚拟标准干涉仪用光学设计软件如 ZEMAX 设计实现,根据实际干涉仪准直扩束系统、分光镜、参考标准平面镜、部分补偿镜、被测镜等的光学结构,可以在 ZEMAX 软件中重构出尺寸参数与之完全相同的虚拟干涉仪,在被测面位置添加一个符合被测非球面理论尺寸且不存在面形误差的标准非球面,进行部分补偿镜的参数设计并获得好的补偿效果之后,通过光路追

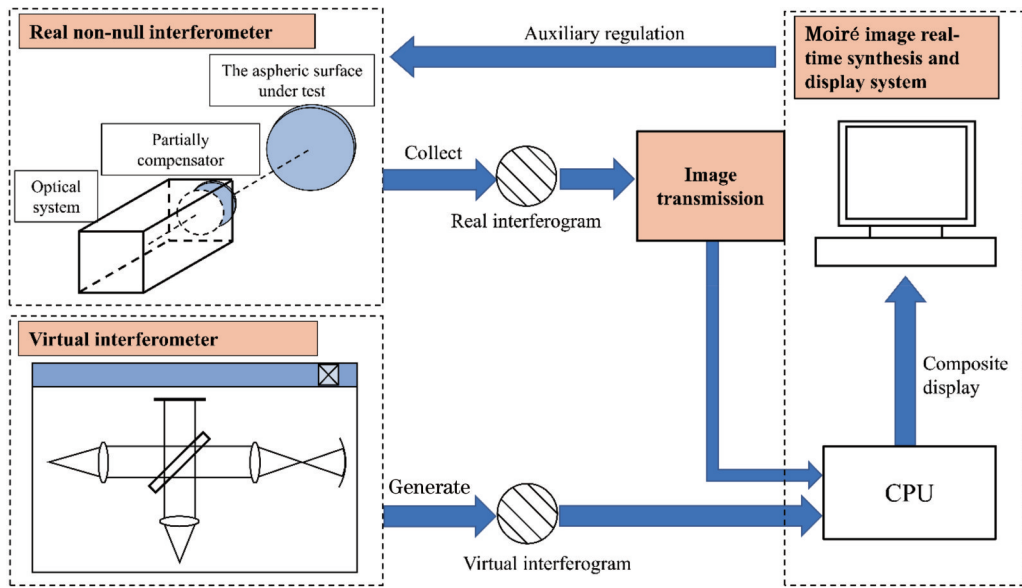


图 4 数字莫尔干涉法系统原理图

Fig. 4 Principle of digital Moiré interferometric system

迹得到仿真的虚拟标准干涉图。由于实际干涉仪的光学元件以及机械零件均会出现不可避免的加工误差,加工完成的镜子面形不可能与 ZEMAX 软件中设计的完全相同,而且在实际的装调过程中也可能会引入少量离焦、倾斜等像差,使得实际干涉仪与虚拟干涉仪并不完全相同,因此需要测量实际干涉仪中每个光学部分的面形误差并导入到已经建立的虚拟干涉仪系统中。

数字莫尔合成是对加载波的虚拟干涉图和实际干涉图进行合成的过程,通过对加载波的虚拟干涉图和实际干涉图进行莫尔合成,再进行低通滤波,进而

获得所需的信息。虚拟干涉图由软件建模的虚拟干涉仪生成,对应部分补偿后经标准非球面反射到出瞳面处的剩余波前。由于软件中设置的是标准非球面,因此不含表面面形误差信息。实际干涉图由实际干涉仪采集得到,它对应部分补偿后经实际被测非球面反射到 CCD 相机靶面处的剩余波前加实际被测面的面形误差信息。利用数字莫尔干涉技术,可以将虚拟干涉仪和实际干涉仪中的剩余波前抵消,剩下的只是被测面的面形误差,莫尔图像则对应这种面形误差信息,通过数字移相就可以解出被测非球面的面形误差。

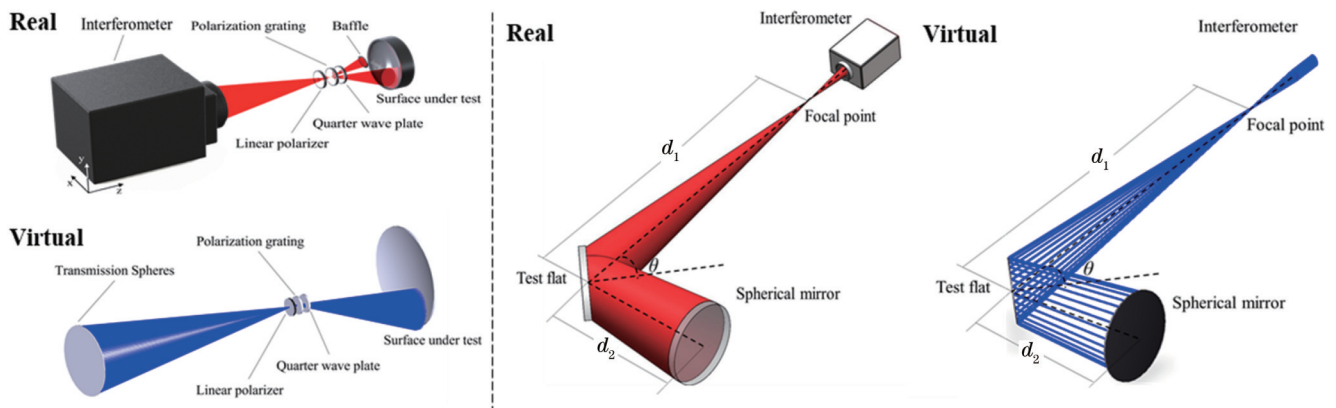


图 5 不同系统中的实际干涉仪光路及所构建的虚拟干涉仪

Fig. 5 Real interferometer lightpath and constructed virtual interferometer in different systems

莫尔条纹一般由两个光栅重叠产生,即由两个光栅的透过率函数相乘得到。若其中一幅图像产生移相,所生成的莫尔条纹也会产生相应的移相。利用三步法、四步法或多步法等对移相后的数字莫尔条纹进行解相,则可以得到反映实际干涉图和虚拟干涉图相

位差的包裹相位分布,再经过解包裹处理即可得到表征被侧面面形误差的相位分布。

北京理工大学提出的两步载波拼接法^[50](TCSM)利用频谱混叠情况下数字莫尔移相(DMP)法求解面形误差产生的错误区域位置与载波有关的现象,通过

采集两幅加入不同载波的干涉图,在两个带有不同求解错误区域的面形误差中提取面形误差的正确区域进行拼接,最终得到完整的面形误差。然而,由于两幅实际干涉图加载的载波不同,两个面形误差的平移和倾斜参数存在一定偏差,如果直接进行拼接,会产生拼接误差。为了获得更精确的结果,TCSM使用更多的方程和数据,利用最小二乘法求解拼接向量,并利用该向量修正两个面形误差。修正之后的两个面形误差具有相同的平移和倾斜参量,之后可以提取拼接区域进行拼接操作。对于光滑连续表面的光学元件来说,TSCM允许被测镜存在几十个波长的非球面度,因此可以做到一个补偿镜对应不同被测件的通用性检测。

考虑到两步载波拼接法仍需两幅具有不同载波的干涉图才能完成测量,北京理工大学团队提出一种基于牛顿迭代优化的单帧高陡度干涉图的解相方法^[51],该方法在获得精度较高结果的同时,又扩展了可测带宽。对于每个空间坐标点 (x,y) ,以混叠噪声 Δ 为优化变量,基于牛顿迭代方程对混叠噪声进行优化,其中优化目标函数 g 为所构造的莫尔合成图与实际莫尔合成图在 (x,y) 点的光强差值,通过牛顿迭代寻找 g 的无约

束极小值。 Δ 的初值取0,优化目标在多次迭代后收敛至允许范围内即可。为了防止求解得到的混叠噪声可能因三角函数的周期性多解而出现不连续的问题,需要进行进一步的连续性操作使其平滑。考虑到混叠噪声相位的PV值远低于 π 且连续分布,因此可以利用混叠噪声起伏较小且二阶导数的数值解小于一定阈值来进行多次迭代并完成平滑操作,多次平滑操作达到连续即可。求得 Δ 的分布后,即可求解得到去除混叠噪声后的相位。

3 参数误差干涉测量

3.1 零位干涉法

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出的零位干涉法^[52]如图6所示,在零位补偿检测中引入激光跟踪仪来测量零位补偿镜与二次非球面被测镜之间的距离,可进一步求解出二次非球面的相关参数,其中包含二次非球面的顶点曲率半径、二次非球面系数以及离轴量。实测一个曲率半径为2 m左右的非球面,得到顶点曲率半径的测量重复性为 ± 0.039 mm,二次非球面系数重复性为 $\pm 2.05 \times 10^{-5}$ 。

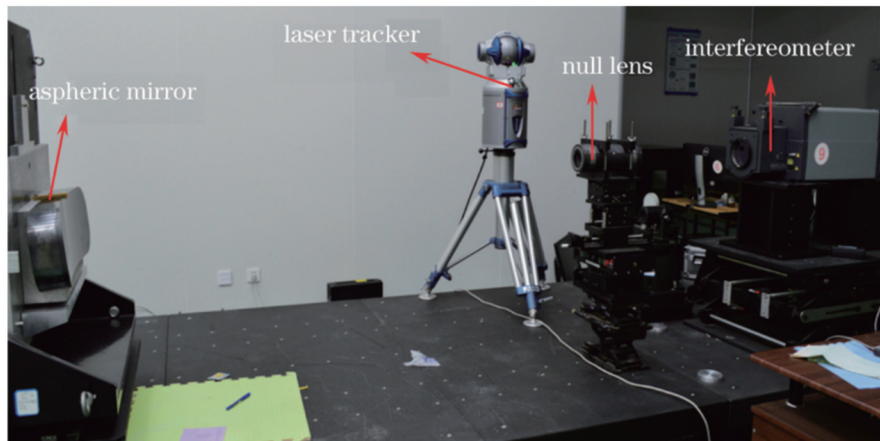


图6 采用激光跟踪仪的零位补偿法测量二次非球面参数^[52]

Fig. 6 Null interferometric measurement of a quadratic aspheric surface parameters with a laser tracker^[52]

3.2 部分零位干涉法

浙江大学提出部分零位补偿法测量二次非球面的顶点曲率半径,利用剩余波前变化以及部分零位补偿镜与被测镜之间的距离变化对非球面的顶点曲率半径进行求解^[53]。将被测非球面沿光轴方向进行多次固定间距的移动,在获得波前变化量与移动距离后,使用一个部分零位干涉系统的多重结构模型进行同步优化,如图7所示。实测 R 为819.52 mm的抛物面时, R 的相对测量精度优于0.025%。

3.3 最佳补偿位置像差分析法

在部分补偿干涉系统中,当被测非球面位于光轴的不同位置时,会获得不同条纹密度的干涉图。要使不同的部分补偿干涉系统具有相同的评价标准,最直接的方法是在系统中调整被测非球面的位置,使其干

涉条纹的密度最小,即保证入射波前与非球面面形最接近,然后对比不同系统的最小条纹密度,评价各个系统的补偿能力。上述被测非球面的位置,就是部分补偿干涉系统中补偿效果最好的位置,即最佳补偿位置^[54-55]。从像差分析的角度,将被测非球面沿光轴方向移动到最佳补偿位置的过程,其实是通过引入平衡离焦来对剩余波前像差进行平衡的过程,当被测非球面在最佳补偿位置时,剩余波前像差的峰谷值最小。在最佳补偿位置处,补偿镜最后一个镜面到被测面之间的距离被定义为最佳补偿距离。

北京理工大学提出的利用最佳补偿位置像差分析进行非球面参数干涉测量的原理^[54-55]如图8所示。结合虚拟部分补偿干涉系统和实际部分补偿干涉系统,建立非球面参数误差测量系统。在实际干涉仪中调节

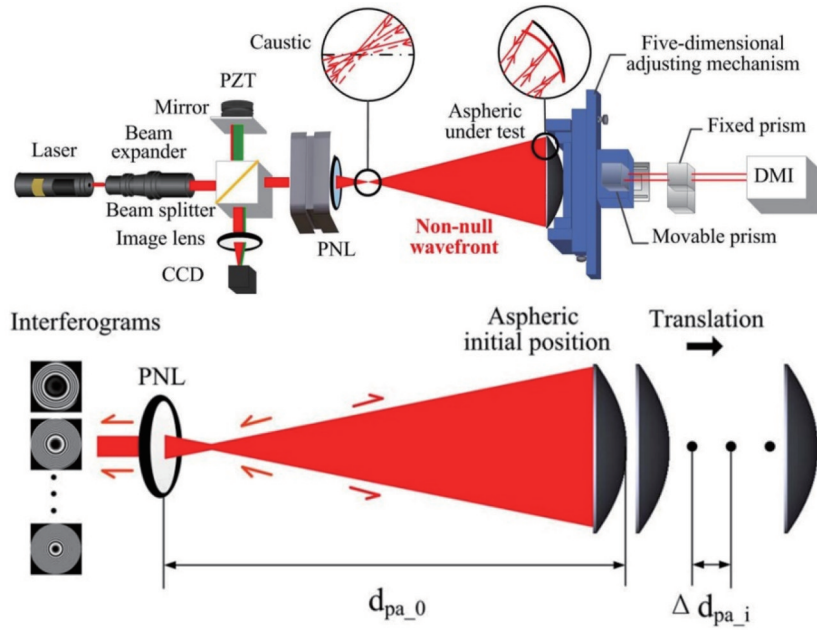


图 7 基于部分零位补偿法的二次非球面顶点曲率半径测量^[53]

Fig. 7 Measurement of curvature radius of vertex based on partial compensation interferometry^[53]

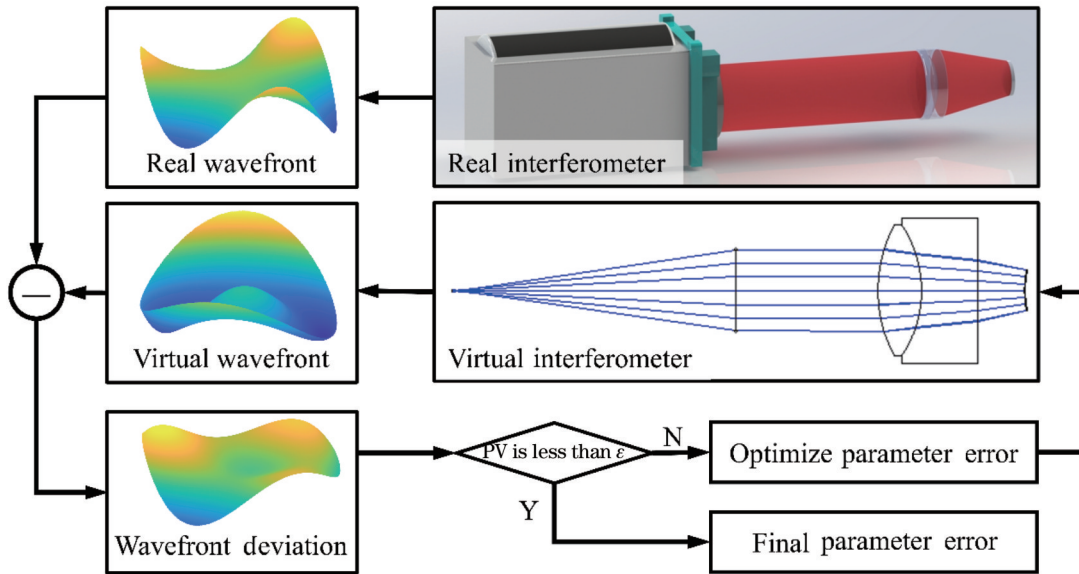


图 8 基于最佳补偿位置像差分析的非球面参数误差测量原理图

Fig. 8 Principle diagram of aspheric parameter error measurement based on aberration analysis of optimal compensation position

被测面和补偿镜的轴向距离,找到最佳补偿位置,测得此时的实际剩余波前。在虚拟干涉仪中构建理想补偿镜和被测镜,同样找到最佳补偿位置,测得虚拟剩余波前。通过分析实际剩余波前和虚拟剩余波前的差异得到波前偏差。此外,采用猫眼波前测量实际与虚拟最佳补偿距离之间的偏差。利用两项偏差联立方程即可求得包括高阶非球面系数在内的参数误差初值,再结合迭代优化可测得参数误差。

北京理工大学团队采用上述猫眼波前测量补偿距离的非球面参数误差测量系统^[56],实现了对于高阶非球面参数的测量,该非球面的 R 为 35.7569 mm, K 为

-0.6291 , A_4 为 -4.741×10^{-7} 。测量结果中 R 为 35.7482 mm, 相对误差为 0.3637%; K 为 -0.6286 , 相对误差为 0.3182%; A_4 为 -4.8830×10^{-7} , 相对误差为 0.1229%。除上述系统外,北京理工大学团队还搭建了采用差动共焦测量补偿距离的非球面参数误差测量系统^[57],非球面参数测量结果如下: R 为 35.7479 mm, 相对误差为 0.2797%; K 为 -0.6285 , 相对误差为 0.1591%; A_4 为 -4.8850×10^{-7} , 相对误差为 0.0819%。该方法的通用性较强,可以实现各式非球面、全种类非球面系数的高精度测量,但对于补偿距离的测量精度要求较高,而距离测量系统的加入,提升

了测试成本,降低了系统集成度。

4 展 望

非球面的面形与参数测量,对于保障各式先进光学系统的性能水平至关重要。近几十年来,全球的学者们在非球面计量领域投入了大量的精力。目前,针对各式测试场景中的各种非球面,已经出现了许多有效的测试方法。然而,随着先进光学系统的不断发展,复杂的边界条件对光学车间检测提出了愈发严格的要求。以目前正在建设的欧洲极大望远镜(E-ELT)为例,其主镜口径为 39.3 m,由 798 块 1.4 m 口径的正六边形非球面反射镜拼接而成,需要在约 7 年内加工完成。如此大批量的大口径非球面加工任务,对检测技术的精度、成本与效率均提出了极高的要求。在大多数光学车间中,需要面对各种非球面检测任务,对检测

成本的要求进一步体现为检测技术的通用性要求。

用于非球面面形检测的干涉测量法可分为零位干涉检测法与非零位干涉检测法。各种非球面干涉面形测量方法的对比如表 1 所示,其中○表示是,×表示否。可以看到,零位检测法的测量精度较高,但是通用性较差,测试成本较高,CGH 逐渐成为主流的零位补偿测量方法。相较于零位干涉检测法,非零位干涉检测法有着更大的动态范围,通用性较强,目前已发展出多种测量方法。然而,更大的动态范围往往以牺牲精度、效率或提高成本为代价。以子孔径拼接法、倾斜波干涉法、部分补偿法为代表的非零位面形干涉检测技术,以高通用性为目标,取得了许多重大成果,但在系统误差控制方面还有较大的发展空间,更高的测试精度是非零位面形检测技术的发展方向。同时应注意到,各种方法在效率、成本、集成度等方面有着不同的问题。

表 1 各种非球面干涉面形测量方法的对比

Table 1 Comparison of interferometric methods for aspheric surface form measurement

Method	Type	Advantage	Disadvantage	Convex	Concave
Null test	No-aberration point	High accuracy	Only for quadratic surface	○	○
	Compensator	High accuracy	Low versatility Limited compensating ability	○	○
	CGH	High accuracy	Low versatility High cost	○	○
Non-null test	Sub-aperture stitching interferometry	High versatility	Time-consuming	○	○
	Sub-Nyquist interferometry	High versatility	Require prior knowledge	○	○
	Two wavelength phase shifting interferometry	High versatility	Chromatism	○	○
	Shearing interferometry	High versatility	Information loss Complex algorithm	○	○
	Tilted-wave interferometry	High versatility Efficient	Retrace error	○	○
	Point diffraction interferometry	High accuracy	Time-consuming	×	○
	Partial compensation interferometry	High versatility Low cost	Require distance measurement	○	○

如表 2 所示,用于非球面参数检测的零位干涉测量法可以实现 R 的高精度测量,但是需要对零位补偿镜与被测非球面进行额外加工,且无法测量高阶系数 A_{2i} ,这就限制了该方法的应用。目前,用于参数检测的最佳补偿位置像差分析法蓬勃发展,可以实现针对

各式非球面中全种类非球面参数的高精度测量。最佳补偿位置像差分析法对补偿距离的测量精度要求较高,限制了该方法的使用范围,因此如何满足不同测试场景下补偿距离的高精度测量需求,提高通用性,是该方法的研究重点。

表 2 各种非球面干涉参数测量方法的对比

Table 2 Comparison of interferometric methods for aspheric surface parameter measurement

Method	Type	R	K	A_{2i}	Convex	Concave
Null interferometry		○	○	×	×	○
Non-null interferometry	Axial moving	○	×	×	×	○
	Best compensation position	○	○	○	○	○

5 结 论

面向军用、民用、医用等领域的非球面光学系统制造装调过程中,光学非球面面形误差和参数误差测量

需求,综述了以零位干涉和非零位干涉为代表的面形误差测量方法,以及以零位干涉法、部分零位干涉法和最佳补偿位置像差分析法为代表的参数误差测量方法,探讨了光学非球面干涉测量的发展前景和研究方

向。高精度、高效率、低成本、高通用性的测量方法,将是非球面检测的不懈追求。

参 考 文 献

- [1] 龚大鹏. 航天遥感相机焦平面技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
Gong D P. Research on focal plane technology of space remote-sensing camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015
- [2] 路文文, 郭景阳, 陈善勇. 鸥翼型非球面元件的白光干涉拼接测量[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0912001.
Lu W W, Guo J Y, Chen S Y. White light interferometry stitching measurement of gull-wing aspheric optics[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0912001.
- [3] 郝云彩. 空间详查相机光学系统研究[D]. 上海: 中国科学院上海药物研究所, 2000.
Hao Y C. Research on optical system of space detailed investigation camera[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Materia Medica, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [4] 崔向群, 高必烈, 汪达兴, 等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. 光学学报, 2005, 25(3): 402-407.
Cui X Q, Gao B L, Wang D X, et al. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(3): 402-407.
- [5] Juraneck H J, 高国龙. 离轴望远镜: 新一代地球观测望远镜(上)[J]. 红外, 2000, 21(1): 5-11.
Juraneck H J, Gao G L. Off-axis telescope: a new generation of earth observation telescope (I) [J]. Infrared, 2000, 21(1): 5-11.
- [6] Juraneck H J, 高国龙. 离轴望远镜: 新一代地球观测望远镜(下)[J]. 红外, 2000, 21(2): 32-36.
Juraneck H J, Gao G L. Off-axis telescope: a new generation of earth observation telescope (II) [J]. Infrared, 2000, 21(2): 32-36.
- [7] 牛岗, 樊仲维, 王家赞, 等. 大功率半导体激光光纤耦合技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3): 34-38.
Niu G, Fan Z W, Wang J Z, et al. Technological progress of high-power fiber coupling LD[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(3): 34-38.
- [8] 张海平, 唐运海, 张慧星, 等. 基于非球面方程的渐进多焦点眼用镜片优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0322001.
Zhang H P, Tang Y H, Zhang H X, et al. Optimal design of progressive addition lenses based on aspherical formula[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0322001.
- [9] 喻秀英, 王江, 姜勇, 等. 半导体激光测距机非球面准直整形元件的设计[J]. 光电与控制, 2009, 16(5): 71-73.
Yu X Y, Wang J, Jiang Y, et al. Aspheric collimating and shaping element design for diode laser range finders[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(5): 71-73.
- [10] 代会娜. 基于ZEMAX的LCOS微型投影镜头设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
Dai H N. Design and research of LCOS micro projection lens based on ZEMAX[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [11] 杜娟. 共心宽视场高分辨率成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
Du J. A study of moncentric wide field of view and high-resolution imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [12] 朱海丰, 贾翠萍, 方志良. 非球面人工晶体设计及其光学性能研究[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 56-59.
Zhu H F, Jia C P, Fang Z L. Design method and optical performance of aspherical IOL[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(4): 56-59.
- [13] 刘锦琳, 余飞鸿. 旋转对称非球面表述及其特点分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0922001.
Liu J L, Yu F H. Descriptions of rotationally symmetric aspheres and analysis of their characteristics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0922001.
- [14] International Organization for Standardization. Optics and photonics: preparation of drawings for optical elements and systems: ISO 10110-12: 2019[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
- [15] Qiu L R, Li J A, Zhao W Q, et al. Laser confocal measurement system for curvature radii of lenses[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 246-252.
- [16] Huang C K, Wu Y Q, Fan B, et al. A new method on measuring radius of curvature of a conic aspherical mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9280: 928017.
- [17] 马拉卡拉. 光学车间检测[M]. 杨力, 伍凡, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
Malacara D. Optical shop testing[M]. Yang L, Wu F, Transl. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [18] Rosete-Aguilar M, Diaz-Urbe R. Profile testing of spherical surfaces by laser deflectometry[J]. Applied Optics, 1993, 32(25): 4690-4697.
- [19] 朱秋东, 郝群. 激光束偏转法非球面面形测量和计算[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 22-23, 27.
Zhu Q D, Hao Q. Aspheric surface testing and calculating by laser deflectometry[J]. Optical Technology, 2002, 28(1): 22-23, 27.
- [20] Kim T, Burge J H, Lee Y, et al. Null test for a highly paraboloidal mirror[J]. Applied Optics, 2004, 43(18): 3614-3618.
- [21] MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements[J]. Applied Optics, 1971, 10(3): 619-624.
- [22] 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.
- [23] Kin C J, Wyant J. Subaperture test of a large flat or a fast aspheric surface[J]. Journal of Optical Society of America, 1981, 71: 1587
- [24] Greivenkamp J E. Sub-nyquist interferometry[J]. Applied Optics, 1987, 26(24): 5245-5258.
- [25] Cheng Y Y, Wyant J C. Multiple-wavelength phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1985, 24(6): 804-807.
- [26] 成金龙. 基于双波长移相干涉的阶跃型三维形貌高精度检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
Cheng J L. Research on the technology for the high precision testing of three-dimensional shape with steps by dual-wavelength phase-shift interferometry[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [27] Wang M, Zhang B, Nie S P, et al. Radial shearing interferometer for aspheric surface testing[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4927: 672-676.
- [28] 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.
- [29] 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.
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.
- [30] Shen H A, 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.
- [31] Shen H A, Sun Y E. Point diffraction interferometer with tilted waves for measuring complex surfaces[J]. Optical Engineering, 2021, 60(1): 014103.
- [32] Otaki K, Yamamoto T, Fukuda Y, et al. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet

- lithography aspheric mirror[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2002, 20(1): 295.
- [33] Gao F, Jiang Z D, Zhao Z X, et al. Measurement of aspheric surface combining point diffraction interferometry and annular subaperture stitching[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(1): 014102.
- [34] Gao F, Jiang Z D, Feng Y, et al. High accuracy measurement of aspherical surface by point diffraction interferometry[C]//14th IEEE International Conference on Nanotechnology, August 18-21, 2014, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2014: 428-432.
- [35] 刘惠兰. 基于部分补偿透镜的非球面检测方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
- Liu H L. Research on aspheric surface detection method based on partially compensated lens[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004.
- [36] 徐斌, 王文生. 检测非球面的准万能补偿器设计[J]. *长春光学精密机械学院学报*, 1997, 20(1): 1-5.
- Xu B, Wang W S. Designing the universal compensator of test aspherical surface[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1997, 20(1): 1-5.
- [37] 张权, 张璞扬, 郝沛明, 等. 大型非球面镜的加工和检测[J]. *光学技术*, 2001, 27(3): 204-205, 208.
- Zhang Q, Zhang P Y, Hao P M, et al. Manufacturing and testing on large aspherical surface[J]. *Optical Technology*, 2001, 27(3): 204-205, 208.
- [38] Offner A. A null corrector for paraboloidal mirrors[J]. *Applied Optics*, 1963, 2(2): 153-155.
- [39] Kim Y S, Kim B Y, Lee Y W. Design of null lenses for testing of elliptical surfaces[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(19): 3215-3219.
- [40] 刘惠兰, 郝群, 朱秋东, 等. 利用部分补偿透镜进行非球面形测量[J]. *北京理工大学学报*, 2004, 24(7): 625-628.
- Liu H L, Hao Q, Zhu Q D, et al. Testing an aspheric surface using part-compensating lens[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(7): 625-628.
- [41] 刘东. 通用数字化高精度非球面干涉检测技术与系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- Liu D. Research on universal digital high-precision aspheric interference detection technology and system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [42] Liu D, Yang Y Y, Tian C, et al. Practical methods for retrace error correction in nonnull aspheric testing[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7025-7035.
- [43] 栗孟娟. 数字莫尔移相干涉术测量非球面的面形误差和面形参数[D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
- Li M J. Measurement of surface errors and parameters of aspheric surface by digital Moiré phase-shift interferometry[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2005.
- [44] Zhu Q D, Hao Q. Aspheric surface test by digital Moiré method [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6723: 672355.
- [45] Hao Q, Hu Y, Zhu Q D. Digital Moiré phase-shifting interferometric technique for aspheric testing[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 590: 623-628.
- [46] 张丽琼, 王劲溥, 胡摇, 等. 部分补偿数字莫尔移相干涉的回程误差消除[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0117005.
- Zhang L Q, Wang S P, Hu Y, et al. Retrace error elimination for partial compensation digital Moiré phase shifting interferometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0117005.
- [47] 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.
- [48] Liu Y M, Hu Y, Zhang S H, et al. Virtual-real combination ritchey-common interferometry[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 15777-15795.
- [49] Hu Y, Wang Z, Hao Q. Circular subaperture stitching interferometry based on polarization grating and virtual-real combination interferometer[J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9129.
- [50] Hao Q, Wang S P, Hu Y, et al. Two-step carrier-wave stitching method for aspheric and freeform surface measurement with a standard spherical interferometer[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(17): 4743-4750.
- [51] 叶明哲, 王劲溥, 胡摇, 等. 大梯度相位单幅干涉图的解相方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0504002.
- Ye M Z, Wang S P, Hu Y, et al. Phase retrieval methods for single interferogram with large gradient phase[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0504002.
- [52] 陈新东, 李锐刚. 非球面 Null Lens 补偿检测中采用激光跟踪仪测量几何参数方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0508007.
- Chen X D, Li R G. Research on geometric parameter measurement method using laser tracker in null lens asphere testing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0508007.
- [53] Yang Y Y, Zhang L, Shi T, et al. Determination of aspheric vertex radius of curvature in non-null interferometry[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2838-2844.
- [54] Hao Q, Li T F, Hu Y, et al. Partial compensation interferometry measurement system for parameter errors of conicoid surface[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(6): 063102.
- [55] Hao Q, Li T F, Hu Y, et al. Vertex radius of curvature error measurement of aspheric surface based on slope asphericity in partial compensation interferometry[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18107-18121.
- [56] 胡摇, 陶鑫, 郝群. 猫眼前定位虚实结合干涉非球面参数误差测量[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 20220497.
- Hu Y, Tao X, Hao Q. Parameter error measurement of aspheric surface by combining virtual and real interference in cat's eye wavefront positioning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220497.
- [57] Hao Q, Tao X, Hu Y, et al. Interferometric measurement of high-order aspheric surface parameter errors based on a virtual-real combination iterative algorithm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27014-27030.

Interferometric Measurement of Optical Aspheric Surface Form Error and Parameter Error

Hao Qun*, Liu Yiming, Hu Yao**, Ning Yan, Wang Zichen, Xu Chuheng, Dong Xinyu,
Liu Yuanheng

Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract

Significance Asphere is a general term for surfaces deviating from a sphere. Different from spherical surfaces with similar curvature, the curvature of aspheric surfaces varies everywhere. Aspheric surfaces have higher degrees of freedom than spherical ones, allowing them to achieve more functions than spherical surfaces. In addition to correcting high-order aberrations and improving imaging quality, aspheric surfaces can reduce the sizes of optical systems by yielding effects that are only possible with multiple spherical mirrors. Employing aspheric surfaces can simultaneously improve image quality and reduce the volume of optical systems. As a result, optical designers are increasingly adopting aspheric surfaces in modern optical systems, such as biomedical, lithography, astronomical optics, and high-power laser systems. The measurement technique is vital in manufacturing aspheric surfaces. The measurement technique of the aspheric surface is mainly for the surface form and parameters, and both techniques can assess the aspheric surface quality. Interferometry is an efficient method widely applied in measuring aspheric surfaces in optical shops. Our paper reviews the interferometric measurement of optical aspheric surface form and parameter error, with attention to the research on partial compensation and digital Moiré interferometry. Additionally, the future trend of interferometric measurement technology for optical aspheric surfaces is discussed.

Progress According to whether the interferometer can obtain the null interferogram, the surface form measurement technique can be divided into two categories of null interferometry and non-null interferometry.

Null interferometry includes the no-aberration point method and compensation method. The no-aberration point method is widely adopted to measure quadratic surfaces but cannot be utilized to measure high-order aspheric surfaces. The compensation method is implemented by an interferometric system with a compensator or computer-generated hologram (CGH) and has been widely applied to measure various aspheric surfaces.

The non-null interferometry mainly includes the sub-aperture stitching interferometry, sub-Nyquist interferometry, two-wavelength phase shifting interferometry, shearing interferometry, tilted-wave interferometry, point diffraction interferometry, and partial compensation interferometry. The research group from the University of Arizona proposed the sub-aperture stitching interferometry, two-wavelength phase shifting interferometry, and sub-Nyquist interferometry in 1981, 1985, and 1987, respectively. These three methods can be employed to measure aspheric surfaces with small asphericity. The research group from the University of Stuttgart put forward the tilted-wave interferometry in 2007, which was applied to measure aspheric surface forms with large gradient variations (Fig. 2). The tilted-wave interferometry introduces multiple off-axis point sources by a microlens array to generate multiple spherical waves with different inclinations to compensate the gradients in various local areas of the tested surface. Then the interferogram corresponding to each local region can satisfy the Nyquist sampling theorem, and the complete surface form is obtained by a phase retrieval algorithm. Point diffraction interferometry can achieve high accuracy and is applied in the measurement of the extreme ultraviolet lithography aspheric mirror. The research group from the Beijing Institute of Technology proposed partial compensation and digital Moiré interferometry in 2003 (Fig. 3). The partial compensator only compensates part of normal aberrations, and the surface form can be obtained when the interferogram satisfies the Nyquist sampling theorem. A partial compensator can measure multiple aspheric surfaces with various parameters, and it has good versatility and can be adopted to test the aspheric surfaces with a large aperture and asphericity.

The interferometric method for aspheric surface parameter error establishes the relationship between the compensation distance and residual wavefront. The research group from Changchun Institute of Optics utilizes the null compensator to measure parameter error (Fig. 6). The research group from Zhejiang University obtains the vertex radius of curvature by axially moving the test surface (Fig. 7). The research group from Beijing Institute of Technology obtains the parameter error by analyzing the aberration at the best compensation position (Fig. 8).

Conclusions and Prospects The measurement of aspheric surface form error and parameter error is crucial for ensuring

the performance of advanced optical systems. In recent decades, intensive efforts have been made to the measurement technique of aspheric surfaces. We are delighted to see the booming development of this field, and many efficient approaches have been proposed for various test scenarios. Nevertheless, the development of advanced optics always poses new challenges. Complex boundary conditions would impose harsh requirements on optical shop testing. For example, the primary mirror of the European Extremely Large Telescope (E-ELT) is composed of 798 regular hexagonal aspheric mirrors with a diameter of 1.4 m, and the manufacturing should be finished in seven years. Such a task poses extremely high requirements for the accuracy, cost, and efficiency of measurement techniques. The optical shop handles the testing tasks of various aspheric surfaces, and the requirement of testing cost means to ensure the versatility of the measurement techniques. Further progress will undoubtedly be associated with a test method that comprehensively considers high accuracy, high efficiency, low cost, and good versatility.

Key words interferometry; aspheric surface; form error; parameter error