

文章编号: 1002-2082 (2020) 04-0857-11

标准球面透镜的几何特性与误差分析

袁 群, 季 文, 高志山

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 标准球面透镜是斐索型干涉仪的核心器件, 综述标准球面透镜的几何特性和误差。分析标准球面透镜在干涉照明光路和成像光路中的作用, 重点介绍并实验验证了球面干涉成像的 $R\text{-}\sin\theta$ 几何特性关系模型, 给出了采用 Q 非球面实现非球面分裂的新型设计方法, 以及 2 片式非球面标准球面透镜结构的实例, 概述了针对小 F 数标准球面透镜球面干涉腔中的待测球面调整误差和移相空间非均匀性误差的研究成果, 介绍了校正球面干涉腔中误差的波面差分算法, 指出在近标准球面透镜焦点位置测量球面时的回程误差影响, 从物像共轭关系角度解释了近焦点位置回程误差较大的原因, 对比分析了标准球面透镜的透射波前与斜率对回程误差的影响。提出了在设计标准球面透镜时需注意的几何特性关系, 以及使用标准球面透镜时易产生的误差和相应的抑制方法。

关键词: 标准球面透镜; 成像畸变; 干涉腔; 回程误差

中图分类号: TN202; TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0405002

Geometric characteristics and error analysis of standard spherical lens

YUAN Qun, JI Wen, GAO Zhishan

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The standard spherical lens plays an important role in the Fizeau interferometer. The geometric characteristics and error analysis of standard spherical lens were reviewed. The effect of standard spherical lens on interference illumination optical path and imaging optical path was first analyzed; the $R\text{-}\sin\theta$ geometric characteristics relation model of spherical interference imaging was emphatically introduced and verified with experiments; a new design method of aspheric surface splitting using Q aspheric surface was described, and an two-piece type aspheric standard spherical lens structure was presented; the research results of spherical adjustment error to be measured and phase shift space nonuniformity error for small F -number standard spherical lens were summarized; a wave surface difference algorithm for correcting errors in a spherical interferometer was presented; the effect of retrace error when measuring the spherical surface at the focal position near the standard spherical lens was pointed out; from the conjugation relation angle of object image, the reason of large retrace error of near focal position was explained, and the effect of transmission wave front and slope of standard spherical lens on retrace error was analyzed. The geometric characteristics relation which should be paid attention to when designing the standard spherical lens, the errors which were easy to generate when using the standard spherical lens and the corresponding suppression methods were put forward.

Key words: standard spherical lens; imaging distortion; interference cavity; retrace error

引言

斐索型移相干涉仪是球面波检测和计量的重要仪器。标准球面透镜是干涉仪完成球面元件面

形或有限共轭系统透射波像差测量的核心器件, 标准球面透镜一般为多片式齐明透镜组结构, 其作用是将干涉仪主机出射的准直波前转化为标准

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-06-10

基金项目: 国家自然科学基金 (U1931120); 国家重点研发计划 (2019YFB2005500)

作者简介: 袁群 (1986-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学仪器设计和光学测试方面的研究。

E-mail: yuankun@njjust.edu.cn

球面波,且透镜组的最后一个面为干涉测量中的参考球面,面形质量一般优于 $\lambda/10$ PV (λ 通常为 632.8 nm),标准球面透镜的焦点 F' 与该面的曲率中心 C 重合^[1]。在干涉检测球面元件时,干涉腔内待测球面的曲率中心与标准球面透镜的焦点 F' 重合,形成共焦结构。由参考球面返回的波前作为参考球面波,由待测球面返回的波前作为测试球面波,二者在探测器上形成干涉条纹。上述干涉光路结构为干涉仪的照明光路。

在干涉仪照明光路中,一般关注标准球面透镜的 2 个几何特征:一是标准球面透镜 F 数选择要能够覆盖待测球面的焦比(口径与曲率半径之比),目前 Zygo 公司提供的 10.96 cm(4 英寸)标准球面透镜的 F 数最小为 0.65,最大为 10.7;二是凸球面的测量受限于标准球面透镜的参考面,大口径凸球面的测量一直以来都是干涉测量领域的难题,目前 Zygo 公司商用标准球面透镜最大口径为 16.44 cm(6 英寸)。为了检测快焦比球面,或者口径更大的凸球面,必须自行设计加工小 F 数或者大口径的标准球面透镜^[2-3]。

另一方面,待测球面被成像到探测器上,也即待测球面与探测器关于干涉仪中包含标准球面透镜在内的光学系统共轭,该光路结构称之为干涉仪中的成像光路。依据干涉图计算获取的面形误差是待测球面进一步加工的依据。因此,设计标准球面透镜时需综合考虑其在照明光路和干涉成像光路中的几何特性。

本文针对标准球面透镜在干涉仪照明光路和成像光路中的作用,讨论标准球面透镜的几何特征与设计方法,并重点围绕小 F 数的标准球面透镜及其干涉腔结构,结合国内外以及本课题组近几年的研究工作,分析标准球面透镜在使用过程中的误差源和误差抑制方法,为高精度的球面波检测和计量提供理论依据和实践操作指导。

1 标准球面透镜的几何特性与设计方法

1.1 标准球面透镜的作用光路

标准球面透镜作为斐索型干涉测量中的核心器件,其在干涉仪照明光路和成像光路中都起着至关重要的作用,标准球面透镜的照明光路结构如图 1(a)所示。它被安装在干涉仪主机的端口处,将出射的准直波前转化为会聚球面波,用于检

测凸球面或凹球面的面形,以及有限共轭的透射系统波像差。因此,与一般的透镜光学系统一样,光学设计时主要是优化会聚球面波的波像差,并且控制最后一个面的曲率半径 R 值与标准球面透镜的顶焦距一致。为了提升对凸球面的检测范围,优化设计时尽量控制提升 R 值。

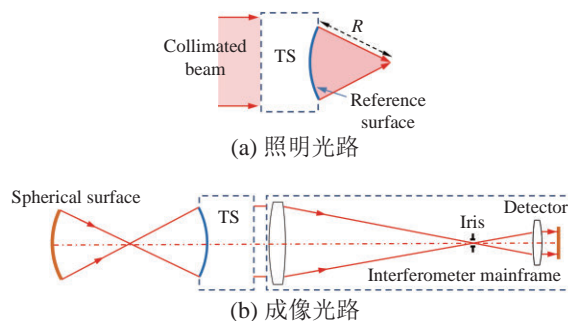


图 1 标准球面透镜的光路

Fig. 1 Optical path of standard spherical lens

球面波干涉条纹的存在有 2 个原因:一是待测球面的面形误差;二是干涉腔内待测球面的调整误差。调整误差包括待测球面的倾斜和离焦,对应的分别是直条纹载频和圆条纹载频,具体将在 2.1 节展开讨论。干涉条纹是从参考球面返回的光线与从待测球面返回的光线在标准球面内的光路不一致产生的,测试光束和参考光束光路不一致引起的误差称之为回程误差。因此标准球面透镜可能会引入附加光程差,从而影响干涉测量的准确度。在安装标准球面透镜时,除了要采用对点模式调整其俯仰倾斜姿态以外,还要以猫眼位置的干涉图作为判据,使干涉仪主机出射的准直波前正入射标准球面透镜。这一点往往被操作者所忽视,值得注意。参考球面返回的光束沿轴上视场透射经过标准球面透镜,如果干涉条纹存在载频,则待测波面与参考波面返回的行程不一致,存在回程误差,从而影响测量结果。

图 1(b)为标准球面透镜在成像光路中的作用,其焦点位置与干涉成像光路中的光阑共轭。理想情况下,对于待测球面上某一视场点,干涉仪中仅一根光线即主光线入射到达此位置。因为待测球面存在面形误差及其调整误差,使反射光线偏离入射光线,则各位置返回干涉仪的光束的孔径高不尽相同,如果偏离量太大,偏出光阑,则此位置的干涉条纹缺失。因此,在成像光路中标准球面透镜相对孔径较小。

1.2 球面干涉成像的几何关系

在光学元件加工过程中,干涉仪测量获得的面形误差分布用于指导修磨,通过迭代测量和修磨可以获得满意的元件面形。因此,如果干涉测量数据与被测件面形之间的映射关系有偏差,即成像畸变将导致加工出现错误。另一方面,干涉仪通过移相干涉图中条纹反馈的光强变化,可计算获得面形分布。如果干涉成像系统有畸变,将使得干涉腔中的直条纹在探测器上显示为弯曲的条纹,继而在计算获取的面形误差中引入附加相位。因此,上述两方面的问题要求标准球面透镜、准直镜与成像镜构成的干涉成像光路畸变较小,其畸变控制量与允许的载频条纹数目和干涉仪的测量准确度有关。

干涉仪检测平面元件时,平面元件按照等高增量被成像到探测器上,几何成像关系满足 $f \cdot \tan\theta$ 畸变模型。检测球面元件时的成像关系如图2所示。干涉仪获取的面形误差分布是相对于理想球面的偏差,也即待测球面在法向的矢高误差。因此,理想情况是将球面元件按照等角度增量成像到探测器上,这样面形误差分布与待测球面在弧长方向上线性对应。按照图2中几何关系,等角度增量满足 $R \cdot \theta$ 成像关系模型。然而,如果按照 $R \cdot \sin\theta$ 成像关系设计标准球面透镜,则在性载频和圆载频时标准球面透镜将引入较大的附加光程差。因为理想的 $R \cdot \theta$ 成像关系难以实现,考虑与平面元件成像类似的等高度划分成像关系,高度为图2中标注的弦长 H 。在球面干涉腔内,等弦长增量成像满足 $R \cdot \sin\theta$ 成像关系模型。按照 $R \cdot \sin\theta$ 成像关系设计标准球面透镜,则轴上和轴外的波像差均可得到较好的优化控制,标准球面透镜将不会在线性载频和圆载频时引入附加光程差。

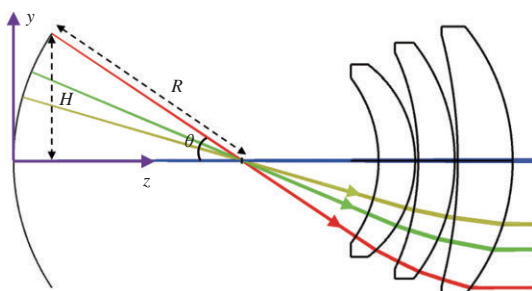


图2 球面干涉成像的几何关系模型

Fig.2 Geometric relation model of spherical interference imaging

用Zygo公司4英寸 $F/0.75$ 标准球面透镜验证球面成像的几何关系^[4],如图3所示。在透明薄膜上打印如图3(a)所示的正方形网格,将其插入到标准镜之前的准直光路中,如图3(b)所示。透射标准球面透镜后的网格图案与标准球面透镜的几何关系作用产生变形,如图3(c)所示。 $R \cdot \theta$ 和 $R \cdot \sin\theta$ 成像关系模型的理论网格变形分别如图3(d)和图3(e)所示。将实际情况与理论模型做比对的结果如图3(f)所示,可以看出该 $F/0.75$ 标准球面透镜的网格变形与 $R \cdot \sin\theta$ 成像关系最为吻合。

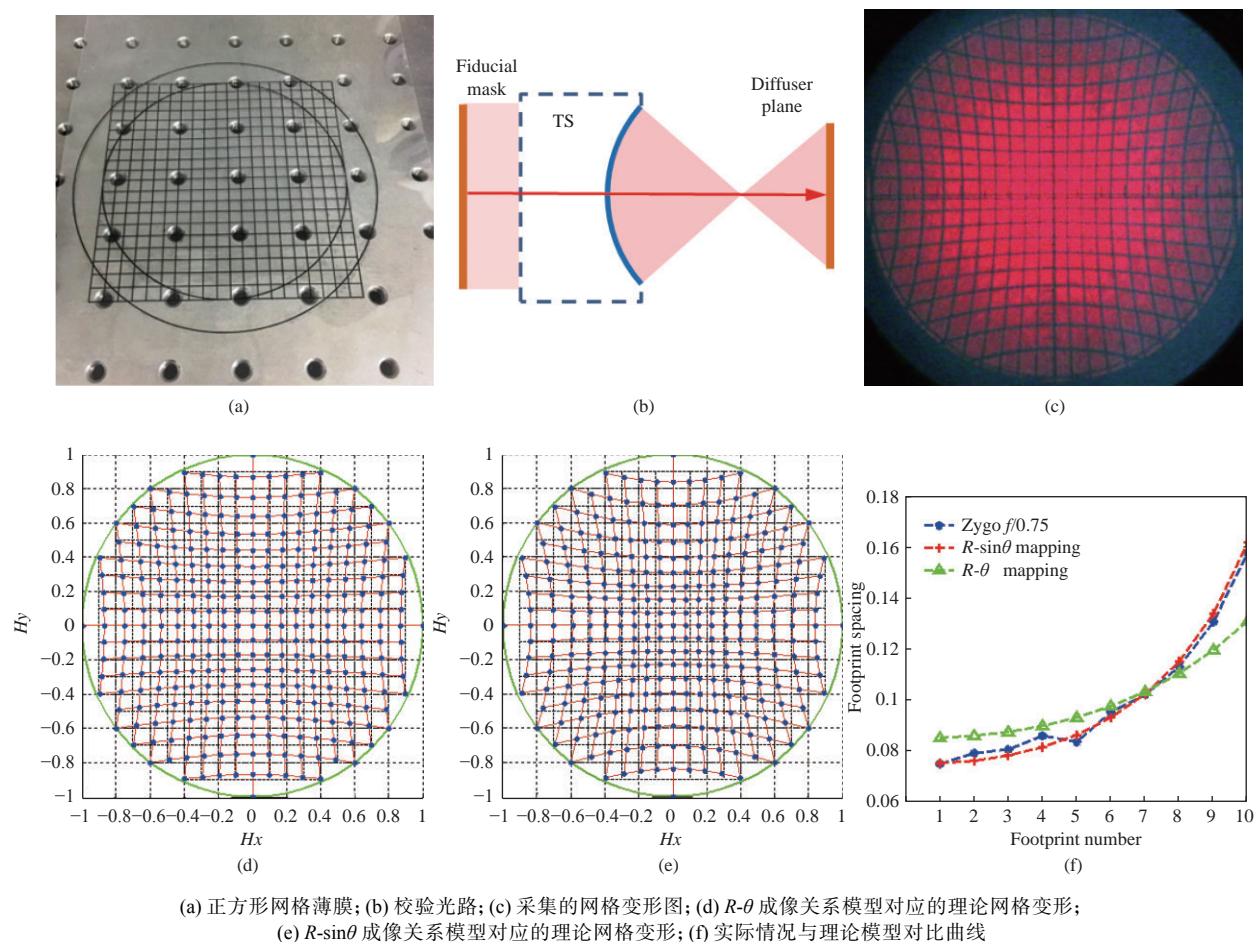
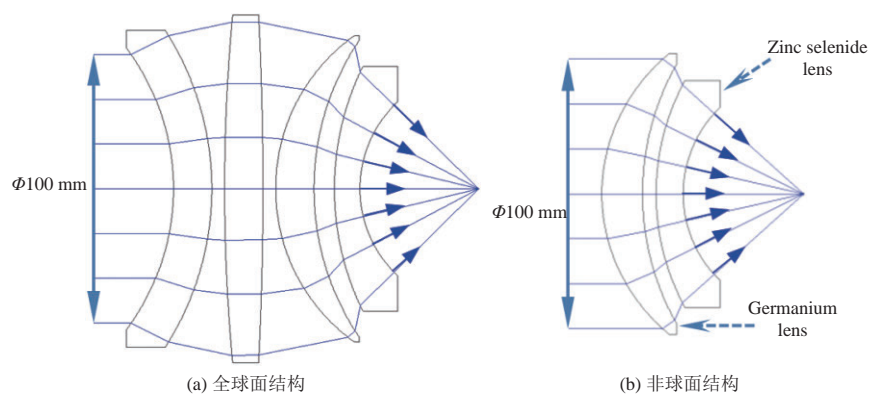
在使用大 F 数的标准球面透镜时, $R \cdot \theta$ 和 $R \cdot \sin\theta$ 成像关系比较相近。但在使用小 F 数的标准球面透镜时,也即检测快焦比球面时, $R \cdot \theta$ 和 $R \cdot \sin\theta$ 成像关系偏差较大。此时,正确理解球面成像的几何关系十分重要,修磨球面面形时需对干涉测量数据与被测球面按照等弦长增量作线性映射。

1.3 非球面设计的考虑

依据上述像质要求和成像关系,可以完成对标准球面透镜的设计。可见光干涉仪中配备的小 F 数标准球面透镜一般由3~6片镜头组成。透镜片数较多时对移相器的负载要求增加,并且使得标准球面透镜的 R 值较小,减小了凸面测量能力。因此,在小 F 数标准球面透镜设计时可以考虑采用非球面减小透镜片数。非球面的使用需要考虑如下几个因素:1)非球面的加工能力,不能在透镜表面产生较多的中高频误差^[5];2)非球面的检测能力,如果采用补偿器检测将使得标准球面透镜成本增加;3)不建议使用非球面的高阶项,以牺牲波面斜率的代价提升波像差PV值。

本课题组在设计一款工作于中波红外 $4.41\mu\text{m}$ 和长波红外 $10.6\mu\text{m}$ 的双波长,口径 100mm 的 $F/0.75$ 标准球面透镜时,采用了非球面设计方案^[6]。如图4所示,若采用全球面结构,需要4片透镜,而采用非球面结构,仅需2片透镜。2片式非球面结构中,第1片为锗材料,第2片为硒化锌,采用单点金刚石车削加工非球面,采用QED SSI拼接干涉仪进行面形测量。为了有效控制非球面偏差,采用Q非球面表达式。与传统偶次非球面相比,可以通过Q多项式系数的平方和计算非球面斜率,从而控制非球面偏差^[7]。

2片式非球面标准球面透镜结构中,最后一个面作为参考球面,所以一共有3个面可以被用作非球面。将锗透镜的前表面设置为Q非球面,为了

图3 利用 Zygo $F/0.75$ 标准球面透镜验证球面成像的几何关系Fig. 3 Geometric relations of spherical imaging verified by Zygo $F/0.75$ TS图4 $F/0.75$ 红外双波长标准球面透镜Fig. 4 Dual wavelength infrared $F/0.75$ TS

满足 $F/0.75$ 双波长标准球面透镜的设计要求, 此非球面与最佳拟合球面的偏差为 $126.9\ \mu\text{m}$, 斜率均方根值为 7.36 倍 Nyquist 采样频率 (相邻像素的非球面偏差为 $\lambda/4$, $\lambda=632.8\ \text{nm}$)。上述非球面偏差超过了拼接干涉仪最大 $120\ \mu\text{m}$ 非球面偏差的检测能力。因此, 考虑分裂单个非球面, 将非球面度分摊到其他球面上, 增加硒化锌透镜的前表面为 Q 非

球面。通过对 Q 非球面项系数的优化控制, 2 片非球面方案中, 非球面偏差分别为 $85.5\ \mu\text{m}$ 和 $77.1\ \mu\text{m}$, 斜率均方根值分别为 4.50 倍和 4.55 倍 Nyquist 采样频率。如果增加锗透镜的后表面为 Q 非球面, 可以继续分摊非球面度, 3 片非球面方案中, 非球面偏差分别为 $47.5\ \mu\text{m}$ 、 $46.3\ \mu\text{m}$ 和 $50.6\ \mu\text{m}$, 斜率均方根值分别为 2.47 倍、2.50 倍和 2.48 倍 Nyquist 采

样频率。综合非球面偏差的 PV 值和材料的折射率定量表征非球面度 Asphericity, 用下式表示:

$$\text{Asphericity} = PV_{\text{departure}} \times (n - 1) \quad (1)$$

式中: $PV_{\text{departure}}$ 为非球面偏差; n 为透镜材料的折射率。根据公式(1)计算可知, 单片非球面的非球面度、2 片非球面的总非球面度和 3 片非球面的总非球面度三者基本相同。因此, 在上述 $F/0.75$ 双波长标准球面透镜中采用非球面, 为了满足设计指标要求, 系统的总非球面度是固定的, 采用 Q 非球面可以将非球面度分摊到多个非球面上, 从而减小非球面的检测难度。如果采用偶次非球面, 由于 2 片式非球面结构中各个非球面为相邻面, 容易出现优化不收敛的情况, 即各个非球面的非球面度都很大, 但作用相互抵消, 优化效果不佳。另一方面, 在 Q 非球面标准球面透镜中, 因为总非球面度基本不变, 所以从单片非球面演变为 2 片、3 片非球面, 尽管非球面片数增加, 但整个系统对装调误差的敏感性仍保持不变。

综上所述, 我们应用 Q 非球面成功实现了非球面分裂, 采用 2 片 Q 非球面, 设计了 2 片式红外双波长 $F/0.75$ 双波长标准球面透镜。与传统的 4 片式全球面结构相比, 2 片式非球面结构尽管采用了 2 片非球面, 但由于均可直接采用拼接干涉仪检测, 且红外材料使用量减小, 整体的成本并未显著提高。此外, 透镜片数的减少提升了标准球面透镜的透过率, 降低了移相器的负载要求。因此, 依据当前非球面加工和检测的能力, 合理使用非

球面方案, 在可见光标准球面透镜设计时也具有应用价值和前景。

2 球面干涉腔中的系列问题与误差分析

2.1 待测球面调整误差

理想的球面干涉腔是参考球面和被测球面完全共焦, 也即干涉图为零条纹状态, 没有调整误差。但此情况是难以实现的, 因为待测球面有面形误差, 引入操作人员对零条纹的判断产生干扰。另外, 由于采用移相干涉术解调相位, 移相过程中零条纹状态必然被破坏。前文所述, 存在调整误差时, 参考球面返回的光束沿轴上视场透射经过标准球面透镜, 待测球面返回的光束沿轴外视场透射经过标准球面透镜, 参考光束和测试光束在标准球面透镜内产生回程误差。斐索型干涉仪作为一种准共光路型干涉测试仪, 其非共光路部分为干涉腔。因此, 由调整误差引入干涉腔内的附加光程差是另外一种形式的回程误差。

存在调整误差的球面干涉腔如图 5 所示。图中 $R-s$ 表示标准球面透镜的参考面, $T-s$ 表示被测球面。其中倾斜和错位调整误差将会在干涉图中引入直条纹载频, 而离焦调整误差将会在干涉图中引入圆条纹载频。直条纹和圆条纹载频分别表示波面存在倾斜和离焦这两种调整误差, 去除调整误差的常规方式是通过公式(2)对波面进行拟合^[8]:

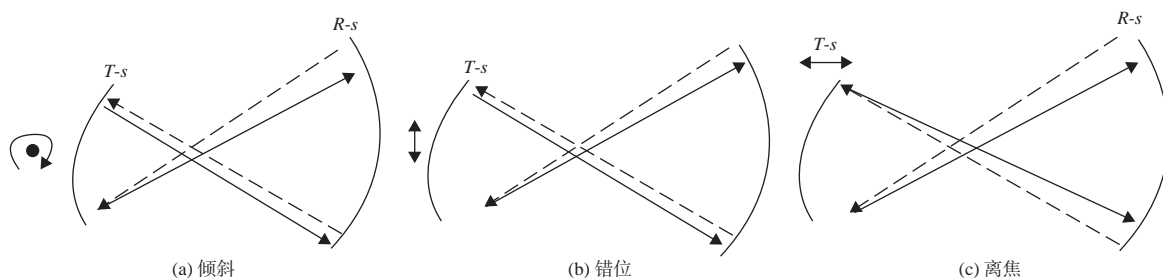


图 5 球面干涉腔中的调整误差

Fig. 5 Adjustment error in spherical interference cavity

$$W = a + bx + cy + d(x^2 + y^2) \quad (2)$$

式中: a 为常数项 (piston) 系数; b 和 c 为倾斜项 (tilt) 系数; d 为离焦项 (power) 系数。商用干涉仪也是根据(2)式去除干涉腔中调整误差对测试波面结果的影响。

上述方法是基于对干涉腔中调整误差的低阶

近似, 存在残余像差。在检测慢焦比球面时, 残余像差相对于干涉检测时的精度要求可以忽略, 但对快焦比球面元件检测将产生较大的影响^[9-10]。研究表明, 倾斜和错位调整误差引入的残余像差主要为彗差, 但量级较小可以忽略。离焦调整误差引入的残余像差为球差, 球面波离焦模型如图 6 所

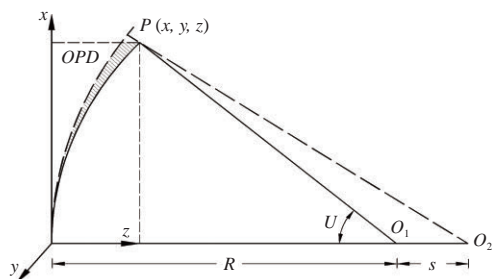


图 6 球面波离焦模型

Fig. 6 Spherical wave defocusing model

示。出瞳上任意一点 $P(x, y, z)$, 参考点 O_2 距离球面波焦点 O_1 有一轴向偏移量 s , 而参考点处 O_2 的波像差可以由 O_2 与 P 的距离, 以及 O_1 与 P 的距离来确定。两者之间的光程差表示为

$$OPD = O_2P - O_1P = \sqrt{x^2 + y^2 + (R - z + s)^2} - R = R \left(\sqrt{1 + \frac{2s}{R^2}(R - z) + \frac{s^2}{R^2}} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: s 相对于 R 较小, s^2/R^2 可以忽略。所以上式可以简化, 并依据考察点的孔径角 U 与全口径球面波 NA 的关系 $\sin U = \rho NA$, 展开可得:

$$OPD \approx s \frac{R - z}{R} = s \cos U = s \sqrt{1 - \rho^2 NA^2} = s(1 - \rho^2 NA^2/2 - \rho^4 NA^4/8 - \rho^6 NA^6/16 - 5\rho^8 NA^8/128 - \dots) \quad (4)$$

由离焦调整误差引入的干涉波面误差 OPD 主要由离焦量 s 和球面波 NA 决定, 误差形式为球面波, 包含离焦项和球差项。干涉波面误差中各阶球差项系数与离焦项系数的比值和 NA 相关。波面调整误差常规表达式(2)中只有离焦项, 未包含球差项。实际干涉测量时, 选择圆载频条纹 1 条, 即对应的干涉波面误差为 0.5λ , 表 1 给出 3 种 NA 情况下的干涉波面误差。如果按照(2)式只拟合去除离焦项, 会残留离焦调整误差引入的球差项。

表 1 离焦引入 0.5λ 时 PV 干涉波面误差中的像差成分Table 1 Aberration components in interference wave surface error with PV value of 0.5λ introduced by defocusing

NA	焦比 D/R	离焦成分/PV	球差成分/PV
0.3	1/1.67	0.487 8λ	0.012 2λ PV
0.5	1/1	0.466 6λ	0.033 4λ PV
0.7	1/0.71	0.430 2λ	0.069 6λ

2.2 移相空间非均匀性误差

斐索型移相干涉仪在采集时序移相干涉图时, 移相机机构驱动标准球面透镜作 $\pi/2$ 移相量的微位移。球面干涉腔内的移相原理如图 7 所示, 轴上点的移相量和轴外点的移相量不一致, 称之为球面空间位置上的移相非均匀性^[11-12]。

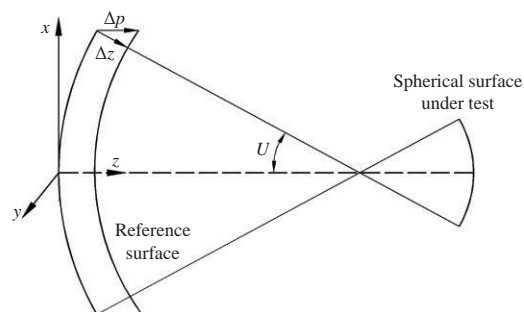


图 7 球面干涉腔中的移相空间非均匀性模型

Fig. 7 Phase shift space nonuniformity model in spherical interference cavity

根据图 7 中的几何关系, 轴上点的移相量 Δp 与轴外点的移相量 Δz 之间的关系^[12] 为

$$\Delta z = \Delta p \cos U \quad (5)$$

式中省略了 Δz 和孔径角 U 的坐标变量 (x, y) 。因此, 边缘点的移相量小于轴上点的移相量, 两者相差值是参考球面数值孔径 NA 的函数。(5)式中 Δp 和 Δz 之间的关系与(4)式中 OPD 与 s 的关系类似。在轴上点移相量为 $\pi/2$ 的情况下, 轴外点的移相量随着孔径高度的增加而递减, 当 NA 为 0.9 时, 边缘点的移相偏差则高达 55%。

球面干涉腔的几何特征使移相空间非均匀, 导致了整个空间中只有一个点的移相准确。移相空间非均匀可看成一种特殊的移相线性误差, 这种移相线性误差随球面孔径高度变化, 轴上点的移相量为 $\pi/2$, 轴外点的移相量取决于该点对应的孔径角。用下式中的 ε 表示移相误差:

$$\varepsilon = \pi/2(1 - \cos U) \quad (6)$$

将上述误差代入到 N 幅(N 一般取 5/7/9/11 等)移相算法中, 相位复原误差 $\Delta\phi_N$ 可以近似为

$$\Delta\phi_N = q_N \sin 2(\phi + m\varepsilon) + m\varepsilon \quad (7)$$

式中: $N=2m+1$; ϕ 为待复原相位; q_N 为正弦项的系数, 大小与 N 相关。 $q_N \sin 2(\phi + m\varepsilon)$ 项可以看作待测相位 2 倍周期的波纹误差, 这与 PZT 引入的移相线性误差或非线性误差的影响类似, 可以通过选择合适的移相算法抑制其影响。另一项 $m\varepsilon$ 的形式与离焦调整误差引入的干涉波面误差 OPD 形

式相同,其大小取决于移相幅数 N (与 m 相关) 和移相空间非均匀性造成的移相误差 (与 ε 相关)。

结合(6)式和(7)式,与(4)式做比较可知,离焦调整误差和干涉腔中的移相空间非均匀都在复原相位中引入了离焦项和球差项,误差大小与球面波 NA 相关。在测量获得的面形分布中,离焦项全部为调整误差引入,但球差项由面形的本征误差和离焦调整误差引入的干涉波面误差两部分组成。尽管干涉波面误差中各阶球差项系数与离焦项系数的比值与 NA 相关,但 NA 难以精确获取。

我们提出一种不依赖 NA 的基于 $N+4$ 幅移相干涉图序列的波面差分算法^[12]。通过一次移相干涉测试采集 $N+4$ 幅移相干涉图序列,然后将采集得到的干涉图分成两组 N 幅移相干涉图序列,两组之间移相量间隔为 4 幅。分别对第 1 组和第 2 组移相干涉图序列用 N 幅移相算法求解得到波面值 W_a 和 W_b 。 W_a 和 W_b 波面中包含不同的离焦量,2 个波面相减得到差分波面 ΔW 。 ΔW 全部由离焦调整误差引入,拟合 ΔW 可以获得各阶球差项系数与离焦项系数的比值。然后对 W_a 或 W_b 按照(2)式拟合获得离焦项系数,根据比值可以反演对应的各阶球差项系数,进而实现离焦和球差的共同消除。上述波面差分算法主要在小 F 数的球面干涉腔中使用,同步完成了离焦调整误差和移相空间非均匀性误差的消除。

2.3 近焦点位置处的回程误差

前文所述,回程误差指的是从被测球面返回的光束与参考光束走向不一致,主要分为干涉腔内的回程误差和经过标准球面透镜的参考面后在后续的光学系统中的回程误差。回程误差由待测件的调整误差引入,非零位干涉直接检测非球面时也会引入回程误差。图 8 给出了球面干涉腔内另外一种形式的回程误差,即由标准球面透镜的透射波像差引入的回程误差。图 8 中,待测球面和参考球面均为理想面形,调整待测球面球心与标准球面透镜的近轴焦点重合。由于标准球面透镜存在波像差,全口径的光束不能会聚到同一点,图中光线 a 为近轴光线,因此该光线垂直入射待测球面,返回光线 a' 与入射光线 a 完全重合;但入射光线 b 不再垂直于待测球面,返回光线 b' 偏离入射光线 b ,在干涉腔内和后续的光学元件中均引入回程误差;如果标准球面透镜的像质较差,对于边缘孔径的入射光线 c ,其返回光线 c' 则很有可能会偏出标准球面透镜口径范围,导致面形信息丢失。

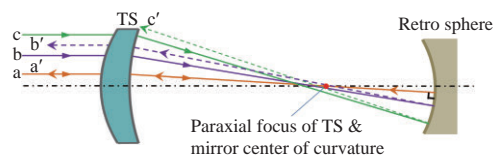
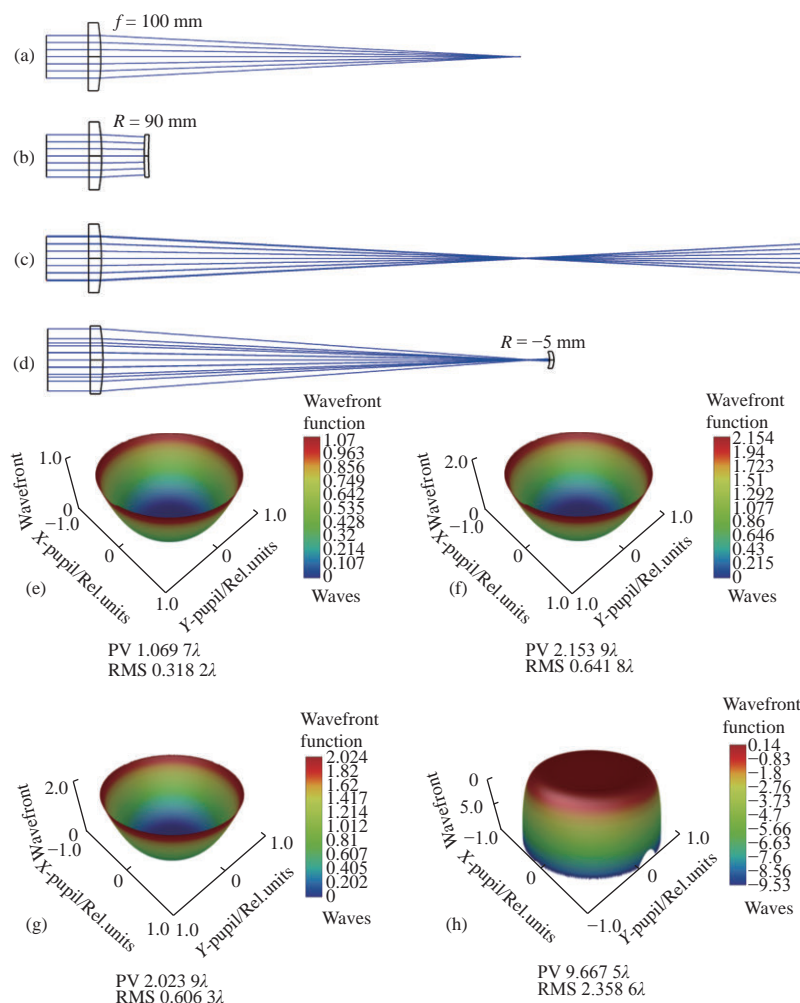


图 8 球面干涉腔的回程误差

Fig. 8 Retrace error in spherical interference cavity

为了进一步分析标准球面透镜的透射波像差对回程误差的影响,简化球面干涉腔模型,由单透镜类比标准球面透镜,分析其透射波像差引入的干涉测量误差,如图 9 所示。图 9(a) 中选择最简单的平凸透镜结构,透镜玻璃材料为 BK7,厚度 3 mm,后表面曲率半径 -51.510 mm,焦距 100 mm。入射光束口径 10 mm 时,透射波像差主要为低阶球差,PV 值约 1λ ,如图 9(e) 所示。与图 8 中建立干涉腔模型类似,引入理想面形待测球面,并使待测球面球心与平凸透镜的近轴焦点重合。此干涉光路用于测量平凸透镜波像差,因两次透射经过平凸透镜,理想情况下返回的波前应为 2 倍的平凸透镜波像差,入射光束口径 10 mm 时,透射波像差主要为低阶球差,PV 值约 1λ ,如图 9(e) 所示。在图 9(b)、9(c) 和 9(d) 中采用曲率半径值分别为 90 mm 的凸面反射镜、-100 mm 的凹面反射镜、-5 mm 的凹面反射镜,经球面镜返回后,两次透射经过平凸透镜的波前分别如图 9(f)、9(g) 和 9(h) 所示。图 9(f) 和 9(g) 中,返回的波前分布形式与图 9(e) 相同,PV 值和 RMS 值约为单次透射时的 2 倍。但图 9(h) 中,返回的波前分布形式与图 9(e) 完全不同,且 PV 值和 RMS 值较大。从图 9(d) 可看出,由曲率半径值为 -5 mm 的凹面反射镜返回的光线追迹图中返回光束被展宽。

测量同一单透镜,采用没有面形误差的球面镜返回波前,返回波前理应为单次透射波像差的 2 倍。然而,球面镜的曲率半径不同,测量结果也不同,甚至出现了错误的测量结果,也即不同的球面镜引入的回程误差不一样。分析曲率半径值为 -5 mm 的凹面反射镜引入较大回程误差的原因,回程误差可以体现在经球面镜返回的光束传播到单透镜后表面上的足迹分布。图 10(a) 和 10(b) 中分别给出了图 9(c) 和 9(g) 光路中返回的足迹分布,很明显,曲率半径值为 -5 mm 的凹面反射镜返回单透镜后表面足迹分布变形严重且更弥散。按照成像关系作进一步分析,单透镜后表面的足迹分布可以看作是单透镜后某一位置处光束截面经过球面镜成像以后的效果。根据这种情况



(a) 单透镜会聚光路; (b) $R=90 \text{ mm}$ 凸球面返回光路; (c) $R=-100 \text{ mm}$ 凹球面返回光路; (d) $R=-5 \text{ mm}$ 凹球面返回光路; (e) 单透镜单通波像差; (f) $R=90 \text{ mm}$ 凸球面返回单透镜双通波像差; (g) $R=-100 \text{ mm}$ 凹球面返回单透镜双通波像差; (h) $R=-5 \text{ mm}$ 凹球面返回单透镜双通波像差

图9 不同曲率半径球面镜回程误差比对

Fig. 9 Retrace error comparisons of spherical mirrors with different radii of curvature

做反向计算,在图 9(c)中,单透镜后表面与其焦点往后 66.667 mm 位置处共轭,单次透射经过单透镜到达该点位置的光线足迹如图 10(e)所示。在图 9(d)中,单透镜后表面与其焦点往后 2.561 mm 位置处共轭,单次透射经过单透镜到达该点位置的光线足迹如图 10(d)所示。图 10(a)和图 10(d)的足迹分布类似,图 10(b)和图 10(e)的足迹分布类似,佐证了 2 个位置之间关于球面镜的共轭关系。图 10(c)所示为单透镜焦点位置的光线足迹图,受透射波像差影响,越接近焦点位置,光束的弥散现象越严重。所以,当用曲率半径值为 -5 mm 的凹球面返回时,相当于单透镜焦点往后 2.561 mm 位置处的弥散光束被投射返回至单透镜的后表面,导致较大的回程误差引入。

由单透镜模型转化到标准球面透镜,在接近焦点位置,标准球面透镜的透射波像差将引入较大

的回程误差,且越靠近焦点,误差越大。对接近焦点位置作量化处理,即待测球面的曲率半径与标准球面透镜参考面曲率半径的比值,比值越小,标准球面透镜的透射波像差影响越大。因此,在检测较小曲率半径的球面时,应当选择参考球面曲率半径较小的标准球面透镜,即用小口径的球面干涉仪检测小曲率半径的球面更佳。

2.4 波面与斜率

由上面的讨论可知,由标准球面透镜会聚球面波在焦点附近位置的弥散引入了回程误差,且在检测小曲率半径的球面时误差较大。因此,必须优化控制标准球面透镜的透射波像差。

以某 $F/1.5$ 标准球面透镜为研究对象,其透射波像差 PV 值为 0.2309λ ,主要由离焦和低阶球差组成,在子午面和弧矢面上的波像差分布轮廓如图 11 中的初始结构(Initial)对应的曲线。在 $F/1.5$ 标准球

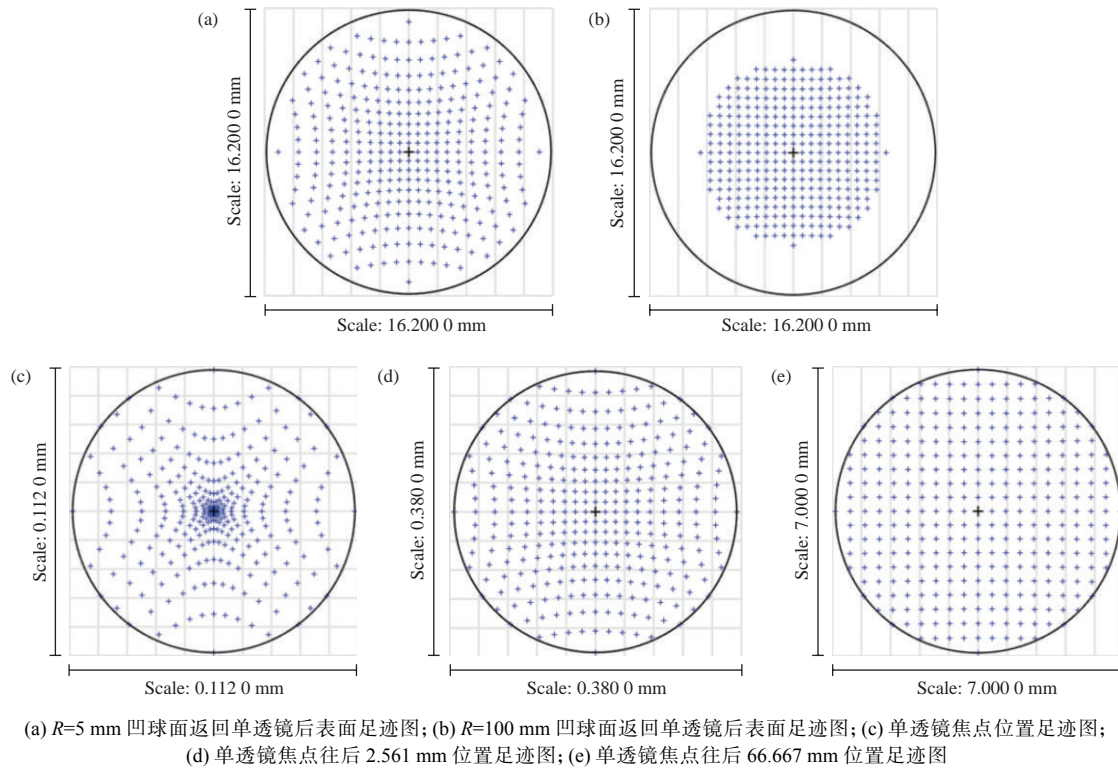
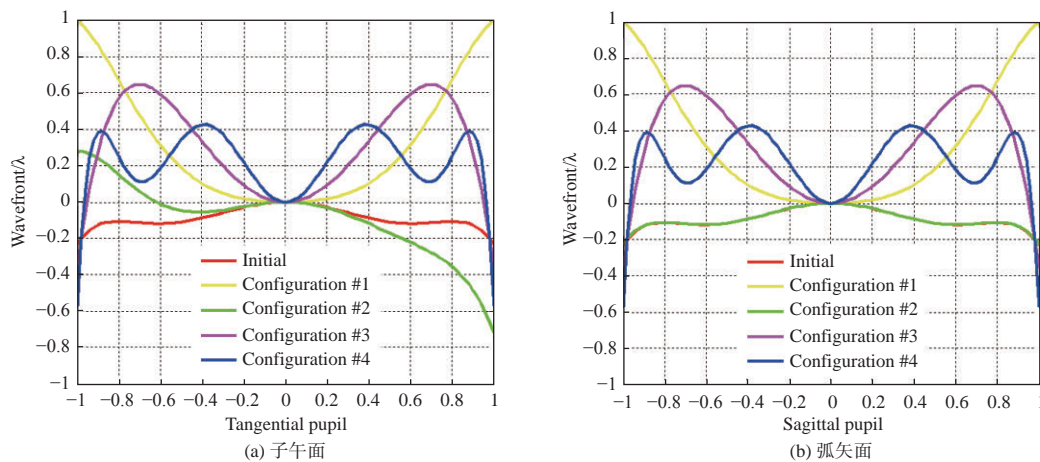


图 10 光束足迹图

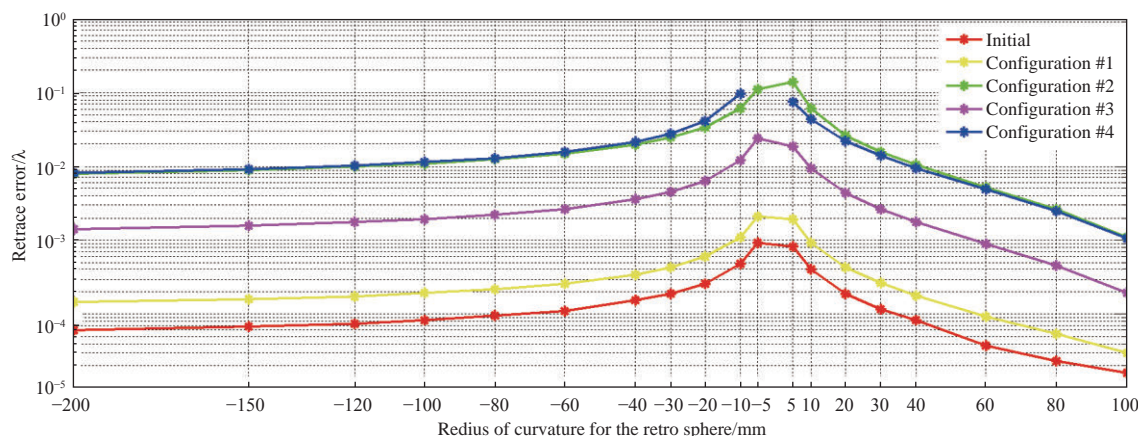
Fig. 10 Footprint graphs of light beam

图 11 $F/1.5$ 标准球面透镜的透射波像差轮廓曲线Fig. 11 Profile curve of transmitted wave aberration for $F/1.5$ TS

面透镜中分别仿真引入装调误差和加工误差。图 11 中结构 1(Configuration #1)引入透镜间隔误差,将进一步增大离焦和低阶球差;结构 2(Configuration #2)引入透镜偏心,将主要引入彗差;结构 3(Configuration #3)在面形中引入五阶球差;结构 4(Configuration #4)在面形中引入七阶球差。图 11 所示 4 种误差结构中,控制引入的误差恰好使得标准球面透镜透射波像差的 PV 值为 1λ ,它们各自在子午面和弧矢面上的波像差分布轮廓见图 11(a)和

11(b),仅结构 2 引入的彗差为非旋转对称像差。

参照图 8 构建干涉腔结构分析回程误差,采用不同曲率半径的理想球面反射镜返回波面,再次透射经过标准球面透镜的返回波像差与经过参考球面返回的波像差相减作为干涉波差,取干涉波差的 $1/2$ 作为回程误差。该 $F/1.5$ 标准球面透镜的初始结构和 4 个误差结构在检测不同曲率半径的理想球面时引入的回程误差 PV 值分布曲线如图 12 所示。尽管 4 个误差结构对应的透射

图12 $F/1.5$ 标准球面透镜的回程误差 PV 值随待测球面曲率半径变化曲线Fig. 12 PV values curves for retrace error of $F/1.5$ TS varying with radius of curvature of spherical surface under test

波像差均为 PV 1λ , 但结构 1 的回程误差最小, 即便是检测曲率半径为 -5 mm 的凹球面, 回程误差仅为 PV 0.002λ , 完全满足斐索型干涉仪测量球面时的测量准确度要求。结构 2 的回程较大, 在检测曲率半径为 5 mm 的凸球面时, 回程误差达到 PV 0.1278λ 。结构 3 和结构 4 中, 随着更高阶球差的引入, 回程误差显著增加, 甚至在结构 4 中, 检测曲率半径为 -5 mm 的凹球面时, 因返回光束已经偏离了标准球面有效口径, 图 12 中没有做回程误差数值标注。

由图 12 可看出, 尽管 4 个误差结构的透射波像差 PV 值相同, 但由图 11 中的波像差轮廓曲线可知, 它们的波面斜率不同。透射波像差中主要为彗差成分和高阶球差成分时, 斜率较大。波面的斜率比波像差的 PV 值影响更大, 因为更大的斜率表示光线的会聚特性更差, 导致光束返回时的偏离量增大, 从而引入较大的回程误差^[13]。

3 结论

从照明和成像角度出发, 论述了标准球面透镜在斐索型干涉仪中的作用, 分析了其几何特性, 探讨了设计标准球面透镜时波像差控制、成像畸变模型、非球面的使用等问题。重点分析了球面干涉腔内的误差和校正方法, 包括待测球面调整误差, 移相空间非均匀性误差, 近焦点位置的检测误差等, 并着重强调了在使用小 F 数标准球面透镜检测快焦比球面, 以及检测小曲率半径球面时需要注意的问题。经过分析可得到如下结论:

1) 标准球面透镜在照明光路和干涉成像光路中起两种作用, 光学设计时应综合轴上和轴外视

场, 有助于减小回程误差;

2) 标准球面透镜的几何特性遵循 $R\text{-sin}\theta$ 球面成像关系模型, 修磨球面面形时需对干涉测量数据与被测球面按照等弦长增量作线性映射;

3) 在标准球面透镜设计时采用非球面可以减小透镜片数, 降低移相器负载要求, 采用 Q 型非球面有助于实现非球面分裂, 将非球面度合理分配至多个表面, 满足加工和检测能力;

4) 在使用小 F 数标准球面透镜进行干涉检测时, 需要关注干涉腔中的调整误差和移相空间非均匀性误差引入的测量误差, 线性载频引入的彗差量级较小可以忽略, 圆载频将引入不可忽略的球差成分, 采用波面差分算法可以有效抑制调整误差和移相空间非均匀误差的影响;

5) 标准球面透镜透射波前的波面斜率比波面 PV 值更重要, 较大的波面斜率会引入明显的回程误差, 尤其是在靠近标准球面透镜的焦点位置检测球面面形时, 测量误差较大, 因此在设计和装校标准球面透镜时应尽量降低高阶像差, 在检测较小曲率半径的球面时, 应当选用小口径的球面干涉仪。

参考文献:

- [1] GAO Zhishan. Analysis of coincidence tolerance between F' and C for the transmission spheres with small F -number[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(7): 793-796.
高志山. 小 F 数标准球波面透镜组的 $F'C$ 重合误差分析[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 793-796.
- [2] XUE Donglin. Manufacture and application of large aperture standard transmission spheres[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 281-286.

- 薛栋林. 大口径标准球面镜组研制与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 281-286.
- [3] PENG W J, HO C F, LIN W L, et al. Design, tolerance analysis, fabrication, and testing of a 6-in. dual-wavelength transmission sphere for a Fizeau interferometers[J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 035105.
- [4] YUAN Q, GAO Z S, DOU Y M, et al. Mapping geometry in Fizeau transmission spheres with a small f-number[J]. Applied Optics, 2018, 57(2): 263-267.
- [5] YUAN Lujun, CHEN Tao. Manufacturing technology for high order aspheric surface[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 335-342.
袁吕军, 陈韬. 高次非球面的工艺技术研究[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 335-342.
- [6] YUAN Lujun, CHEN Tao. Manufacturing technology for high order aspheric surface[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 335-342.
袁吕军, 陈韬. 高次非球面的工艺技术研究[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 335-342.
- [7] YUAN Q, GAO Z S, ZHU D. Applying slope constrained Qbfs aspheres for asphericity redistribution in the design of infrared transmission spheres[J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6857-6864.
- [8] FORBES G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. Optics Express, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [9] WANG D D, YANG Y Y, CHEN C, et al. Misalignment aberrations calibration in testing of high-numerical-aperture spherical surfaces[J]. Applied Optics, 2011, 50(14): 2024-2031.
- [10] DE GROOT P, DRESEL T, TRUAX B. Axial alignment for high-precision interferometric measurements of steeply-curved spheres[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2015(3): 044004.
- [11] DE GROOT P. Phase-shift calibration errors in interferometers with spherical Fizeau cavities[J]. Applied Optics, 1995, 34(16): 2856-2863.
- [12] YUAN Q, GAO Z S, ZHOU Y X, et al. Calibration of phase-step nonuniformity in sub-nanometer-accuracy testing of high-numerical-aperture spherical surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1568-1574.
- [13] SYKORA D M. A model for cavity induced errors with wavefront slope in high accuracy spherical Fizeau metrology[C]. New York: Optical Society of America, 2008.