

波面干涉测量中的可变像差补偿技术

陈善勇, 卢劲丰, 薛 帅

国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073

摘要 以非球面为代表的复杂面形在现代光学系统中的应用越来越广泛,因为它比球面提供了更多的设计自由度,可用更少的元件达到更优的成像质量。然而非球面的多样性也带来了面形测量的难题,传统的零位测试没有灵活适应不同面形的能力。可变像差补偿技术对于提高检测柔性 and 效率具有重要意义。针对回转对称非球面的球差补偿,分析了部分补偿透镜、相位板组合和高次非球面单透镜等可变补偿方案;针对离轴非球面的像差补偿,分析了倾斜球面系统、Risley 棱镜和双回转相位板的可变补偿方案;进而介绍了变形镜和空间光调制器(SLM)作为可编程补偿器用于波面干涉测量的研究进展。最后指出可变像差补偿技术面临的大范围和多模式像差补偿、回程误差补偿以及失调像差解耦三个主要问题。

关键词 测量; 面形测量; 可变像差; 像差补偿; 近零位测试; 非球面

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.040004

Variable Aberration Compensation Techniques in Wavefront Interferometry

Chen Shanyong, Lu Jinfeng, Xue Shuai

*College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Complex surfaces typically including aspheres are more and more widely used in modern optical systems. Better imaging quality can be achieved with fewer elements because aspheres provide more design freedom. However, the variety of aspheres also introduces challenges to surface metrology. Conventional null tests do not have the flexibility to adapt to different shapes. Therefore variable aberration compensation techniques are important to enhance the flexibility and efficiency of testing. The analysis of partial null lens, combination of phase plates and high-order aspheric singlet for variable compensation schemes of spherical aberration of rotationally symmetric aspheres is presented. For aberration compensation of off-axis aspheres, the variable compensation schemes of tilted spherical mirror system, Risley prisms and the counter-rotating phase plates are analyzed. Furthermore, the progress of using deformable mirrors and spatial light modulators (SLM) as programmable compensators in wavefront interferometry is reviewed. Finally, three major problems in variable aberration compensation techniques are introduced, which are compensation of wide range and multiple modes of aberration, retrace error compensation and decoupling of misalignment-induced aberration.

Key words measurement; surface measurement; variable aberration; aberration compensation; near-null test; asphere

OCIS codes 120.6650; 220.4840; 220.1000; 220.1250

1 引言

传统光学系统主要由平面和球面组成,可提供设计优化的变量较少,例如球面光学元件通常只有材料(折射率)、中心厚度和曲率半径等几个设计变量。非球面是形状上与球面有偏离的一类曲面,常见的有抛物面、椭球面、双曲面等二次曲面,也有包含更高阶项的高次非球面。除了球面的几个设计变量,非球面还有二

收稿日期: 2016-11-17; **收到修改稿日期:** 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51375488)、湖南省自然科学基金(2016JJ1003)

作者简介: 陈善勇(1980—),男,博士,研究员,主要从事光学检测与超精密测量方面的研究。

E-mail: mesychen@163.com

次常数、高阶项系数等更多的参数,为光学系统优化提供了更多自由度,因而可以用更少的非球面来达到同样甚至更优的成像质量。非球面已经逐渐取代球面成为决定系统性能的主角,被广泛应用于现代光学系统中。高性能望远镜、空间相机等常用的 Cassegrain 系统、Ritchey-Chrétien(R-C)系统、同轴或离轴三反消像散(TMA)系统中均采用了非球面反射镜^[1];深紫外或极紫外光刻物镜中也采用了多片高次非球面^[2-3];惯性约束聚变系统中则是在终端光学系统中采用非球面透镜对强激光束进行聚焦,以达到聚变点火条件^[4]。

波面干涉测量能够准确获得三维分布的面形误差,是光学面形测量的主要技术手段,常用标准平面或球面镜头产生高精度的平面或球面测试波前。但是当球面波照射到非球面上时,由于非球面上不同环带的曲率半径(或曲率中心)是连续变化的,各反射光线不能同时满足法向入射条件,此时光线之间存在光程差。被测非球面即使没有面形误差,干涉图也不是零条纹,称为非零位测试。干涉条纹形状反映了非球面度大小,非球面度太大时,条纹太密使 CCD 无法解析,超出干涉仪的动态测量范围。如果在干涉仪镜头后放置一个补偿器,将干涉仪发出的标准球面测试波变换为与被测非球面理想匹配,那么仍能保证等光程条件,实现零位测试。补偿器常由两片或三片球面透镜组成,也可以是球面反射镜组合而成^[5],或者是基于衍射原理的计算机生成全息图(CGH)^[6]。无论何种形式,补偿器都是针对被测面进行像差平衡精确设计的,只能适用于特定的面形,造成时间和经济成本的巨大浪费。因此,尽管非球面具有更多更灵活的设计自由度,但正是其面形的多样性与补偿器的专一性形成一对矛盾,传统补偿检验没有灵活适应不同面形的能力。具有补偿能力可调的可变像差补偿技术,能够适应较大参数范围的不同面形,对于提高检测柔性 and 效率、降低成本具有重要意义。

2 球差的部分补偿

球面的等距面还是球面,只是曲率半径不同。因而经干涉仪球面镜头发出的球面测试波在自由空间传播时,能够保持为球面波,可以用来测量不同曲率半径的球面,只要保持球面波中心与被测球面的曲率中心重合即可。而非球面不具有这种对称性,其等距面是不同类型的曲面,例如抛物面的等距面不再是抛物面。因此补偿器变换得到的非球面波只有在特定的传播距离上才与被测非球面匹配,如果被测面形变化了,就很难通过同一个补偿器来产生与之严格匹配的非球面波。回转对称非球面的补偿检验主要平衡的像差是球差。

2.1 部分补偿透镜

早在 1973 年,Faulde 等^[7]就提出了部分补偿透镜的方法,如图 1 所示,因为单纯用全息片补偿时存在线宽极限,补偿能力不足,结合使用单透镜补偿非球面的大部分三阶像差,可以实现大偏离量非球面的零位补偿检验。这里的单透镜起部分补偿作用,但不是用作可变补偿器。

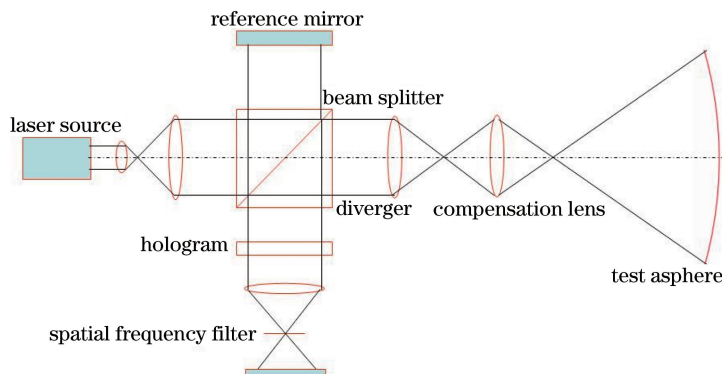


图 1 单透镜部分补偿增大全息片补偿的极限能力^[7]

Fig. 1 Partial compensation of single lens extends the limit of holograms^[7]

为了增加补偿检验的灵活性,可以适当放松补偿器设计的像差平衡要求,即只进行部分像差的补偿,使得剩余像差减小到干涉仪的动态范围之内(干涉条纹可解析)。北京理工大学刘慧兰等^[8]从 CCD 分辨力的要求出发,分析了补偿后剩余波像差的斜率约束,用于指导部分补偿器的设计优化。所采用的补偿器是一片或多片球面透镜的组合,但是补偿能力较为有限。例如针对 $f/1.5$ 的凹非球面(二次常数 $K = -0.966$)设计

的部分补偿器是双胶合透镜,在保持被测非球面二次常数不变而只改变顶点曲率半径的情况下,该补偿器的补偿能力范围为 $92.8\lambda \sim 121.7\lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$,下同)。尽管他们进一步提出以剩余波像差斜率作为优化目标可改进部分补偿器的设计,降低干涉条纹密度^[9],但这种结构的补偿器的补偿能力很难有显著改善。

浙江大学杨甬英研究小组^[10-12]也采用了类似的球面透镜组合形式作为部分补偿器,主要针对平行光入射的情形,将部分补偿器取代干涉仪的标准镜头,组成用于非球面通用化检测的仪器,重点研究了检测系统的误差分析与处理。但是如前所述,这种结构的部分补偿透镜只适用于较窄范围变化的面形,并且剩余像差较大,干涉条纹仍然较密。为此,该研究小组进一步结合环带子孔径拼接方法,通过轴向调整被测面的离焦距离,只对部分补偿后的环带区域进行解析和处理,可增大干涉仪的动态范围^[13-14],当然这同时又增加了子孔径测量与拼接算法等复杂问题。

美国亚利桑那大学的 Greivenkamp 研究小组^[15-16]认为非零位测试应重点考虑动态解析能力、光线渐晕、回程误差补偿等问题,详细讨论了整个非零位测试干涉仪的设计和校准,并针对高陡度凸非球面设计了两片透镜组合的部分补偿器^[17]。此外,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王孝坤等^[18]提出可用单透镜作为部分补偿器,并事先利用标准球面反射镜对其进行标定,但没有给出具体的设计方法和结果。如果采用球面单透镜,则像差补偿能力非常有限,只适用于面形变化范围很窄的非球面检验。

2.2 相位板组合

用相位板组合的形式产生可变的像差,用作非球面检验的可变补偿器,早在 1970 年就由 Hilbert 等^[19]提出,甚至比 Faulde 等^[7]提出部分补偿透镜还要早。如图 2 所示,在球面测试波中靠近被测非球面顶点曲率中心的位置依次放入三片非球面相位板,每片相位板只有一个面是非球面。改变相位板的轴向位置,可以产生不同的 4 阶、6 阶和 8 阶球差。大部分场合只需要两片即可,补偿 4 阶和 6 阶球差。例如采用 100 mm 口径、厚度 10 mm 的 BK7 玻璃,其中一片相位板为 4 阶球差的凸非球面,矢高 0.16 mm;另一片为 6 阶球差的凹非球面,矢高 0.04 mm。这一对相位板用于补偿 500 mm 口径、 $f/2$ 抛物面,剩余像差峰谷值(PV)只有 $\lambda/25$;改变相位板的轴向位置,用于补偿 1270 mm 口径、 $f/2.5$ 的抛物面,剩余像差 PV 也只有 $\lambda/12$ 。如果考虑只需要补偿大部分球差,允许有一部分剩余像差,只要干涉仪能够解析,那么这种非球面相位板组合的形式能够适用的非球面的面形变化范围很大。然而,非球面相位板本身的加工和检测则是一道难以逾越的障碍,而且相位板组合之间的装调误差同样会引入测量误差,这也是该方案提出近半个世纪来并没有得到应用的原因。随着全息光学元件制作工艺的日益成熟,如果采用 CGH 实现非球面相位板,则可望解决上述难题,但同时必须考虑多个 CGH 串联使用带来的干扰级次多、衍射效率低等问题。

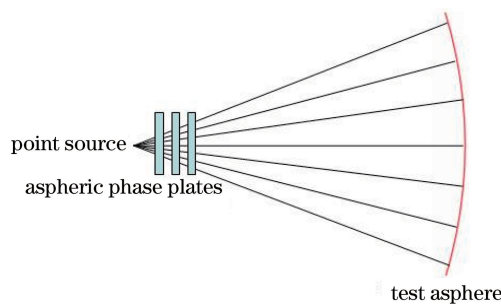


图 2 非球面相位板组合作为可变补偿器^[19]

Fig. 2 Combination of aspheric phase plates used as variable null lens^[19]

Palusinski 等^[20]从像差理论出发分析了一对非球面相位板组合通过调整其相对位置引入的多种像差,最近,Acosta 等^[21-22]又提出通过横向平移两对相位板或轴向平移一对高次非球面相位板的方式产生变化的球差,只不过可调节的范围较小(数十波长),不适用于被测非球面大范围变化的球差补偿。这种相位板因为包含一对非球面,同样存在其自身的加工、检测和装调问题。

2.3 非球面单透镜

综上所述,采用球面透镜组合形式的部分补偿器固然有其容易制造的优点,但是像差补偿范围较有限;在补偿器中采用非球面,必然能够提升像差补偿能力,但为了避免装调问题,宜用单透镜。国防科学技术大

学的研究小组^[23]提出高次非球面透镜结合液晶空间光调制器(SLM)的可变补偿检验方法,有望为非球面干涉测量灵活性差的难题提供有效的解决方案。采用平凹或平凸的高次非球面单透镜作为可变补偿器,调整可变补偿透镜在点光源与被测非球面之间的距离,可获得较大范围的像差补偿能力,灵活适用于不同面形,使得剩余像差减小到 SLM 的调制能力范围内;然后利用 SLM 补偿剩余像差,实现复杂面形的零位测试,如图 3 所示。针对椭球面、抛物面、双曲面及高次非球面(二次常数 K 从 0 变化到 -1.5) 等若干个大范围变化的面形,所设计非球面透镜的补偿能力大于 $100\ \mu\text{m}$,对不同面形均能实现有效补偿,剩余像差 PV 小于 20λ ,干涉仪可解析,从而可利用非零位测量的面形重构方法获得面形误差^[12]。剩余像差也可用 SLM 进一步补偿,达到零位测试条件。表 1 给出了被测非球面参数以及用同一个非球面单透镜(改变其轴向位置)补偿后的剩余像差 PV 和均方根值(RMS),其中 D 为口径, K 为二次常数, R 为顶点曲率半径。与常规的补偿检验类似,该方法要求对点光源、补偿器和被测面之间的轴向距离进行严格监控,可用短相干干涉仪或差动共焦法等测量手段^[24]。

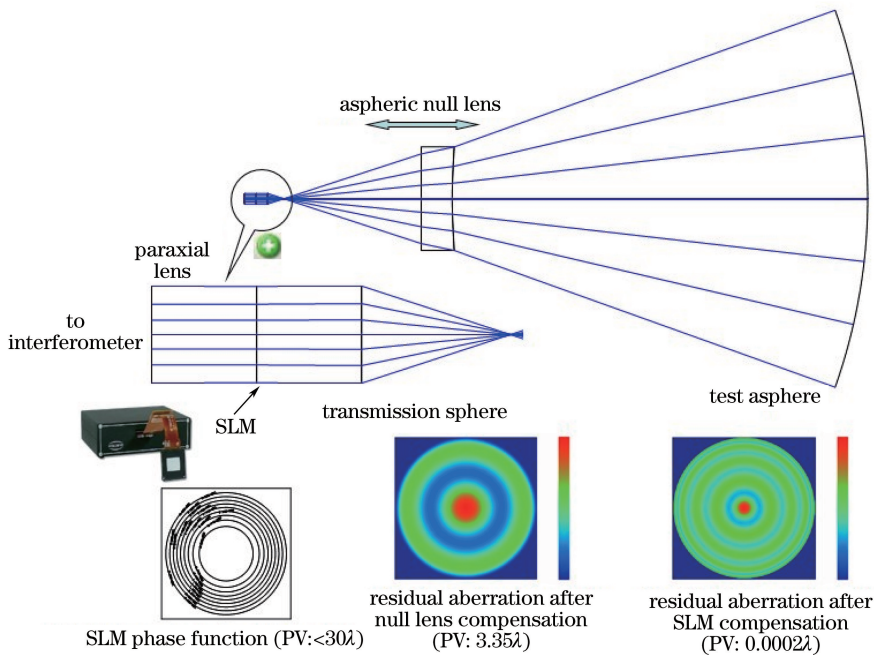


图 3 高次非球面透镜结合 SLM 的可变补偿检验

Fig. 3 Variable null test combining high order aspheric lens and SLM

表 1 各种被测非球面在单透镜补偿后的剩余像差

Table 1 Residual aberrations of various aspheres after single lens null compensation

Measured aspheric parameters	Residual aberration PV / λ	Residual aberration RMS / λ
$D=1200\ \text{mm}, K=-1.5, R=3416\ \text{mm}$	1.4785	0.4568
$D=1200\ \text{mm}, K=-1.0, R=3416\ \text{mm}$	0.0444	0.0058
$D=1200\ \text{mm}, K=-0.5, R=3416\ \text{mm}$	1.1274	0.2181
$D=1200\ \text{mm}, K=-0.1, R=3416\ \text{mm}$	0.2910	0.0551
$D=1200\ \text{mm}, K=0, R=3416\ \text{mm},$ higher order terms: $\alpha_4=1\times 10^{-12}, \alpha_6=1\times 10^{-18}, \alpha_8=1\times 10^{-24},$ $\alpha_{10}=1\times 10^{-30}, \alpha_{12}=1\times 10^{-36}$	17.0832	3.1922
$D=326\ \text{mm}, K=-0.26452, R=478.56\ \text{mm}$	3.3090	0.6320

3 离轴非球面的可变补偿

与回转对称非球面不同,离轴非球面的几何轴线与光轴不重合,可认为是从回转对称非球面(母镜)的偏轴位置取出一个子区域,其光轴是母镜非球面方程所定义的回转对称轴线,几何轴线是几何外形所确定的轴

线。离轴非球面光学系统具有无中心遮拦、视场大等突出优点,在空间相机^[1]、极紫外光刻物镜^[3]等系统中都有重要应用。因为要求严格控制离轴量公差,离轴非球面的检验更难。离轴非球面固然可以看作是回转对称母镜的一部分,因而仍然可用传统球面透镜组形式的补偿器,但是当离轴量较大时并不适合,被测面成像在干涉仪探测器上只占据一小部分有效像素。相比之下,采用CGH可以直接针对离轴非球面进行设计,因为CGH理论上可以产生任意形状测试波前,而不局限于回转对称非球面。此时干涉仪光轴与被测面几何轴线是近似对准的,当然CGH同样存在前述不能适应面形变化的问题,还需要找到可变的离轴像差补偿方法。

3.1 离轴非球面的像差

离轴非球面的像差是非回转对称的,主要由彗差和像散组成,并且彗差和像散的大小随着离轴距离的增大而近似呈线性和平方增长关系^[25]。另有一小部分三叶形像差,通常可假设其完全能够被干涉仪解析。因此离轴非球面的可变补偿器要求能够产生较大范围内变化的彗差和像散,而其余模式的像差可暂不考虑。

离轴非球面的可变像差补偿技术的一个重要应用场合是与子孔径拼接测量方法相结合,实现优势互补,克服子孔径拼接的动态范围较小而常规补偿检验技术又受限于测量口径的缺点,对于大口径凸非球面的检验有突出优势。子孔径拼接方法基于“以小拼大”的思想,将大口径的非球面划分为一系列互有重叠的子孔径,通过依次测量并拼接这些子孔径的面形,获得全口径上的面形误差,具有同时增大垂直测量范围和提高横向分辨率的优点,可以有效解决测量口径受限的问题^[26]。除了中心子孔径外,其余子孔径均相当于被测非球面上的离轴子镜。但是由于没有使用补偿器,非球面子孔径处于非零位测试状态,在边缘附近的离轴子孔径像散越来越严重,当非球面度较大时,为了满足子孔径干涉条纹少到可解析的条件,边缘子孔径可能很小而子孔径数目迅速增加,极大增加了子孔径拼接测量的难度。例如有效口径为360 mm的凸双曲面,非球面度约为 $150.7 \mu\text{m}$ 时,由于子孔径像散随着离轴量增大而近似呈平方关系增长,可能需要超过140个子孔径才能覆盖全口径,如图4所示^[27]。

综上所述,不用补偿器而单纯依靠子孔径拼接方法,其动态范围难以满足高陡度非球面的大像差解析要求;如果引入补偿器,则因为不同离轴位置的子孔径像差变化显著,要想实现各个子孔径的零位测试,就必须

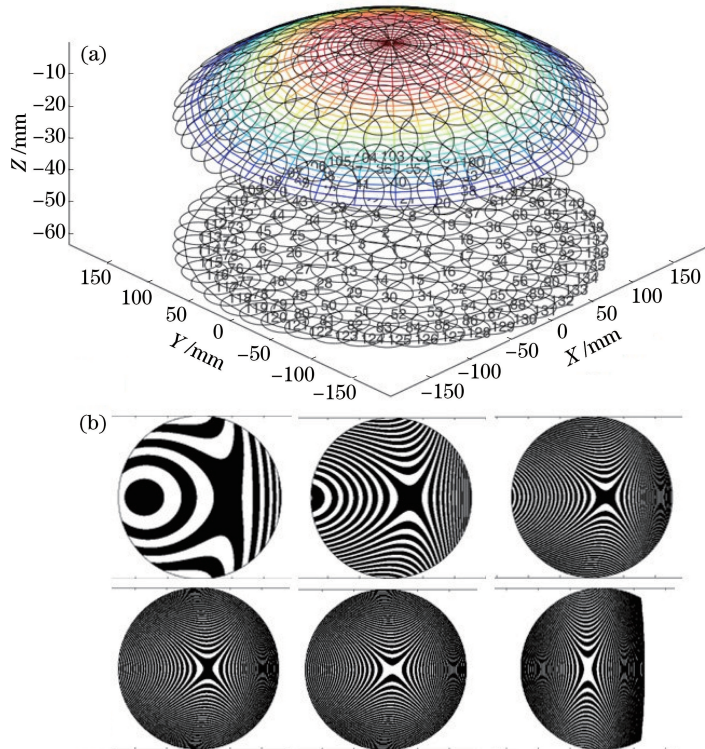


图4 大口径凸非球面的子孔径像差。(a)子孔径划分;(b)不同离轴量的子孔径干涉图

Fig. 4 Subaperture aberrations of a large convex asphere. (a) Subaperture layout; (b) subaperture interferograms with different off-axis distances

使用不同的补偿器,这显然是不切实际的。因此,即使是测量某一个特定的非球面,也要求补偿器具有可变的像差补偿能力。这时同样只要求补偿大部分像差,主要是彗差和像散,使得补偿后每个子孔径处于接近零位测试状态,称之为近零位子孔径拼接,相应的可变补偿器称为近零位补偿器^[25-26]。

3.2 倾斜球面系统

单独产生变化的单一模式的像差(比如像散)并不难,但是离轴非球面的检验要求同时具有可变的彗差和像散补偿能力。2009年美国Zygo公司的Küchel^[28]总结常用的补偿彗差和像散的光路有透镜组、倾斜双球面或三球面设计等几种形式,其中透镜组形式包含前后对称的6片透镜,如图5(a)所示,引入倾斜产生大的像散,而前后组的相对偏心则产生彗差。这种结构过于复杂,严重降低测量不确定度。相比之下,倾斜双球面或三球面的形式较简单,如图5(b)和(c)所示。但是结构不紧凑,两个分离的球面反射镜也存在安装和对准问题;此外,测试光束往返经过两个或三个球面反射镜反射后进入干涉仪,为了提高条纹对比度,球面必须镀高反膜。

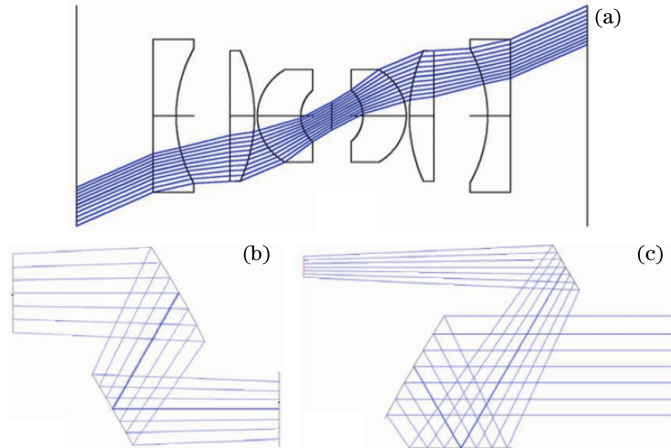


图5 产生可变彗差与像散的光学系统。(a)对称6片透镜组;(b)倾斜双球面;(c)倾斜三球面^[28]

Fig. 5 Optical layouts of generating variable coma and astigmatism. (a) Symmetrical six-lens assembly; (b) tilted two spherical mirrors; (c) tilted three spherical mirrors^[28]

3.3 Risley 棱镜

Risley 棱镜由一对楔形平板组成,常用于光束定向控制。如图6所示^[29],光线通过一对楔形平板,当两个斜面平行时,光线只发生偏移,方向不变;否则光线会发生偏转,偏转角度与楔形角度和平板材料的折射率有关,并且可根据解析式精确计算光束的指向^[30-32]。当这一对楔形平板连续地相向回转时,可控制出射光束的指向连续变化。Li^[33]还通过级数展开推导了Risley棱镜引入的三阶像差。

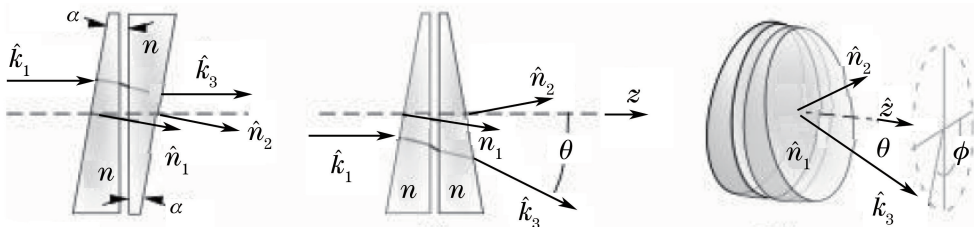


图6 用于光束定向控制的Risley棱镜^[28]

Fig. 6 Risley prisms for beam steering^[28]

美国QED公司2009年初推出的非球面拼接干涉仪(ASI)^[34],就是利用了Risley棱镜作为可变补偿器。如图7所示,当一对楔形平板相向回转时主要引入彗差;调整两个平板相对干涉仪光轴的整体倾斜,主要引入像散。通过这两个自由度,产生大小可调的像差,补偿不同离轴非球面的大部分像差^[35-36]。仿真表明,当楔形平板的楔角取 4° ,倾斜范围为 $\pm 30^\circ$ 时,可产生大约 $\pm 50 \mu\text{m}$ 的彗差和 $\pm 250 \mu\text{m}$ 的像散,与子孔径拼接方法结合,可测非球面度达到 1000λ ^[36]。该方法的缺点是需要两个调整自由度,对相向回转和倾斜调整的精度要求高,对准比较困难;并且由于需要调整补偿器的整体倾斜(可能达到 40°),要求波面干涉仪与被测镜面之间预留足够多的空间,不利于凸非球面等测量空间紧凑的场合。

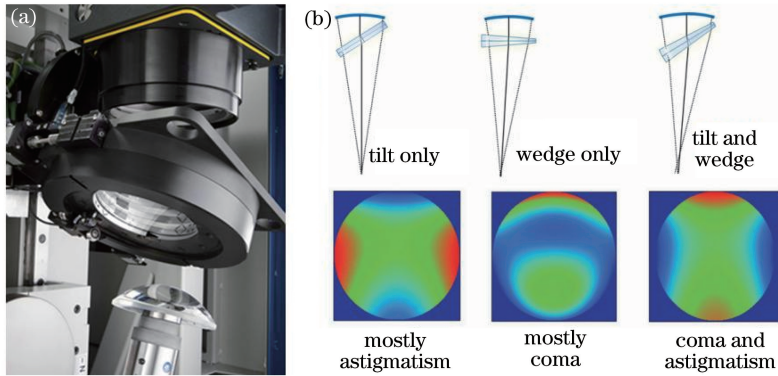


图7 采用Risley棱镜作为可变补偿器的非球面子孔径拼接干涉仪。

(a)实物近景照片;(b)倾斜和相向回转产生可变的像散和彗差^[33]

Fig. 7 Aspheric stitching interferometer employing the Risley prisms as variable null lens. (a) A close-up photograph; (b) variable astigmatism and coma generated by tilting and counter-rotating the prisms^[33]

3.4 双回转相位板

Acosta等^[37]指出通过相向回转的一对泽尼克相位板可产生变化的泽尼克像差,这是利用了泽尼克多项式的旋转属性。利用这一属性,国防科学技术大学的研究小组提出了基于双回转相位板的可变补偿器方案,如图8(a)所示,通过调整一对相向回转的泽尼克相位板的回转角度,产生大小可调的彗差和像散,实现不同形状曲面在不同位置的子孔径的大部分像差的补偿。图8(b)和(c)是某个凸非球面离轴子孔径在补偿前后的实测干涉图,补偿前干涉条纹非常密集,补偿后变得很稀疏^[25-26]。

相位板的相位函数由泽尼克多项式的Z5(45°方向的像散与离焦)和Z7(彗差与Y-倾斜)两项组成,且两个相位板的多项式系数互为相反数,即分别为 c_5 、 c_7 和 $-c_5$ 、 $-c_7$ 。当两个相位板相向回转一个角度 θ 时,测试波前透过后附加的像差主要由泽尼克多项式的Z4(0°方向的像散与离焦)和Z6(彗差与X-倾斜)两项组成,并且其系数大小为 $c_5 \sin 2\theta$ 和 $c_7 \sin \theta$,两者随回转角度变化。与Risley棱镜方案相比,双回转相位板方案只需要调整回转角度,结构简单紧凑,机械精度更容易保证;并且不涉及补偿器的整体倾斜调整,因而避免了圆形孔径畸变为椭圆形的问题。此外,相位板可用CGH实现,通过在CGH上同步制作各种对准图样,实现精确光路对准。由于CGH成对使用,衍射干扰级次增多,而且衍射效率较低导致干涉条纹对比度差。为此,设计了离焦载频隔离干扰级次;并使用4台阶制作工艺,将衍射效率提升至80%。该补偿器能够适用于多个不同参数的凸非球面,也能用于凹非球面的拼接测量^[25-26,38]。对于柱面、自由曲面等像差组合模式不同的面形,需要重新设计相位函数并制作一对新的CGH。

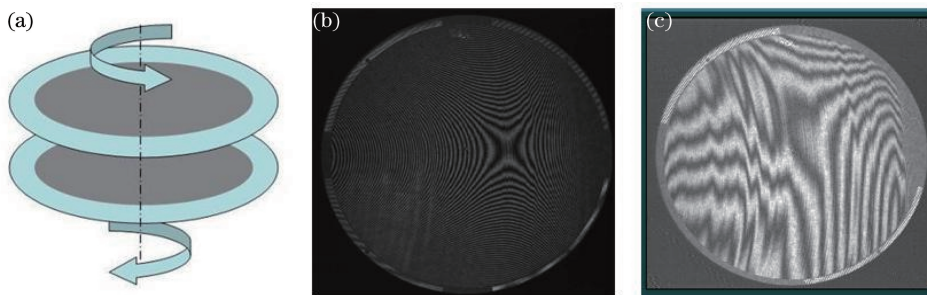


图8 双回转相位板用作可变补偿器。(a)双回转相位板;(b)补偿前干涉图;(c)补偿后干涉图

Fig. 8 Counter-rotating phase plates used as variable optical null. (a) Counter-rotating phase plates; (b) interferogram before compensation; (c) interferogram after compensation

图9(a)是结合双回转相位板的可变补偿能力与子孔径拼接测量方法,测量某高次非球面凸次镜的实验现场。被测镜材料为熔石英,还可以采用背面透过方法检验,如图9(b)所示。此时凸面变为凹面,可利用常规的补偿检验手段,其结果作为参考真值,验证拼接测量结果的正确性。被测凸非球面的有效口径为320 mm,划分为中心子孔径加上离轴三圈子孔径共37个。通过调整相位板的相向回转角度进行可变像差

补偿后,确保不同位置离轴子孔径的干涉条纹都可以很好地解析,剩余像差小于 10λ 。通过光线追迹仿真可知,相位板的失调像差与被测面的失调像差有不同特性,据此可以从子孔径测量数据中成功分离出面形误差和失调像差,经拼接优化后获得真实的被测面形误差。图 10(a)是拼接面形误差图,与图 10(b)所示的背面透过检验结果一致,包括球差分量也是一致的。

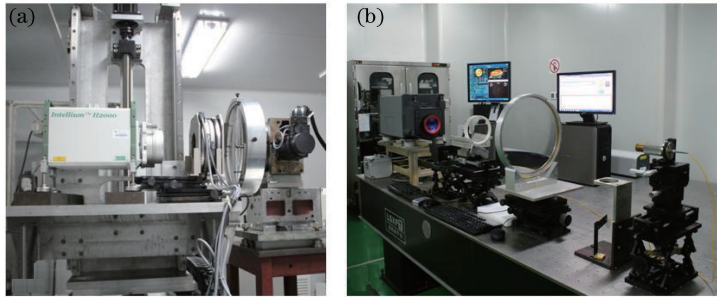


图 9 测量实验装置。(a)近零位子孔径测量;(b)背面透过检验

Fig. 9 Photo of test system setup. (a) Near-null subaperture test; (b) through-the-back test

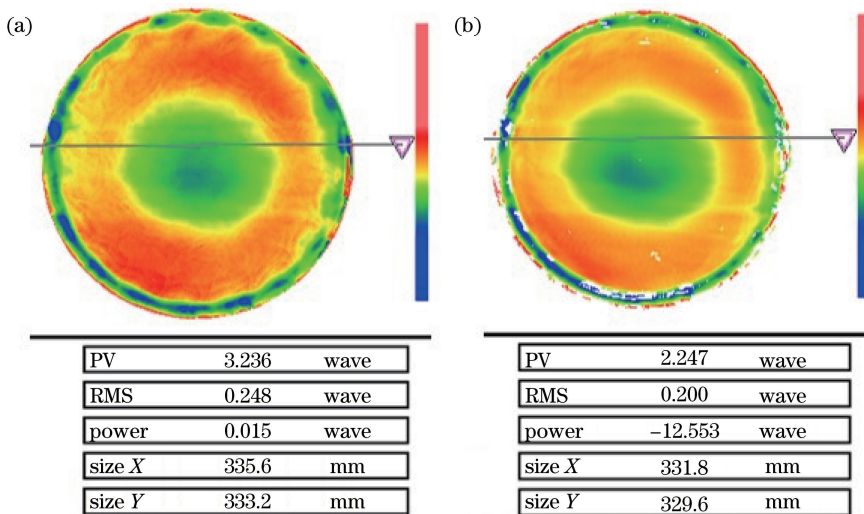


图 10 互检验证结果。(a)拼接;(b)背面透过检验

Fig. 10 Cross test results. (a) Stitching; (b) through-the-back test

4 可编程补偿器

前述透镜组或相位板组合形式的可变补偿器,主要依靠调整相对位置来产生变化的像差,但像差的变化范围和模式种类有限。为了灵活适应各种复杂面形的测量需求,人们更希望拥有一种可编程的补偿器,能够通过程序控制产生与任意被测面形匹配的测试波前。目前应用较多的可编程波前调制器件主要是变形镜和液晶 SLM,前者采用薄镜面主动变形原理,难点在于精确的变形控制。Evans 等^[39]提出用于离轴非球面分块子镜的自适应补偿器并申请了美国专利,通过控制薄镜面反射镜的变形来产生可调的低阶像差,适用于拼接式望远镜中不同离轴位置分块子镜的像差补偿要求。德国斯图加特大学的 Pruss 等^[40]将 25 mm 大小的变形镜置于泰曼-格林干涉仪中,用于非球面的面形检测。变形镜的形状重复性约为 50 nm RMS,最大变形可达 40 μm PV。测试光束首先被变形镜反射后入射到被测面上,光束反射回来再次经过变形镜反射,因而变形镜产生的变形被 4 倍放大后对测试波前产生调制,增大了像差补偿范围。

随着微机电系统(MEMS)技术的快速发展,美国德州仪器公司推出了数字微镜器件(DMD),成为一种新型实用的 SLM。DMD 在不到 1 in(1 in=2.54 cm)的芯片区域内集成了近百万(例如 1024×768)个边长十余微米的微反射镜,通过数字控制其偏转角度实现对光束反射的“开关”状态切换,在投影显示、数据存储和数字光刻等领域取得了成功应用^[41-42]。近年来液晶 SLM 的工艺日渐成熟,特别是硅基液晶(LCoS)技术

取得突破, LCoS 作为 SLM 也已广泛用于全息投影显示、激光材料加工和光通信等领域^[43]。液晶 SLM 类似于可编程的 CGH, 但是避免了 CGH 制作过程, 具有动态可变补偿的潜在优势, 因而作为像差校正元件, 在自适应光学、光学面形测量等领域得到越来越多的应用^[44-48]。SLM 可以是透射型, 也可以是反射型; 可与夏克-哈特曼波前传感器组合使用^[49], 也可以用于波面干涉仪^[50-51]。与上述补偿方法相比, SLM 可产生的像差模式多样, 具有动态可编程的独特优势。但另一方面受工艺条件限制, SLM 的调制能力范围还很小; 易受杂散衍射级次的干扰, 加入载频又进一步降低了调制范围; 此外, SLM 的波前精度较差, RMS 一般只有 $\lambda/20$ 左右, 尚不能满足大范围变化的非球面高精度检验的需求。

5 结 论

非球面的多样性成就了其优异的光学性能, 但同时也带来了面形检测无法适应其变化的难题。本研究针对回转对称非球面的球差补偿、离轴非球面的像差补偿, 综合分析了部分补偿器、相位板组合、非球面单透镜、倾斜球面系统、Risley 棱镜和双回转相位板等可变补偿方案; 并以变形镜和空间光调制器为例, 对更具实时性和灵活性的可编程补偿器在光学面形干涉测量中的应用进行了简要介绍。可变像差补偿技术必将在未来复杂面形的智能化干涉测量中占得一席之地, 需要解决的难点包括以下几个方面。

1) 如何产生大范围可变、模式多样化的像差补偿能力。部分补偿透镜、位置可调的相位板组合、SLM 等多种可变补偿形式均存在各自的优缺点, 尚不能满足不同非球面的高精度检验需求。采用高次非球面透镜结合 SLM 的优势互补方案, 可能成为一个新的技术发展方向, 但需要精确校准补偿元件引入的波像差。另一方面, 还需要考虑非球面波前像差的梯度约束, 揭示非本征像差的形成机理, 为可变补偿方法寻求原理突破。

2) 由于被测面形处于近零位测试状态, 存在不共光路引起的回程误差补偿问题。可变补偿对应的非球面像差还有一部分剩余, 反射光线会偏离入射光线的方向透过补偿器后回到干涉仪。被偏离的反射光在干涉仪内部光路中所经过的路径与参考光不再是共光路的, 因而测量结果包含了内部光路引入的光程差, 在高精度场合必须对此回程误差进行精确补偿。非零位测量条件引入的回程误差补偿方法的主要困难在于需要已知整个干涉测量系统(包括干涉仪内部光路)的元件误差, 文献[52]对此进行了简要评述并提出了逆向迭代优化重构技术。

3) 如何从面形测量结果中精确解耦失调像差。非球面补偿检验所得测量结果耦合了面形误差、补偿器系统误差和补偿器或被测面失调引入的像差, 失调像差是非球面检验区别于平面或球面干涉检验的重要特征, 也是一个主要的测量不确定度来源^[53-54]。对于回转对称非球面的检验, 通常需要对检测系统中干涉仪、补偿器和被测面之间的相互位置进行监控, 同时可通过光线追迹的方法确定失调像差。然而对于可变补偿的子孔径拼接测量, 对应非球面离轴子孔径上的面形误差与失调像差是难以区分的。例如全口径上回转对称的球差, 在离轴子孔径上表现为像散加彗差的形式, 而补偿器或被测面失调引入的像差同样是像散与彗差的组合, 此时通过拼接优化得到正确的球差分量就变得非常困难。不过, 补偿器的失调像差与被测面的失调像差可能有不同特性, 据此从子孔径测量数据中成功分离出面形误差和失调像差是可能的, 笔者所在研究小组对凸非球面的近零位子孔径拼接实验结果(图 10)已经证明了该方法的可行性。

参 考 文 献

- [1] Wilson R N. *Astronomical optics*[M]. San Diego: Academic Press, 2000: 115-154.
- [2] Bociort F, Turnhout M V, Marinescu O E. Method of designing a projection system, lithographic apparatus and device manufacturing method: US, 7714307[P]. 2010-05-11.
- [3] Mann H J. Six-mirror EUV projection system with low incidence angles: US, 7973908[P]. 2011-07-05.
- [4] Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, *et al.* NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- [5] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [6] Goodwin E P, Wyant J C. Field guide to interferometric optical testing[C]. SPIE, 2004, FG10: 114.

- [7] Faulde M, Fercher A F, Torge R, *et al.* Optical testing by means of synthetic holograms and partial lens compensation [J]. *Optics Communications*, 1973, 7(4): 363-365.
- [8] Liu Huilan, Hao Qun, Zhu Qiudong, *et al.* Testing an aspheric surface using part-compensating lens[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(7): 625-628.
刘惠兰, 郝群, 朱秋东, 等. 利用部分补偿透镜进行非球面面形测量[J]. *北京理工大学学报*, 2004, 24(7): 625-628.
- [9] Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qiudong, *et al.* Optimization design of partially compensating lens based on Zemax [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0622002.
孟晓辰, 郝群, 朱秋东, 等. 基于 Zemax 的部分补偿透镜的优化设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0622002.
- [10] Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao, *et al.* Partial null lens for general aspheric testing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 322-325.
刘东, 杨甬英, 田超, 等. 用于非球面通用化检测的部分零位透镜[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 322-325.
- [11] Luo Yongjie, Yang Yongying, Tian Chao, *et al.* Error analysis and processing of partial compensatory aspheric testing system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(4): 636-642.
骆永洁, 杨甬英, 田超, 等. 非球面部分补偿检测系统的误差分析与处理[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(4): 636-642.
- [12] 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.
- [13] Zhang L, Tian C, Liu D, *et al.* Non-null annular subaperture stitching interferometry for steep aspheric measurement [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(25): 5755-5762.
- [14] 杨甬英, 刘东, 张磊, 等. 一种高精度非球面组合干涉检测装置与方法: 中国, 201410012476.7[P]. 2014-05-07.
- [15] Lowman A E. Calibration of a non-null interferometer for aspheric testing[D]. Tucson: University of Arizona, 1995.
- [16] Greivenkamp J E, Gappinger R O. Design of a non-null interferometer for aspheric wavefronts [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(27): 5143-5151.
- [17] Sullivan J J, Greivenkamp J E. Design of partial nulls for testing of fast aspheric surfaces [C]. SPIE, 2007, 6671: 66710W.
- [18] 王孝坤, 闫峰, 郑立功, 等. 部分补偿非球面反射镜面形检测方法: 中国, 201110334888.9[P]. 2012-06-20.
- [19] Hilbert R S, Rimmer M P. A variable refractive null lens [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(4): 849-852.
- [20] Palusinski I A, Sasián J M, Greivenkamp J E. Lateral-shift variable aberration generators [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(1): 86-90.
- [21] Acosta E, Sasián J. Phase plates for generation of variable amounts of primary spherical aberration [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13171-13178.
- [22] Sasián J, Acosta E. Generation of spherical aberration with axially translating phase plates via extrinsic aberration [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 289-294.
- [23] Lu J F, Chen S Y, Xue S. Variable aberration generator using a high-order even aspheric singlet for testing optical surfaces [C]. SPIE, 2016, 10155: 101550A.
- [24] Shi Zhonghua, Yang Baoxi, Wei Zhangfan, *et al.* Research progress in optical spacing measurement technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040004.
师中华, 杨宝喜, 魏张帆, 等. 光学镜面间距测量技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040004.
- [25] Chen S Y, Zhao C Y, Dai Y F, *et al.* Reconfigurable optical null based on counterrotating Zernike plates for test of aspheres [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1381-1386.
- [26] Chen S Y, Li S Y, Dai Y F. Subaperture stitching interferometry: jigsaw puzzles in 3D space [M]. SPIE Press, 2016.
- [27] Chen S Y, Dai Y F, Li S Y, *et al.* Calculation of subaperture aspheric departure in lattice design for subaperture stitching interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(2): 023601.
- [28] Küchel M F. Interferometric measurement of rotationally symmetric aspheric surfaces [C]. SPIE, 2009, 7389: 738916.
- [29] Ostaszewski M, Harford S, Doughty N, *et al.* Risley prism beam pointer [C]. SPIE, 2006, 6304: 630406.
- [30] Yang Y G. Analytic solution of free space optical beam steering using risley prisms [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(21): 3576-3583.

- [31] Jeon Y G. Generalization of the first-order formula for analysis of scan patterns of Risley prisms [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 113002.
- [32] Li Y J. Closed form analytical inverse solutions for Risley-prism-based beam steering systems in different configurations [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4302-4309.
- [33] Li Y J. Third-order theory of the Risley-prism-based beam steering system [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(5): 679-686.
- [34] QED Technologies announces ASI™ metrology system for aspheres [EB/OL]. (2009-01-12). <http://www.qedmrf.com>.
- [35] Tricard M, Kulawiec A, Bauer M, *et al.* Subaperture stitching interferometry of high-departure aspheres by incorporating a variable optical null [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 547-550.
- [36] Supranowitz C, McFee C, Murphy P. Asphere metrology using variable optical null technology [C]. *SPIE*, 2012, 8416: 841604.
- [37] Acosta E, Bará S. Variable aberration generators using rotated Zernike plates [J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(9): 1993-1996.
- [38] Song Bing, Chen Shanyong, Wang Guilin. Subaperture testing technique of aspheres based on counter-rotating phase plates [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1112007.
宋兵, 陈善勇, 王贵林. 基于双回转相位板的非球面子孔径测量技术 [J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1112007.
- [39] Evans C J, Küchel C G, Parks R E, *et al.* Adaptive nulls for testing off-axis segments of aspherics: US, 20060268282 [P]. 2006-11-30.
- [40] Pruss C, Tiziani H J. Dynamic null lens for aspheric testing using a membrane mirror [J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1-3): 15-19.
- [41] Lu Yacong, Chen Linsen, Wei Guojun, *et al.* Laser direct writing system of fabricating high resolution image with DMD [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(6): 46-47.
陆亚聪, 陈林森, 魏国军, 等. 基于 DMD 高分辨率激光直写系统设计与实现 [J]. *激光杂志*, 2007, 28(6): 46-47.
- [42] Luo Ningning. Study on digital mask fabrication technique for micro-optical elements [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 12-13.
罗宁宁. 微光学器件数字掩模制作技术的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 12-13.
- [43] Collings N, Davey T, Christmas J, *et al.* The applications and technology of phase-only liquid crystal on silicon devices [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(3): 112-119.
- [44] Love G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(7): 1517-1524.
- [45] Hu L F, Xuan L, Liu Y J, *et al.* Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6403-6409.
- [46] Kacperski J, Kujawinska M. Active, LCoS based laser interferometer for microelements studies [J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 9664-9678.
- [47] Arines J, Durán V, Jaroszewicz Z, *et al.* Measurement and compensation of optical aberrations using a single spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15287-15292.
- [48] Fernández E J, Prieto P M, Artal P. Wave-aberration control with a liquid crystal on silicon (LCOS) spatial phase modulator [J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 11013-11025.
- [49] Cao Z L, Xuan L, Hu L F, *et al.* Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1059-1065.
- [50] Ares M, Royo S, Sergievskaya I, *et al.* Active optics null test system based on a liquid crystal programmable spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(32): 6201-6206.
- [51] Jo J S, Trolinger J D, Lal A, *et al.* Practical issues in applying a programmable holographic optical element for optical metrology [C]. *Mirror Technology SBIR/STTR Workshop*, 2009.
- [52] Liu D, Shi T, Zhang L, *et al.* Reverse optimization reconstruction of aspheric figure error in a non-null interferometer [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5538-5546.
- [53] Chen Xindong, Li Ruigang. Research on geometric parameter measurement method using laser tracker in null lens asphere testing [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0508007.

陈新东, 李锐刚. 基于双回转相位板的非球面子孔径测量技术[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508007.

- [54] Quan Haiyang, Hou Xi, Wu Fan. Research status and progress of measurement uncertainty in interferometric testing of surface figure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060004.

全海洋, 侯 溪, 伍 凡. 测量不确定度在干涉面形检测领域的研究现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060004.