

自由曲面干涉检测中的自适应循环补偿结构

刘仁虎^{1,2}, 吴金灵^{1,2}, 曹加全^{1,2}, 吴升阳^{1,2}, 周 胜^{1,2}, 俞本立^{1,2}, 张 磊^{1,2}

- (1. 安徽大学 信息材料与智能感知安徽省实验室, 安徽合肥 230601;
2. 安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽合肥 230601)

摘要: 为缓解基于可变形镜 (DM) 的自适应自由曲面干涉仪存在的固有矛盾——不能同时兼顾大动态像差补偿与 DM 形变监测范围, 前期提出了循环利用 DM 形变量去产生大畸变波前的自适应环形补偿器 (ARCC), 并得到了初步验证。为了推广其在自由曲面自适应检测中的应用, 并结合校正光学系统的自由曲面多为低阶像差面的现实问题, 对 ARCC 的低阶像差补偿特性做出了必要验证和研究。首先, 通过 Zemax 建模对比了 ARCC 和传统单次往返补偿器 (TSRC) 对于像散、彗差和球差的补偿能力, 得出 ARCC 补偿像散和彗差的能力近似为 TSRC 的 2 倍, 补偿球差的能力也要显著大于 TSRC, 验证了 ARCC 的低阶像差补偿优势; 其次, 研究了 ARCC 的低阶像差类型补偿规律, 得出 ARCC 结构中 DM 上的像差类型与补偿给被测面的像差类型是“一对多”或“多对一”的关系。结果证明: 在实际中分别使用 ARCC 和 TSRC 对 4 块低阶像差自由曲面进行补偿验证, 同样的 DM 形变量下, 与传统补偿结构相比 ARCC 展现出更加出色的低阶像差补偿能力。

关键词: 测量; 像差补偿; 自适应循环补偿结构; 自适应干涉仪

中图分类号: TQ171.65 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220157

Adaptive cyclic compensation structure used in freeform surface interferometric testing

Liu Renhu^{1,2}, Wu Jinling^{1,2}, Cao Jiaquan^{1,2}, Wu Shengyang^{1,2}, Zhou Sheng^{1,2}, Yu Benli^{1,2}, Zhang Lei^{1,2}

- (1. Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to alleviate the inherent contradiction of existing deformable mirror (DM)-based adaptive freeform surface interferometers, which can not take into account both large departure coverage and DM surface monitoring, therefore, adaptive ring-cavity compensator (ARCC) was proposed, which can generate large departure wavefront using DM deformation multiple times, and it had been preliminarily verified. Considering the practical application of ARCC and the fact that most freeform surfaces in optical systems were low-order aberration surfaces, the low-order aberration compensation characteristics of ARCC were verified and studied. Firstly, the compensation capability of ARCC and TSRC (traditional single round compensator) for astigmatism, coma and spherical aberration was compared by Zemax modeling. It was concluded that the ability of ARCC to compensate astigmatism and coma were about twice that of TSRC, and the ability of ARCC to compensate

收稿日期:2022-04-10; 修订日期:2022-05-20

基金项目:国家自然科学基金(61705002);安徽省自然科学基金(1808085 QF198)

作者简介:刘仁虎,男,硕士生,主要从事非球面形精密测量方面的研究。

导师简介:张磊,男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事光学精密检测技术与系统等方面的研究。

spherical aberration was also significantly greater than TSRC, which verified the advantage of ARCC in low-order aberration compensation; Secondly, the low-order aberration compensation of ARCC was studied, and it was include that the aberration types on DM in ARCC structure was one-to-many or many-to-one with the aberration types compensated to the tested surface. The results show that in practice, four low-order aberration free-form surfaces are compensated and verified by using ARCC and TSRC respectively. Under the same DM stroke variable, ARCC shows more excellent low-order aberration compensation ability than the TSRC.

Key words: measurement; aberration compensation; adaptive cyclic compensation structure; adaptive interferometer

0 引言

光学自由曲面是非球面的一种特殊形式,在狭义上是指表面各处曲率不同的光滑光学曲面。在军工或民用领域,拥有了更大自由度的光学自由曲面在成像^[1-2]、照明^[3]等领域给设计者带来了极大的施展空间,极大地提升了光学产品的性能。但同时因其高自由度的特点,也给自由曲面制造^[4]尤其是面形的高精度检测增大了难度^[5-6]。对于公认精度最高的干涉检测方式来说,检测时需要一个能够全部或部分补偿被测自由曲面像差的光学补偿器。由于自由曲面表面自由度大,传统补偿器的设计复杂且不能保障可被加工。针对性地实现波前补偿的计算全息图(CGH)^[7-8]可以充当这个角色但其不具通用性。同时,在实际高精度光学制造中,面对迭代制造过程中不断被修正的面形,需要一种可以产生大动态像差范围和具有灵活像差调控能力的补偿元件,显然 CGH 不具有这种能力。

若干具有一定波前动态像差范围的补偿器曾在非球面检测中被提出,如微透镜阵列^[9]、可变零位器^[10]、可移动高次非球面单透镜^[11]和双回转相位板^[12],但上述补偿器像差调控类型和能力也均有限,并不能实现真正意义上的自由像差调控。由于自适应光学元件具有可编程控制的波前调控能力,如液晶空间光调制器(LC-SLM)和可变形镜(DM),因此 Arizona 大学^[13]、Rochester 大学^[14-15]、清华大学^[13]、国防科技大学^[16]和安徽大学^[17]均展开了基于 LC-SLM 或 DM 的自适应干涉检测研究。但目前实验验证的报道中,基于 DM 的自由曲面检测动态范围和检测精度略高于 LC-SLM(受限于灰度级和调控算法),且 DM 作为反射器件,波前调控和光学追迹简单,无波长选择性,可与各种波长的干涉仪配合使用,因而作为动态补偿器在自由曲面干涉检测中具有较好地应

用前景。

然而,DM 的传统应用领域为大气光学^[18]等自适应像差调节系统,其表面波前调控精度不能满足高精度光学测试的要求。所幸由于其直接反射特性,通过监测 DM 表面形变可以精确预知其波前调控精度。2014 年, Rochester 大学^[14]预先使用 ZYGO 干涉仪对 DM 表面形变标定,但这种非实时、非原位监测过程中容易造成 DM 形变蠕动,影响最终的检测结果。之后,清华大学和安徽大学对该问题均进行了一系列研究,采用了如相位偏折测量系统(DS)^[13]、双通道干涉仪^[17]等手段对 DM 进行了实时原位监测。其中,DS 在监测 DM 面形时存在系统校准复杂的问题,更重要的是,无论以何种方式进行 DM 监测,系统都存在一个基本矛盾:加工过程中不同时段被测量面形相差较大,需要作为补偿器的 DM 具有较大行程实现大像差覆盖,而 DM 本身的形变同样需要被监测来保证精度,增大 DM 的形变量将增加其自身负担。

基于以上研究现状,研究者希望能够在干涉检测系统中使用不超过监测范围的 DM 形变量去产生更大动态范围的像差补偿,课题组前期提出了一种自适应环形补偿器(ARCC)^[19],对重复利用 DM 形变产生大畸变波前的思路进行了初步验证。考虑到实际工程中应用的自由曲面多数为低阶像差面,文中在 ARCC 可行性的基础上做出了必要的低阶像差(像散、彗差和球差)补偿研究。通过仿真实验进行了 ARCC 与传统单次往返式补偿器(TSRC)低阶像差补偿能力对比,同时研究了 ARCC 对于低阶像差的补偿特性。最后在实际实验中验证了 ARCC 对于低阶像差的补偿优势,为现实应用提供了理论基础。

1 基本原理

基于补偿结构为 ARCC 与 TSRC 的自适应干涉

检测系统原理如图 1 所示,两种补偿结构均可搭配偏振干涉仪 PI 工作,图 1(a) 左侧示出了偏振干涉仪 PI 的工作原理。PI 中激光器发出偏振方向与 x 轴夹角为 θ 的线偏振光,经 BS1 后分为两束,反射光线作为参考光,透射光线作为检测光。检测光经过补偿结构 ARCC 或 TSRC 到达被测面并被反射后,将携带被测面形信息回到 PI,此时检测光的偏振方向为 p 偏振

方向,调整可旋转偏振片 (RP) 至透振方向与 p 偏振方向平行 (RPy) 便可获得检测光与参考光形成的检测干涉图。与此同时,补偿结构 ARCC 和 TSRC 设置的另一路监测 DM 表面形变的 s 方向线偏振光也可进入 PI,可称其为监测光,通过旋转 RP 至透振方向与 s 偏振方向平行 (RPx) 便可获得监测光与参考光形成的监测干涉图。在自适应补偿之前,DM 表面处于初始化

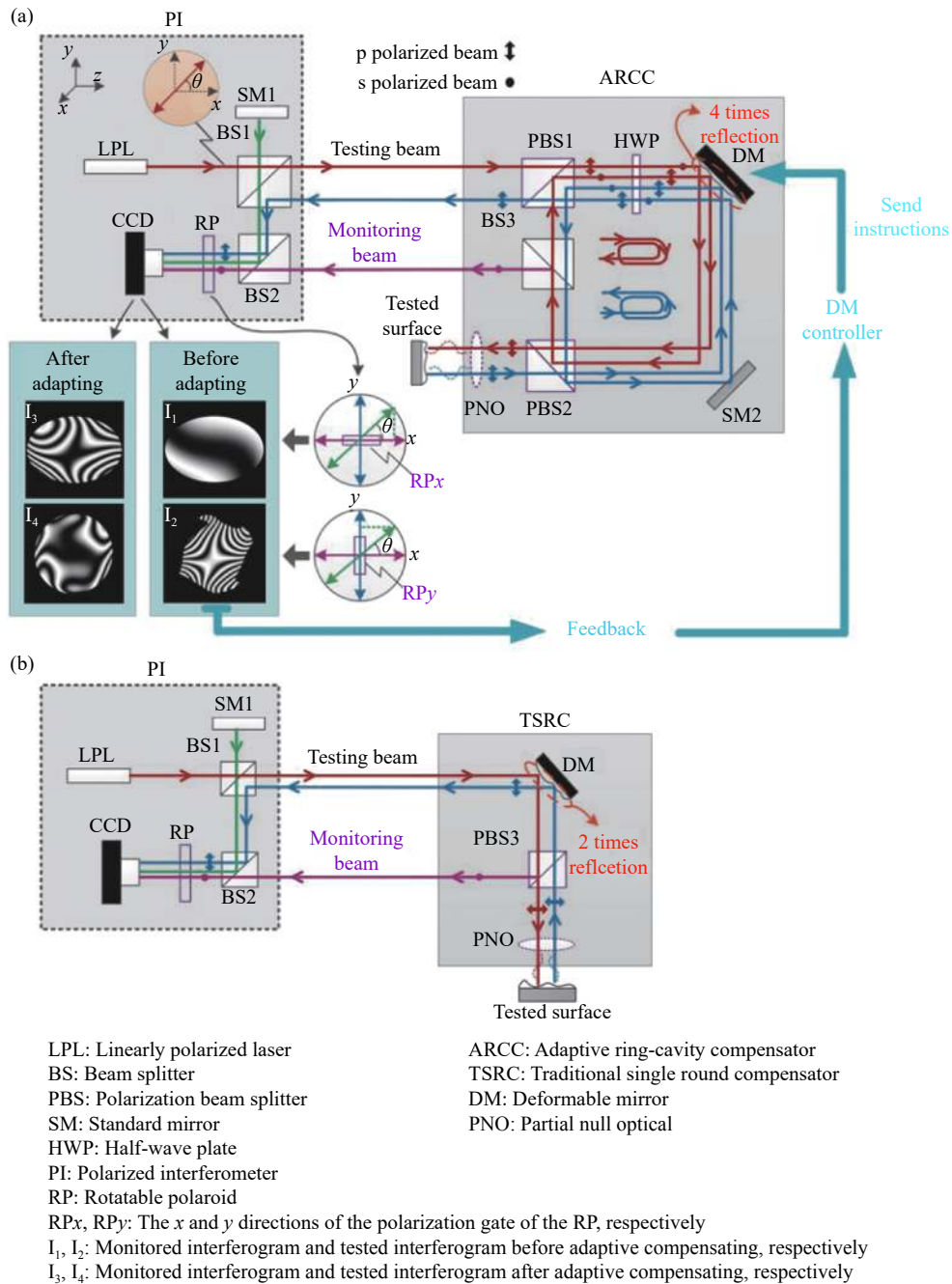


图 1 自适应干涉仪原理。(a) 基于 ARCC 型补偿结构的自适应干涉仪; (b) 基于 TSRC 型补偿结构的自适应干涉仪
Fig.1 Principle of adaptive interferometer. (a) ARCC-based adaptive interferometer; (b) TSRC-based adaptive interferometer

状态, 监测干涉图如 I_1 所示, 此时若直接对大偏离度自由曲面进行检测, 可能会导致检测干涉图的局部区域因干涉条纹过密而不可见, 造成检测信息缺失, 如 I_2 所示。运行自适应算法^[13,17,19]后, 计算机能够自动识别检测干涉图中的条纹不可见区域(条纹过密区域)并向 DM 发送反馈命令, 使其驱动表面形变补偿被测面像差直至检测干涉图达到近零位状态, 如干涉图 I_4 所示, 从而可完整获取全口径的检测波面信息进行检测路精确建模。同时, 自适应补偿结束后的监测(DM)干涉图也在 CCD 可解析范围之内, 如 I_3 所示, 通过 I_3 可求解出此时的 DM 面形, 然后将其代入检测路模型, 利用光线追迹就可得到被测自由曲面的面形误差。

ARCC 补偿结构的详细光路如图 1(a) 右侧所示。由 PI 发出的检测光束首先进入 ARCC 的偏振分束器 PBS1 成为 P 偏振光, 由于半波片 HWP 的快轴方向与 p 偏振方向呈 45° , p 偏振光经过 HWP 后偏振方向旋转 90° 变为 s 偏振光, s 偏振光随后经 DM、SM2、PBS2 反射到达 BS3, 此时监测 DM 表面形变的光线将会被 BS3 反射到 PI 中, 调整 RP~RPx 状态时便可获得监测干涉图 I_2 。透射光则不改变传播方向到达 PBS1 并被全部反射, 再次经过 HWP 后 s 偏振光的偏振方向旋转 90° 变回 p 偏振光。p 偏振光然后经 DM、SM2 表面反射和 PBS2 全部透射后到达被测表面, 此时入射波前已被 DM 调制了两次。若检测球面基底的自由曲面需要在 PBS2 后放置部分零位光学元件(PNO), 检测平面基底的自由曲面则不需要。到达被测面的 p 偏振光经被测面反射后会原路返回到 PI 中, 返回的路径中检测波前再次受到了两次 DM 的形变调制, 调整 RP 至 RPy 状态时便可获得检测干涉图 I_1 。检测光进出 ARCC 的整个过程, 检测光波前总共经过了 DM 表面形变的 4 次调制。另外, 由于实际中遇到的被测面反射率不尽相同, 需要使用合适透反比的分光棱镜以及入射光偏振方向来保证检测光、监测光分别与参考光之间的振幅比, 进而保证干涉条纹的对比度。ARCC 结构搭配 PI 的光能利用分析已在参考文献 [19] 详细给出, 在 BS1 与 BS2 透反比均为 1 的情况下获得高对比度条纹的条件为:

$$\begin{cases} (t_{BS3})^2 \cdot r_{TS} = 0.5r_{SM1} \\ \tan\theta \cdot (1 - t_{BS3}) = 0.5r_{SM1} \end{cases}$$

式中: t_{BS3} 为 BS3 的透射率; r_{TS} 为自由曲面的反射率; r_{SM1} 为 SM1 的反射率; θ 为入射线偏振光与 x 轴的夹角。当被测面反射率 $r_{TS} \geq 98\%$ 时, 可选择 $r_{SM1} \geq 98\%$, $t_{BS3} = 70\%$ 和 $\tan\theta = 5/3$ 来保证高对比度干涉条纹^[19]; 当被测面反射率低至 4% 时, 应当更换低反射率 SM1 来降低参考光能量从而分别提高其与监测光和检测光的振幅比, $r_{SM1} = 6\%$, $t_{BS3} \approx 86\%$, $\tan\theta \approx 0.22$ 的条件可保证条纹高对比度。

TSRC 型补偿结构的光路如图 1(b) 右侧所示, 左侧为 PI。PI 中透过 BS1 的检测光经 DM 反射到达 PBS3 后分成 s 方向偏振的反射光和 p 方向偏振的透射光, 同样地, 反射光将会进入 PI 记录 DM 表面形变, 透射光则会继续传播到被测面, 可以根据被测面的基底类型在被测自由曲面前面选择是否加入 PNO, p 偏振光被被测面反射后, 将会携带被测面面形信息依次经 PBS3 全部透射和 DM 反射回到 PI。面对实际中不同反射率的被测自由曲面, 在 BS1 与 BS2 透反比分别为 1 和 1/2, 线偏振入射光与 x 轴夹角 θ 为 45° 时, 只需被测面与 SM1 反射率保持相同即可获得高对比度干涉条纹。检测光进出 TSRC 的整个过程, 检测光波前总共经过了 DM 表面形变的 2 次调制, 相比 ARCC 少了一半。根据上述 ARCC 原理, 若将 ARCC 中 HWP 的快轴方向旋转到与 p 偏振方向平行后, 检测光全程也将受 DM 表面形变的 2 次调制, 将变成 TSRC 型补偿结构。

2 仿真实验

为了验证 ARCC 相比 TSRC 在低阶像差补偿方面的优势以及分析 ARCC 的低阶像差的补偿特性, 利用光学追迹软件 Zemax 进行了仿真实验。实验通过给两种结构中的 DM 预设相同并具有一定大小的单一低阶像差形变, 然后分别优化两种结构中的被测面至剩余波前像差至某一极小水平 ($rms \approx 0\lambda$) 后, 通过对比两个被测面上相应的低阶像差大小即可得到两种补偿器对于低阶像差的补偿能力大小。例如预先给两种结构中的 DM 表面均施加 5λ 大小的 X 像散,

然后优化各自对应的被测面面形使得从补偿器出射波前的剩余像差 $rms \approx 0\lambda$ 后,便可通过对比两个被测面上 X 像散量大小得出两种补偿结构对 X 像散补偿能力的大小。同时,在系统剩余像差 $rms \approx 0\lambda$ 的条件下,被测面处的检测波前形状与被测面面形匹配,便可利用被测表面的像差分布进行补偿结构的低阶像差补偿特性分析。仿真实验中 DM 的参数按照实际商用的 AlpaTM 97-25 设定, DM 口径设为 25 mm,归一化半径为 12.5 mm。被测面口径 12 mm,并且为平面基底。DM 和被测面的附加面形均用条纹 Zernike 表示。由于 DM 形变量有限,因此以监测处的最大波前斜率不超过 $0.35\lambda/\text{pixel}$ 来限定 DM 表面所施加的像差范围 (CCD 分辨率为 128×128),并且此范围要在 AlpaTM 97-25 的 GUI 菜单提供的像差区间内,结果以整数波长计量。

2.1 ARCC 低阶像差补偿能力优势验证

根据前述方法对表 1 给出的低阶像差范围执行

被测面面形的优化,最终优化结果显示系统的剩余像差 rms 值均在 0.02λ 以下,可认为被测面面形已和检测波前相匹配,此时将 DM 表面附加的像差量与被测面上对应像差的大小作为数据点并进行多项式拟合 (拟合优度 $R^2 \geq 0.9999$),如图 2~4 所示,横坐标表示 DM 面上所施加的像差量,纵坐标表示优化后 (近零位条件) 被测面上的对应像差量。由于 DM 为反射元件,其表面施加的正像差会以负像差的形式补偿被测面,反之亦然。图 2(a) 和图 2(b) 分别为 DM 表面附加一定范围的 X 像散和 Y 像散时,两种结构所能带给被测面的像散量,可以看出无论 DM 上为正像散还是负像散,在相同的 DM 像散形变量下 ARCC 结构补偿给被测面的像差量显著大于 TSRC 结构。并且 ARCC 和 TSRC 对两种方向的像散均近似为线性补偿,拟合线的斜率 κ 可用来反映各自的补偿能力的大小,即 DM 上 $n\lambda$ 的像差能够给被测面带来 $\kappa \cdot n\lambda$ 的补偿量,所以利用 ARCC 和 TSRC 补偿同种 Zernike 像差的能力

表 1 仿真实验中 DM 表面所附加每种低阶像差的范围 (单位: λ)

Tab.1 Range of the each low-order aberration on the DM surface in simulation (Unit: λ)

Aberration types	Astigmatism X	Astigmatism Y	Coma X	Coma Y	Spherical aberration
Range	[-24, 28]	[-33, 33]	[-23, 23]	[-16, 16]	[-10, 10]

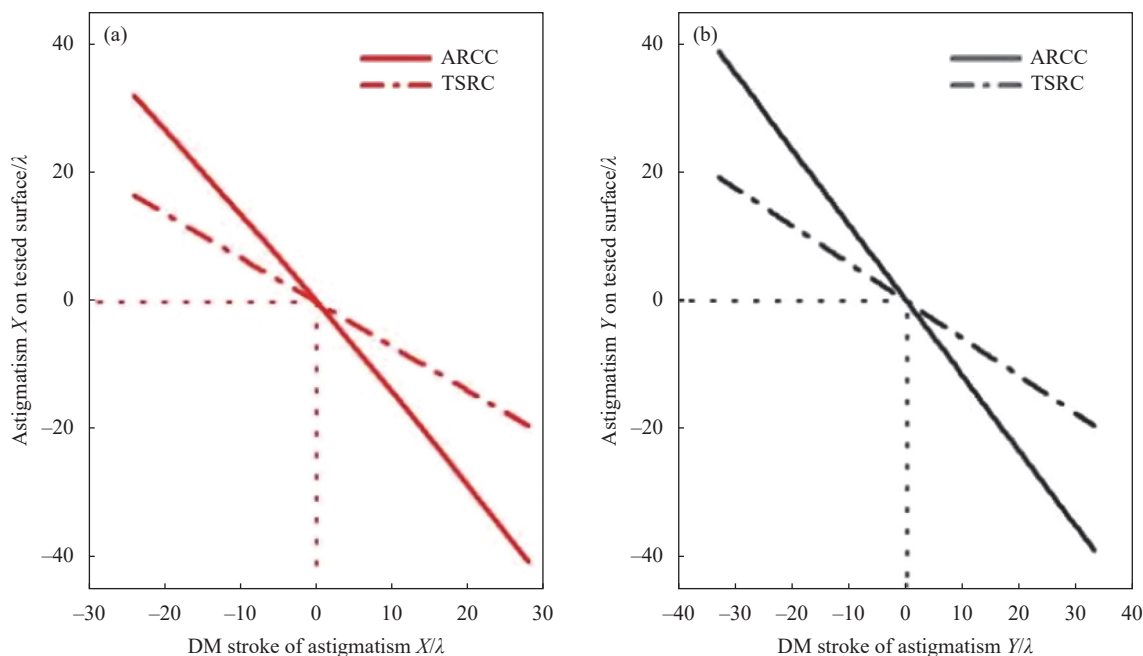


图 2 TSRC 与 ARCC 补偿像散的能力。(a) 补偿 X 像散;(b) 补偿 Y 像散

Fig.2 Astigmatism compensation capacity of the TSRC and ARCC. (a) Compensation astigmatism X ; (b) Compensation astigmatism Y

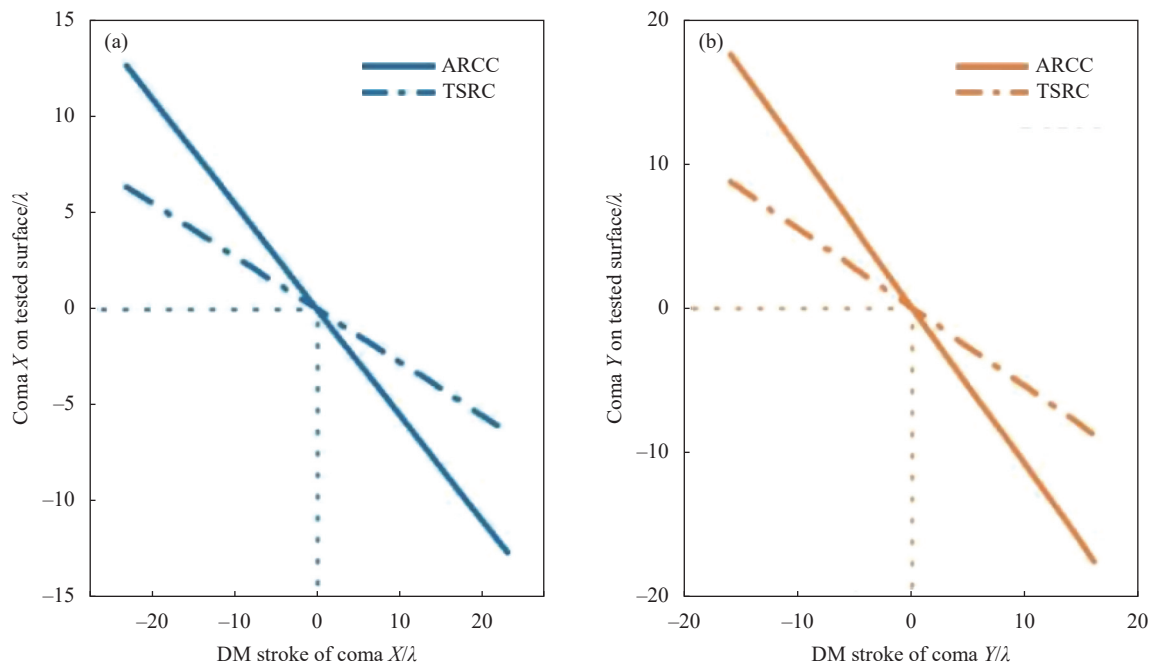


图 3 TSRC 与 ARCC 补偿彗差的能力。(a) 补偿 X 彗差; (b) 补偿 Y 彗差

Fig.3 Coma compensation capacity of the TSRC and ARCC. (a) Compensation coma X; (b) Compensation coma Y

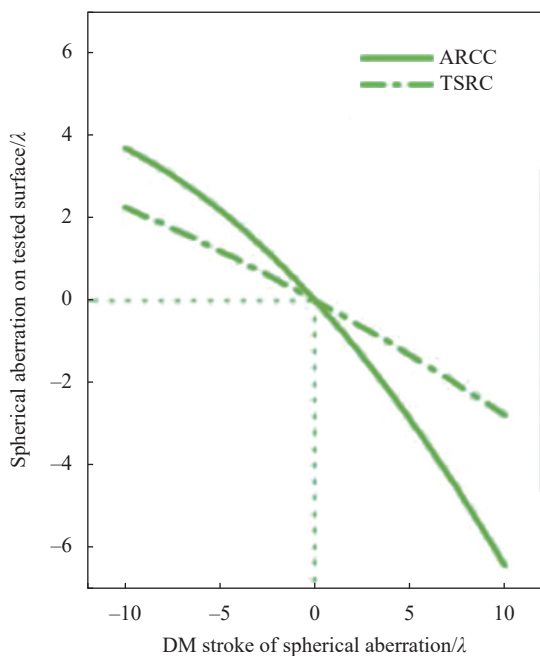


图 4 TSRC 与 ARCC 补偿球差的能力

Fig.4 Spherical aberration compensation capacity of the TSRC and ARCC

之比 κ_A/κ_T 可近似反映两种补偿器的补偿倍数关系, κ_A 表示 ARCC 的补偿能力, κ_T 表示 TSRC 的补偿能力, 如表 2 所示, ARCC 补偿 X 像散的能力是 TSRC 的 2.006 倍, 补偿 Y 像散的能力是 TSRC 的 2.007 倍, 可认为 ARCC 补偿像散的能力近似为 TSRC 的 2 倍。图 3(a) 和图 3(b) 分别为 DM 表面附加一定量的 X 彗差和 Y 彗差时, 两种结构所能带给被测面的彗差量, 同样地, 无论 DM 上为正彗差还是负彗差, 在相同的 DM 彗差形变量下 ARCC 结构补偿给被测面的彗差量显著大于 TSRC。如表 2 所示, ARCC 补偿 X 彗差和 Y 彗差的能力分别为 TSRC 的 1.991 倍和 2.005 倍, 所以 ARCC 补偿彗差的能力也近似为 TSRC 的 2 倍。图 4 为 DM 表面附加球差时, 两种结构所能带给被测面像差补偿量的拟合曲线, 从图中可以看出 ARCC 对被测面球差的补偿呈非线性的关系, 虽然不能得到 ARCC 补偿能力大于 TSRC 的准确倍数, 但仍可以看出 ARCC 对球差的补偿能力要明显优于 TSRC。

表 2 ARCC 和 TSRC 两种补偿器对低阶像差补偿能力之比

Tab.2 Ratio of low-order aberration compensation between ARCC and TSRC

Low-order aberration	Astigmatism X	Astigmatism Y	Coma X	Coma Y	Spherical aberration
κ_A/κ_T	2.006	2.007	1.991	2.005	-

2.2 ARCC 低阶像差补偿特性

在系统剩余像差 $rms \approx 0\lambda$ 时被测面面形近似代表了检测波前形状, 两种补偿结构对应被测面上的像差分布除了具有和 DM 表面相同的像差类型外, 还会出现额外像差, 即 DM 表面为单种的低阶像差形变时补偿结构还会向被测面额外补偿其他像差类型, DM 上为同一种像差形变时两种补偿器所产生的额外像差类型相同。产生附加像差的原因为仿真中的被测面并不需要用到 DM 全口径的补偿, 因而圆形口径检测光入射至倾斜放置的 DM 后在其表面呈现椭圆光斑, 由于椭圆区域内 Zernike 各项正交性丢失所以导致 Zernike 在此区域拟合出现额外像差项: 像散主要引入离焦; 彗差主要引入倾斜和三叶草像差; 球差主要引入离焦、像散和二阶像散。

在实际中若被测表面仅需一种低阶像差补偿时(如像散面), 不能在两种结构中的 DM 上简单驱动一种像差, 需要 DM 产生另外的像差形变辅助性地抵消相应的额外像差。图 5 所示为优化两种结构中的

DM 表面形变去补偿被测面上 1λ 单一低阶像差(优化后系统剩余波差 $rms < 0.05\lambda$), 所得的 DM 最终表面像差分布情况, 图 5(a)~(e) 表示利用 ARCC 分别补偿 1λ 大小的 X 像散、 Y 像散、 X 彗差、 Y 彗差和球差所引起结构中 DM 表面的像差分布, 图 5(f)~(j) 表示利用 TSRC 分别补偿 1λ 大小的 X 像散、 Y 像散、 X 彗差、 Y 彗差和球差所引起结构中 DM 表面的像差分布, 可见无论使用 ARCC 还是 TSRC, 补偿被测面上单一的像散、彗差或球差均需要 DM 产生额外像差完成补偿。在此需注意对被测面 Y 像散的补偿只需要 DM 产生少量的额外像差(离焦), 就能完成补偿。另外, 图 6 所示为两种结构补偿 1λ 单一低阶像差所需的 DM 形变量(PV), 可以看出, 对于补偿同样的低阶像差, ARCC 所需的 DM 形变量要比 TSRC 中 DM 形变量小, 也就是 ARCC 中的 DM 能够用明显少于 TSRC 中 DM 的形变量去达到 TSRC 所能提供的补偿量, 这在一定程度上减缓了监测压力, 可进一步说明 ARCC 补偿低阶像差能力要优于 TSRC。

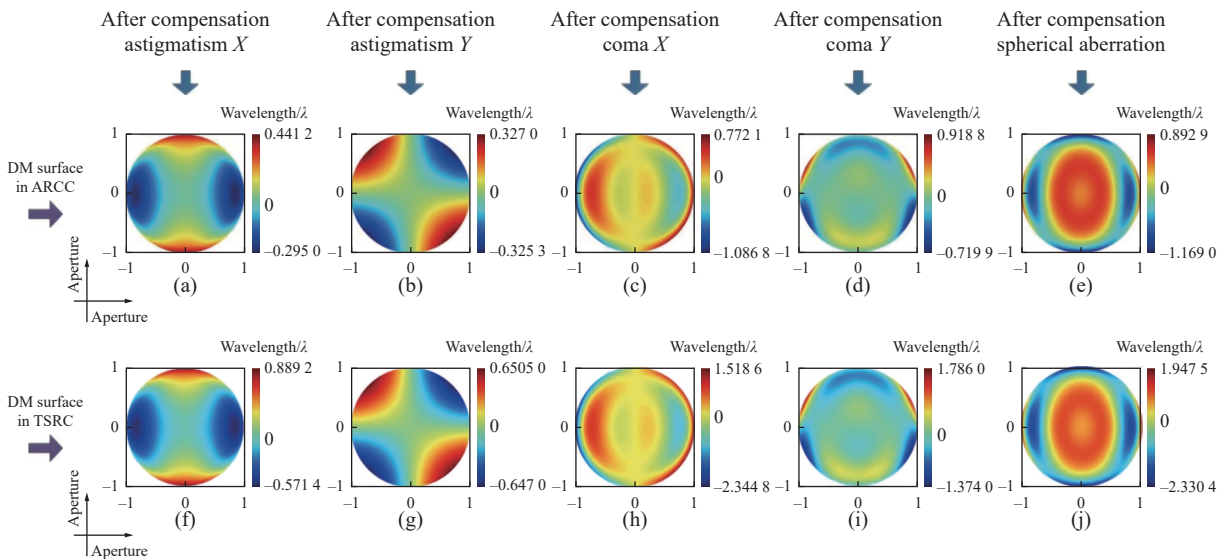


图 5 ARCC 和 TSRC 两种补偿结构中的 DM 面形(口径为归一化的)。(a)~(e) 分别为利用 ARCC 补偿大小均为 1λ 的 X 像散、 Y 像散、 X 彗差、 Y 彗差所需的 DM 像差分布; (f)~(j) 分别为利用 TSRC 补偿大小均为 1λ 的 X 像散、 Y 像散、 X 彗差、 Y 彗差和球差所需的 DM 的像差分布
Fig.5 DM surface figure in ARCC and TSRC, and the aperture is normalized. (a)~(e) DM surface figure in ARCC that can compensate astigmatism X , astigmatism Y , coma X , coma Y and spherical aberration with 1λ respectively; (f)~(j) DM surface figure in TSRC that can compensate astigmatism X , astigmatism Y , coma X , coma Y and spherical aberration with 1λ respectively

仿真实验对比和分析了两种补偿结构中相同的 DM 低阶像差形变所能带给被测面像差补偿量的大小, 得到 ARCC 补偿被测面像散和彗差的能力近似大

于传统结构 TSRC 的 1 倍, 补偿球差的能力也要显著大于 TSRC, 验证了 ARCC 对低阶像差的补偿优势。同时, 在被测面面形与检测波前相匹配的条件下进行

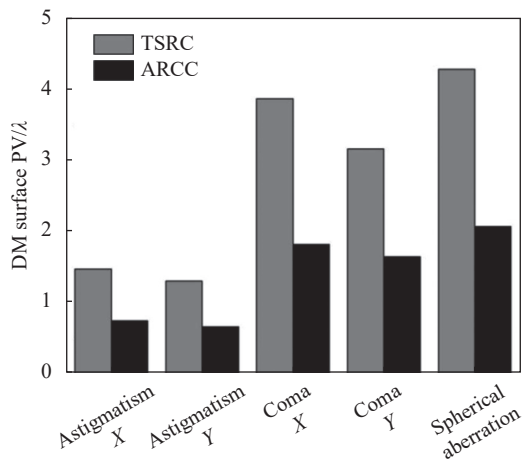


图 6 ARCC 与 TSRC 补偿被测面 1λ 低阶像差所需的 DM 形变量 (PV)

Fig.6 DM deformation(PV) required by ARCC and TSRC respectively when compensating for 1λ single aberration

了 ARCC 的低阶像差补偿特性分析, 由于检测光线与 DM 表面存在 45° 的入射角度, ARCC 中 DM 表面的单一低阶像差不会仅补偿圆形被测面一种像差类型, 还会引起额外的像差类型补偿, 如像散会引起离焦, 彗差引起调整型像差和三叶草像差, 球差会引起离焦和二阶像散等。论文中的 TSRC 结构同样如此。反过来, 若被测面仅需一种低阶像差补偿时, 进而还需 DM 驱动另外的像差类型辅助性地抵消相应的额外像差。最后进行了两种结构对于补偿同一低阶像差所需 DM 形变量的反向对比, 得出了 ARCC 中的 DM 形变量要比 TSRC 小, 即利用小的 DM 形变产生了大像差, 进一步验证了 ARCC 对低阶像差的补偿优势。

3 实验验证

为了验证 ARCC 在实际中对于低阶像差补偿的优势, 故进行了 ARCC 与传统补偿结构 TSRC 的像差补偿能力对比实验。实验利用相同的 DM 形变量分别通过 ARCC 与 TSRC 对被测自由曲面进行像差补偿, 两种补偿结构的补偿能力大小将会以干涉条纹的疏密程度反映, 补偿能力越大则产生的检测干涉条纹越稀疏; 反之密集, 甚至会出现条纹缺失区域。其中被测面选择 4 块低阶像差自由曲面 (表面反射率 $r \geq 97\%$), 1#自由曲面表面的主要像差类型为像散、2#表面主要分布彗差、3#表面主要分布球差, 4#为同时分布像散、彗差和球差的复合像差面, 并且每块自由曲面所需的补偿量已知。

根据第 2 节 ARCC 原理所述, 当 ARCC 中 HWP 的快轴方向旋转到与 p 偏振方向平行时, 补偿结构成为 TSRC 型, 因此搭建了如图 7 所示的 ARCC 实验系统, 通过转动 HWP 的快轴方向来获取 ARCC 和 TSRC 在相同的 DM 形变量下所得的检测干涉图。系统中所用线偏振激光器波长为 632.8 nm, DM 型号为 Alpao™ 97-25, DM 位姿精准调整已在之前的工作中^[17, 20]已经完成。4 块被测自由曲面 1#、2#、3#和 4#均为平面基底, 因此实验中不需要 PNO。由于仅需获取检测干涉图, 所以需要将 RP 的偏振方向调整为与 y 轴平行 (RP_y) 的状态来获取。

实验中当以平面波直接对 1#、2#、3#和 4#自由曲面进行补偿时, 所获取的检测干涉图皆存在条纹缺失

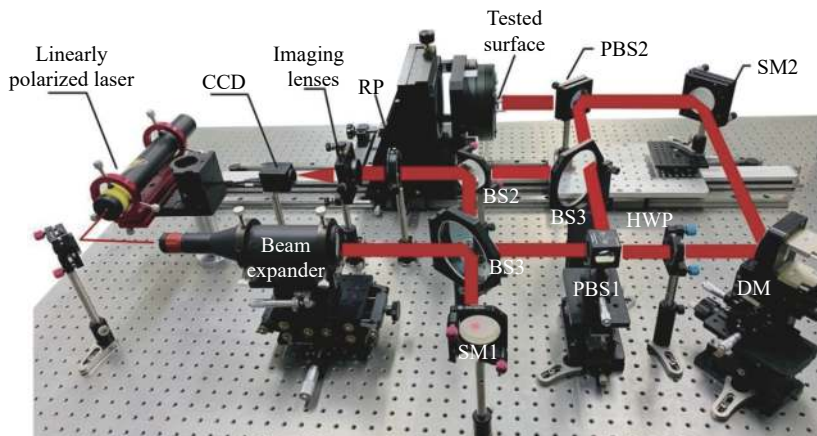


图 7 实验装置

Fig.7 Experiment device

区域,全局无法被 CCD 分辨,如图 8(a)、(d)、(g) 和 (j) 所示。对 ARCC 中的 DM 施加一定量像差形变进行补偿后,1#、2#和 3#自由曲面的检测干涉图已被 CCD 全局解析,4#自由曲面检测干涉图的条纹缺失区域已获得减小,如图 8(c)、(f)、(i) 和 (l) 所示。此时旋转 HWP 的快轴至与 p 偏振方向平行,ARCC 变为 TSRC 型补偿结构,并且 DM 表面的形变量保持不变,

结果为 1#、2#和 3#自由曲面的检测干涉图仍存在条纹缺失区域,如图 8(b)、(e) 和 (h) 所示,4#自由曲面所得检测干涉图(见图 8(k))明显要比在 ARCC 补偿下所得到的干涉条纹(见图 8(l))密集。可见实际中的 ARCC 同样具有比 TSRC 更大的补偿能力,证明了 ARCC 对低阶像差的补偿优势。

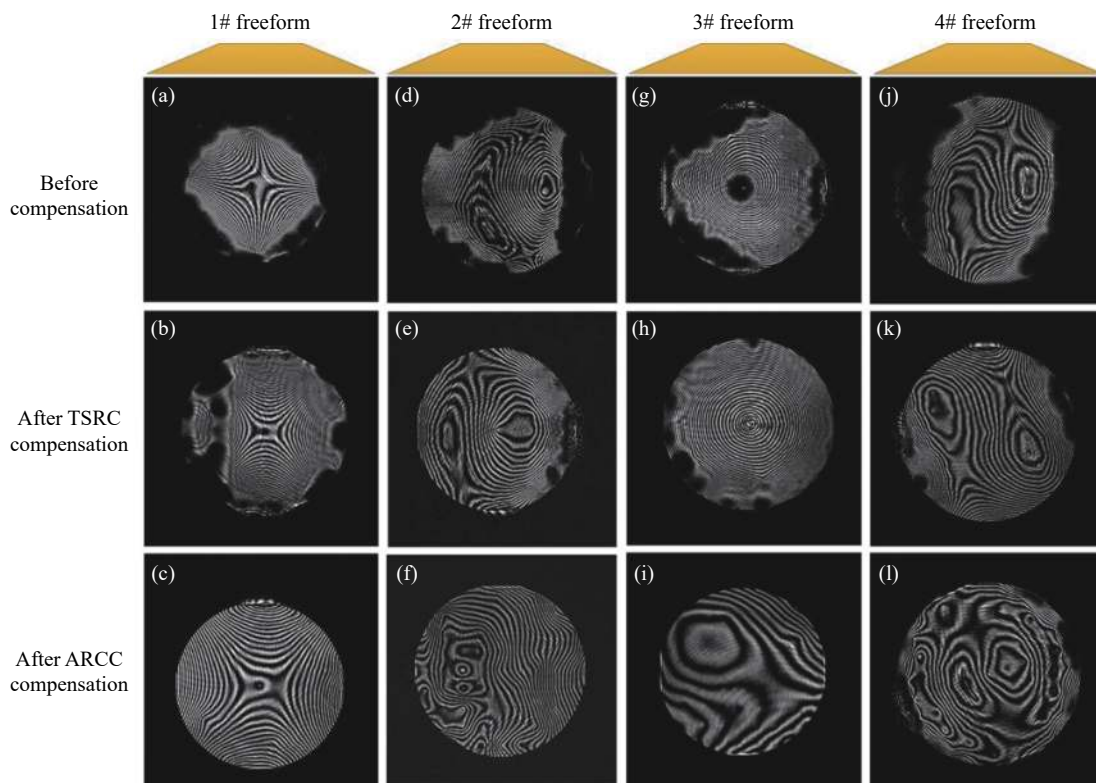


图 8 1#-4#自由曲面的检测干涉图。(a)、(d)、(g)、(j) 分别为 1#、2#、3#和 4#自由曲面在无任何像差补偿下的干涉图;(b)、(c) 分别为 TSRC 和 ARCC 使用相同的 DM 形变量对 1#自由曲面补偿后所得干涉图;(e)、(f) 分别为 TSRC 和 ARCC 使用相同的 DM 形变量对 2#自由曲面补偿后所得干涉图;(h)、(i) 分别为 TSRC 和 ARCC 使用相同的 DM 形变量对 3#自由曲面补偿后所得干涉图;(k)、(l) 分别为 TSRC 和 ARCC 使用相同的 DM 形变量对 4#自由曲面补偿后所得干涉图

Fig.8 Interferograms of 1#-4# freeform. (a), (d), (g), (j) are the initial interferograms when testing the 1#, 2#, 3# and 4# freeform surface without aberration compensation, respectively; (b), (c) are the interferograms of 1# freeform when compensated by TSRC and ARCC respectively under the same DM stroke; (e), (f) are the interferograms of 2# freeform when compensated by TSRC and ARCC respectively under the same DM stroke; (h), (i) are the interferograms of 3# freeform when compensated by TSRC and ARCC respectively under the same DM stroke; (k), (l) are the interferograms of 4# freeform when compensated by TSRC and ARCC respectively under the same DM stroke

4 结 论

针对基于 DM 的自适应自由曲面干涉仪所存在大像差补偿与 DM 形变监测范围的矛盾,并结合光学系统中自由曲面多为低阶像差面的现实问题,对自由

曲面检测中的自适应循环补偿器 ARCC 进行了重要的低阶像差补偿研究。仿真与实际实验均进行了 ARCC 和传统补偿器 TSRC 对于像散、彗差和球差补偿能力的对比,仿真结果表明 ARCC 补偿像散和彗差的能力约为 TSRC 的 2 倍,补偿球差的能力也显著大

于 TSRC。以及对于补偿相同的低阶像差, ARCC 所需的 DM 形变量 (PV) 更小。实际实验中的 ARCC 能够利用与 TSRC 相同的 DM 形变量, 使得被测自由曲面 (低阶像差面) 的干涉条纹全局可被解析或更加稀疏, 说明了 ARCC 提供了更大的像差补偿。因此仿真与实验充分验证了 ARCC 在低阶像差补偿方面的优势和可行性。同时总结了 ARCC 对于低阶像差类型补偿的规律, 即单一的 DM 表面低阶 Zernike 像差类型能够补偿被测面的多种像差类型以及补偿被测面的单一低阶 Zernike 像差时还需 DM 表面产生多种像差类型去实现。能够为实际检测提供具有理论依据的指导以及有助于基于更多次波前调制的自适应循环补偿结构设计。

参考文献:

- [1] Chang Lingying, Zhang Qiang, Qiu Yuehong, et al. Design of telecentric relay optical system with broadband and real entrance pupil [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210091. (in Chinese)
- [2] Jiang Tingting, Feng Huajun, Li Qi. Design on internal focusing optical system with zoom lens of freeform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200290. (in Chinese)
- [3] Gannon C, Liang R. Ray mapping with surface information for freeform illumination design [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9426-9434.
- [4] Xu Lingdi, Fang Anli, Yu Jianhai, et al. Ultrasonic-vibration assisted grinding of a zero-dour freeform optical mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2564-2570. (in Chinese)
- [5] Zhu Rihong, Sun Yue, Shen Hua. Progress and prospect of optical freeform surface measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001. (in Chinese)
- [6] Zhang Lei, Wu Jinling, Liu Renhu, et al. Research advances in adaptive interferometry for optical freeform surfaces [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 227-244. (in Chinese)
- [7] Wei Xiaohong, He Yuhang, Gao Bo, et al. Measurement of transmissive wavefront of long-focal length lens by computer-generated holography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3005-3011. (in Chinese)
- [8] Zhang Haidong, Wang Xiaokun, Xue Donglin, et al. Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154. (in Chinese)
- [9] Garbusi E, Pruss C, Osten W. Interferometer for precise and flexible asphere testing [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(24): 2973-2975.
- [10] Murphy P, Devries G, Fleig J, et al. Measurement of high-departure aspheric surfaces using subaperture stitching with variable null optics[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2009, 7426: 74260.
- [11] Xue S, Chen S, Tie G. Near-null interferometry using an aspheric null lens generating a broad range of variable spherical aberration for flexible test of aspheres [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31172-31189.
- [12] Chen S, Zhao C, Dai Y, et al. Reconfigurable optical null based on counter-rotating Zernike plates for test of aspheres [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1381-1386.
- [13] Huang L, Choi H, Zhao W, et al. Adaptive interferometric null testing for unknown freeform optics metrology [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5539-5542.
- [14] Fuerschbach K, Thompson K P, Rolland J P. Interferometric measurement of a concave, ϕ -polynomial, Zernike mirror [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 18-21.
- [15] Chaudhuri R, Papa J, Rolland J P. System design of a single-shot reconfigurable null test using a spatial light modulator for freeform metrology [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 2000-2003.
- [16] Xue S, Chen S, Tie G, et al. Flexible interferometric null testing for concave free-form surfaces using a hybrid refractive and diffractive variable null [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2294-2297.
- [17] Zhang L, Zhou S, Li D, et al. Pure adaptive interferometer for free form surfaces metrology [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 7888-7898.
- [18] Ma Huimin, Zhang Jinghui, Zhang Pengfei, et al. Simulation of turbulence aberration correction based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1738-1742. (in Chinese)
- [19] Zhang L, Zhang Y. Freeform surface interferometry with an adaptive ring-cavity compensator [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2020, 8: 025036.
- [20] Zhang L, Zhou S, Li J, et al. Model calibration by multi-null constraint for an optical freeform surface adaptive interferometer [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 726-734.