

自由曲面干涉仪中自适应零位补偿器间距标定

张磊^{1*}, 李东², 周胜¹, 李劲松¹, 俞本立¹

¹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;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 研究了自适应补偿器(ANC)中两大补偿器——可变形镜(DM)和部分补偿镜之间的轴向距离标定技术,提出了一种多零位约束方法,利用一块校准镜,通过 DM 形变实现不同位置的零位检测,从而构建多个测量方程用以限制误差耦合,实现 ANC 空间间距自标定。通过仿真和实验验证了该标定方法的高精度。该方法摒弃了外部直接测量手段,使得 ANC 和整体干涉仪的集成化成为可能。

关键词 测量; 自由曲面检测; 自适应干涉仪; 自适应零位补偿器; 间距标定

中图分类号 TQ171.65

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1104005

Spacing Calibration of Adaptive Null Compensator in Free Form Surface Interferometer

Zhang Lei^{1*}, Li Dong², Zhou Sheng¹, Li Jingsong¹, Yu Benli¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The axial spacing calibration between the two big compensators, the deformable mirror (DM) and the partial null optics in the adaptive null compensator (ANC), is investigated. A multi-null constraint method is proposed, in which the deformation of the DM is used to acquire the null measurements at different positions with the help of a calibrating mirror. Thus the multiple measurement equations are constructed to constrain the error coupling and the self-calibration of spacing distance in ANC is realized. The high efficiency of this method is verified by simulations and experiments. The direct measurement way is discarded in this method, which makes the integration between ANC and the whole interferometer possible.

Key words measurement; free form surface measurement; adaptive interferometer; adaptive null compensator; spacing calibration

OCIS codes 120.1088; 120.3930; 120.6650

1 引言

光学自由曲面元件因其表面自由度较大,可以针对性地平衡不同的轴上或轴外像差,同时能够满足现代光学系统高性能、轻量化和微型化的要求,逐渐成为现代光学研究领域和工业及商业领域的新宠^[1-3]。近年来,光学自由曲面面形计量技术得到了广泛的研究^[4],特别是非接触式计量技术,如相位偏

折术^[5-7]和干涉测量法^[8-10]等。相位偏折术的系统标定一直是其测量瓶颈^[7],而干涉测量法则凭借其在平面、球面乃至非球面检测领域的高精度优点,持续受到人们关注。特别是配合零位^[11-12]和非零位补偿器^[13-14]的干涉仪,在非球面检测中已经显现出巨大优势。然而,从非球面检测中累积的技术迁移到自由曲面检测时,研究者们不得不面对一个巨大的难题:非旋转对称像差的补偿。此时,非零位检测对

收稿日期: 2018-06-05; **修回日期:** 2018-07-06; **录用日期:** 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(61705002)、安徽省自然科学基金(1808085QF198)、中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题(CAS-KLAOT-KF201704)

* **E-mail:** optzl@ahu.edu.cn

于自由曲面来说变得异常艰难,因为在非零位检测中的被测自由曲面姿态误差一般很难去除^[9,15]。因此,人们开始转向零位检测方式,即必须设计一些特殊的补偿器以实现非旋转对称像差的零位补偿,例如计算全息图(CGH)^[16-17],而这种“一对一”零位检测使得干涉检测动态范围大打折扣。子孔径拼接^[18-21]检测方式能在一定程度上拓展动态范围,但目前很少用于自由曲面检测中。

基于上述研究现状,研究者希望能够兼顾动态范围和检测精度,追求在自由曲面干涉检测中实现大动态范围的零位检测。2004年,Pruss等^[22]将目光转向了一种自适应光学器件,即可变形反射镜(DM),将其薄膜式DM应用于非球面干涉检测中以实现不同的离焦补偿,为自由曲面的动态检测提供了思路。但是,在接下来的若干年里,该技术并未得到进一步的发展。主要是因为变形后的DM也成为了一块自由曲面,其表面的面形精度同样不能精确预知。因此,DM面形的实时监测成为亟待解决的问题。2014年,Fuerschbach等^[23]利用一块DM配合Offner补偿器,在一种特定的离轴结构中完成了 φ 多项式反射镜的零位检测。但是,其DM的形变是事先利用Zygo干涉仪进行测量的,从而丢失了实时性,而DM的不稳定性为最终的检测精度埋下了隐患。2016年,Huang等^[24]采用DM完成了一块未知自由曲面的整体轮廓检测,同时,利用相位偏折测量系统在线测量DM形变,综合二者结果实现未知自由曲面的整体轮廓测量。然而该技术依然受到相位偏折测量系统的系统标定精度的困扰。Zhang等^[25]提出一种自适应自由曲面干涉仪(AFI),利用偏振光路设计实现被测自由曲面和DM的同步实时测量,无须依赖其他外部辅助设备进行DM监测。在该干涉仪中,通过DM配合一块部分补偿器(PNO)组成自适应零位补偿器(ANC)实现被测自由曲面的大动态范围零位检测。然而,正是由于DM的弹性形变范围,AFI中的零位结构变得并不唯一。在AFI的检测臂,除去DM表面变形由干涉仪实时监控以外,DM和PNO之间的轴向距离和PNO与被测面之间的轴向距离之间相互耦合,使得单单依靠零位条纹进行系统建模的精度变得极低,除非预先标定其中一个参数。

本文研究了ANC中两大补偿器——DM和PNO之间的轴向距离标定技术,提出了一种多零位约束(MNC)方法,将一块校准镜置于ANC后,通过DM形变实现不同位置猫眼定位,即在干涉仪中多

个轴向位置实现零位检测,据此构建多个测量方程用以限制误差耦合,实现ANC空间间距自标定。通过仿真和实验,分析和验证了该标定方法的精度。值得注意的是,虽然通过直接测量的方法可以测定其空间间距,但是该空间间距并非直线距离,测量程序繁琐,更重要的是直接测量法不适用于集成化干涉仪的参数测量。因此,该自标定方法使得下一步的干涉仪仪器化成为可能。

2 AFI原理

AFI系统原理如图1所示,详细的阐述见参考文献^[25]。如图1(a)所示,干涉仪将准直光束送至自适应零位补偿器(ANC)中。经ANC提供像差补偿后,由被测自由曲面反射并重新返回ANC再次进行像差补偿,然后回到干涉仪中,作为被测波前。在此过程中,来自ANC中DM的第一次直接反射波前经过BS2后,一部分反射波前将直接返回到干涉仪中,作为DM监测波前。被测波前和DM监测波前同时与参考波前发生干涉,并分别成像于CCD2和CCD1中。CCD2将其所接收的干涉条纹经计算机处理后,为DM驱动器提供反馈,驱动DM形变实现动态像差补偿,直至CCD2接收到近似零条纹。而CCD1则实时接收DM形变所致的非零条纹,通过对该非零条纹的光线追迹,精密监测DM表面形变,进而将该DM表面形变和CCD2所接收的零位干涉图代入检测模型中,通过光线追迹得到被测自由曲面面形误差。可见,虽然被测自由曲面像差超过了干涉仪检测极限,但是通过ANC使得被测自由曲面的像差补偿分担到DM的两次反射和PNO透射补偿中,而干涉仪仅需要检测补偿后的零条纹和DM一次反射所致的非零位条纹,大大降低了干涉仪的检测压力,拓宽了检测范围。

ANC的工作原理主要通过偏振设计来实现。如图1(b)所示,来自BS1(90%透射率)的光束的p偏振光穿过PBS1和1/4波片后到达DM。经DM反射的p偏振光再次穿过1/4波片,偏振方向改变90°变为s光,全部由PBS1反射。反射的s偏振光束通过BS2(90%透射率)和PNO,到达被测自由曲面表面。由自由曲面反射的s偏振光束沿原路返回再次到达DM,经DM再次反射后到达PBS1,期间由于两次穿过1/4波片,偏振方向再次发生90°变化成为p光,从而全部透过PBS1返回干涉仪,作为被测光与参考光中的p光干涉,成像于CCD2。值得注意的是,干涉仪出射的p偏振光束第一次经过DM反射

后,到达 BS2 时的 s 光部分被其反射,经过一 1/2 波片后又变为 p 光,该 p 光进入干涉仪中,全部穿过

PBS2,与参考光中的 s 光在偏振片的光轴方向干涉,作为 DM 监测光记录 DM 形变,成像于 CCD1。

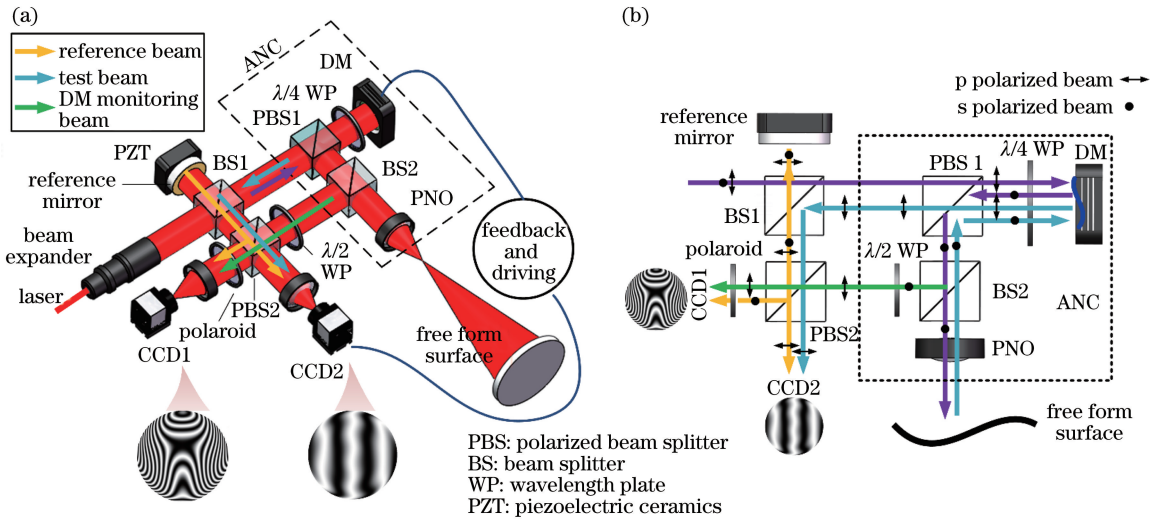


图 1 AFI 原理。(a) 系统布局;(b) ANC 光路偏振设计

Fig. 1 Principle of AFI. (a) System layout; (b) polarization design of optical path in ANC

3 ANC 轴向间距标定

如图 1 所示,ANC 主要由 DM 和 PNO 组成。通过偏振设计,经过 PNO 的透射和 DM 的两次反射补偿自由曲面像差。为了便于理解,将该过程转化为连续的正向波前像差补偿过程,如图 2(a) 所示。在自适应补偿中,DM 通过 CCD2 的反馈驱动实现自由曲面的零位检测。然而,由于 DM 表面变形(S_{DM})、DM 和 PNO 之间的轴向距离(d_{DP})、PNO 与被测面之间的轴向距离(d_{PS})之间的耦合,导致实

验中零位结构并不是唯一的。也就是说,不同的参数耦合会产生相同的零条纹,从而导致精确建模出现困难,使得最终光线追迹结果也将出现偏差。因此,这些参数的测定是精确建模的关键。实际实验中, S_{DM} 是由 CCD1 实时监测的,其位姿误差的校准可以在其未变形之前,作为标准反射平面,其表面均方根误差(RMS)小于 7 nm 时进行,该校准已在之前的工作中^[25]完成。但 d_{DP} 与 d_{PS} 之间的耦合则难以消除,除非预先标定其中一个参数。文中将系统参数 d_{DP} 作为标定对象。

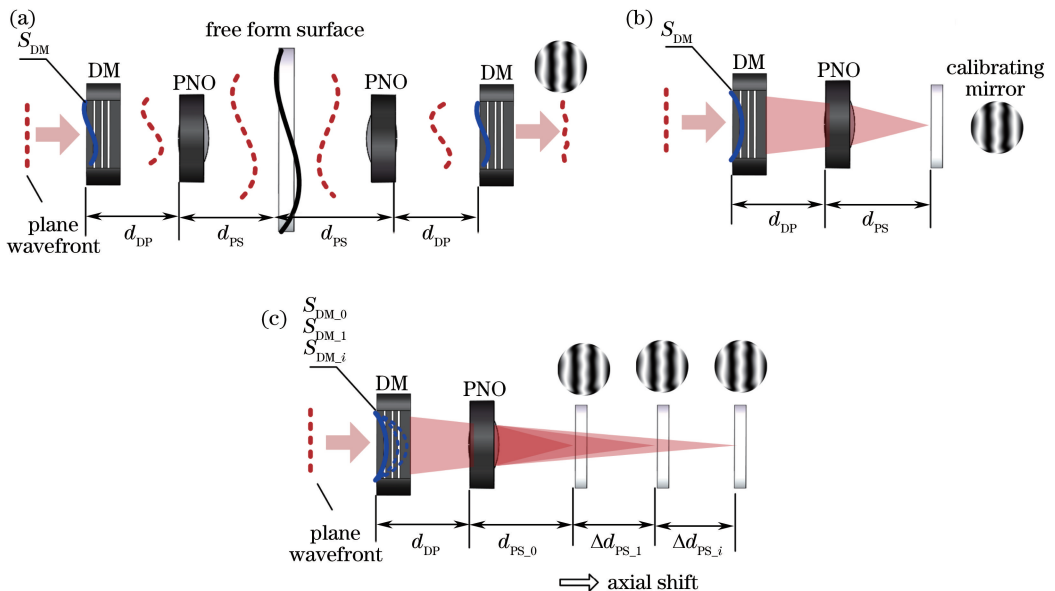


图 2 ANC 空间间距标定方法。(a) 正向波前传播过程;(b) 标定系统;(c) 标定方法

Fig. 2 Spacing calibration method of ANC. (a) Positive wave-front propagation; (b) calibration system; (c) calibration method

如图 2(b)所示,实际实验中采用一块标准的参考平面镜作为校准镜,用于辅助 d_{DP} 的标定。DM 将提供适度的离焦和球差,使得在 PNO 之后产生近似完美的焦点。猫眼处的光经校准镜反射后,通过 CCD2 接收到的零位干涉图,可以用来校准 PNO 的非轴向装调误差。在图 2(b)中,在 CCD2 中干涉图的零位波前像差 W 可以表示为

$$W = F(S_{DM}, d_{DP}, d_{PS}) = 0. \quad (1)$$

尽管 S_{DM} 由 CCD1 进行实时监测,但是 d_{DP} 与 d_{PS} 之间的耦合使得(1)式并不能提供关于二者的准确的解。因此,提出多零位约束(MNC)方法来提供更多的方程,以约束解空间。如同前面介绍的对自由曲面的检测一样,校准镜的零位位置也不唯一,而这一特性恰好有助于建立更多的零位测量方程。如图 2(c)所示,校准镜沿光轴方向进行若干轴向移位 $\Delta d_{PS_i} (i=1, 2, \dots, k)$, 每一个 Δd_{PS_i} 均由商用位移测量干涉仪(DMI)实时监控;同时,校准镜的每一个新位置都需要 DM 提供一个新的形变 S_{DM_i} 来重新恢复零位检测,而每一个 S_{DM_i} 均由 CCD1 实时监测。

因此,(1)式可扩展为方程组,即

$$\begin{cases} F(S_{DM_0}, d_{DP}, d_{PS_0}) = 0 \\ F(S_{DM_1}, d_{DP}, d_{PS_0} + \Delta d_{PS_1}) = 0 \\ \vdots \\ F(S_{DM_k}, d_{DP}, d_{PS_0} + \Delta d_{PS_k}) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 k 为测量次数。当然,上述非线性方程组并不能直接解出 d_{DP} , 必须依靠多重结构模型光纤追迹技术实现方程组的求解。因此在系统原始模型的基础上,根据测得的 Δd_{PS_i} 和 S_{DM_i} 增设其他模型,这些模型唯一的区别就在于 DM 形变和校准镜距离不同。当然,校准镜的初始距离 d_{PS_0} 是未知的,建模时只能依靠粗略测量值,但每个相对移动距离 Δd_{PS_i} 都是已知的。在这些多结构模型中,同样满足

$$\begin{cases} F(S'_{DM_0}, d'_{DP}, d'_{PS_0}) = 0 \\ F(S'_{DM_1}, d'_{DP}, d'_{PS_0} + \Delta d'_{PS_1}) = 0 \\ \vdots \\ F(S'_{DM_k}, d'_{DP}, d'_{PS_0} + \Delta d'_{PS_k}) = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 S'_{DM_i} 、 d'_{DP} 、 d'_{PS_0} 和 $\Delta d'_{PS_i}$ 是与实验中的参数相对应的模型参数。由于 Δd_{PS_i} 和 S_{DM_i} 都是实际测得的已知参数,则有

$$\begin{cases} S'_{DM_i} = S_{DM_i} \\ \Delta d'_{PS_i} = \Delta d_{PS_i} \end{cases}. \quad (4)$$

不断迭代地改变模型中的 d'_{DP} 和 d'_{PS_0} , 使得模

型中的所有结构的被测波前不断逼近零位波前。该过程主要通过建立基于多结构模型的逆向光线追迹优化函数实现,即

$$U = \sum_{i=1}^k [F(S'_{DM_i}, d'_{DP}, d'_{PS_0} + \Delta d'_{PS_i}) - F(S_{DM_i}, d_{DP}, d_{PS_0} + \Delta d_{PS_i})]^2 + \text{cons}(S_{DM_i}, \Delta d_{PS_i}) = X_{\min}, \quad (5)$$

式中 cons 表示 Δd_{PS_i} 和 S_{DM_i} 对解空间的约束,通过多方程解出 d_{DP} 与 d_{PS_0} 。当(5)式成立,则有

$$\begin{cases} d_{PS_0} = d'_{PS_0} \\ d_{DP} = d'_{DP} \end{cases}. \quad (6)$$

这意味着 DM 和 PNO 之间的轴向距离 d_{DP} 、PNO 与被校准镜之间的轴向距离 d_{PS_0} 被同时解算出,从而实现 ANC 器件轴向间距标定。实际实验和模型中采用标准 Zernike 多项式拟合各像差和表面面形(误差),其中表征失调像差的前 4 项 Zernike 多项式不进行优化。

4 仿 真

为了分析 d_{DP} 误差的影响和所提标定技术的有效性,在光线追迹软件 Zemax 中进行了仿真实验,如图 3(a)所示。在仿真实验中被测表面分别为球面、抛物面和双圆锥曲面,三个表面的非球面度依次增加。实际的 $d_{DP} = 350$ mm, 同样的表面面形误差被添加到三个表面。图 3(b)所示为由于 d_{DP} 误差而导致的表面面形误差重构结果的均方根偏差。每次测量都是在零位条件下进行的,而在 d_{DP} 存在误差的条件下,零位检测是由 d_{DP} 、 d_{PS} 和 S_{DM} 之间误差耦合实现的。很明显,检测的误差随着 d_{DP} 误差增加而增大,并且随着被测表面的非球面度增加而增加。因此,在自由曲面检测,尤其是大偏离度自由曲面检

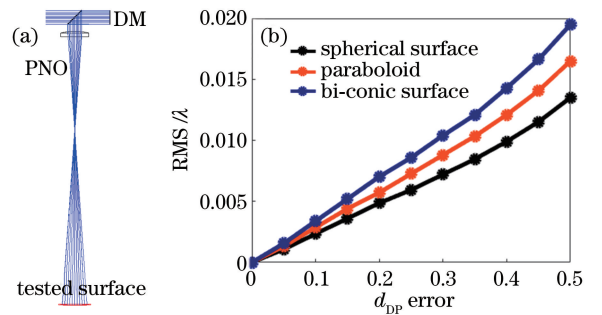


图 3 仿真实验。(a)建模;(b)基于 d_{DP} 偏差建模的最终测量结果的 RMS

Fig. 3 Simulation experiment. (a) Modelling; (b) RMS of final measurement results based on modelling of d_{DP} errors

测中, d_{DP} 的精确标定是最终检测精度的必要保证。

接下来对校准镜进行建模, 并采用所述的MNC方法进行 d_{DP} 的标定。针对不同情况下的标定结果进行了评估, 例如不同的移位距离 Δd_{PS_i} 、不同的测量次数 k 和不同的零条纹模式与条纹数。图 4 所示为在不同状态下的 MNC 标定结果。

图 4(a)所示为不同校准镜移动距离 Δd_{PS} 下的标定结果, 分别在 $\Delta d_{PS} = 200, 400, 600 \mu\text{m}$, 以及 $200 \sim 600 \mu\text{m}$ 间的随机距离情况下进行了标定, 标定结果误差浮动不超过 0.01 mm , 相对误差小于 0.003% 。可见校准镜的移动距离并不影响标定结果。图 4(b)描述了不同测量次数下的标定结果(每次移动距离相同, $\Delta d_{PS} = 200 \mu\text{m}$), 可见, 随着测量次数的增加标定精度逐渐上升, 当 $k > 3$ 标定结果趋于稳定。主要是由于测量次数越多, 对(2)式解空

间的约束越强, 从而越能得出精确的 d_{DP} 解。但是, 实际实验中测量次数的增加使得误差累积效应随之增强。因此, 为了平衡精度, 提取至少 3 次误差起伏小于 0.01 mm 的连续稳定结果作为可信数据, 取其平均作为标定终值。图 4(c)给出了不同模式的零位条纹对标定结果的影响。在每次校准镜移动后, 将产生不同模式的零位条纹(这里认为条纹数相同), 图 4(c)给出了在该状态下的一次标定结果 $d_{DP} = 350.002 \text{ mm}$ (10 次平移, 每次 $200 \mu\text{m}$), 相对标定误差小于 0.0006% 。当然每次校准镜移动后产生的零位条纹数也可能不同, 图 4(d)所示为三次不同的条纹数下的标定结果(10 次平移, 每次 $200 \mu\text{m}$)。三次标定误差均小于 0.003 mm , 相对误差小于 0.0006% 。由此可见, 零位条纹模式和条纹数对标定结果影响甚微。

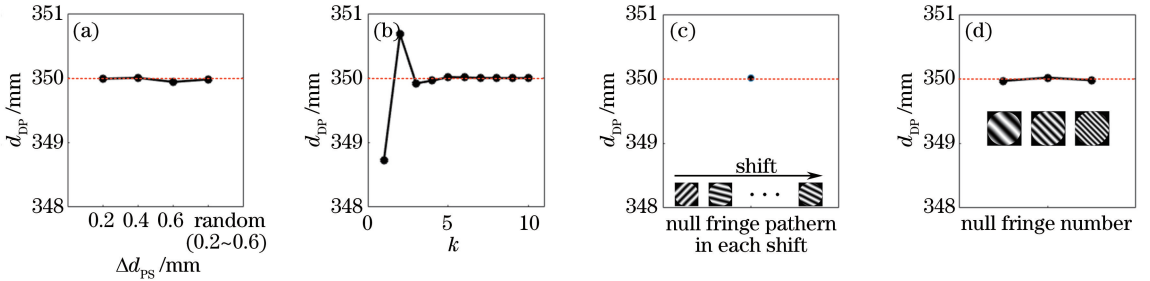


图 4 不同状态下 ANC 间距标定结果仿真。(a) 平移距离; (b) 测量次数; (c) 每次移动产生的零位条纹模式; (d) 零位条纹数目

Fig. 4 Simulation results of spacing calibration of ANC under different situations. (a) Shift distance; (b) measurement number; (c) null fringe pattern in each shift; (d) null fringe number

5 实验验证

实验系统布局如图 5 所示。激光器采用 Thorlabs 公司的 HNL008LB, 其波长为 632.8 nm 。表 1 和表 2 中分别列出了所使用的 DM 和 PNO 的参数。采用了 Renishaw DMI 对校准镜进行平移距

离测定, 使用的 DMI 测量精确度可达 $0.5 \mu\text{m}$ 。

表 1 DM 参数

Table 1 Parameters of DM

Parameters	Value
Model	Alpao™ DM88
Mode	Membrane
Aperture / mm	20
Actuators	88

表 2 PNO 参数

Table 2 Parameters of PNO

Parameters	Value
Material	BK-7
Radius / mm	88.23, 396.30
Aperture / mm	40
Thickness / mm	8

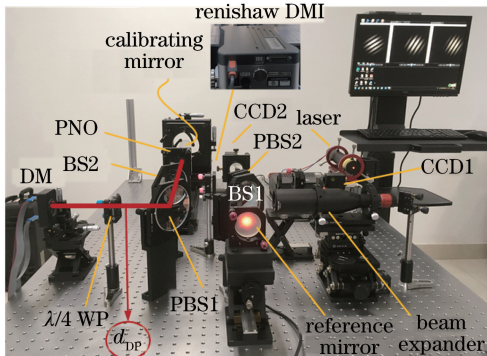


图 5 实验系统布局

Fig. 5 Experimental layout

实验标定时, 校准镜沿光轴平移 9 次位移可得到 10 个零位干涉图, 每一个零位干涉图中包含峰谷 (PV) 值小于 0.05λ 的离焦, 如图 6 所示。

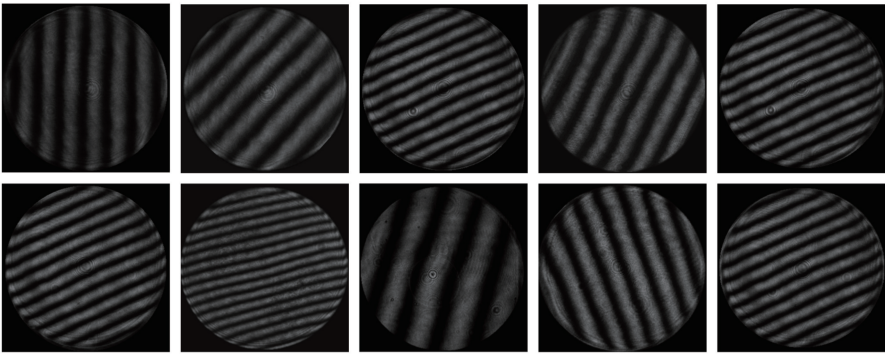


图 6 实验标定中所得零位干涉图

Fig. 6 Null fringes obtained by experimental calibration

图 7(a)所示为标定结果,随着参与标定的测量数增加,结果趋向于稳定。当这些连续值之间的偏差小于阈值时(这里设定为 0.02 mm),取 5 个稳定值得平均值,得到标定结果 $d_{DP} = 722.422$ mm。图 7(b)、(c)所示为另外两次重复性实验,两次标定实验分别在 $\Delta d_{PS,i} = 300 \mu\text{m}$ 和 $\Delta d_{PS,i} = 200 \sim$

300 μm (随机)的情况下完成,标定结果分别为 $d_{DP} = 722.441$ mm和 $d_{DP} = 722.436$ mm。三次实验展示了稳定的标定结果,标定值浮动不超过 0.003%,取三次重复性试验结果的平均值 $d_{DP} = 722.433$ mm作为最终标定结果。

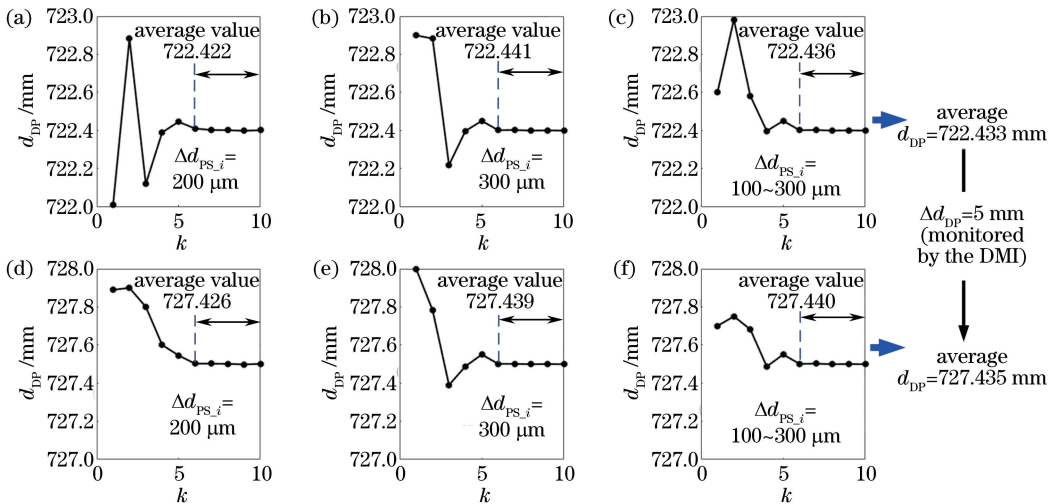


图 7 两组间距标定实验。(a)~(c)第 1 组实验;(d)~(f)第 2 组实验

Fig. 7 Spacing calibration in two groups of experiments. (a)~(c) First group of experiments; (d)~(f) second group of experiments

值得注意的是,在之前的工作中^[25]是利用激光跟踪仪对 d_{DP} 进行测量,进而根据测量值建模的。但是由于 d_{DP} 并非直线距离,因而测量过程较为繁琐,而且激光跟踪仪不适合后期集成化的 ANC 中 d_{DP} 的测量。采用相对测量验证的原理,在上述标定值 $d_{DP} = 722.433$ mm 的基础上,将 PNO 沿光轴平移 5.000 mm,即提供一个 $\Delta d_{DP} = 5.000$ mm,该移动距离同样由 DMI 精确测定。再次实施 MNC 标定方法,同样的三次重复性实验结果如图 7(d)~(f)所示,最终标定结果为 $d_{DP} = 727.435$ mm。而两次标定结果之差为 5.002 mm。

可见,与实验中由 DMI 测定的 $\Delta d_{DP} = 5.000$ mm 相比,误差仅为 0.002 mm。从而通过相对测量间接证明了 MNC 的标定精度。

在上述第二次标定结果下 ($d_{DP} = 727.435$ mm),对两块抛物面进行了测量。两块抛物面具有相同的标称参数,口径为 50 mm,非球面度约为 17 μm 。每块抛物面反射镜经过三次重复性实验测量,每次测量均在不同的零位位置进行,每次测量 d_{DP} 固定,沿轴向测量移动被测面,同时利用 DM 形变重新恢复零位测量。图 8(a)~(c)分别为第一块抛物面镜的面形误差三次重复性测量结果,

图 8(d) 为该抛物面的 Zygo 干涉仪测量结果。图 8(e)~(g) 分别为第二块抛物面镜的面形误差三次重复性测量结果, 图 8(h) 为该抛物面的 Zygo 干涉仪测量结果。表 3 列出了图 8(a)~(h) 所示表面

面形误差的 PV 值与 RMS 值。从图 8 和表 3 中可以看出, 各次测量结果均具有较高的测量精度, 从侧面证实了自适应补偿器间距的标定精度。

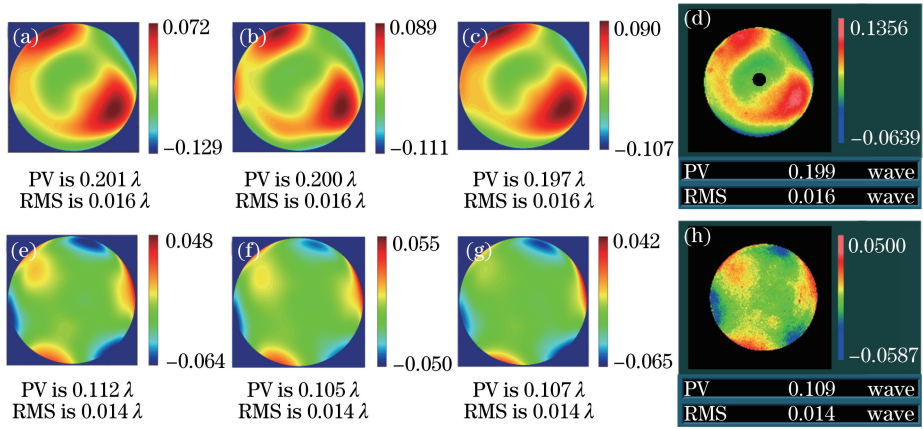


图 8 ANC 间距标定后的两块抛物面面形误差检测结果。(a)~(c) 第一块抛物面镜的三次独立检测结果;(d) 第一块抛物面镜的 Zygo 干涉仪检测结果;(e)~(g) 第二块抛物面镜的三次独立检测结果;(h) 第二块抛物面镜的 Zygo 干涉仪检测结果
Fig. 8 Test results of surface figure errors of two paraboloid mirrors after spacing calibration of ANC. (a)-(c) Three independent test results for first paraboloid mirror; (d) test result of first paraboloid mirror by Zygo interferometer; (e)-(g) three independent test results for second paraboloid mirror; (h) test result of second paraboloid mirror by Zygo interferometer

表 3 图 7 中抛物面镜检测结果 PV 与 RMS 值
Table 3 PV and RMS values of test results for paraboloid mirrors in Fig. 7

Method	First paraboloid mirror		Second paraboloid mirror	
	PV / λ	RMS / λ	PV / λ	RMS / λ
AFI	0.201	0.016	0.112	0.014
	0.200	0.016	0.105	0.014
	0.197	0.016	0.107	0.014
Zygo	0.199	0.016	0.109	0.014

6 结 论

基于一种新型的自由曲面自适应干涉仪, 研究了其中重要器件自适应补偿器的空间间距标定方法。由于自适应干涉仪中零位位置的不唯一性, 导致各参数相互耦合, 从而降低了建模精度。提出了一种多零位约束方法, 利用一块校准镜, 通过 DM 形变实现不同位置的零位检测, 从而构建多个测量方程用以限制误差耦合, 实现 ANC 空间间距自标定。通过仿真和实验分析和验证了该标定方法的精度。值得注意的是, 虽然通过直接测量的方法可以测定其空间间距, 但是由于该空间间距并非直线距离, 从而使得测量程序繁琐, 更重要的是直接测量法不适用于集成化干涉仪的参数测量。因此, 该自标

定方法使得下一步的干涉仪仪器化成为可能。

参 考 文 献

- [1] Tricard M, Bajuk D. Practical examples of freeform optics [C] // Freeform Optics. Optical Society of America, 2013: FT3B. 2.
- [2] Pang Z H, Fan X W, Ma Z, *et al.* Free-form optical elements corrected aberrations of optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522001. 庞志海, 樊学武, 马臻, 等. 自由曲面校正光学系统像差的研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522001.
- [3] Qian W, Yang B. Free-form reflector design for multi-direction collimated beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 012201. 钱伟, 杨波. 产生多向准直光束的自由曲面反光镜设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 012201.
- [4] Zhang L, Liu D, Shi T, *et al.* Optical free-form surfaces testing technologies [J]. Chinese Journal of Optics, 2017, 10(3): 283-299. 张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术 [J]. 中国光学, 2017, 10(3): 283-299.
- [5] Speck A, Zelzer B, Kannengießner M, *et al.* Inspection of freeform intraocular lens topography by phase measuring deflectometric methods [J]. Applied Optics, 2013, 52(18): 4279-4286.
- [6] Su P, Wang Y H, Burge J H, *et al.* Non-null full

- field X-ray mirror metrology using SCOTS: a reflection deflectometry approach [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12393-12406.
- [7] Wang D D, Zhang S, Wu R M, *et al.* Computer-aided high-accuracy testing of reflective surface with reverse Hartmann test[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19671-19681.
- [8] Ghim Y S, Rhee H G, Davies A, *et al.* 3D surface mapping of freeform optics using wavelength scanning lateral shearing interferometry [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5098-5105.
- [9] 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.
- [10] Li J, Shen H, Zhu R H, *et al.* Interferometry with flexible point source array for measuring complex freeform surface and its design algorithm[J]. *Optics Communications*, 2018, 417: 67-75.
- [11] Offner A. A null corrector for paraboloidal mirrors [J]. *Applied Optics*, 1963, 2(2): 153-155.
- [12] Wyant J C, Bennett V P. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12): 2833-2839.
- [13] Sullivan J J, Greivenkamp J E. Design of partial nulls for testing of fast aspheric surfaces [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6671: 66710W.
- [14] Liu D, Yang Y, Luo Y J, *et al.* Non-null interferometric aspheric testing with partial null lens and reverse optimization [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 74260: 74260.
- [15] Zhang L. Optical free-form surface subaperture stitching interferometry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
张磊. 光学自由曲面子孔径拼接干涉检测技术 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [16] Zhu D Y, Zhang X J. Design of high-precision phase computer-generated-hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0712002.
- 朱德燕, 张学军. 高精度相位型计算全息图的设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0712002.
- [17] Huang Y, Ma J, Zhu R H, *et al.* Investigation of measurement uncertainty of optical freeform surface based on computer-generated hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112007.
黄亚, 马骏, 朱日宏, 等. 基于计算全息的光学自由曲面测量不确定度分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1112007.
- [18] Hou X, Wu F, Yang L, *et al.* Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method [J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12890-12899.
- [19] Chen S Y, Li S Y, Dai Y F, *et al.* Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm [J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4760-4765.
- [20] Wang X, Wang L, Yin L, *et al.* Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(11): 645-647.
- [21] Zhang L, Liu D, Shi T, *et al.* Aspheric subaperture stitching based on system modeling [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19176-19188.
- [22] Pruss C, Tiziani H J. Dynamic null lens for aspheric testing using a membrane mirror [J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1/2/3): 15-19.
- [23] 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.
- [24] Huang L, Choi H, Zhao W C, *et al.* Adaptive interferometric null testing for unknown freeform optics metrology [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5539-5542.
- [25] Zhang L, Zhou S, Li D, *et al.* Pure adaptive interferometer for free form surfaces metrology [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 7888-7898.