

非球面非零位检测的逆向优化面形重构

师 途 刘 东* 张 磊 杨 甬 英 沈 亦 兵

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 非球面的非零位检测较其零位检测而言具有更强的通用性,但非零位检测偏离了零位条件,所产生的回程误差给被测非球面的面形重构带来一定困难。针对非球面非零位检测中回程误差的校正与面形重构问题,提出了基于检测系统理论建模的非球面面形逆向求解技术。该方法对实际检测系统进行理论建模,设置被测面面形为变量,以实际检测到的波前作为目标函数,通过拟合优化得到的结果进而重构出被测面面形。对逆向优化重构技术进行了仿真验证、实际检测和误差分析,实际测量口径为 101.0 mm 的凹抛物面反射镜,检测结果与标准零位法测得结果一致,峰谷值和均方根值误差分别优于 $\lambda/20$ 和 $\lambda/50$ 。

关键词 测量;面形检测;逆向优化;非零位系统;误差分析

中图分类号 TQ171.65 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0612007

Reverse Optimization Reconstruction Method for Aspheric Testing in a Nonnull Interferometer

Shi Tu Liu Dong* Zhang Lei Yang Yongying Shen Yibing

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Aspheric nonnull testing methods can achieve more flexible measurement of aspheres than the null testing ones. However, due to the violation of the null condition, retrace error exists and data reduction is difficult for this reason. In order to solve this problem, a reverse optimization data reduction approach based on theoretical simulation of the testing system is proposed. Simulation system is set according to the experimental apparatus. Surface figure errors are variables during the optimization procedure while the experimental wavefront is set to be the objective function. Aspheric surface figure error can be then reconstructed by fitting the solutions obtained from the optimization process. Simulation verification, experiment and error analysis are considered for this method. An experiment for testing a concave paraboloidal mirror with 101.0 mm clear aperture is taken. The result is very similar to that of null test (autocollimation method) with the peak-to-valley value and root-mean-square value errors less than $\lambda/20$ and $\lambda/50$, respectively.

Key words measurement; surface testing; reverse optimization; nonnull system; error analysis

OCIS codes 120.6650; 120.3180; 220.1250; 220.4840

1 引 言

非球面光学元件设计灵活,可以有效改善光学系统性能,但由于其检测难度较大,目前仍然无法像

平面和球面光学元件那样得到大规模的应用^[1]。干涉检测是非球面面形精密测量的常用方法,可分为零位检测和非零位检测两类。零位检测精度较高,

收稿日期: 2013-11-18; **收到修改稿日期**: 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(11275172)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013QNA5006)、现代光学仪器国家重点实验室创新基金(MOI201208)

作者简介: 师 途(1991—),女,博士研究生,主要从事光学非球面精密检测方面的研究。E-mail: shitu0209@163.com

导师简介: 杨甬英(1954—),女,教授,博士生导师,主要从事精密测试与计量技术、光电信息传感与纳米技术、气动光学及瞬态波前检测等方面的研究。E-mail: chuyyy@hzncnc.com

* **通信联系人**。E-mail: liudongopt@zju.edu.cn

但由于任意不同形状非球面的法线像差不同,需要设计专门的补偿器,例如 Dall 补偿器^[2]、Offner 补偿器^[3]和计算产生全息图^[4-6]等,故成本较高且难以实现快速、通用化测量。非零位检测方法则较灵活^[7-8],能够对一定范围内的非球面进行测量。然而,非零位检测偏离了零位条件,被测面的理论形状并非与参考面完全吻合,以检测反射型非球面为例,检测光线被非球面反射后不能沿原入射光路原路返回,造成检测值与真实值之间存在偏差,即产生回程误差^[9-12]。探测器检测到的干涉图为回程误差与被测面形误差的混叠,给面形重构带来一定困难。

传统面形重构通过从干涉图中直接减去非球面与参考面之间的几何偏差来获得被测面的面形信息^[13],但是非球面度较大时,回程误差不再近似等于几何偏差。刘东等^[10]将回程误差分为轴向误差和坐标径向剪切误差,对其分别进行校正后得到被测面的面形,在面形误差较小的情况下取得了良好的检测效果。Murphy 等^[9]从成像角度采用三阶像差理论对回程误差进行预测和校正,计算较复杂。Tian 等^[14]则提出理论参考波前法重构被测面面形,可实现一定误差范围内非球面面形较高精度的重构,但重构精度会随非球面度和面形误差的增大而降低。

本文提出一种基于检测系统理论建模的非球面面形逆向求解技术,称为逆向优化面形重构(ROR)法。在光线追迹软件中对实际搭建的非零位检测系统进行建模,被测非球面的初始形状为其理想值,以泽尼克多项式表征附加于被测面的面形误差,并设置相应系数为变量。将实际检测系统中解调出的波前作为目标函数对变量进行优化求解,通过拟合优化得到的结果进而重构出被测面的面形。本文介绍了基于泰曼-格林干涉仪的非球面非零位部分补偿干涉检测系统,详细阐述了逆向优化面形重构技术的基本原理,通过仿真实验验证 ROR 技术的可行性与面形重构精度,对非球面进行了实际检测并给出误差分析。

2 非球面非零位检测系统

基于泰曼-格林干涉仪的非球面非零位部分补偿干涉检测系统如图 1 所示^[15]。稳频激光器发出的光经过准直扩束系统后成为宽光束平行光,被分束镜分为反射光和透射光两路。为了消除分束镜 A 面对光线不必要的反射,在其上镀有多层增透膜;而分束镜 B 面则镀反射膜以保证适当的反射光能量。

被分束镜反射的光作为系统参考光,传播至参考平面镜后沿原路返回;分束镜的透射光为检测光,经过部分补偿镜入射到被测非球面表面后返回。返回的光线携带被测面的面形信息再次透过部分补偿镜,与参考光相遇产生干涉,全孔径干涉图由成像系统成像于 CCD 探测器的像面位置。针对被测面选用合适的部分补偿镜,沿光轴方向改变非球面的位置,可以控制像面处波前斜率处于探测器可分辨范围内。压电陶瓷(PZT)控制参考镜沿光轴方向产生微小位移,实现对探测器检测波前的相位调制从而获得多幅移相干涉图。

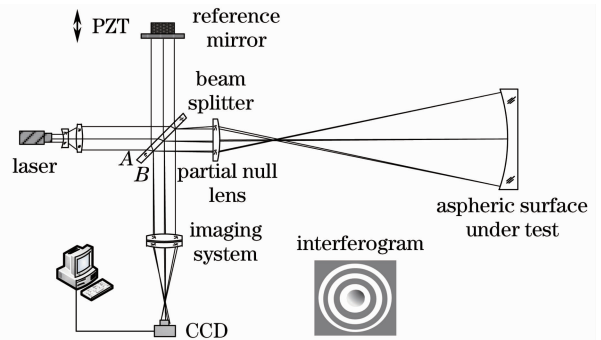


图 1 非球面非零位部分补偿干涉检测系统

Fig. 1 Partial compensating nonnull interferometric aspheric testing system

部分补偿镜(PNL)是实现非球面非零位检测的关键元件。传统零位补偿检测采用零位补偿器完全补偿非球面的法线像差,任意一个形状不同的非球面都需要有特定的补偿器,不具备通用性。部分补偿镜^[7,16]则不同,PNL 仅补偿理想非球面的大部分法线像差,保证由非球面反射回来的波前斜率处于探测器可分辨范围内即可。因此,单个部分补偿镜可以实现对一定形状范围内所有非球面的非零位补偿,补偿能力得到很大提升。当部分补偿镜系列化后,就可以实现非球面的通用化测量。此外,部分补偿镜的结构简单,设计和加工也相对容易^[17]。

3 ROR 基本原理

在非零位干涉仪中,探测器检测到的波前为被测非球面形状、系统结构参数、系统调整误差、激光光源性能及外界环境干扰等多种因素的函数,可表示为

$$W_{\text{det}} = f(\mathbf{X}_{\text{asp}}, \mathbf{X}_{\text{system}}, \epsilon, O), \quad (1)$$

式中 $\mathbf{X}_{\text{asp}} = [W_{\text{asp}}, c_0, k, a_i]^T$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 表示被测非球面的形状, W_{asp} 、 c_0 、 k 和 a_i 分别表示被测面面形、非球面顶点曲率、圆锥常数和高次项系数。

X_{system} 表示系统结构参数, ϵ 和 O 分别为系统调整误差和其他对探测波前造成影响的因素。通常情况下, 各元件经过精密加工与装调且检测系统整体调整完成后, 系统结构参数 X_{system} 为确定值, 系统调整误差 ϵ 可以被控制在很小的范围内, 在恒温超净室中环境干扰等影响 O 可近似忽略, 此时探测器像面处的波前分布 W_{det} 主要受到非球面形状 X_{asp} 的影响。对某一给定被测非球面, k 和 a_i 已知, c_0 通过精密测量得到, 则 W_{det} 简化为面形误差 W_{asp} 的函数

$$W_{\text{det}} \approx g(W_{\text{asp}}). \quad (2)$$

由探测器所得 W_{det} 求取 g 的反函数, 即可重构出面形误差 W_{asp} 为

$$W_{\text{asp}} = g^{-1}(W_{\text{det}}). \quad (3)$$

然而, 非零位检测中存在不可预知的回程误差, 检测波前与面形误差之间的函数关系难以确定, 更无从求取反函数的准确表达。因此, 为避开反函数求解问题, 直接在(2)式的基础上, 根据检测系统理论建模的光线追迹和迭代优化方法, 直接以被测面的面形误差为变量, 提出逆向优化面形重构技术。以检测旋转对称非球面元件为例, 其数学表达式可写为

$$z = \frac{c_0 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c_0^2 r^2}} + \sum_{j=1}^M a_{2j} r^{2j} + W_{\text{asp}}, \quad (4)$$

式中等式右边前两项之和表示高次非球面的理论形状, r 为径向坐标。一般来说, 光学元件经过精密抛光后, 其面形变化连续、平缓, 通过干涉仪检测所得面形误差频率主要集中在中低频。因此, 非球面的实际面形误差可以用有限项标准泽尼克圆形多项式的线性组合来表征, 其为

$$W_{\text{asp}} \approx \sum_{i=1}^n b_i Z_i(\rho, \theta), \quad (5)$$

式中 b_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为相应泽尼克多项式 Z_i 的系数, 求得 b_i 即可重构出被测非球面的面形误差。

由(2)式, 系统调整完成后, 被测面的面形误差 W_{asp} 决定了实际检测波前 W_{det} , 而计算波前分布行之有效的方法为光线追迹。因此, 在光线追迹软件中按实际非零位检测系统的结构参数进行建模, 其中被测面按不存在面形误差 ($W'_{\text{asp}} = 0$) 的理论形状建模, 进行光线追迹得到此时像面处理论波前为 W'_{det} 。在建模的被测非球面理论形状上附加以泽尼克多项式表示的可变面形误差 $W_{\text{asp_temp}}$, 设置泽尼克多项式的相应系数 b_{i_temp} 为变量。不断优化可变面形误差 $W_{\text{asp_temp}}$ 的系数变量 b_{i_temp} , 当模型中像面波

前 $W_{\text{det_temp}}$ 与实际检测到的波前 W_{det} 相同时, 认为此时可变面形 $W_{\text{asp_temp}}$ 与实际被测非球面的面形误差 W_{asp} 相同。该过程示意图如图 2 所示。

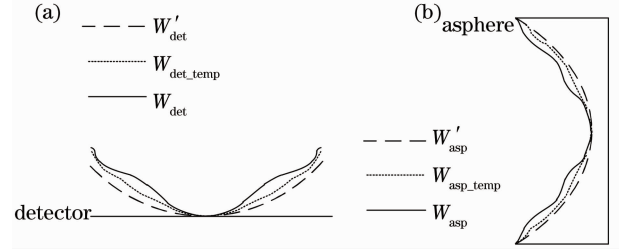


图 2 逆向优化面形重构过程。(a) 建模估计检测波前逼近实际波前; (b) 建模优化面形误差逼近被测非球面的实际面形误差

Fig. 2 Procedure of figure error reverse optimization reconstruction. (a) Simulated wavefront approaches to the real one; (b) optimized figure error approaches to the real one

逆向优化过程的优化目标函数可以表示为

$$U(b_{i_temp}) = \{ [W_{\text{det}} - f(W_{\text{asp_temp}})]^2 + c_{\text{cons}} \} = [(W_{\text{det}} - W_{\text{det_temp}})^2 + c_{\text{cons}}], \quad (6)$$

式中平方项表示建模中通过优化不断改变的像面估计波前 $W_{\text{det_temp}}$ 与实际检测波前 W_{det} 之间的偏离, c_{cons} 为附加约束, 用以约束解空间。最终优化所得非球面的可变面形误差泽尼克系数 b_{i_temp} 应使目标函数具有最小值, 为

$$b_{i_temp} = \operatorname{argmin} [(W_{\text{det}} - W_{\text{det_temp}})^2 + c_{\text{cons}}]. \quad (7)$$

基于理论建模的非球面非零位检测逆向优化面形重构流程如图 3 所示。基本过程为: 1) 精确调整非球面非零位检测系统, 采集移相干涉图, 解调得到实际检测中探测器处的波前 W_{det} ; 2) 根据实际系统的结构参数在光线追迹软件中建模, 被测面初始值设置为其理论形状并附加以 n 项泽尼克多项式表示的可变面形, 设相应系数 b_{i_temp} 为变量, 初始值赋零进行优化; 3) 对建模系统进行光线追迹, 得到探测器像面处的波前分布 $W_{\text{det_temp}}^k$, k 表示迭代次数, 经过 k 轮优化得到可变非球面面形为 $W_{\text{asp_temp}}^k$; 4) 将第 k 次光线追迹得到的波前 $W_{\text{det_temp}}^k$ 与实际检测得到的波前 W_{det} 代入优化目标函数 $U(b_{i_temp})$ 得到 $U^{(k)}(b_{i_temp})$, 若满足 $U^{(k)}(b_{i_temp}) < \epsilon$ (ϵ 为设定好的一个极小量), 则目标解 $X = [b_{1_temp}, b_{2_temp}, \dots, b_{n_temp}]$ 满足要求, 将其作为所求非球面面形的泽尼克多项式系数, 停止迭代优化; 否则重复步骤 3)。将最终得到的目标解进行泽尼克多项式拟合即可重构出被测非球面的面形误差 W_{asp} 。

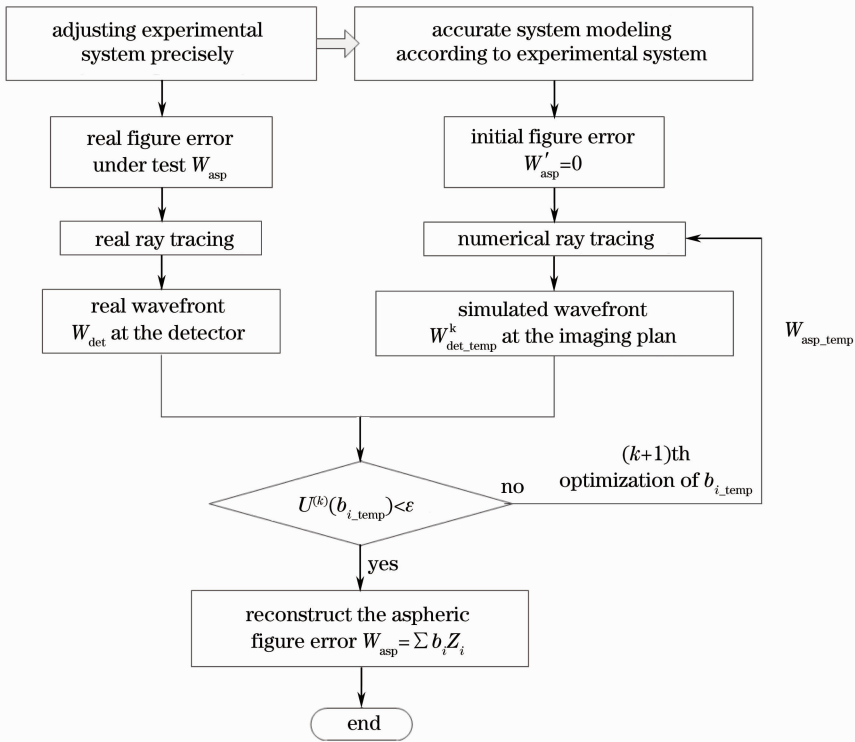


图 3 非球面非零位检测 ROR 面形重构过程

Fig. 3 Procedure of aspheric figure error reconstruction with ROR method in nonnull interferometric testing

4 ROR 仿真与实验结果

利用光学追迹软件仿真实验验证 ROR 方法,并搭建实验系统对一凹抛物面反射型非球面镜进行检测,仿真和实际实验均使用 632.8 nm 波长的激光作光源。仿真中所用非球面的理论形状参数与实际被测非球面相同,其通光口径为 101.0 mm,顶点曲率半径为 240.0 mm。对该非球面进行补偿的部分补偿镜是一片口径 45 mm 的正透镜,前后表面的曲率半径分别为 $r_1 = 89.148$ mm 和 $r_2 = -50.678$ mm,厚度为 10.65 mm,玻璃折射率为 1.516780。

4.1 ROR 仿真实验

利用光线追迹软件对图 1 所示光路建模,将非球面与部分补偿镜之间的距离调整为 301.810 mm (实际检测时可通过精密导轨定位非球面的位置),像面处得到清晰可辨的干涉条纹如图 4(a) 所示。在非球面理论形状上附加由 37 项标准泽尼克圆形多项式表示的面形误差,如图 5(a) 所示,面形误差峰谷(PV)值与均方根(RMS)值分别为 0.4840λ 和 0.0857λ ,此时像面处的干涉图如 4(b) 所示。

以附加面形时像面处的波前为目标函数,将面形 37 项泽尼克多项式系数设为变量,赋初值为 0 进行优化。经过两轮优化(约 15 s)后重构出非球面的

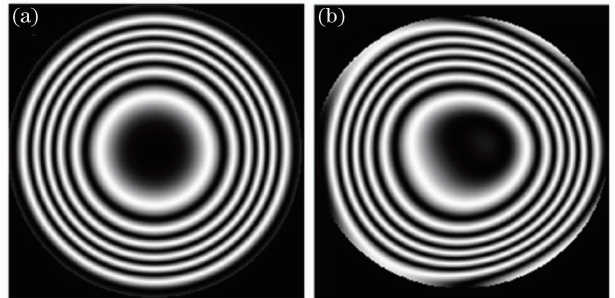


图 4 仿真所得像面干涉图。(a)非球面不存在面形误差; (b)非球面附加面形误差后

Fig. 4 Simulated interferograms at the imaging plane. (a) Theoretical aspheric shape without figure error; (b) figure error added to the theoretical aspheric surface

面形误差如图 5(b) 所示,重构面形的 PV 值和 RMS 值分别为 0.4840λ 和 0.0857λ 。重构误差如图 5(c) 所示,面形 PV 值和 RMS 值的重构误差分别为 $2.81 \times 10^{-5}\lambda$ 和 $5.91 \times 10^{-6}\lambda$,重构精度远远优于 $\lambda/1000$ 。原始面形和重构面形的 37 项泽尼克多项式系数以及系数重构误差如图 5(d) 所示。

延长优化时间,经过 10 轮优化(约 10 min)后,得到的面形泽尼克多项式矢高系数与附加的原始系数几乎一致,重构误差可达到零。仿真结果表明,

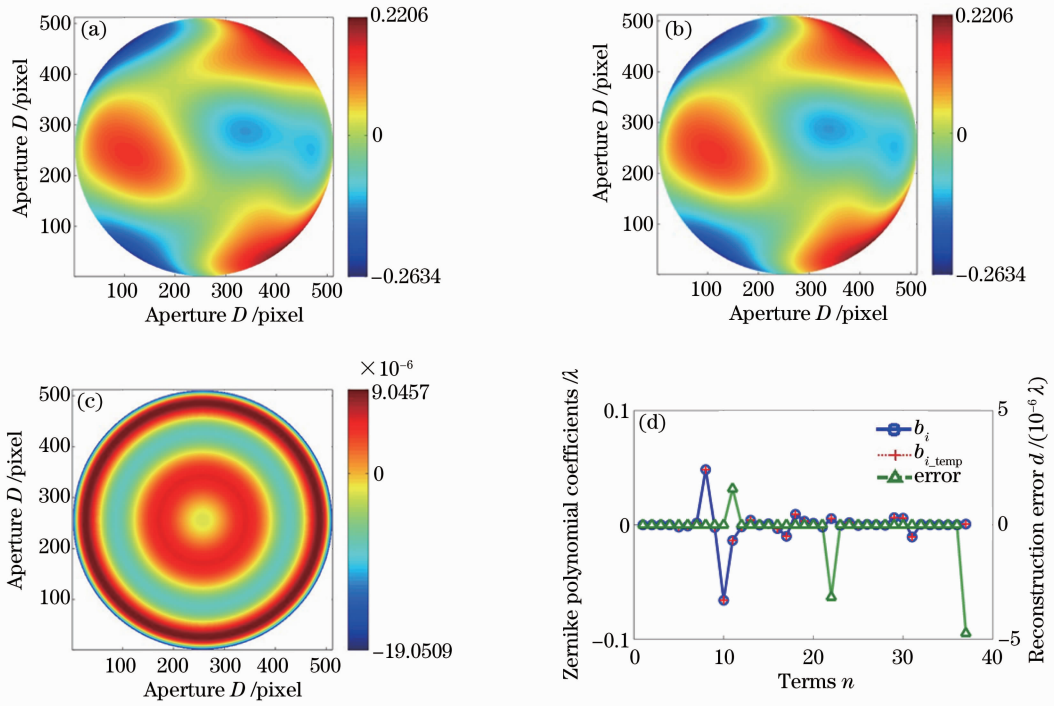


图 5 ROR 仿真验证。(a)原始附加面形；(b)ROR 重构面形；(c)面形重构误差；(d)原始面形、
重构面形和重构误差的 Zernike 多项式系数

Fig. 5 Simulated confirmation of ROR. (a) Initial figure error map; (b) reconstructed figure error map with ROR method; (c) reconstructed error map; (d) Zernike polynomial coefficients of initial figure error, reconstructed figure error and reconstruction error

ROR 技术具有很高的面形重构精度与准确度。当然,这是在系统精确建模的情况下实现的重构精度。如果系统建模不够准确,即存在建模误差,则面形重构精度将随建模误差的增大而降低,将无法达到如此高的重构精度。

4.2 ROR 实验结果

搭建图 1 所示的实验系统对 4.1 节中的凹抛物面反射镜进行测量和面形重构。根据仿真建模,利

用干涉方法和精密导轨在实际系统中将被测非球面定位于距离部分补偿镜 301.810 mm 的位置^[18],经仔细调整后采集多幅干涉图,其中一幅如图 6(a)所示。解调这些干涉图得到实际检测系统中探测器处的波前相位分布如图 6(b)所示。在光线追迹软件中,以非球面理论形状建模得到的像面理论干涉图如图 6(c)所示。

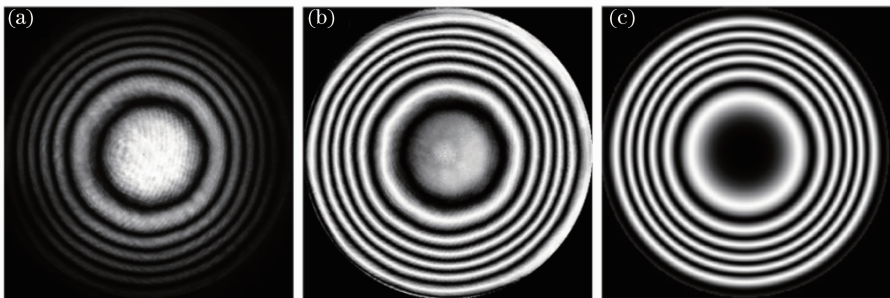


图 6 实际检测波前与模型理论波前。(a)实际干涉图；(b)实际干涉图解调得到的波前；(c)软件建模所得理论波前
Fig. 6 Real wavefront and simulated one. (a) One of the real interferograms; (b) wavefront demodulated from the detected interferograms; (c) theoretical wavefront in simulation

将实际检测到的波前作为目标函数,以 37 项泽尼克多项式表示非球面的面形,将多项式系数设为优化变量。实际上,泽尼克多项式的前四项并不真

实反映非球面的面形误差^[19],因此在光线追迹软件中仅将泽尼克多项式第四项以后的系数设为变量进行优化,直到光线追迹获得的像面波前与目标函数

一致。图 7(a)是由逆向优化得到的非球面面形 37 项泽尼克系数拟合重构的被测非球面面形误差二维分布,图 7(b)为其三维分布,重构面形的 PV 值和 RMS 值分别为 0.3088λ 和 0.0465λ 。

作为对照,利用 Zygo 公司干涉仪采用无像差

点法对同一块非球面进行测量,检测过程中用到的平面辅助反射镜面形 PV 值优于 $\lambda/20$ 。该方法测得非球面面形误差 PV 值和 RMS 值分别为 0.272λ 和 0.035λ ,面形误差的二维和三维分布如图 8 所示。

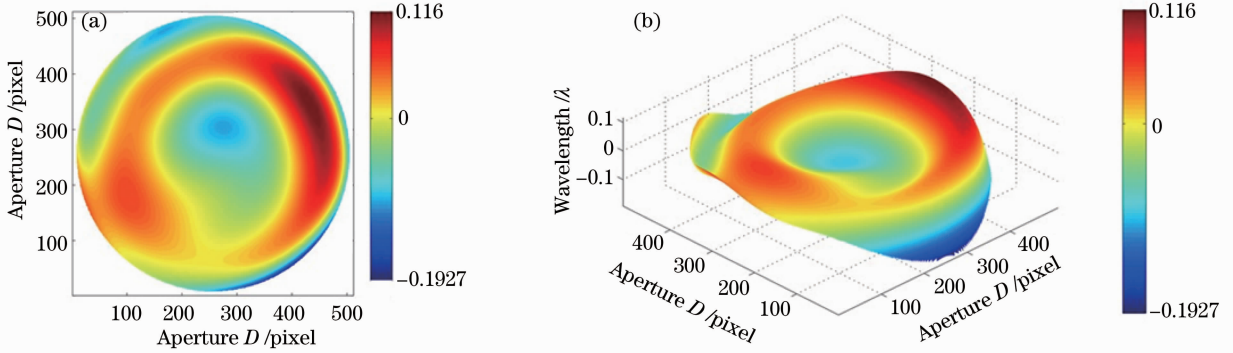


图 7 ROR 面形重构结果。(a)重构面形二维分布;(b)重构面形三维分布

Fig. 7 Reconstructed figure error obtained with ROR method. (a) Two dimensional map of the reconstructed figure error; (b) three dimensional map of Fig. 7(a)

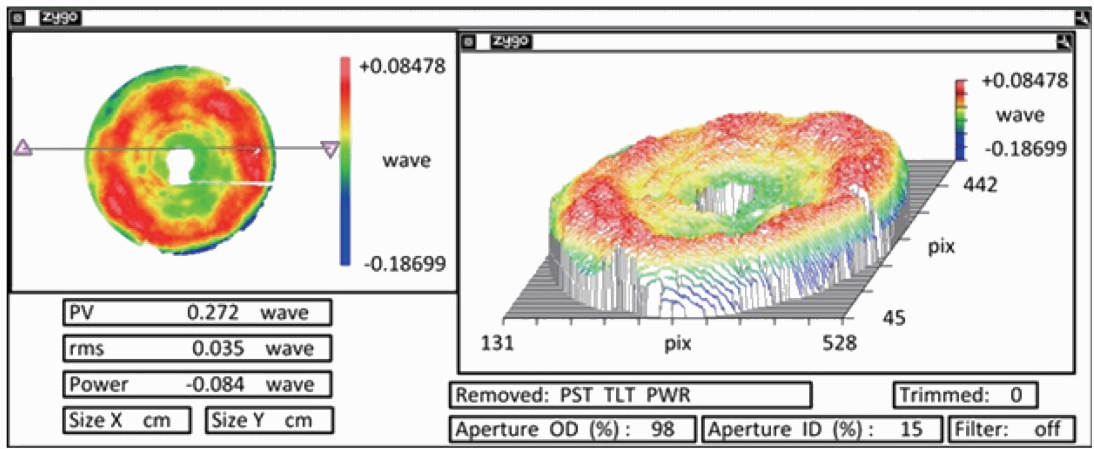


图 8 Zygo 干涉仪无像差点法测得的非球面面形误差二维和三维分布

Fig. 8 Two dimensional and three dimensional figure error map of the same aspheric tested with the autocollimation method

对比两种检测方法得到的结果可以看出,非零位检测逆向优化重构技术所得面形与零位检测得到的面形分布基本一致,测量结果 PV 值和 RMS 值之间的偏差分别小于 $\lambda/20$ 和 $\lambda/50$,ROR 技术具有较高的测量精度。由于很多因素都会影响作为目标函数的像面波前的分布,如环境干扰、干涉图相位解调时有效孔径的选择、检测系统的调整误差等,因此非零位 ROR 重构面形与无像差点法测得面形之间的差异仅作为改善面形重构方法的一种指导。

5 误差分析

ROR 技术的实现以精确的检测系统理论建模

为基础,要求理论模型与实际检测系统一致。建模误差较大时无法通过仿真模型获得准确的理论波前,以此为基础得到的面形将与真实面形之间存在较大偏差。

建模误差主要由实际检测系统中被测非球面和部分补偿镜的调整误差以及对非球面和部分补偿镜自身参数的不准确建模造成。非球面的调整误差包括被测面的倾斜、偏心和轴向位置误差。其中,非球面倾斜与偏心会向检测波前引入倾斜波像差和慧差^[14,20]。对于经过精密调整的检测系统,非球面的倾斜和偏心误差可以分别控制在 $10''$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 以内,引入的慧差非常微弱。非球面的轴向位置误差

指被测面与部分补偿镜之间相对距离的实际值与建模值之间的偏差^[18],将主要造成检测波前的一阶离焦波像差^[14],顶点曲率建模值与真实值不符也主要引入该项像差。为了对一阶离焦波像差进行校正,可以将非球面与部分补偿镜之间的相对距离 d_{pm} 和非球面顶点曲率 c_0 同时设为优化变量。被测面的数值孔径较大时,要获得更高精度的测量结果,则需要对高阶像差进行进一步的分析和校正。部分补偿镜在检测中起到关键性作用,对其精确建模直接影响到面形重构精度,其建模误差主要指结构参数误差和调整误差。其中,结构参数包括面形误差、折射率误差、表面曲率半径误差和厚度误差等。由于组成部分补偿镜的各表面均为平面或球面,其面形误差可以达到PV值小于 $\lambda/20$,大部分情况下对检测波前造成的影响可忽略不计。部分补偿镜的玻璃折射率、表面曲率半径和厚度等则可以通过测量得到,目前的检测精度可分别达到 $\pm 10^{-5}$ 、标准半径的 $\pm 0.005\%$ 和 $\pm 5\ \mu\text{m}$,向波前引入的误差量小于 $\lambda/1000$ 。经过精密对准后,部分补偿镜的倾斜和偏心调整误差可控制在 $10''$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 以内,引入极小的慧差和波前倾斜,对像面波前影响小于 $\lambda/100$ 。

干涉仪的系统误差会对检测结果造成微小影响,用标准镜代替部分补偿镜和被测非球面,利用误差存储的方法可对系统误差进行校正^[21]。而多次测量取平均则可以降低检测过程中的随机误差。此外,ROR重构中,优化算法采用阻尼最小二乘法的偏差函数线性项近似计算,以及采用有限项泽尼克多项式表示非球面的面形等,都会带来算法误差。大量实验表明,选取前37项泽尼克多项式拟合面形,ROR算法对重构面形精度的影响低于 $\lambda/100$ 。

根据以上分析,建模误差和系统误差可以分别通过系统精确调整、元件精密测量、一阶波像差校正以及误差存储等方法得到校正,ROR技术理论上具有较高的面形重构精度。这些分析均以检测系统的精确调整为前提,否则过大的调整误差将向检测波前引入复杂、高阶甚至互相耦合的波像差,使误差分析和校正变得困难。

6 结 论

针对非球面非零位检测中回程误差难以准确区分的问题,提出ROR技术,巧妙地避开了回程误差求解的难题。分析了该方法的基本原理和重构算法,基于理论建模和光线追迹的面形逆向优化方法对回程误差的校正比一般算法更准确,理论上可以

实现大非球面度、大面形误差非球面较准确的面形重构,具有很强的通用性。讨论了基于泰曼-格林干涉仪的非零位部分补偿检测系统和ROR过程中的误差及其对重构面形的影响,仿真验证了该项技术的正确性,具有很高的重构精度,并结合实验对一块凹抛物面反射镜进行测量。实验结果表明非零位ROR技术重构精度较高,重构面形与无像差点法测得的面形分布一致,PV值和RMS值与零位检测之间的偏差分别优于 $\lambda/20$ 和 $\lambda/50$ 。

非球面非零位ROR技术基于理论建模和光线追迹,从原理上大大提高了回程误差校正的准确性,且该方法不受非球面度和面形误差大小的影响,通用性较强。实际检测中,ROR技术对理论建模精度和系统调整精度的要求较高,建模系统与实际检测系统不同或系统调整误差过大,都将导致重构面形误差增大。利用计算机辅助装调^[19],可以得到系统的调整误差值进而实现对实际检测系统的准确建模,提高ROR面形重构精度。

参 考 文 献

- 1 Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, *et al.*. Aspheric surface testing methods [J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 26-46.
师 途, 杨雨英, 张 磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术 [J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26-46.
- 2 Wu Fan. Design of Dall compensation for aspherical surface null testing [J]. Journal of Applied Optics, 1993, 14(2): 1-4.
伍 凡. 非球面零检验的 Dall 补偿器设计 [J]. 应用光学, 1993, 14(2): 1-4.
- 3 A Offner. A null corrector for paraboloidal mirrors [J]. Appl Opt, 1963, 2(2): 153-155.
- 4 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612003.
- 5 Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1109003.
曾雪峰, 闫 峰, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术 [J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1109003.
- 6 Feng Jie, Deng Chao, Xing Tingwen. Design and error analysis of the computer-generated hologram used for concave aspheric surface testing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 110902.
冯 婕, 邓 超, 邢廷文. 用于凹非球面的计算全息设计及其误差分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 110902.
- 7 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, 杨雨英, 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.
- 8 Dai Yifan, Zeng Shengyue, Chen Shanyong. Iterative stitching algorithm for annular subaperture testing and its experimental verification [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 251-256.
戴一帆, 曾生跃, 陈善勇. 环形子孔径测试的迭代拼接算法及其

- 实验验证[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 251—256.
- 9 P E Murphy, T G Brown, D T Moore. Interference imaging for aspheric surface testing [J]. Appl Opt, 2000, 39(13): 2122—2129.
- 10 Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao, *et al.*. Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 688—696.
刘东, 杨甬英, 田超, 等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 688—696.
- 11 Dong Liu, Yongying Yang, Chao Tian, *et al.*. Practical methods for retrace error correction in nonnull aspheric testing [J]. Opt Express, 2009, 17(9): 7025—7035.
- 12 O Robert, John E Greivenkamp. Iterative reverse optimization procedure for calibration of aspheric wave-front measurements on a nonnull interferometer [J]. Appl Opt, 2004, 43(27): 5152—5161.
- 13 Wang Xiaokun. Test on large convex aspherical mirror by subaperture stitching interferometry [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 716—722.
王孝坤. 大口径凸非球面反射镜子孔径拼接检测[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 716—722.
- 14 Chao Tian, Yongying Yang, Yongmo Zhuo. Generalized data reduction approach for aspheric testing in a non-null interferometer [J]. Appl Opt, 2012, 51(10): 1598—1604.
- 15 Dong Liu, Yongying Yang, Yongjie Luo, *et al.*. Non-null interferometric aspheric testing with partial null lens and reverse optimization [C]. SPIE, 2009, 7426: 74260M.
- 16 Liu Huilan, Hao Qun, Zhu Quidong, *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形测量[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(7): 625—628.
- 17 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Quidong, *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.
- 18 Yongying Yang, Dong Liu, Xin Gao, *et al.*. Research of precision interference locating method for a partial null compensator at aspheric testing [C]. SPIE, 2009, 7426: 74260R.
- 19 Lei Zhang, Dong Liu, Tu Shi, *et al.*. Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in nonnull interferometric testing [J]. Appl Opt, 2013, 52(35): 8501—8511.
- 20 E Garbusi, W Osten. Perturbation methods in optics: application to the interferometric measurement of surfaces [J]. J Opt Soc Am A, 2009, 26(12): 2538—2549.
- 21 Luo Yongjie, Yang Yongying, Tian Chao, *et al.*. Error analysis and processing of partial compensatory aspheric testing system [J]. J 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.

栏目编辑: 何卓铭