

引用格式: LEI Wei-zheng, YUAN Lü-jun, KANG Yan, *et al.* Nonlinear Optimization Method for Reconstruction of the Off-axis Aspherical Surface by Profile Measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1212004

类维政,袁吕军,康燕,等.基于非线性优化方法的离轴非球面轮廓测量面形恢复技术[J].光子学报,2019,**48**(12):1212004

基于非线性优化方法的离轴非球面轮廓 测量面形恢复技术

类维政^{1,2,3},袁吕军^{1,2},康燕^{1,2},苏志德^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所),南京 210042)

(3 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:轮廓测量是非球面光学镜面的重要测量手段,然而在测量过程中由于测量坐标系与理论坐标系间存在偏离,测量结果中存在误差.本文分析了离轴非球面的测量坐标系与理论坐标系间的平移和偏转误差在面形结果中引入的测量误差形式,根据最小二乘原理建立优化函数,依照函数特性通过数值差分法快速求解梯度并利用非线性优化方法优化偏差,从而将该误差从测量结果中剔除.仿真分析表明这种方法能在镜面面形残差和测量系统的随机误差的影响下有效恢复镜面面形信息.利用该方法实际指导直径为 570 mm 的离轴椭球面的加工,经过四个周期的测量-研磨过程使该镜面面形误差的 PV 值从 34.80 μm 收敛至 13.83 μm , RMS 从 3.28 μm 收敛至 1.89 μm .为了进一步比较,对一块 220 mm \times 96 mm 矩形离轴椭球面测量,验证了该方法测量异形离轴镜面的适用性和通用性.

关键词:离轴非球面;轮廓测量;面形恢复;非线性优化;光学镜面制造

中图分类号:TB133

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20194812.1212004

Nonlinear Optimization Method for Reconstruction of the Off-axis Aspherical Surface by Profile Measurement

LEI Wei-zheng^{1,2,3}, YUAN Lü-jun^{1,2}, KANG Yan^{1,2}, SU Zhi-de^{1,2}

(1 *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China*)

(2 *CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Profile measurement plays an important role in aspherical mirror testing. However, the coordinate deflection and shift will lead to errors in result. In this paper, the analytical mathematic formula for misalignment error is presented. The measurement results are optimized by numerical differentiation method and nonlinear optimization algorithm based on least square method and the influence of these errors is eliminated. This method can effectively reconstruct the off-axis aspherical surface with systematic error. After four times polishing of the 570 mm off-axis aspherical mirror, the surface PV and RMS are decreased from 34.80 μm to 13.83 μm , and from 3.28 μm to 1.89 μm , respectively. For further comparison, the 220 mm \times 96 mm off-axis rectangle-shaped mirror is measured

基金项目:国家自然科学基金(No.11603051)

第一作者:类维政(1990-),男,博士研究生,主要研究方向为光学镜面检测技术. Email: wzlei@niaot.ac.cn

导师(通讯作者):袁吕军(1961-),男,研究员,博导,主要研究方向为天文大镜面的光学工艺与检测. Email: ljyuan@niaot.ac.cn

收稿日期:2019-06-28;录用日期:2019-09-04

<http://www.photon.ac.cn>

and proved that this method has strong applicability and generality for special shape mirror.

Key words: Off-axis aspherical surface; Profile measurement; Reconstruction of mirror surface; Nonlinear optimization; Mirror fabrication

OCIS Codes: 120.4610; 120.4800; 220.0220; 220.4610; 220.4840

0 引言

应用于空间对地观测、地基望远镜等光学反射镜系统中的离轴光学元件多为碳化硅或玻璃材料,其加工过程一般分为铣磨、精磨和抛光三个阶段^[1-2],此三个阶段对应的面形检测手段也各不相同,铣磨阶段采用机床自带装置测量镜面面形,抛光阶段采用干涉测量法来检测面形.在镜面的精磨及初抛阶段,镜面的面形误差在毫米到微米级别分布,通常采用轮廓测量法^[3-5],测量设备利用接触式触头或者显微镜、多彩共焦原理的光学探头等来获得被测面轮廓信息^[6-7],测量过程对被测工件的表面光洁度没有要求.

目前有多种类型的高精度轮廓测量设备,无论轮廓测量设备的外观和运作形式如何,其本质是在设备搭建的检测平台上依据被测镜面的轮廓构建测量坐标系,通过测量设备的空间运动位置将被测镜面上点的空间坐标记录下来,将测量实点的空间坐标与该点的理论空间坐标做对比从而得到被测镜面的面形误差.结合上述原理,可以推断轮廓测量的精度不仅受设备自身精度影响,也受到测量坐标系与理论坐标系平移及偏转误差的影响,实际测量中零件测量坐标系根据镜面形状及选取的基准来建立,由于镜坯的加工不可避免存在误差,所以实际测量坐标系必然会与理论坐标系存在方向偏转以及原点位置平移误差,根据熊玲等^[8]对正轴非球面装调误差对于测量误差的影响的分析,工件底面倾斜将引入倾斜量,中心偏移则引入慧差.为了得到准确的镜面面形需要将引入误差消除,常用的消去被测工件倾斜量的方法主要有基于软件处理方法^[9]、利用最小二乘拟合倾斜面消除法^[10],和利用数值优化求解的方法^[11].利用软件处理方法对于多参量共同作用误差的矫正能力较弱,利用最小二乘拟合倾斜面消除倾斜量无法消除中心偏移引入的慧差.对于更复杂的离轴非球面,无论镜子的几何外形为圆形、矩形或者其他复杂形状,都失去了镜面几何中心轴对称性,建立测量坐标系时不可避免会存在绕被测镜几何中心的转动偏差,这种由转动偏差引入的测量误差也不能被拟合倾斜量有效去除.因此利用数值优化方法不失为一种适合消除离轴非球面基准面误差和装调偏差的方法.数值优化方法建立在对测量数据处理和计算上,对于大中型镜面由于采集点数增多,数据存储计算的压力会显著增加,优化过程中解析式求梯度会消耗相当长的时间,甚至超出内存范围.因此对于离轴非球面的轮廓测量需要更简便快捷的数值优化方式.

本文建立数学模型,将坐标系的偏差引入测量结果中得到含有平移及偏转误差的被测镜面误差表达式.建立优化函数并利用非线性迭代方法求出偏差参数的最优解.结合实际测量时采集数据较大的特点,利用数值微分方法计算优化函数关于误差参数的梯度以加快非线性算法优化速度,根据求得的最优解消除坐标系偏差对面形测量结果的影响,并通过实际指导离轴椭球面的加工证明该方法的有效性.

1 离轴非球面轮廓测量原理和数据处理

在光学设计与加工中,非球面光学元件在二维直角坐标系下的数学表达式^[12]如式(1).

$$z = \frac{y^2}{R + \sqrt{R^2 - (1 + K)y^2}} + \sum_{i=1}^n A_{2i} y^{2i} \quad (1)$$

式中, R 代表非球面的中心曲率半径, K 为二次项系数, A_n 是高次项系数, z 表示非球面的矢高.对于离轴非球面俯视如图1所示.

图1中,大圆表示中心非球面,六边形表示离轴非球面,坐标系 $X_c Y_c Z_c$ 表示中心非球面坐标系,原点在非球面中心 O_c 上, Z_c 在非球面光轴上, $X_s Y_s Z_s$ 代表离轴非球面坐标系,原点为离轴非球面几何中心 O_s , O_s 在 $X_c Y_c Z_c$ 坐标系下的坐标为 (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0}) ,对于离轴量为 S 的离轴非球面有

$$S = \sqrt{x_{c0}^2 + y_{c0}^2} \quad (2)$$

实际设计中会存在 Z_s 垂直 $X_c Y_c$ 面以及 Z_s 垂直离轴非球面几何中心两种情况,由图2可知,这两种情况分别是 Z_s 与 Z_c 之间夹角变化的特殊情况之一,根据坐标系空间关系,坐标系 $X_s Y_s Z_s$ 上的点在 $X_c Y_c Z_c$ 上的位置关系为

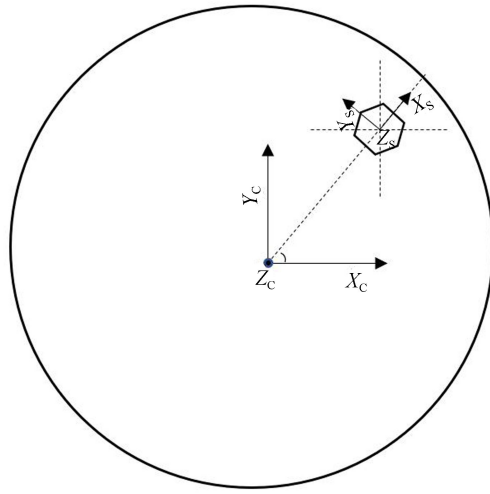


图 1 中心非球面与离轴非球面位置关系俯视图

Fig.1 Top view of position relationship between central aspheric and off-axis aspheric

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}_y \times \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{c0} \\ y_{c0} \\ z_{c0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, \mathbf{R}_y 表示坐标系绕 Y_s 的转动矩阵, θ 代表 Z_s 与 Z_c 的夹角, 即此时中心非球面上点 O_s 沿 X_s 方向切线的斜率.

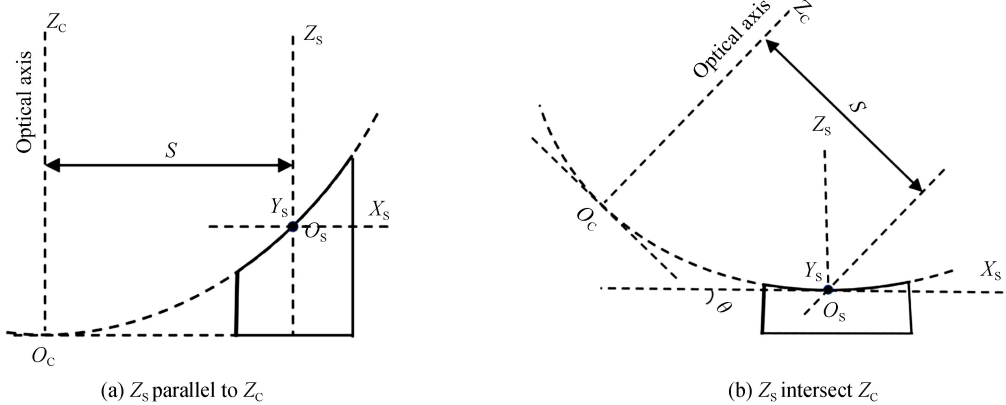


图 2 离轴非球面坐标系两种位置关系

Fig.2 Two relationship between center aspheric coordinate and off-axis aspheric coordinate

轮廓测量首先需要在被测非球面上建立测量坐标系. 对于正轴非球面 ($S = 0$) 或者离轴量较小 ($S < \frac{D}{2}$) 的离轴非球面可以将光轴作为测量坐标系 Z 轴, 以中心非球面中心点 O_c 为原点建立测量坐标系.

该坐标系下测量点的位置即为中心非球面方程中该点的位置. 对于离轴量较大 ($S > \frac{D}{2}$) 的离轴非球面, 测量坐标系的原点选在被测镜面的几何中心点 O_s 位置, 测量坐标系 z 轴方向为非球面镜底面基准面的法线方向. 由于被测离轴非球面失去旋转对称性所以要考虑水平轴的方向, 可采用图 1 所示的方式以 $O_c O_s$ 连线的方向作为测量坐标系的 X 轴, 使测量坐标系 XYZ 与离轴非球面坐标 $X_s Y_s Z_s$ 重合, 这样离轴量只发生在 X 轴, 方便之后误差引入.

2 算法原理以及误差分析

2.1 数学原理

实际测量过程中,被测工件在测量平台上的摆放位置不可避免地存在调整偏差,并且离轴非球面的加工基准面也存在平面度较差、与理论面存在倾斜量的情况.以上问题会使测量坐标系与离轴非球面坐标系发生平移和偏转从而影响检测结果.被测工件的基准底面的倾斜误差会使测量坐标系发生偏斜,将倾斜分解为绕测量坐标系的 X 方向转动 α 以及绕 Y 方向转动 β .被测工件在测量平台上的摆放位置存在调整偏差使坐标系绕 Z 方向转动 γ ,具体位置关系如图 3 所示,其中 Z' 和 Z'' 分别为 Z 轴在 $X_s Z_s$ 平面和 $Y_s Z_s$ 平面的投影, X' 是 X 轴在 $X_s Y_s$ 平面的投影.测量坐标系原点与被测非球面中心点的水平偏移量分别为 δ_x, δ_y .

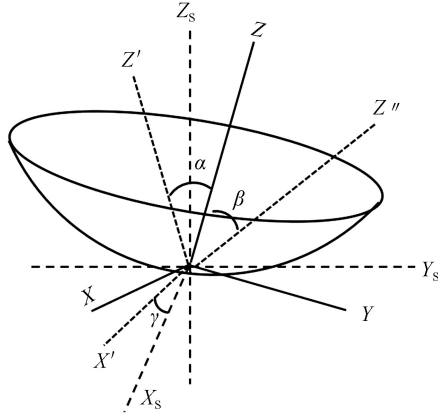


图 3 测量坐标系 XYZ 与离轴非球面坐标系 $X_s Y_s Z_s$ 的偏转关系

Fig.3 Coordinate deflection between real measuring coordinate XYZ and off-axis coordinate $X_s Y_s Z_s$

根据直角坐标系偏移转动关系,测量点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 的坐标与该点在离轴非球面上的坐标 $P_s(x_s, y_s, z_s)$ 的变化关系为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \begin{bmatrix} x_0 + \delta_x \\ y_0 + \delta_y \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(5)得到的 (x_s, y_s, z_s) 可以直接带入式(2)转换为离轴非球面坐标.实际镜面轮廓测量数据是一组具有 n 个点的坐标的集合 $P_n(x_n, y_n, z_n)$,根据式(2)~(5),中心非球面对应点 P'_n 为

$$P'_n(x'_n, y'_n, z'_n) = T \cdot P_n(x_n, y_n, z_n) \quad (9)$$

式中, T 表示从式(5)到式(2)的转换算子,将 P'_n 带入式(1)可以得到引入基准面误差后被测离轴非球面在中心非球面的相对位置矢高

$$g(\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{x_n'^2 + y_n'^2}{R + \sqrt{R^2 - (1+K) \cdot (x_n'^2 + y_n'^2)}} \quad (10)$$

被测镜面的面形误差 E_{sur} 为

$$E_{\text{sur}} = g_i(\delta_{x0}, \delta_{y0}, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0) - z'_i \quad (11)$$

光学镜面加工中通常只关心镜面的面形误差,因此需要去掉工件基准面引入误差,即将 $\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma$ 五个量引入误差从面形误差中排除.这些参量实际中很难精确测量,此时利用最小二乘原理数值求解.根据误差平方和构建待优化目标函数

$$E_{obj} = \sum_{i=1}^n |g_i(\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma) - z'_i|^2 \quad (12)$$

可以利用拟牛顿法或者信赖域^[13]得到式(12)为0的最优解.对于上述优化方法,首先需要确定 E_{obj} 关于各个初始参量的梯度,对于任意参量 $p \in (\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma)$ 关于 E_{obj} 的梯度,由式(12)有

$$\frac{\partial E_{obj}}{\partial p} = 2 \sum |g_i(p_0) - z'_i| \cdot \frac{\partial g(p)}{\partial p} \quad (13)$$

由式(1)~(5)可知, $g_i(\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma)$ 是复合非线性函数,利用函数方程解析求解各参量偏导数非常耗时.为了提高计算速度本文使用数值近似方法.根据非球面的表达式(1)和坐标转换式(9),可以确定函数 $g_i(p)$ 在参量 p 方向上连续,利用一阶导数差分近似可得目标函数 $g(p)$ 关于参量 p 的梯度为

$$\frac{\partial g(p)}{\partial p} \approx \frac{g(p+h) - g(p-h)}{2h} \quad (14)$$

h 为任意小量,将式(11)、(14)带入式(13)有

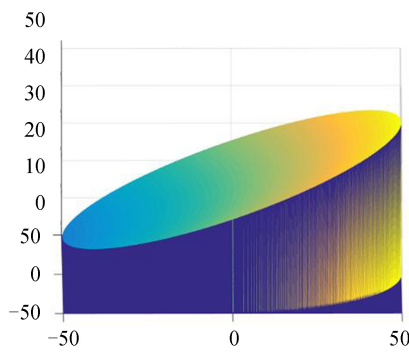
$$\frac{\partial E_{obj}}{\partial p} = \sum |E_{sur}(p_0)| \cdot \frac{g(p+h) - g(p-h)}{h} \quad (15)$$

由此,式(15)表示在给定 $(\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma)$ 参量初值后可以确定该值的梯度方向,之后可以利用前面的迭代算法求出参量最优解.将得到的最优解带回式(9)即可得到去除基准面误差的被测镜面形误差.

2.2 算法的误差以及精度分析

2.1 节讨论了参量优化算法的具体数学表达,对于理想镜面利用最优化算法可以得到高精度的恢复结果,然而现实中镜面测量数据则包含镜面自身的面形残余误差、测量设备的系统误差、测量时的随机误差等,这些误差存在会对最终面形恢复结果产生影响.本节利用仿真方法分析测量数据包含误差情况下算法恢复镜面面形的能力.

利用仿真软件生成直径 100 mm 中心曲率半径 500 mm 的椭球面如图 4(a),根据 2.1 节引入被测工件的基准偏差使椭球面偏移,偏移量为 $\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma$ 的值分为 1、-0.5、-0.4、2、1.1.在仿真的镜面上模拟采点,采点间隔 2 mm.采集点引入测量系统的随机误差.现实中采用 HEXAGON 公司的三坐标仪作为轮廓测量设备,利用标准量块对三坐标仪进行标定,经过测量可以确定三坐标仪在 x, y, z 三个方向的随机误差小于 $0.5 \mu\text{m}$,重复精度小于 $0.1 \mu\text{m}$,因此将随机误差设为 $\pm 0.6 \mu\text{m}$.令仿真椭球面包含如图 4(b)所示三组不同 PV 值的面形误差,利用 2.1 节算法对仿真镜面面形恢复,结果如图 4(c),三种情况下测量坐标系偏移量的优化值见表 1.



(a) Simulating ideal asphere

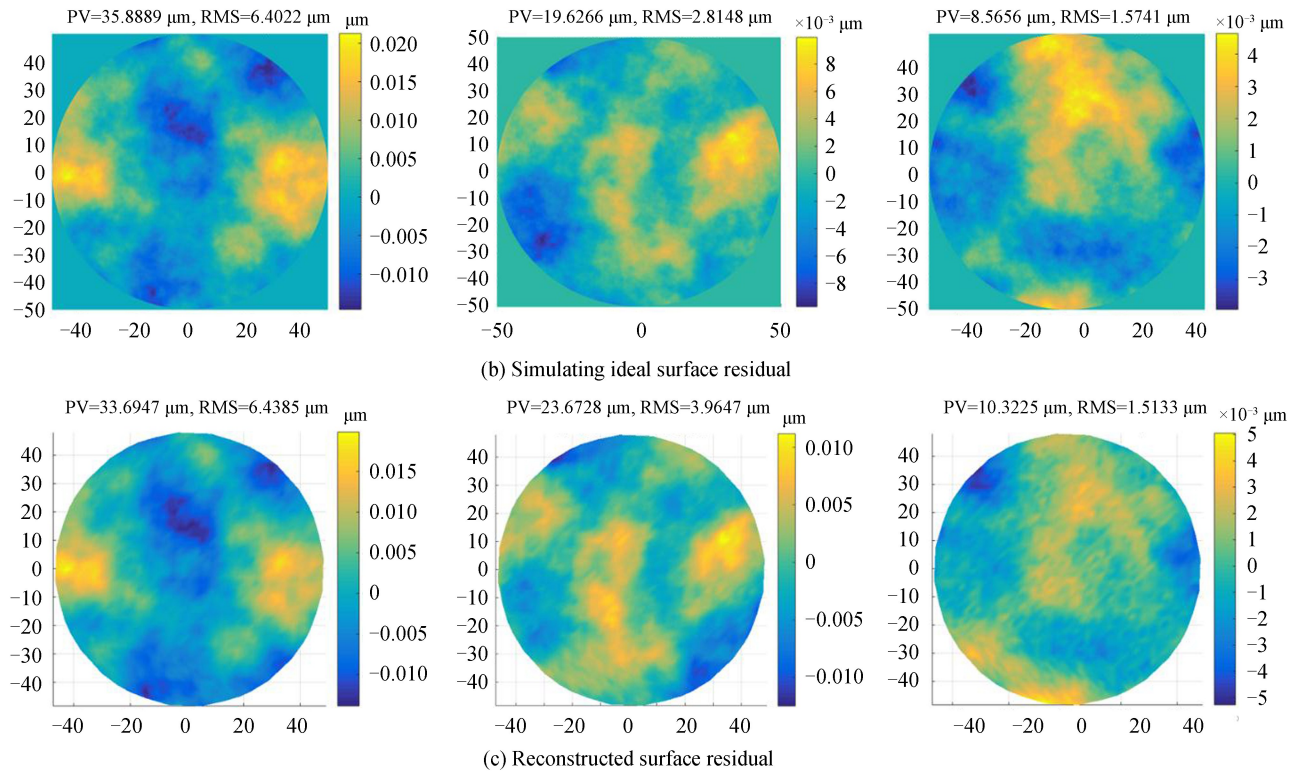


图4 仿真理想椭球面和镜面残余误差以及恢复面形

Fig.4 Simulating ideal aspherical surface and its residual and reconstructed surface residual

表1 含有误差数据坐标系偏差量恢复值
Table 1 Optimization result with errors

	Initial value	Optimal value		
δ_x	3	2.935 1	2.963 4	2.946 8
δ_y	-1	-1.556 2	-0.635 9	-1.260 8
α	-0.4	-0.577 8	-0.470 9	-0.566 9
β	3	2.995 5	2.997 4	2.995 1
γ	-0.2	-0.227 2	-0.209 5	-0.134 3

可以发现,由于多种误差的共同作用,经过算法恢复面形与实际面形仍存在差别,而且随着面形误差不断减小,测量系统的随机误差对测量结果的影响越发明显.同时也可以发现,本文提出的方法比较完整地恢复镜面的特征信息.在精磨抛光阶段,技术人员通常侧重于局部特征的修磨,利用本文方法得到的镜面信息可以作为有效信息指导镜面抛光阶段修磨,通过反复几个周期的修磨-测量工序使镜面面形快速收敛,当镜面面形误差达到干涉测量要求时再利用干涉测量作为指导后续测量的手段.

3 实验设置与结论验证

实验选取一块研磨阶段中心曲率半径为 1 730 mm,离轴量为 468 mm,直径为 570 mm 的椭球面进行测量,测量轮廓设备为三坐标仪,测量精度为 1 μm .首先在测量前利用 CAD 软件根据图纸建立被测工件的模型,将模型导入三坐标仪建立测量坐标系.由于离轴非球面的光轴脱离被测镜面范围,被测镜不再是中心对称结构,因此在建立坐标系时需要考虑光轴离镜面中心的方向,通常做法是在被测镜边缘刻线表示光轴的方向.在建立测量坐标系时先利用三坐标仪测量工件的几何形状,根据外形尺寸确定镜面中心作为测量坐标系原点,然后将镜面中心与光轴刻线连接构成测量坐标系的 x 轴,测量平台的法线作为测量坐标系的 z 轴,最后利用右手定则确定 y 轴.此时建立的测量坐标系与被测镜理论坐标系绕 z 轴存在一定的偏转,可以通过第 2 节提供的算法进行恢复.

建立测量坐标系后利用三坐标仪扫描功能对整个镜面采点.利用式(9)转换采集点坐标, $\delta_x, \delta_y, \alpha, \beta, \gamma$

参量的初始值均设为 0.将转换后的坐标直接带入式(10)并根据式(11)计算面形误差见图 5(a).

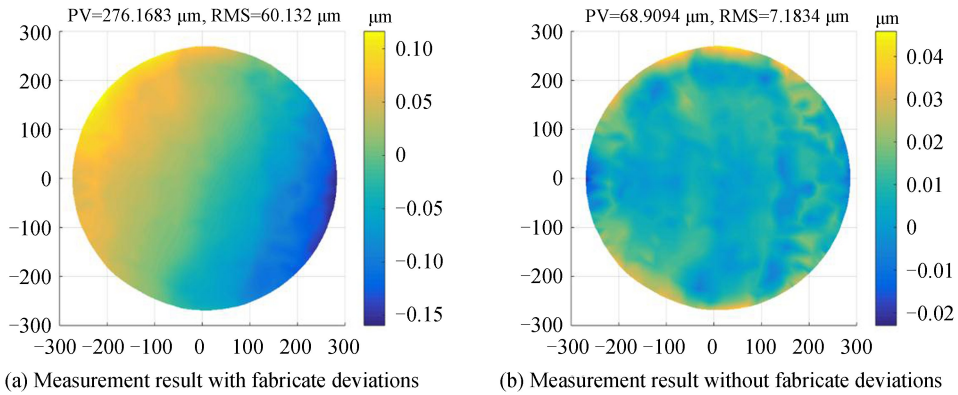


图 5 570 mm 离轴椭球面轮廓测量面形恢复结果
Fig.5 Surface error of the 570 mm off-axis-elliptic mirror

从图 5(a)可以看到镜面面形误差被倾斜误差覆盖.根据之前分析,倾斜量是由工件基面偏差以及装调偏差引起,与镜面面形误差杂糅在结果中无法分辨,为了得到面形误差需要将倾斜量去除.利用第 2.1 节提出的参量迭代算法将求解的被测工件基面误差等参量引入面形误差计算,恢复镜面面形如图 5(b),可以看出,图 5(a)中的倾斜量在图 5(b)中被去除,镜面面形误差开始分散,PV 值从未去除倾斜量的 276.17 μm 降到 68.91 μm,均方根误差 RMS 从 60.13 μm 降到 7.18 μm.

利用图 5(b)的结果指导继续研磨,再反复测量镜面面形继续指导精磨,经过三个周期的测量结果如图 6 所示,镜面面形误差 PV 收敛至 13.83 μm,RMS 收敛至 1.89 μm.

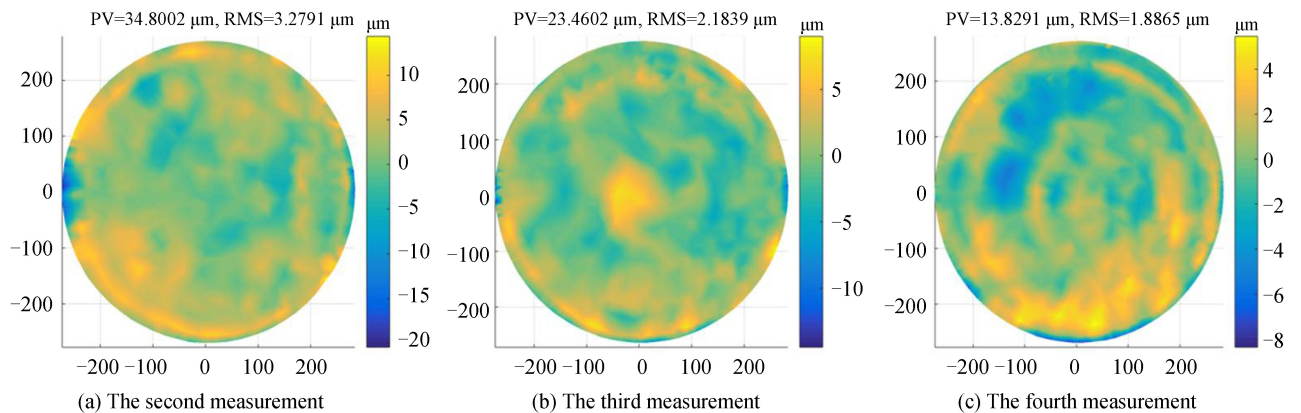


图 6 570 mm 离轴椭球面在研磨不同阶段镜面面形误差收敛结果
Fig.6 Surface error of the 570 mm off-axis-elliptic mirror after several times grinding

为了进一步验证本文方法的有效性,对一块 220 mm×96 mm,离轴量为 40 mm 的矩形离轴椭球面进行测量,被测镜的实物和侧视结构如图 7 所示.由于被测镜轮廓为矩形,因此建立测量坐标系时可以分别以矩形的长边和短边作为测量坐标系的 x 轴和 y 轴, z 轴仍垂直于测量平台.根据设计图纸,光轴在被测镜面上且位置已知,因此测量坐标系原点可以直接设定在镜面光轴处,这种情况下在进行参量优化时需注意此时优化参数设定理论离轴量为 0,绕 z 轴偏转角也为 0.测量后恢复面形如图 8(a)所示,图 8(b)所示面形为利用测量数据与被测工件理论数模之差进行拟合计算得到的面形结果,可以看到两种方法可以得到一致的面形分布情况,进一步验证本文方法的可行性.可以看出,参量的非线性迭代优化方法可以有效地去除测量倾斜量恢复镜面面形.同时采用数值计算梯度方法可以加快迭代算法地运行速度,使用 i7 四核处理器计算机优化具有 646 个测量点的工件参量运算时间最长只需要不到 5s,因此非线性迭代优化方法在实际复杂离轴光学镜面的轮廓测量中具有应用价值.

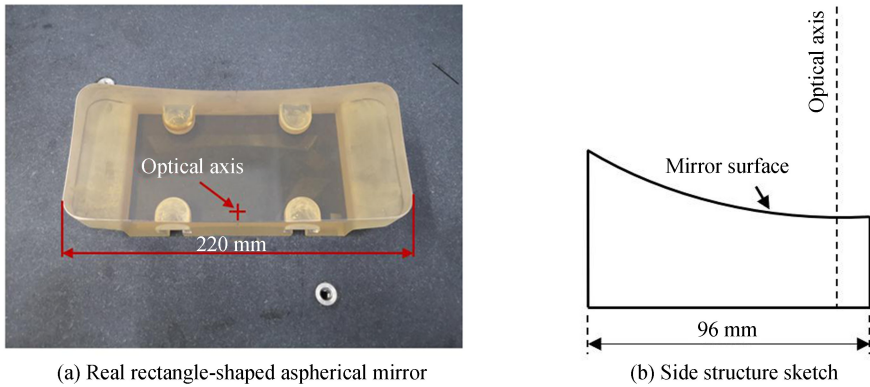


图7 220 mm×96 mm 矩形离轴椭球面实物以及侧面结构示意图

Fig.7 220 mm×96 mm rectangle-shaped off-axis ellipsoidal mirror and side structure sketch

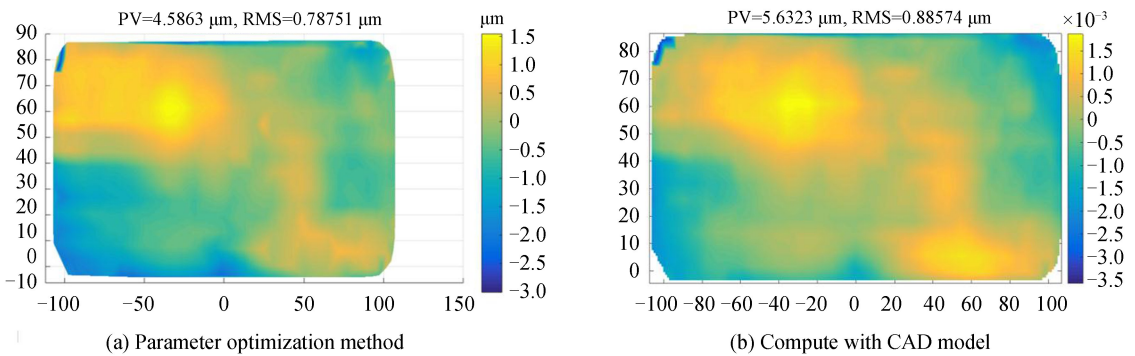


图8 220 mm×96 mm 离轴椭球面面形误差

Fig.8 Surface error of the 220 mm×96 mm rectangle-shaped off-axis mirror

4 结论

本文分析了复杂光学镜面轮廓测量的一般坐标转换方法,并将工件基准偏差以及测量时调整偏差引入镜面测量误差之中,给出了基准偏差参量影响测量误差的数学表达式.根据参量引入误差的表达式建立优化函数,利用数值差分法求解参量的梯度,进而根据梯度方向利用非线性优化测量将由于基准面加工及调整引入的误差从测量结果中去除掉.通过软件仿真受多种误差影响的非球面测量实验验证了该方法的可靠性,并在实验中利用本文提出的方法,对一块处于研磨阶段直径为 570 mm,离轴量为 468 mm,中心曲率半径为 1 730 mm 的椭球面进行实际测量,得到去除基准面误差后的镜面面形误差 PV 值为 $68.91 \mu\text{m}$,RMS 为 $7.18 \mu\text{m}$.通过反复几次测量-研磨过程,使镜面面形 PV 值进一步收敛到 $13.83 \mu\text{m}$,RMS 收敛至 $1.89 \mu\text{m}$.之后又测量一块 220 mm×96 mm 矩形离轴椭球面,将本文方法得到的测量结果与利用测量数据和 CAD 理论值之差计算的面形结果对比,进一步验证了本文方法的可行性.

参考文献

- [1] ZHANG Feng. Fabrication of large off-axis asphere silicon carbide mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(s2): s222001.
张锋. 大口径离轴非球面碳化硅反射镜的加工[J]. 光学学报, 2013, **33**(s2): s222001.
- [2] LI Rui-gang, ZHENG Li-gong, ZHANG feng, *et al.* Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(5): 633-639.
李锐钢, 郑立功, 张峰, 等. 大口径高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(5): 633-639.
- [3] LI Jie, WU Fan, WU Shi-bin, *et al.* Using a laser tracker to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112002.
李杰, 伍凡, 吴时彬, 等. 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0112002.
- [4] JIA De-li, ZHENG Zi-wen, LI Sheng-yi. Principle and experiments of swing-arm profilometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(4): 499-504.
贾立德, 郑子文, 李圣怡. 摆臂式非球面轮廓仪的原理与试验[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(4): 499-504.

- [5] LIN Chang-qing, JING Hong-wei, KUANG Long, *et al.* Measuring technique for off-axis aspherical mirror in fine grinding process using coordinate measurement machine[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(11): 2665-2668.
林长青,景洪伟,匡龙,等.离轴非球面镜精磨阶段的三坐标检测技术[J].*强激光与粒子束*,2012,**24**(11): 2665-2668.
- [6] CHEN Yuan-liu, ZHU Wu-le, YANG Shun-yao, *et al.* Large-area profile measurement of sinusoidal freeform surface using a new prototype scanning tunneling microscopy[J]. *Precision Engineers*, 2013, **38**(2): 414-20.
- [7] JING Hong-wei, LIN Chang-qing, FAN Bin, *et al.* Measurement of an off-axis parabolic mirror using coordinates measurement machine and swing arm profilometer during the grinding process[C]. SPIE, 2012, **8415**: 84150K.
- [8] XIONG Ling, LUO Xiao, LIU Zheng-yu, *et al.* Swing arm profilometer: analytical solutions of misalignment errors for testing axisymmetric optics[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(7): 074108.
- [9] ZHANG Rong-zhu, YANG Chun-lin, XU Qiao, *et al.* Anti-tilting technology of the sub-aperture stitching interferograms[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7): 879-882.
张蓉竹,杨春林,许乔,等.子孔径拼接干涉检测中去倾斜处理技术[J].*强激光与粒子束*,2004,**16**(7): 879-882.
- [10] ZHANG Ming-yi, LI Xin-nan. Influence of tilt in stitching interferometry and how to eliminate it[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(8): 117-122.
张明意,李新南.子孔径拼接检验法中倾斜的影响及消除方法[J].*光电工程*,2006,**33**(8): 117-122.
- [11] VWANG Jian-ming, GUO Pei-ji, QIU Gu-feng. Data processing of off-axis aspheric surface measurement by coordinate contour measuring machine[J].*Optical Technique*, 2013, **39**(4): 2991-296.
王建明,郭培基,仇谷烽.三坐标轮廓测量仪测量离轴非球面的数据处理[J].*光学技术*,2013,**39**(4): 2991-296.
- [12] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检测[M].苏州大学出版社 苏州,2004
- [13] WRIGHT S, NOCEDAL J. Numerical optimization[M]. Springer New York, 1999.