

大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究

刘力^{1,2} 陈新东¹ 熊玲^{1,2} 张峰¹ 薛栋林¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了满足大口径反射镜研磨阶段的面形检测需求, 分析了激光跟踪仪测角误差的来源, 提出了一种基于 S 多项式拟合的矫正测角误差的方法, 该矫正方法能有效克服采样位置误差和随机误差带来的影响。针对不同频段测角误差, 提出母线和米字格采样法, 其中母线采样法对 10% 以内的标定实验随机误差有较好的抑制作用。矫正方法的可行性得以验证, 从而为进一步实验提供了理论基础。

关键词 光学设计; 激光跟踪仪; 角度误差补偿; 大口径非球面镜; 多项式拟合

中图分类号 O439; TH72

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1104003

Angle Error Investigation in Laser Tracker Testing Large Aspheric Mirrors

Liu Li^{1,2} Chen Xindong¹ Xiong Ling^{1,2} Zhang Feng¹ Xue Donglin¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to meet the surface shape detection requirements during the grinding stage of large aspheric mirror, the sources of angle error are analyzed, and one method for correcting angle measurement errors based on the S polynomial fitting is proposed. This method can effectively overcome the impact caused by the sampling location and random errors. As for the angle errors at different frequency bands, the generatrix and composite sampling methods are proposed, and the generatrix sampling method can suppress the random error within 10% in the calibration experiment. The above correction method is proved to be possible, which provides a theoretical basis for its application in the future experiments.

Key words optical design; laser tracker; angle error compensation; large aspheric mirror; polynomial fitting

OCIS codes 220.1250; 220.4610; 220.4840

1 引言

非球面镜相对于球面镜, 不仅能够降低系统的复杂程度, 而且可以大幅提高系统性能, 广泛应用于大型光学系统。随着光学系统对大视场、高分辨率以及宽覆盖需求的不断增长, 光学成像系统的口径也在不断增加。大口径非球面镜作为关键的光学元件, 制造工艺复杂, 检测难度大, 是各国重点研发的关键技术之一。

大口径非球面镜的制造通常需要经过铣磨成形^[1]、研磨^[2]以及抛光^[3]等阶段, 各阶段的检测手段也不相同^[4-7]。特别是在研磨阶段, 由于镜面粗糙度值较大、反射率低, 因而通常采用轮廓测量的方式进行面形检测。传统的三坐标轮廓测量仪虽然可以检测大口径轮廓, 但由于检测时需要来回搬运被测件, 操作较困难^[8]。激光跟踪仪具有测量范围大、响应速度快、检测范围广等诸多优点, 在大口径非球面镜轮廓检测中具有明显的优势^[9-11]。

收稿日期: 2016-06-02; **收到修改稿日期:** 2016-08-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61505205)

作者简介: 刘力(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学加工、检测方面的研究。E-mail: liuli6815@gmail.com

导师简介: 张峰(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学加工与检测方面的研究。E-mail: zhangfjyz@sina.cn

随着检测口径的增大,激光跟踪仪的测量区域越来越大,导致检测精度下降。为了实现大口径非球面镜高精度检测,满足从研磨阶段到抛光阶段的面形检测需求,需要进一步提高激光跟踪仪的检测精度。激光跟踪仪的测量误差主要包括测距误差和测角误差,其中测距误差依赖于双频激光干涉技术,精度已达到波长(632.8 nm)量级;角度测量受传感器类型、结构、安装等影响,测量精度较低,角度误差成为激光跟踪仪测量误差的主要来源^[12]。研究角度误差分布,对角度误差进行补偿,能够有效提高激光跟踪仪的系统测量精度^[13-14]。角度误差的补偿方式主要有硬件补偿和软件补偿,硬件补偿主要采用多头读数等方法消除测角编码器的偏心、轴系晃动等误差^[15],软件补偿主要通过标定、算法补偿、自校准等方法提高单个测角编码器的测角精度^[16]。目前的补偿方法主要是针对单个测角编码器的角度误差进行补偿,无法直接解决两个编码器相互影响的角度误差,对激光跟踪仪在大口径检测中的测角精度的提升有限。

本文首先分析了激光跟踪仪的测角误差来源,通过标定获得了角度误差信息,提出了利用多项式拟合得到测量平面的角度误差分布的方法,矫正了测角误差,提高了测角精度。以4 m量级非球面反射镜面形检测为模型,对采样点选择进行了讨论分析,以母线采样为例,通过仿真计算证明了该方法的可行性。最后针对标定实验中可能出现的误差进行仿真讨论,分析了该方法对位置误差和随机误差的灵敏性。

2 角度误差补偿原理

2.1 激光跟踪仪测角误差分析

激光跟踪仪是基于球坐标系的测量系统,如图1所示,激光从原点发出打在目标靶球(SMR)上,利用双频激光干涉仪测量距离 r ,两测角编码器分别绕水平轴和俯仰轴转动,测量目标靶球的水平角 θ 和俯仰角 φ ,根据几何关系可以得到靶球的直角坐标

$$\begin{cases} x = r \sin \varphi \\ y = r \cos \varphi \sin \theta \\ z = r \cos \varphi \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

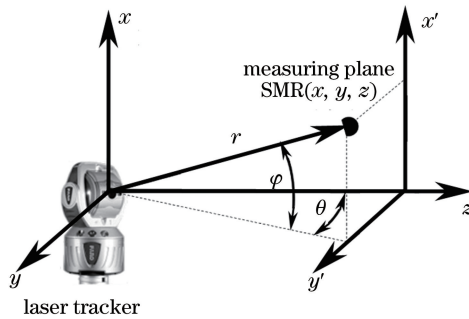


图1 激光跟踪仪测量系统球坐标系

Fig. 1 Spherical coordinate of laser tracking measurement system

激光跟踪仪的测角系统采用的是圆光栅角度编码器,根据球坐标测量原理,理想的测角关系满足:

- 1) 激光跟踪仪的水平轴和俯仰轴正交,跟踪仪发出的激光光束与俯仰转轴正交,且三者相交于一点,即激光跟踪仪的原点;
- 2) 水平测角编码器和俯仰测角编码器轴线分别与水平轴和俯仰轴重合,且两编码器相互垂直。

在实际应用中,制造、装配、运输及环境变化等因素导致激光跟踪仪编码器出现测角误差。根据产生误差的原因,激光跟踪仪测角误差主要包括:角编码器刻划误差、电子细分误差、编码器安装偏心误差和倾斜误差等编码器误差^[17]以及激光光束与水平俯仰轴相互间的平移、倾斜等几何误差。其中编码器误差由规律变化的系统误差和随机误差构成,图2所示为Reidenhain公司生产的RON285型角度编码器的典型误差曲线^[18],在全量程范围内表现为连续的误差,可用连续可微的误差分布函数进行描述。激光跟踪仪水平和俯仰编码器的系统误差相互独立,不互相影响。

在装调中,当激光跟踪仪的激光光束出现平移和倾斜误差时,激光的出射位置沿俯仰轴有一个距离为 l

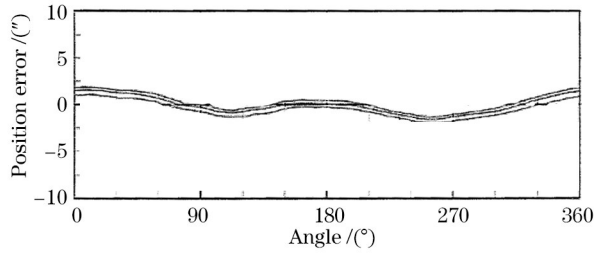


图 2 RON285 角度编码器典型误差曲线^[18]

Fig. 2 Typical error curves of RON285 angle encoders^[18]

的偏差,且与俯仰轴有一个 α 角度偏差,在测量过程中,激光光束的旋转轴会偏移,且与俯仰轴不再垂直,使得测量过程出现误差,如图 3 所示,图中 $O'P$ 为激光跟踪仪的实际测量光束,测量平面即为待检镜顶点切平面,由于镜体矢高远小于其曲率半径,可认为镜体表面与测量平面的测角误差相同。

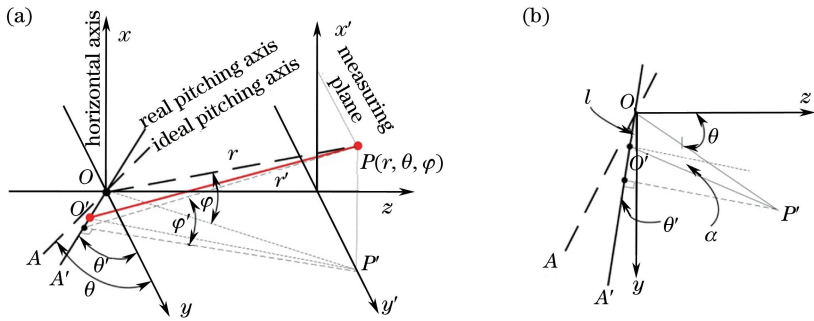


图 3 激光光束几何误差示意图。(a) 斜视图;(b) 俯视图

Fig. 3 Schematic diagrams of laser beam geometry error. (a) Oblique view; (b) top view

P 点的测量坐标为 (r', θ', φ') , 且当 α 较小时,有 $\sin \alpha = \alpha$, 通过几何分析计算,可以得出激光光束的几何误差引起的测量误差为

$$\begin{cases} \Delta r = r - r' = \frac{l^2}{2r} + l \cdot \alpha \\ \Delta \theta = \theta - \theta' = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{r\alpha - \frac{l^2}{2r}\alpha + l \cdot \alpha^2 + l}{r \cos \varphi}\right) - \arcsin\left(\frac{r_0^2 - \frac{l^2}{2} + l \cdot r_0}{r \cos \varphi}\alpha\right) \\ \Delta \varphi = \varphi - \varphi' = \varphi - \arcsin\left(\frac{2r^2 \sin \varphi}{2r^2 - l^2 + 2r \cdot l \cdot \alpha}\right) \end{cases} \quad (2)$$

激光光束沿俯仰轴的位移偏移量为 $l = 10 \mu\text{m}$, 角度偏差为 $\alpha = 2''$ 。对距离为 5 m 的单位圆平面进行测量时,利用数值仿真可以得到其角度误差分布如图 4 所示,俯仰轴误差对水平角的测量影响较大,引起了大于 $7.7 \mu\text{rad}(1.7'')$ 的水平角误差,对俯仰角的测量影响较小,俯仰角误差在皮弧度量级。

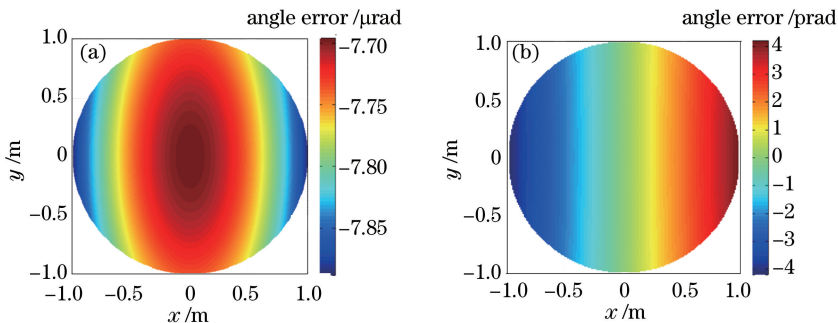


图 4 激光跟踪仪俯仰轴误差引起的角度误差。(a) 水平角度误差;(b) 俯仰角度误差

Fig. 4 Angle errors caused by pitch axis error of laser trackers. (a) Horizontal angle error; (b) pitch angle error

水平角度误差不仅与水平角的大小直接相关,还与测量位置的俯仰角有关。角度误差与测量角度成正比,即角度越大,测角误差也越大,其他几何位置误差引起的测角误差具有类似的关系。几何误差引起的测角误差在平面上表现为一个连续可微的误差分布函数。

在测量过程中,多种误差共同决定了激光跟踪仪的角度测量精度。在测量过程中,激光跟踪仪固定不动,测角误差是固定不变的系统误差,可以用一个二维误差分布函数进行描述。

2.2 测角误差标定方法

激光跟踪仪的角度误差主要由编码器的制造精度及相互安装误差组成,该误差为系统误差。为了实现激光跟踪仪对大口径非球面镜的面形轮廓的高精度检测,需要对激光跟踪仪的角度误差进行标定。选择两个激光跟踪仪同时测量的方式,利用一个激光跟踪仪的高测距精度对另一激光跟踪仪的角度测量误差进行标定,得到激光跟踪仪在测量平面的角度误差分布。对系统误差进行补偿,提高测角精度。

激光跟踪仪在其初始位置($\theta=0^\circ, \varphi=90^\circ$),利用其内部的角度自动校正功能对角度测量进行初始化和归零处理,此时角度测量误差为0。如图5所示,采用激光跟踪仪立式检测系统进行标定测量,激光跟踪仪 I 为待矫正激光跟踪仪,安装在立式测量塔上,与待测镜体区域中心对准,使待测平面的中心点测角误差为0;激光跟踪仪 II 为测量激光跟踪仪,放置在水平面上,且其激光光束与待测平面等高。激光跟踪仪 II 与目标靶球对准,利用内部测距干涉仪(DMI)测距功能测量目标靶球在直线上的移动距离,同时激光跟踪仪 I 利用编码器测量角度变化,跟踪测量靶球的位置。

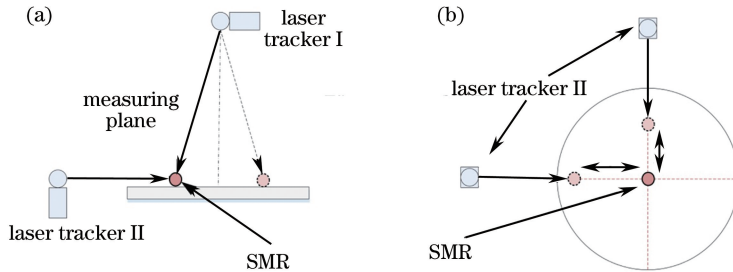


图5 激光跟踪仪角度误差标定示意图。(a) 正视图;(b) 俯视图

Fig. 5 Schematic diagram of angle error calibration of laser tracker. (a) Front view; (b) top view

测量之前,目标靶球放置在测量平面中心,测量过程中,目标靶球沿直线运动,根据激光跟踪仪 II 测量数据进行位置微调,保证靶球与跟踪仪 II 对准。激光跟踪仪 II 利用 DMI 准确测量靶球的移动距离,激光跟踪仪 I 通过角度和距离测量来跟踪测量靶球的位置。由于激光跟踪仪的 DMI 测量精度远高于其角度测量精度,可认为两激光跟踪仪测量值的偏差即为激光跟踪仪 I 的角度误差。

由激光跟踪仪测角误差分析可知,激光跟踪仪的水平和俯仰测角编码器与激光器的相互几何位置误差等共同决定了测量点的测角误差。对标定得到的测角误差数据进行多项式拟合,根据采样点的角度误差,恢复得到测量平面的角度误差分布函数,对激光跟踪仪角度误差进行补偿,提高检测精度。

2.3 测角误差矫正原理

测角误差不仅包含角度误差的大小,还包含角度误差的方向,即角度误差是一个矢量误差。激光跟踪仪测角误差的分析结果表明,可以用一个低阶连续可微的矢量函数来描述测角误差分布,根据采样点标定的测角误差,利用矢量多项式对测角误差进行拟合,恢复解算出测角误差分布函数,对激光跟踪仪角度测量误差进行补偿,提高检测精度。

在光学分析中,Zernike 多项式具有优越的性能,广泛应用于面形拟合及误差处理分析中,但是 Zernike 多项式是标量多项式,在处理矢量误差问题时具有一定的局限性。为了克服这一困难,Zhao 等^[19]基于 Zernike 多项式提出了一种矢量多项式——S 多项式,并利用 Gram-Schmidt 法则对其进行正交归一化:

$$S_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2n(n+1)}} \nabla Z_j, n = m \\ \frac{1}{\sqrt{4n(n+1)}} \left(\nabla Z_j - \sqrt{\frac{n+1}{n-1}} \nabla Z_{j'} \right), n \neq m, n' = n - 2, m' = m \end{cases}, \quad (3)$$

式中 Z_j 是 Zernike 多项式的第 j 项; j 和 j' 是 Zernike 多项式的项数, 且当 $m \neq 0$ 时 $j-j'$ 为偶数; n 和 m 为 Zernike 多项式阶次参数。S 多项式是 Zernike 多项式的梯度函数的线性组合, 并且在单位圆内相互正交。根据 Zernike 多项式的表达形式, 其梯度函数仍然可以表示为 Zernike 标量多项式的线性组合的形式, 也具有 Zernike 多项式的性质。Zhao 等^[20]对 S 多项式进行了补充完善, 使其在单位圆内完备。利用 S 多项式, 可以完备地描述单位圆内任意连续可微的矢量方程, 能够对矢量误差进行拟合分析, 有效地表达误差信息。

使用 S 多项式对测角误差数据进行拟合, 根据采样点的角度误差, 通过拟合得到测量平面的最佳角度误差分布函数, 计算得到测量平面中任意位置的角度矢量误差, 实现对激光跟踪仪角度测量误差的补偿。选择 S 多项式前 n 项对角度误差进行拟合, 测量平面的角度误差分布函数表示为

$$\mathbf{A}(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{S}_i(x, y), \quad (4)$$

式中 $\mathbf{A}(x, y)$ 为测量平面的角度误差分布函数, $\mathbf{S}_i(x, y)$ 为 S 多项式第 i 项, a_i 为 S 多项式第 i 项的系数。根据 S 多项式的性质, 以 S 多项式为基底, 对测角误差分布进行拟合, 通过标定得到各采样点的角度误差矢量 $\mathbf{A}_k(x_k, y_k)$, 将角度误差带入(4)式:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1(x_1, y_1) = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{S}_i(x_1, y_1) \\ \mathbf{A}_2(x_2, y_2) = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{S}_i(x_2, y_2) \\ \vdots \\ \mathbf{A}_k(x_k, y_k) = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{S}_i(x_k, y_k) \end{cases} \quad (5)$$

根据采样定律, 为了完整恢复误差分布函数 $\mathbf{A}(x, y)$, 需要标定的采样点数 k 一般多于拟合参数 a_i 的数量 n , 即(5)式为超定线性方程组。利用最小二乘法解算得到 S 多项式的系数, 拟合得到测量平面的角度误差分布函数。

3 补偿方法的仿真分析

以 4 m 量级非球面镜检测为模型, 利用 MATLAB 进行仿真分析。为了减小测角精度的影响, 大口径非球面镜采用立式检测系统^[14], 激光跟踪仪放置在非球面镜的中心轴线上, 根据实际检测塔高及相关技术指标要求, 激光跟踪仪离非球面镜距离为 $d=5$ m, 利用 Faro-Vantage 激光跟踪仪进行测量, 水平和俯仰测角范围为 $-21.8^\circ \sim 21.8^\circ$ 。根据跟踪仪技术参数, 测角精度为 $-2'' \sim 2''$, 在检测中测角误差引起的最大测量误差 Δs 为

$$\Delta s = d \cdot \Delta\theta \approx \pm 52 \mu\text{m}。 \quad (6)$$

3.1 母线与米字格采样分析

通过有限的采样点, 利用 S 多项式拟合恢复得到误差分布函数。恢复效果与采样点的选取密切相关, 采样点过少, 采样信息缺失, 导致误差分布函数特性丢失; 采样点过多, 采样信息冗余, 降低测量效率, 同时采样时间过长会引入更多的随机误差。选择合适的采样数据, 能够有效提高测量效率和测量精度。根据误差标定实验方案, 选择母线轨迹的方式进行采样计算。

针对不同的母线条数和采样数量进行仿真计算, 讨论分析最佳的采样方式。假设归一化处理后的角度误差分布(最大角度误差为 $1 \mu\text{m}$)为

$$\begin{cases} A_x = 4x^3y + 4xy^3 - 3xy \\ A_y = x^4 + y^4 - 6x^2y^2 \\ \mathbf{A} = A_x \mathbf{x} + A_y \mathbf{y} \end{cases} \quad (7)$$

在测量平面区域, 采样母线按等角度分布, 选择 S 多项式前 28 项进行拟合, 数值仿真计算得到表 1 所示的拟合结果, 其中 ΔS_{rms} 、 ΔX_{rms} 、 ΔY_{rms} 分别表示拟合残差及其 x 、 y 方向分量的均方根值, ΔS_{pv} 、 ΔX_{pv} 、 ΔY_{pv} 分别表示拟合残差及其分量的峰谷值, 后续表中的符号意义相同。

表 1 不同采样方式的结果比较

Table 1 Comparison among results from different sampling methods

Number of generatrices	Number of samplings	$\Delta X_{rms}/\mu m$	$\Delta Y_{rms}/\mu m$	$\Delta S_{rms}/\mu m$	$\Delta X_{pv}/\mu m$	$\Delta Y_{pv}/\mu m$	$\Delta S_{pv}/\mu m$
2	10	0.138	0.276	0.275	0.666	2.000	1.260
	18	0.138	0.276	0.275	0.666	2.000	1.260
	26	0.138	0.276	0.275	0.666	2.000	1.260
	30	0.138	0.276	0.275	0.666	2.000	1.260
3	10	0.169	0.042	0.125	1.562	0.440	1.219
	18	0.169	0.042	0.125	1.562	0.440	1.219
	26	0.169	0.042	0.125	1.562	0.440	1.219
	30	0.169	0.042	0.125	1.562	0.440	1.219
4	10	9.22×10^{-9}	1.61×10^{-8}	1.26×10^{-8}	1.22×10^{-7}	2.33×10^{-7}	2.27×10^{-7}
	18	3.20×10^{-8}	1.65×10^{-8}	2.63×10^{-8}	4.05×10^{-7}	2.46×10^{-7}	4.00×10^{-7}
	26	1.39×10^{-8}	2.73×10^{-8}	2.09×10^{-8}	1.79×10^{-7}	3.84×10^{-7}	3.74×10^{-7}
	30	5.34×10^{-9}	2.56×10^{-8}	1.83×10^{-8}	7.40×10^{-8}	3.50×10^{-7}	3.42×10^{-7}
5	10	3.51×10^{-10}	8.17×10^{-10}	7.63×10^{-10}	2.92×10^{-9}	3.64×10^{-9}	3.07×10^{-9}
	18	1.48×10^{-9}	1.69×10^{-9}	2.25×10^{-9}	1.23×10^{-8}	1.23×10^{-8}	8.68×10^{-9}
	26	6.42×10^{-10}	1.21×10^{-9}	8.56×10^{-10}	5.33×10^{-9}	1.24×10^{-8}	7.20×10^{-9}
	30	1.32×10^{-9}	2.73×10^{-9}	1.89×10^{-9}	1.10×10^{-8}	2.80×10^{-8}	1.57×10^{-8}
6	10	1.80×10^{-10}	2.72×10^{-10}	2.37×10^{-10}	1.44×10^{-9}	2.22×10^{-9}	1.86×10^{-9}
	18	2.63×10^{-10}	2.88×10^{-10}	2.79×10^{-10}	2.56×10^{-9}	2.78×10^{-9}	2.88×10^{-9}
	26	2.30×10^{-10}	1.59×10^{-10}	2.45×10^{-10}	2.22×10^{-9}	7.74×10^{-10}	2.22×10^{-9}
	30	2.24×10^{-10}	9.20×10^{-11}	1.93×10^{-10}	2.06×10^{-9}	1.05×10^{-9}	2.05×10^{-9}

分析表 1 发现,当采样母线条数少于 3 的时候,拟合残差较大,无法恢复得到初始给定的误差方程;当母线条数大于 4 的时候,拟合残差急剧下降,但是当采样母线条数继续增加时,各拟合参数的改变对拟合残差的影响变小;当采样母线条数相同时,单条母线上采样点的数量对拟合结果的影响较小。考虑到实验的方便性,当误差分布函数为低频连续二维函数时,选择对 4 条母线进行均匀采样,采样角度间隔为 45° ,每条母线上选择 18 个采样点即可达到较高的精度。

为了实现对较高频角度误差信息的恢复,满足拟合精度的需求,通常选用更高的阶次进行拟合,对(7)式给定的误差方程选择前 45 项进行拟合,结果如图 6(b)所示。图 6(a)是选择前 28 项进行拟合的结果。比较图 6(a)、(b)发现,选用高阶次进行拟合时,拟合残差中间较小,边缘较大,但是在边缘区域拟合出现震荡,拟合残差较大,拟合结果较差。根据 S 多项式的性质,多项式的次数随着拟合阶次的增加而增加,多项式的次数越高,拟合边缘区域的震荡越明显。为了抑制边缘震荡效应,考虑到母线采样的边缘数据点较少,因此采用如图 6(c)所示米字格采样方式,增加采样线和边缘数据点。利用 S 多项式前 45 项进行拟合,结果如图 6(d)所示。由图可知,拟合结果明显得到改善,有效抑制了边缘区域残差的震荡,相比于前 28 项拟合,拟合精度提高近两个数量级。

通过比较发现,米字格采样方案拟合精度较母线采样方案高,但是采样点多,采样效率低,在实际实验过程中应根据实际误差的形式选择适当的采样方案;当测角误差函数分布为低频函数时,选择母线采样可得到较好的拟合恢复效果;当测角误差函数为较高频误差分布时,为了提高拟合精度可以采用更高的拟合阶次,应采用米字格采样的方案。

3.2 角度误差恢复仿真计算

通过误差分析,激光跟踪仪角度误差可以用一个连续可微的二维矢量误差函数来描述,假设给定了激光跟踪仪的测角误差,并设分布函数最大值为 $52 \mu m$,则

$$\begin{cases} A_x = \sin \left[(x^2 - y^2 + 4x + y) \times \frac{\pi}{8} \right] \\ A_y = \sin \left[(xy + x + 3y) \times \frac{\pi}{8} \right] \\ \mathbf{A} = A_x \mathbf{x} + A_y \mathbf{y} \end{cases}, \quad (8)$$

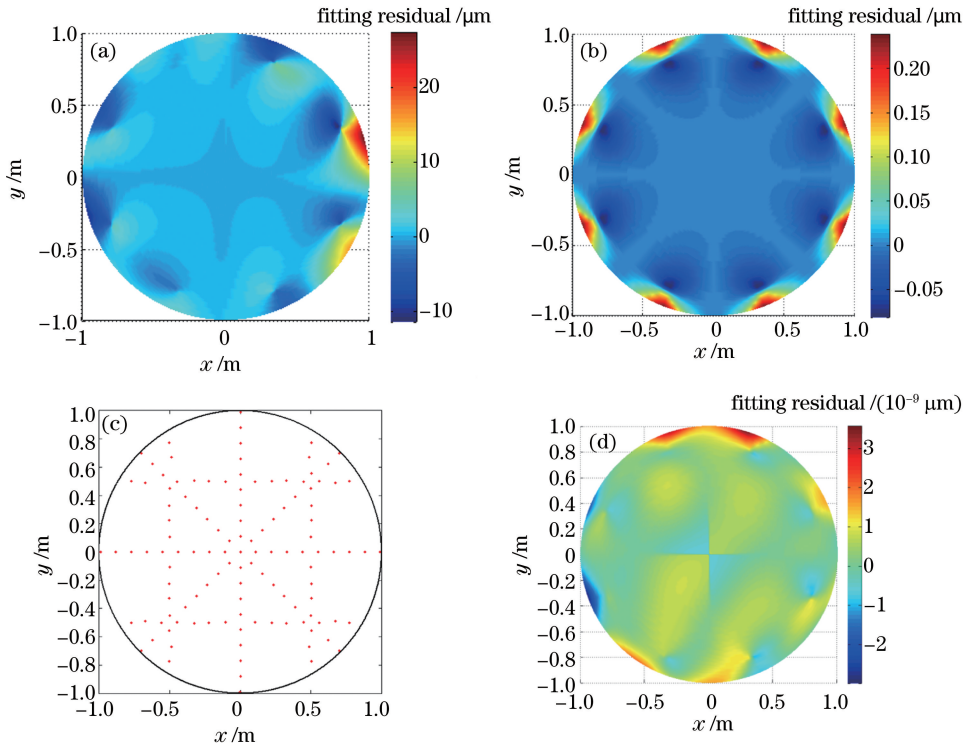


图 6 不同阶次拟合残差分布与采样方式下的拟合结果比较。(a) 母线采样,前 28 项;
(b) 母线采样,前 45 项;(c) 米字格采样示意图;(d) 米字格采样,前 45 项

Fig. 6 Comparison among results under different number of fitting terms and sampling methods. (a) Generatrix sampling, first 28 terms; (b) generatrix sampling, first 45 terms; (c) schematic diagram of composite sampling; (d) composite sampling, first 45 terms

式中 A_x, A_y 分别为不同方向的角度误差函数分量。

对激光跟踪仪的角度误差数据进行采样分析,选择母线采样方案。通过采样得到角度误差数据,选择 S 多项式前 28 项进行拟合,利用最小二乘优化算法,反解出角度误差分布函数,并与初始给定角度误差进行比较,得到拟合精度及拟合残差,仿真结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,对采样点误差信息进行多项式拟合,能够很好地恢复出角度误差分布函数,对角度误差的大小和方向均能很好地恢复,对细节部分的恢复也较明显。对拟合结果与初始误差进行对比,整个测量平面的拟合残差峰谷值优于 $1.5 \mu\text{m}$,中心测量区域拟合残差控制在 $0.5 \mu\text{m}$ 以下,测量平面的边缘区域拟合残差相对较大。拟合残差结果如表 2 所示。

表 2 S 多项式前 28 项拟合残差

Table 2 Fitting residuals of first 28 terms in S polynomial

Fitting result	ΔX_{rms}	ΔY_{rms}	ΔS_{rms}	ΔX_{pv}	ΔY_{pv}	ΔS_{pv}
Value / μm	0.289	0.179	0.216	3.78	2.52	2.12

对初始角度误差为 $52 \mu\text{m}$ 的激光跟踪仪,通过更高精度的 DMI 对采样点的角度误差进行标定,利用 S 多项式拟合,反解出激光跟踪仪角度误差分布函数,对激光跟踪仪进行测角精度补偿,理论上可以将其角度测量精度提高至峰谷值为 $1.5 \mu\text{m}$ 、均方根值优于 $0.25 \mu\text{m}$ 。

4 标定实验误差分析

利用 S 多项式对测量平面内采样数据点测角误差进行拟合,能够有效地恢复出整个测量平面内的角度误差分布,提高激光跟踪仪角度测量精度。在实际标定实验中会引入一定的误差,主要分为采样位置误差和标定实验的随机误差。

4.1 采样位置误差

在理想情况下,采样点沿着母线运动,且与激光跟踪仪对准。在标定过程中,实际采样点与理想采样位

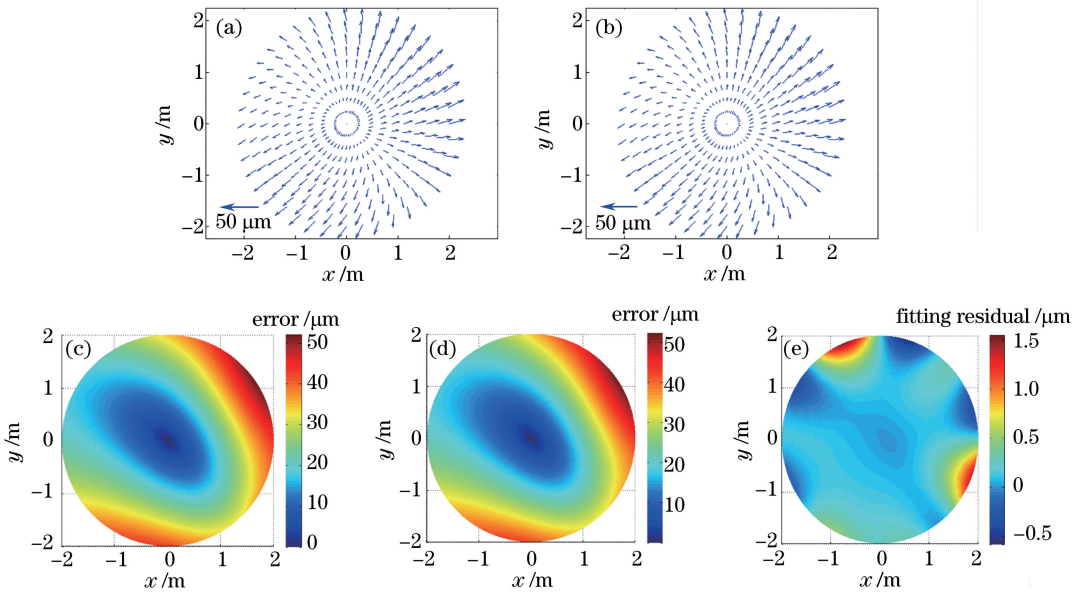


图 7 角度误差 S 多项式拟合恢复效果。(a)(c) 初始角度误差分布;(b)(d) 恢复角度误差分布;(e) 多项式拟合残差
 Fig. 7 Retrieval effect of angle error distribution after S polynomial fitting. (a)(c) Initial distributions of angle errors;
 (b)(d) retrieval distributions of angle errors; (e) residuals after polynomial fitting

置会出现一定的偏差,如图 8 所示。由于采样点始终与激光跟踪仪 II 对准,即在标定过程中,采样点始终在其角度初始位置附近,利用激光跟踪仪 II 能够精确地测量采样点的位置。

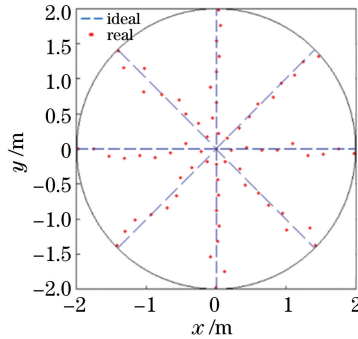


图 8 采样位置误差示意图

Fig. 8 Schematic diagram of sampling location errors

如图 8 所示,圆形区域表示 4 m 范围的角度误差标定区域。采样出现位置误差,初始误差分布函数由(8)式给出,最大位置误差为 30 mm。利用多项式拟合,计算初始角度误差信息,拟合残差如表 3 所示。

表 3 采样位置误差对拟合结果的影响

Table 3 Effect of sampling location errors on fitting results

Fitting result	$\Delta X_{rms}/\mu m$	$\Delta Y_{rms}/\mu m$	$\Delta S_{rms}/\mu m$	$\Delta X_{pv}/\mu m$	$\Delta Y_{pv}/\mu m$	$\Delta S_{pv}/\mu m$
Ideal situation	0.289	0.179	0.216	3.78	2.52	2.12
Real situation	0.288	0.174	0.289	4.53	2.57	2.72

通过比较发现,有位置误差和无位置误差的采样点拟合残差在同一精度范围,采样位置误差对拟合的影响可以忽略不计。在实际标定测量中,虽然采样位置会有所偏移,但是激光跟踪仪和目标靶球对准,采样信息为无误差准确信息,能够很好恢复出初始角度误差分布。

4.2 随机误差

在采样过程中,测量环境和人员等因素会引入随机误差,采样点的随机误差会对测量平面角度误差函数的拟合恢复产生一定的影响。利用数值仿真计算,在初始角度误差函数中引入随机误差,讨论分析不同大小的随机误差对拟合结果的影响。随机误差的角度误差分布函数为

$$\mathbf{A}_w = [1 + r(x, y)] \mathbf{A}, \quad (9)$$

式中 \mathbf{A}_w 为引入随机误差的测角误差分布函数, $r(x, y)$ 为引入的随机误差因子, \mathbf{A} 为初始角度误差分布函数, 可用(8)式描述。

通过采样得到带有随机误差的角度误差分布数据, 利用多项式进行拟合恢复, 结果如图 9 所示。当引入 10% ($5 \mu\text{m}$) 的随机误差时, 角度误差数据出现了一定的模糊, 部分细节信息被随机误差淹没。通过 S 多项式进行拟合, 能够很好地除去随机误差信号, 恢复得到最初的角度误差分布信息。将拟合得到的角度误差数据和初始误差相减得到拟合残差分布, 拟合残差峰谷值控制在 $4 \mu\text{m}$ 以内, 边缘局部区域拟合偏差较大。

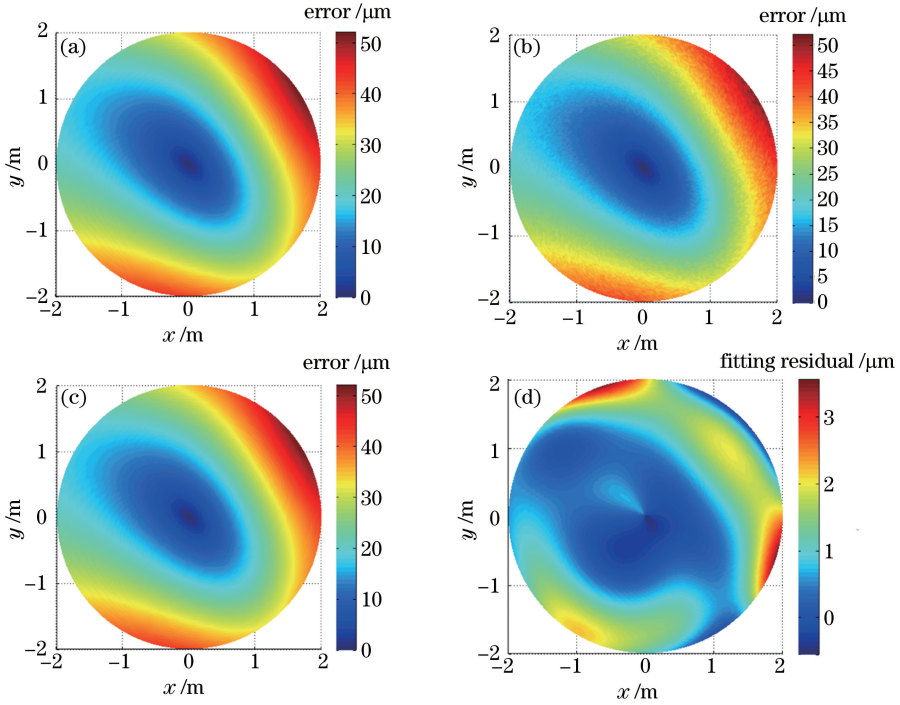


图 9 10%随机误差的 S 多项式拟合结果。(a) 初始角度误差分布;(b) 10%随机误差的角度误差分布;
(c) 恢复角度误差分布;(d) S 多项式拟合残差

Fig. 9 S polynomial fitting results within 10% random error. (a) Initial distribution of angle error; (b) distribution of angle error within 10% random error; (c) retrieval distribution of angle error; (d) residuals after polynomial fitting

引入不同随机误差进行拟合的残差数据如表 4 所示。引入随机误差之后, 拟合残差有一定的增加, 但是当随机误差在 10% ($5 \mu\text{m}$) 以内时, 拟合残差的均方根值仍然优于 $1 \mu\text{m}$, 特别是当随机误差控制在 5% ($2.5 \mu\text{m}$) 以内时, 拟合残差的均方根接近 $0.5 \mu\text{m}$ 。

表 4 随机误差对拟合结果的影响

Table 4 Effect of random errors on fitting results

Random error	$\Delta X_{rms}/\mu\text{m}$	$\Delta Y_{rms}/\mu\text{m}$	$\Delta S_{rms}/\mu\text{m}$	$\Delta X_{pv}/\mu\text{m}$	$\Delta Y_{pv}/\mu\text{m}$	$\Delta S_{pv}/\mu\text{m}$
0	0.279	0.179	0.216	3.779	2.521	2.126
1%	0.297	0.200	0.266	3.927	2.618	2.239
5%	0.564	0.494	0.528	4.573	4.884	2.861
10%	1.016	0.939	0.876	6.399	8.5947	4.114

通过仿真计算分析, 利用 S 多项式拟合, 能够克服随机误差带来的影响, 恢复得到角度误差分布函数。随机误差具有随机性, 可以通过多次测量取平均等方式控制随机误差的大小, 再通过 S 多项式拟合, 进一步减小随机误差对拟合结果的影响, 得到真实的测量平面的角度误差分布, 提高检测精度。

5 结 论

通过分析激光跟踪仪的测角误差来源, 提出了一种矫正角度误差的方法: 通过激光跟踪仪 DMI 对另一

激光跟踪仪的角度误差进行采样标定,利用 S 多项式对标定误差进行拟合,恢复解算出激光跟踪仪在待测镜体表面的测角误差分布,补偿测角精度,实现对大口径非球面镜的高精度检测。以 4 m 量级非球面反射镜面形检测为模型,对采样方案进行了讨论,提出了母线和米子格两种采样方案,以满足不同需求。利用仿真计算,验证了该方法能有效克服采样中的位置误差和随机误差带来的影响,对 10% 以内的随机误差有良好的抑制作用。初步证明了通过矫正能够有效提高激光跟踪仪的检测精度,为进一步实验提供了理论基础。

参 考 文 献

- Zhang Feng. Fabrication of large off-axis aspheric silicon carbide mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s2): s222001.
张 峰. 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.
- Li Ruigang, Zheng Ligong, 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.
- Zhang Feng. Fabrication of optical flat mirror with nanometer surface error[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 616-621.
张 峰. 纳米级面形精度光学平面镜加工[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 616-621.
- Zhang Zhiyu, Li Ruigang, Zheng Ligong, *et al.* Precision grinding technology for the off-axis aspherical silicon carbide mirror blank[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17): 39-45.
张志宇, 李锐钢, 郑立功, 等. 离轴非球面 SiC 反射镜的精密铣磨加工技术[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 39-45.
- Wang Xiaokun. Fabrication and testing of large aperture off-axis SiC aspheric mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011201.
王孝坤. 大口径离轴碳化硅非球面反射镜加工与检测技术研究[J]. *激光与光电子进展*, 2012, 49(1): 011201.
- Wang Xiaokun. Testing large SiC mirror by subaperture stitching interferometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 051202.
王孝坤. 大口径碳化硅反射镜面形子孔径拼接干涉检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 051202.
- Xue Donglin. Manufacture and application of large aperture standard transmission spheres[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0616001.
薛栋林. 大口径标准球面镜组研制与应用[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0616001.
- Wendt K, Schwenke H, Wäldele F, *et al.* Error mapping of large CMMs by sequential multi-lateration using a laser tracker[J]. *Proceedings of 2nd Euspen International Conference*, 2001.
- Burge J H, Su P, Zhao C, *et al.* Use of a commercial laser tracker for optical alignment[C]. *SPIE*, 2007, 6676: 66760E.
- Wang Xiaokun. Measurement of aspherical surfaces by laser tracker[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4): 379-383.
王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. *光子学报*, 2012, 41(4): 379-383.
- Li Jie, Wu Fan, Wu Shibin, *et al.* Using a laser tracker to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 108-112.
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): 108-112.
- Li Sen, Yan Guofeng, Liu Ning. Analysis of laser tracker coordinate measurement accuracy[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2013(2): 15-18.
李 森, 闫国锋, 刘 宁. 激光跟踪仪坐标测量精度分析[J]. *北京测绘*, 2013(2): 15-18.
- Zobrist T L, Burge J H, Davison W B, *et al.* Measurements of large optical surfaces with a laser tracker[C]. *SPIE*, 2008, 7018: 70183U.
- Burge J H, Kot L B, Martin H M, *et al.* Alternate surface measurements for GMT primary mirror segments[C]. *SPIE*, 2006, 6273: 62732T.
- 张善钟. 高精度圆分度测量装置中多读数头结构的消除误差原理[J]. *工具技术*, 1982(6): 39-48.
- Chen X J, Wang Z H, Zeng Q S. Angle measurement error and compensation for decentration rotation of circular gratings[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2010, 17(4): 536-539.
- Lu Rongsheng, Li Wanhong, Lao Dabao, *et al.* Angular error compensation for laser tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2299-2305.
卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2299-2305.
- Li Jie. Research on laser tracker measurement of large optical surface[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.

李 杰. 基于激光跟踪仪的大口径光学件面形检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.

- 19 Zhao C, Burge J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part I: Basis set derived from gradients of Zernike polynomials[J]. Optics Express, 2007, 15(26): 18014-18024.
- 20 Zhao C, Burge J H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, Part II: Completing the basis set[J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6586-6591.