

DOI : 10.3901/JME.2015.04.022

磨削阶段大口径非球面拼接测量技术*

张东旭 杨平 毕果 杨旭 叶世蔚 郭隐彪
(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

摘要 :为实现对磨削加工阶段大口径非球面光学元件的精密测量,提出一种基于坐标测量的多段拼接综合优化数据处理模型。基于多体系理论、最小二乘原理建立两段面形轮廓拼接数学模型;提出基于曲率原理和非球面方程最小二乘拟合的冗余数据剔除数学模型;建立多段拼接的综合优化处理模型;利用 Taylor Hobson 轮廓仪对口径为 176 mm 的非轴对称非球面光学元件的 3 条母线进行分段测量试验并通过文中提出的数学模型进行数据拼接处理,试验结果表明,拼接测量结果与单次测量结果相比,误差最大值的平均值为 0.25 μm ,最小值的平均值为-0.22 μm ,比该光学元件的面形峰-谷值 2.77 μm 高出一个数量级,达到检测要求。试验结果证明所提多段拼接综合优化数据处理模型的正确性及有效性,该模型可以进行工程应用。

关键词 :大口径非球面;拼接测量;冗余数据剔除;综合优化处理

中图分类号: TG161

Stitching Measurement Technique for Large-aperture Aspheric Surface during Grinding Process

ZHANG Dongxu YANG Ping BI Guo YANG Xu YE Shiwei GUO Yinbiao
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract : In order to test large-aperture aspheric surface optice element accurately during grinding process, a comprehensive optimization data processing model of stitching measurement is proposed based on coordinate measuring. Firstly, the stitching model for two segments of surface shape contour is built based on multi-body system theory and least square principle; secondly, the rejecting redundant data model is built based on curvature principle and least square fitting of aspheric equation; then the comprehensive optimization processing model for multiple segments stitching is built; three generatrices of a non-axisymmetry aspherical optical element whose aperture is 176 mm is stitching measured by Taylor Hobson profilometer and the data is processed by the model mentioned in the text. The results show that the maximum average error of the stitching measurement is 0.25 μm , and the minimum average error of the stitching measurement is -0.22 μm which is compared with the single measurement. The error is an order of magnitude higher than the surface shape peak-valley value 2.77 μm of the optic element, and matches the measurement requirements. The experimental results prove the correctness and effectiveness of the comprehensive optimization data processing model of stitching measurement, and the model can be applied in engineering.

Key words :large-aperture aspheric surface ;stitching measurement ;rejecting redundant data ;comprehensive optimization processing

0 前言

随着空间技术、电子信息技术的迅猛发展以及航空航天、天文、国防等领域的需要,大口径非球面光学元件因其具有校正相差、改善像质并可以减小光学系统的尺寸和重量的优势,需求量不断增大^[1-2]。与此同时,对非球面的精度要求也越来越高,

这就对加工和检测提出了新的挑战。

对于大口径非球面光学元件的精密测量,目前主要有两种技术手段:制造大量程、高精度的检测设备^[3];利用拼接测量技术,采用高精度、小量程的测量仪器及装置对大口径非球面进行检测^[4]。对于第一种技术手段,虽然能够直接便捷地实现对大口径非球面的精密测量,但是随着量程的增大,如何保证检测设备本身的精度不随之下降成为难题之一,并且解决这个难题往往会造成设备的成本昂贵,大多数用户难以承受。相比之下,用高

*国家自然科学基金资助项目(51075343,51275433)。20140219 收到初稿,20140820 收到修改稿

精度、小量程的检测设备，通过拼接测量的技术手段，实现对大口径非球面的准确测量具有重要意义和广阔的应用前景。

目前，很多学者对基于激光干涉仪的子孔径拼接技术进行了研究，云宇等^[5]应用该技术对大口径光学元件进行拼接检测，与单次测量结果相比，面形峰-谷(Peak-valley, P-V)值误差为 2.37%；王孝坤等^[6]应用该技术对非球面进行拼接检测，并提出了多个子孔径的综合优化和全口径数据重构数学模型，在不需要零位补偿的情况下，拼接后面形误差相比，P-V 值和方均根值误差分别为-0.009 2 个光波波长和 0.001 3 个光波波长；侯溪等^[7]在环形子孔径拼接检测原理的基础上，建立了子孔径规划模型并给出了具体的求解方法；张蓉竹等^[8]应用该技术对大口径光学元件进行拼接检测，并建立了拼接精度分析模型，量化了拼接检测系统的精度；AXEL 等^[9-10]应用辅助设备对非球面的子孔径拼接测量技术进行了试验研究。但是，这些技术无法应用于磨削阶段大口径非球面光学元件的测量。主要因为光学元件一般需要经过粗磨、精磨和抛光等三个加工阶段才能达到精度要求，在完成粗磨成形后的光学元件面形误差一般在数十 μm 的量级^[11]，在完成精磨后的面形误差一般在 3~5 μm 的量级，此时，面形误差与理论值偏差较大，表面粗糙度不佳，超出激光干涉仪的测量精度范围。贾立德等^[12]针对高陡度保形光学镜面提出了基于多段拼接的坐标测量方法，但是对于拼接后续数据处理没有给出相应解决方案，如重叠区域采样点的误差匹配和测量误差对重构精度的影响等问题。

针对现有研究中存在的问题，本文提出一种用于磨削阶段大口径非球面光学元件面形检测的拼接测量方法，如图 1 所示，建立面形轮廓拼接数学模型、冗余数据剔除数学模型和综合优化处理模型。最后通过试验验证了该拼接测量方法的正确性和有效性。

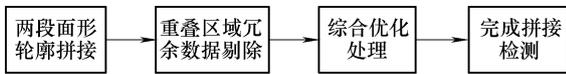


图 1 拼接测量方法流程图

$$\begin{pmatrix} x_{jc} \\ y_{jc} \\ z_{jc} \\ 1 \end{pmatrix} = T_{ij} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_{ij} \cos \gamma_{ij} & -\cos \beta_{ij} \sin \gamma_{ij} & \sin \beta_{ij} & x_{ij} \\ \cos \beta_{ij} \sin \gamma_{ij} + \sin \alpha_{ij} \sin \beta_{ij} \cos \gamma_{ij} & \cos \alpha_{ij} \cos \gamma_{ij} - \sin \alpha_{ij} \sin \beta_{ij} \sin \gamma_{ij} & -\sin \alpha_{ij} \cos \beta_{ij} & y_{ij} \\ \sin \beta_{ij} \sin \gamma_{ij} - \cos \alpha_{ij} \sin \beta_{ij} \cos \gamma_{ij} & \sin \alpha_{ij} \cos \gamma_{ij} + \cos \alpha_{ij} \sin \beta_{ij} \sin \gamma_{ij} & \cos \alpha_{ij} \cos \beta_{ij} & z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， T_{ij} 为变换特征矩阵； x_{ij} 、 y_{ij} 、 z_{ij} 分别为沿 x 、 y 、 z 轴平移距离； α_{ij} 、 β_{ij} 、 γ_{ij} 分别为绕 x 、 y 、 z 轴转动的欧拉角； (x_{jc}, y_{jc}, z_{jc}) 即为在理想情况下， CD 段在 AB 段测量坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 下的坐标值。

1 拼接测量基本原理

以两段拼接测量为例，其原理如图 2 所示，将被测工件分为 AB 和 CD 两段。 x 方向为测头运动方向， z 方向为测头测量方向。首先在状态 1 下测量 AB 段轮廓，然后将工件沿相关坐标轴平移和旋转至状态 2，并将测头分别沿 x 轴、 z 轴方向平移到合适的量程内以测量 CD 段轮廓，同时保证 AB 段和 CD 段有重叠区域 CB 。对于工件的平移量和旋转量，要根据待测元件的口径、半径、曲率等几何特性以及测量设备量程等因素提前进行分段规划而得到。最后，通过空间矩阵变换使 AB 和 CD 两段轮廓的测量坐标值统一于同一坐标系下，从而实现被测工件完整轮廓的重构。利用重叠区域 CB 轮廓信息可以帮助更为准确、方便地建立 AB 、 CD 轮廓之间的相对空间位置关系。

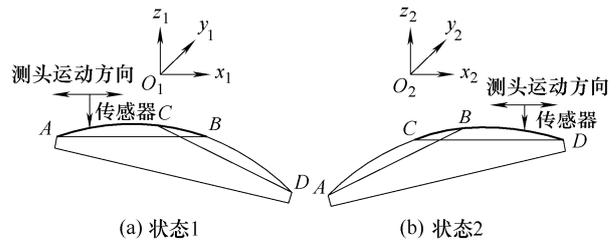


图 2 拼接测量原理

在测量过程中，完成对 AB 段的测量后，要平移及旋转待测工件以完成对 CD 段的测量。如图 2 所示，设 AB 和 CD 的测量局部坐标系分别为 $O_1x_1y_1z_1$ 和 $O_2x_2y_2z_2$ ，分段测量后，得到 AB 和 CD 段两组互不相关的测量数据点集 (x_i, y_i, z_i) ，其中 $i=1, 2, \dots, n$ 和 (x_j, y_j, z_j) ，其中 $j=1, 2, \dots, m$ 。根据多系统理论^[13]，为实现 AB 和 CD 段测量的点集统一到同一坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 中，需要对点集 (x_j, y_j, z_j) ，其中 $j=1, 2, \dots, m$ 做平移及旋转变换，运算过程如式(1)所示

2 数学模型的建立和数据处理

按照上述方法进行拼接后，其精度往往达不到

要求,主要原因有以下三点: 根据多体系统理论,每个运动轴在平移和旋转过程中均存在 6 自由度的运动误差且轴与轴之间还存在垂直度误差,所以将 CD 段在其自身测量坐标系下的坐标值变换至 AB 段测量坐标系下的过程中,不但要考虑理想情况下平移及旋转变换,也要考虑运动误差的影响; 重叠部分 CB 段的数据量是其他部分的两倍,这将影响该段轮廓的测量精度,同时还会造成对非球面的评价误差; 反复利用两段面形轮廓的拼接原理就可以实现多段拼接,但是这样会带来误差的传递和累

积,累积误差是降低拼接精度的重要因素之一。

2.1 两段面形轮廓拼接数学模型

在大口径非球面光学元件拼接测量过程中,夹持光学元件的夹具的每个运动轴在运动过程中均存在 6 自由度的误差,轴间还存在垂直度误差,本文以 x 轴为例进行说明。设 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} 、 Δz_{ij} 为 X 轴沿 x、y、z 轴方向的平动误差, $\Delta\alpha_{ij}$ 、 $\Delta\beta_{ij}$ 、 $\Delta\gamma_{ij}$ 为 x 轴绕 x、y、z 轴方向的转动误差。根据多体系统理论,其运动误差特征矩阵为

$$\Delta T_{ijx} = \begin{pmatrix} \cos\Delta\beta_{ij} \cos\Delta\gamma_{ij} & -\cos\Delta\beta_{ij} \sin\Delta\gamma_{ij} & \sin\Delta\beta_{ij} & \Delta x_{ij} \\ \cos\Delta\beta_{ij} \sin\Delta\gamma_{ij} + \sin\Delta\alpha_{ij} \sin\Delta\beta_{ij} \cos\Delta\gamma_{ij} & \cos\Delta\alpha_{ij} \cos\Delta\gamma_{ij} - \sin\Delta\alpha_{ij} \sin\Delta\beta_{ij} \sin\Delta\gamma_{ij} & -\sin\Delta\alpha_{ij} \cos\Delta\beta_{ij} & \Delta y_{ij} \\ \sin\Delta\beta_{ij} \sin\Delta\gamma_{ij} - \cos\Delta\alpha_{ij} \sin\Delta\beta_{ij} \cos\Delta\gamma_{ij} & \sin\Delta\alpha_{ij} \cos\Delta\gamma_{ij} + \cos\Delta\alpha_{ij} \sin\Delta\beta_{ij} \sin\Delta\gamma_{ij} & \cos\Delta\alpha_{ij} \cos\Delta\beta_{ij} & \Delta z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

因此在实际的拼接过程中,将 AB 和 CD 段的测量点集统一到同一坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 中的变换运算为

$$\begin{pmatrix} x_{jd} \\ y_{jd} \\ z_{jd} \\ 1 \end{pmatrix} = T_{ij} \Delta T_{ijx} \Delta T_{ijy} \Delta T_{ijz} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, ΔT_{ijx} 、 ΔT_{ijy} 、 ΔT_{ijz} 分别为实际情况下 x、y、z 三轴的运动误差特征矩阵; (x_{jd}, y_{jd}, z_{jd}) 即为在实际情况下,CD 段在 AB 段测量坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 下的坐标值。

此方法虽然能够准确实现两段面形轮廓的拼接,但在实际工程应用中,一方面,很难准确测量夹具各轴 6 自由度误差及轴间垂直度误差,并且在测量过程中极易引入测量误差,对拼接测量结果造成较大影响;另一方面,在各项运动误差中,根据拼接测量的特点,有些误差对拼接精度的影响极小,可以忽略不计。本文提出适于工程应用的两段面型轮廓拼接数学模型。

AB 段测量完成后,测量 CD 段时,需要将其沿测头运动方向和传感器测量方向平动,沿与上述两个方向确定的平面相垂直的方向转动,不失一般性,如图 2 定义,设测头运动方向为 x 轴方向,传感器测量方向为 z 轴方向,CD 段绕 y 轴方向转动。因此将 AB 和 CD 段的测量点集统一到同一坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 中的变换过程描述为

$$\begin{pmatrix} x_{gc} & y_{gc} & z_{gc} & 1 \end{pmatrix}^T = R_{ijl} T_{ijl} \Delta R_{ijl} \Delta T_{ijl} \begin{pmatrix} x_j & y_j & z_j & 1 \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

$$R_{ijl} = \begin{pmatrix} \cos\beta_{ijl} & 0 & -\sin\beta_{ijl} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta_{ijl} & 0 & \cos\beta_{ijl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T_{ijl} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{ijl} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{ijl} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta R_{ijl} = \begin{pmatrix} \cos\Delta\beta_{ijl} & 0 & -\sin\Delta\beta_{ijl} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\Delta\beta_{ijl} & 0 & \cos\Delta\beta_{ijl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta T_{ijl} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_{ijl} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_{ijl} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中 R_{ijl} ——理想情况下 CD 段绕 y 轴旋转变换矩阵;

T_{ijl} ——理想情况下 CD 段沿 x、z 方向平移变换矩阵;

β_{ijl} ——绕 y 轴旋转角度;

x_{ijl}, z_{ijl} ——沿 x、z 方向移动位移;

ΔR_{ijl} ——CD 段绕 y 轴旋转误差运动矩阵;

ΔT_{ijl} ——CD 段沿 x、z 方向平移误差运动矩阵;

$\Delta\beta_{ij}$ ——绕 y 轴旋转角度误差;

$\Delta x_{ijl}, \Delta z_{ijl}$ ——沿 x、z 方向移动位移误差;

(x_{gc}, y_{gc}, z_{gc}) ——在实际拼接测量中,CD 段在 AB 段测量坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 下的坐标值。

在实际测量过程中,由于分段规划是预先设计的,所以 β_{ijl} 、 x_{ijl} 、 z_{ijl} 是已知的,所以有

$$\begin{pmatrix} x_{gc}^n & y_{gc}^n & z_{gc}^n & 1 \end{pmatrix}^T = R_{ijl} T_{ijl} \begin{pmatrix} x_j & y_j & z_j & 1 \end{pmatrix}^T \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} x_{gc} & y_{gc} & z_{gc} & 1 \end{pmatrix}^T = \Delta R_{ijl} \Delta T_{ijl} \begin{pmatrix} x_{gc}^n & y_{gc}^n & z_{gc}^n & 1 \end{pmatrix}^T \quad (6)$$

式中, $(x_{gc}^n, y_{gc}^n, z_{gc}^n)$ 为在理想情况下, CD 段经过运动变换后的轮廓坐标值。用泰勒级数对式(6)进行展开, 可以得到式(7)

$$\begin{cases} x_{gc} = -(z_{gc}^n + \Delta z_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^5}{5!} + (x_{gc}^n + \Delta x_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^4}{4!} + (z_{gc}^n + \Delta z_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^3}{3!} - (x_{gc}^n + \Delta x_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^2}{2!} - (z_{gc}^n + \Delta z_{ijl}) \Delta \beta_{ijl} + (x_{gc}^n + \Delta x_{ijl}) \\ y_{gc} = y_{gc}^n \\ z_{gc} = (x_{gc}^n + \Delta x_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^5}{5!} + (z_{gc}^n + \Delta z_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^4}{4!} - (x_{gc}^n + \Delta x_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^3}{3!} - (z_{gc}^n + \Delta z_{ijl}) \frac{\Delta \beta_{ijl}^2}{2!} + (x_{gc}^n + \Delta x_{ijl}) \Delta \beta_{ijl} + (z_{gc}^n + \Delta z_{ijl}) \end{cases} \quad (7)$$

设重叠区域 CB 在 AB 、 CD 段中测量点集分别为 (x_{is}, y_{is}, z_{is}) , 其中 $i=1, 2, \dots, p$ 和 (x_{js}, y_{js}, z_{js}) , 其中 $j=1, 2, \dots, p$ 。将 (x_{js}, y_{js}, z_{js}) 代入式(5), 得到在理想情况下, 重叠区域 CB 段经过运动变换后的轮廓坐标值, 即 $(x_{gcs}^n, y_{gcs}^n, z_{gcs}^n)$, 然后与 (x_{is}, y_{is}, z_{is}) 代入式(7), 求得误差运动参数的最小二乘解, 从而实现相邻两段面形轮廓的拼接。

2.2 冗余数据的剔除

按上述方法完成两段面形轮廓拼接后, 重叠部分 CB 段的数据量是其他部分的两倍, 因此如何剔除重合部分的冗余数据, 使得剩余数据的拼接误差降到最低, 是拼接后续数据处理的关键问题之一。本文提出基于曲率原理和非球面方程最小二乘拟合的冗余数据剔除数学模型。具体如式(8)所示

$$\begin{cases} z = a \frac{-cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + (1-a) \left[-R_x + \sqrt{R_x^2 - x^2} + \frac{C_s y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C_s^2 y^2}} \right] \\ K = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^{-1} \\ \min F(\lambda_1, \lambda_2) = [(K_{ii} - K_{i-1}) - (K_k - K_{k-1}), (K_{jj} - K_{j-1}) - (K_k - K_{k-1})] \end{cases} \quad (8)$$

在式(8)的第一个公式中, a 为非球面类型参数, 其中 $a=1$ 时, 即为轴对称非球面方程, $a=0$ 时, 即为非轴对称非球面方程; $c=R^{-1}$, R 为非球面基础曲率半径, $C_s=1/R_s$, $R_s=-R_y+Ax^2+Bx^4+Cx^6+Dx^8+Ex^{10}+Fx^{12}$, 其中, R_s 为非球面副轴半径, R_x 为非球面主轴基础半径, R_y 为非球面副轴基础半径, A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为非球面副轴系数, k 为非球面系数; 第

计算出三条曲线上各点的曲率, 并在每条曲线上用后一点的曲率值减去前一点的曲率值; 最后, 在相同横坐标处, 将两段重合部分的曲率差值分别与整体轮廓曲线的曲率差值进行比较, 剔除相差较大的点。

式为求解拟合曲线上各点曲率的公式; 第 式中 λ 为延伸因子, 即在对各段的重合部分分别进行拟合时, 向各段非重合部分延伸的距离中所包含的测量点数, λ_1 、 λ_2 分别对应 AB 、 CD 段的重合部分; 第 式中 F 为判定标准, K_k 为对拼接所得整体轮廓拟合后的曲线按照拟合点横坐标所求各点的曲率值, K_{ii} 为对 AB 段重合处及其延伸部分拟合后的曲线按照拟合点横坐标所求各点的曲率值, K_{jj} 为对 CD 段重合处及其延伸部分拟合后的曲线按照拟合点横坐标所求各点的曲率值, 将上述各点曲率值按第 式代入后, 在同一 x 坐标下, 保留使第 式达到最小值的点, 剔除其他点。

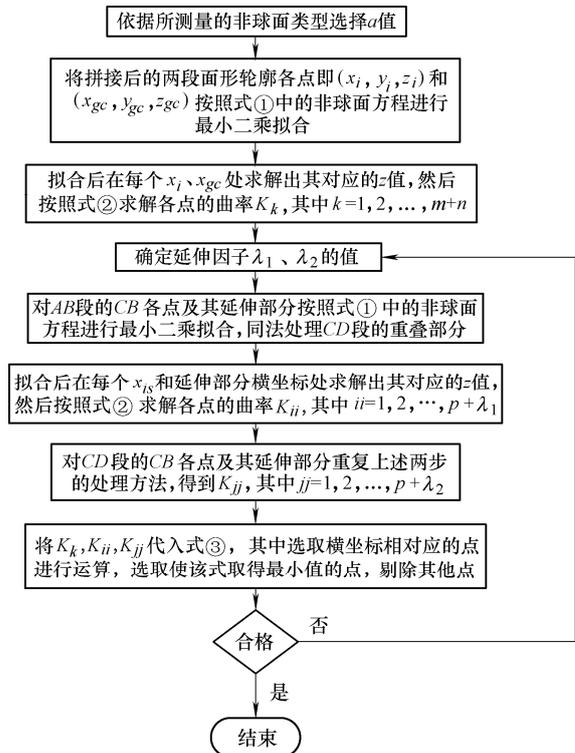


图3 剔除冗余数据数学模型使用方法

该数学模型具体使用方法如图3所示, 其核心策略是首先对拼接后的整体面形轮廓和带有延伸区域的重叠部分分别进行非球面方程最小二乘拟合, 得到拼接后整体面形轮廓的拟合曲线和各段重合部分拟合曲线; 然后, 依据各测量点的横坐标值, 分别计算出三段曲线上各自对应的 z 值; 进而, 分别

2.3 多段面形轮廓拼接的综合优化处理

重复上述步骤,多次利用两段面形轮廓拼接数学模型以及冗余数据剔除方法就可以实现多段面形轮廓的拼接,但是这样往往会造成误差传递和累积,从而降低了整个面形轮廓的拼接测量精度。因此,多段面形轮廓拼接后需要进行综合优化。实际的拼接测量过程中,划分段数大于两段时(假设共 M 段),理论上可以选定其中任意一段作为基准,但为了便于定位、测量以及定性减少累积误差,选择非球面的中心段作为参考标准,从第一段到第 M 段,依次设每段的测量点数分别为 n_1, n_2, \dots, n_m , 相邻两段间重合部分点数分别为 p_1, p_2, \dots, p_{m-1} 。为了建立优化拼接数学模型,设立调整因子 (ω, γ) 和权重因子 b_i , ω 为拼接后整体面形轮廓绕 Y 轴旋转角度, γ 为其沿 Z 轴方向平移距离,具体如式(9)~(14)所示

$$\begin{pmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \cos \omega & 0 & -\sin \omega & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \omega & 0 & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x & y & z & 1 \end{pmatrix}^T \quad (9)$$

式中 ω ——旋转角度;

γ ——平移量。

$$z = a \frac{-cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} +$$

$$(1-a) \left[-R_x + \sqrt{R_x^2 - x^2} + \frac{C_s y^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C_s^2 y^2}} \right] \quad (10)$$

$$K = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^{-1} \quad (11)$$

$$n' = [n_1 + n_2 + \dots + n_m - (p_1 + p_2 + \dots + p_{m-1})] \quad (12)$$

$$\begin{cases} \text{若 } n' = 2e & b_i = 1 + |e - i| \cdot 0.1 \quad i = 1, 2, \dots, n' \\ \text{若 } n' = 2e + 1 & b_i = 1 + |e + 1 - i| \cdot 0.1 \quad i = 1, 2, \dots, n' \end{cases} \quad (13)$$

$$\min G = \sum_{i=1}^{n'} b_i (K_i - K_0)^2 \quad (14)$$

式(9)为整体轮廓的综合优化公式;式(10)、(11)含义与式(8)中前两式相同;式(12)用于计算拼接并剔除冗余点后整体面形轮廓的总测量点数;式(13)给出权重因子 b_i 的计算方法,在拼接过程中,测量点距离基准段的中心点“越远”,经变换后其受到的影响越大,因此在消除累积误差中其权重越大;式(14)中, K_0 为基准段中心点的曲率值, K_i 为对拼接并剔除冗余点后所得整体轮廓拟合后的曲线按照拟合点横坐标所求各点的曲率值。

该数学模型具体使用方法是首先对拼接并剔除冗余点后的整体轮廓按照式(9)进行综合优化处理;然后依据所测量的非球面类型选择 a 值,对综合优化处理后带有调整因子参数的各点进行非球面最小二乘拟合并求出基准段中心点和各点的曲率值;第三,按照式(12)计算综合优化处理后整体面形轮廓总测量点数,按照式(13)计算各点的权重因子 b_i ;最后利用式(15),在满足式(14)即各点曲率值与基准段中心点曲率值差的平方和最小条件下,求出调整因子参数的最优解。

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial \omega} = 0 \\ \frac{\partial G}{\partial \gamma} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

3 试验

利用 Taylor Hobson 公司的 Form Talysurf PGI 1240 轮廓仪,针对本文提出的基于坐标测量的多段拼接综合优化数据处理模型,进行了试验研究。该轮廓仪的量程为 200 mm,所用测针的长度为 60 mm,分辨率为 0.8 nm,测量矢高量程为 12.5 mm;为了能够与单次测量结果比较,选取的被测光学元件为口径 176 mm 的非轴对称非球面光学元件;被测光学元件所用的夹具为课题组自行开发研制的非球面拼接测量的试验夹具,该夹具 x 轴行程 220 mm, y 轴行程 100 mm,可以实现 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 范围调整倾角。试验实物如图 4 所示。

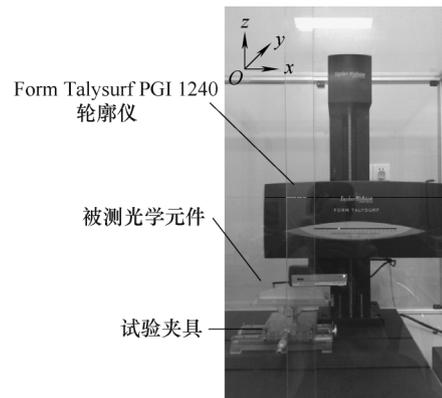


图 4 试验实物图

3.1 试验方案

试验方案如图 5 所示,具体描述如下。首先对被测的非轴对称非球面光学元件进行分段规划和局部坐标系的建立,进行分段规划主要考虑的因素如下:综合考虑被测光学元件的面形特点和夹具平移及旋转的范围界限;为了验证本文所提数学模型的正确性和一般性,选择 3 条不同位置的母线,

各划分不同的段数并选择不同长度的重叠区域，图6所示为3条母线的分段示意图，具体划分段数及重叠区域的长度见表1；接着将夹具安装在PGI1240轮廓仪的工作台上，依据第一条母线的第一段待测轮廓的面形特点装夹被测光学元件；用轮廓仪对其进行测量，完成后，调整被测光学元件的位姿，对第二段轮廓进行测量，如此重复完成第一条母线所有分段轮廓的测量；然后，调整被测光学元件的位姿，利用轮廓仪对第一条母线进行一次完整的测量；如此循环完成第二条和第三条母线的测量；最后，应用本文提出的数学模型进行数据处理，并与单次测量结果进行比对和分析。

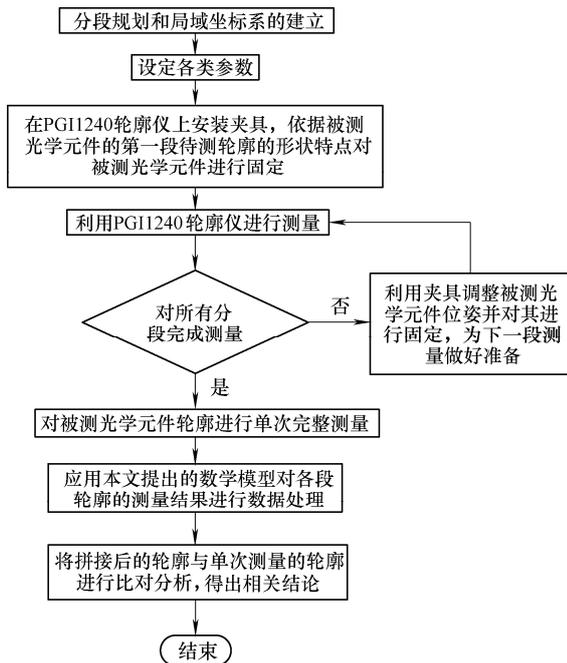


图5 试验流程图

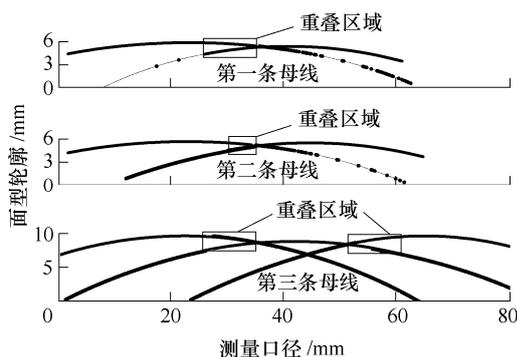


图6 面形轮廓的分段划分

表1 分段参数

母线	所分段数	总长度/各段长度/mm	重叠区域长度/mm	重叠区域占总长的比例(%)
第一条	2	60/35	10	28.57
第二条	2	60/35	5	14.29
第三条	3	85/35	10	28.57

3.2 试验结果分析

三条母线的分段测量结果如图7a所示，图7b为Form Talysurf PGI 1240轮廓仪单次测量该试验用光学元件后，给出的表面质量评价，其P-V值为 $2.77\ \mu\text{m}$ 。

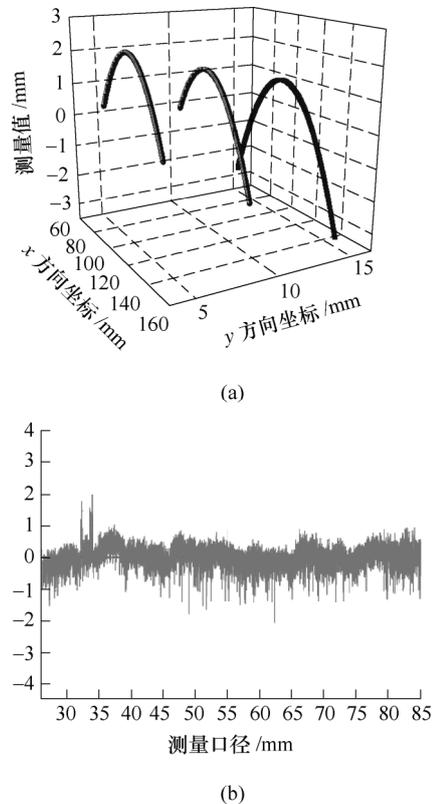
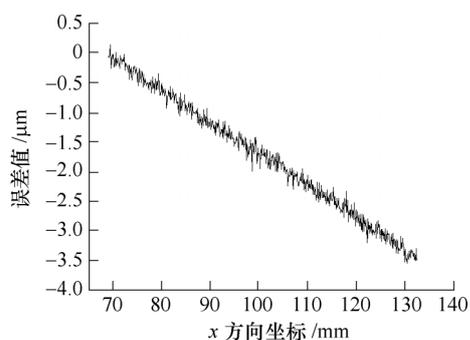


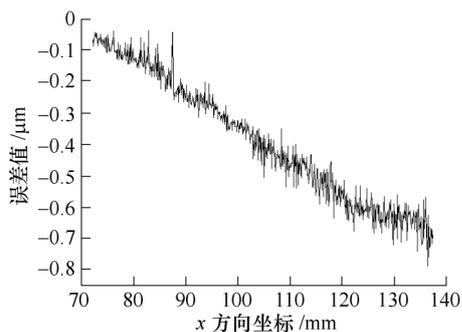
图7 分段测量及表面评价

应用本文提出的两段面形轮廓拼接模型和冗余数据剔除模型进行数据处理后，与单次测量结果相比，误差值如图8所示，图8a~8c分别表示表1中的第一条、第二条和第三条母线测量误差，试验结果显示，第一段和第三段的拼接误差在微米级，第二段在亚微米级，最大误差值与该光学元件的P-V值在同一数量级。

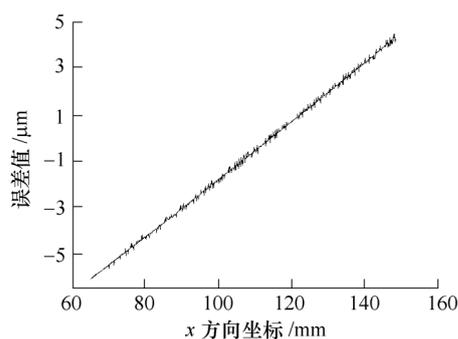
经过两段面形轮廓拼接模型和冗余数据剔除模型处理后，再应用本文提出的综合优化处理模型进行最终处理，结果如图9所示，图9a~9c分别表示表1中的第一条、第二条和第三条母线测量误差，试验结果显示，第一条母线拼接测量后与单次测量相比，误差最大值为 $0.36\ \mu\text{m}$ ，最小值为 $-0.34\ \mu\text{m}$ ；第二条母线拼接测量后与单次测量相比，误差最大值为 $0.16\ \mu\text{m}$ ，最小值为 $-0.11\ \mu\text{m}$ ；第三条母线拼接测量后与单次测量相比，误差最大值为 $0.22\ \mu\text{m}$ ，最小值为 $-0.21\ \mu\text{m}$ ；误差值与该光学元件的P-V值 $2.77\ \mu\text{m}$ 相比，精度均高出一个数量级，达到检测要求。



(a)

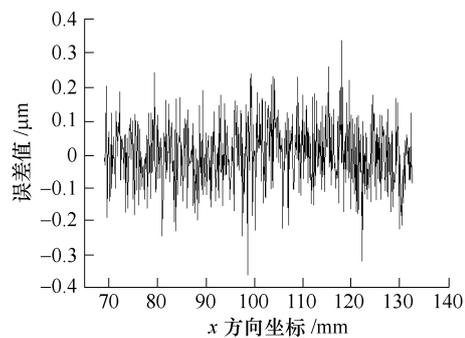


(b)

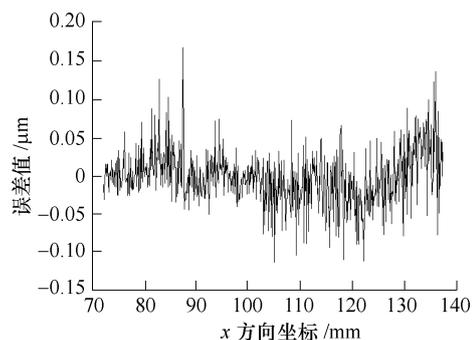


(c)

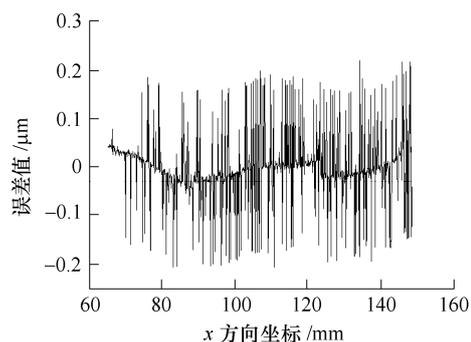
图 8 拼接并剔除冗余数据后误差



(a)



(b)



(c)

图 9 综合优化数据处理结果

4 结论

本文针对磨削阶段大口径非球面光学元件的精密测量,提出了基于坐标测量的多段拼接综合优化数据处理模型。

(1) 综合运用多体系统理论、泰勒级数和最小二乘原理,结合磨削阶段光学元件精密检测特点,建立了两段面形轮廓拼接数学模型。

(2) 提出了基于曲率原理和非球面方程最小二乘拟合的冗余数据剔除数学模型及其使用方法。

(3) 建立了多段拼接的综合优化处理模型及其使用方法。

(4) 多段拼接测量试验证明了本文提出的拼接模型及后续数据处理模型的正确性,拼接测量结果

与单次测量结果相比,三条母线测量误差最大值的平均值为 $0.25 \mu\text{m}$,最小值的平均值为 $-0.22 \mu\text{m}$,比光学元件的 P-V 值 $2.77 \mu\text{m}$ 高出一个数量级,达到检测要求。

参 考 文 献

- [1] 林长青, 景洪伟, 匡龙. 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.
- [2] LIN Changqing, JING Hongwei, 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.
- [2] 姜晨, 郭隐彪, 潘日, 等. 离轴楔形非球面平行磨削及

- 补偿技术研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3) : 193-198.
- JIANG Chen, GUO Yinbiao, PAN Ri, et al. Study on method and compensation technology of off-axis wedge aspheric parallel grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3) : 193-198.
- [3] 郎治国. 基于超精密回转扫描的大口径非球面测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- LANG Zhiguo. Study on measuring large aperture aspheric surface technique based on ultra-precise rotary scanning[D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2009.
- [4] 侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 子孔径拼接干涉测试技术现状及发展趋势[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(3) : 50-53.
- HOU Xi, WU Fan, YANG Li, et al. Status and development trend of sub-aperture stitching interferometric testing technique[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(3) : 50-53.
- [5] 云宇, 彭勇, 田小强, 等. 基于子孔径拼接原理检测大口径光学元件[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7) : 1831-1834.
- YUN Yu, PENG Yong, TIAN Xiaoqiang, et al. Large aperture optical components test based on sub-aperture stitching[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(7) : 1831-1834.
- [6] 王孝坤, 王丽辉, 张学军. 子孔径拼接干涉法检测非球面[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2) : 192-198.
- WANG Xiaokun, WANG Lihui, ZHANG Xuejun. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2) : 192-198.
- [7] 侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 环形子孔径拼接检测大口径非球面镜的规划模型机分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2) : 527-532.
- HOU Xi, WU Fan, YANG Li, et al. Mathematical model and simulation for testing aspheric surface by annula subaperture stitching interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2) : 527-532.
- [8] 张蓉竹, 杨春林, 石琦凯, 等. 子孔径拼接干涉检测及其精度分析[J]. 光学学报, 2003, 23(10) : 1241-1244.
- ZHANG Rongzhu, YANG Chunlin, SHI Qikai, et al. Principle and accuracy of the stitching interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10) : 1241-1244.
- [9] AXEL W, MANUEL S, MONIKA W, et al. Accuracy evaluation for sub-aperture interferometry measurements of a synchrotron mirror using virtual experiments[J]. Precision Engineering, 2011, 35(2) : 183-190.
- [10] TRICARD M, KULAWIEC A, BAUER M, et al. Subaperture stitching interferometry of high-departure aspheres by incorporating a variable optical null[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1) : 547-550.
- [11] 程灏波. 精研磨阶段非球面面形接触式测量误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8) : 228-232.
- CHENG Haobo. Touch trigger probe measurement accuracy of aspherical mirror during fine lapping process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8) : 228-232.
- [12] 贾立德, 王家伍, 尹自强, 等. 高陡度保形光学镜面多段拼接测量方法[J]. 中国机械工程, 2005, 41(8) : 1159-1162.
- JIA Lide, WANG Jiawu, YIN Ziqiang, et al. Profile matching method for the measurement of steep conformal optics[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 41(8) : 1159-1162.
- [13] 李岩, 范大鹏. 基于多体系统运动学理论的三轴转台装配误差建模分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(8) : 981-987.
- LI Yan, FAN Dapeng. Error analysis of three-axis turntable aimed at assembling based on multi-system kinematics theory[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(8) : 981-987.

作者简介: 张东旭, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超精密加工与检测。

E-mail : 470643802@qq.com

杨平(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 助理教授。主要研究方向为微纳检测技术, 高精度三坐标测量仪的开发与校正。

E-mail : yangp@xmu.edu.cn