

文章编号 1004-924X(2010)09-1981-08

高陡度保形光学镜面的坐标测量

贾立德

(中国酒泉卫星发射中心,甘肃兰州 732750)

摘要:针对高陡度保形光学镜面的检测,提出了基于多段拼接的光学镜面坐标测量方法。该方法将保形光学镜面轮廓的测量分割为具有一定重叠区域的数段较短的面形轮廓的测量,通过测量系统与被测工件之间的相对旋转与平移运动调整被测工件的姿态实现分段轮廓的测量。然后使用拼接算法将各段面形轮廓拼接起来,重构出被测工件的面形误差。建立了该坐标测量法的数学模型,提出了基于最小二乘的迭代拼接算法,并在 Matlab 下对测量算法进行了仿真。开发了高精度的测量试验系统并分别在 VC 与 Matlab 下编写了测控软件与数据分析软件。对一口径为 120 mm,长径比为 1.2 的椭球形保形头罩进行了实测试验。仿真与测量试验表明,上述方法能够高精度地重构出面形轮廓,方法简单,实用。

关键词:坐标测量;保形光学;轮廓拼接;轮廓测量;迭代算法;

中图分类号:TH703;TH72 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101809.1981

Coordinate measurement of steep conformal optics

JIA Li-de

(Jiuquan Satellite Launch Center, Lanzhou 732750, China)

Abstract: The measurement of conformal optics is always difficult to perform in the field of ultra-precise manufacturing and measuring. In this paper, a coordinate measuring method based on stitching profile was proposed for the conformal optics. By proposed method, the profile of the conformal optics was divided into several sections with some overlap points, then the every local profile was measured by adjusting the attitude of the measured workpiece, which was completed by the relative movement between the measuring system and the measured workpiece in rotation and transition. Furthermore, an algorithm based on the least square was used to stitch the local profile and to reconstruct the global profile. After those, a mathematical model of the method was established and an iteration algorithm was put forward. An experimental setup was built and the corresponding measurement and data processing software were written with VC and MATLAB, respectively. Finally, an ellipse with a diameter of 120 mm and a length/diameter of 1.2 was tested. Simulations and experiments indicate that the method is practical and simple, and can reconstruct the global profile accurately.

Key words: coordinate measurement; conformal optics; profile matching; profile measurement; iteration algorithm

收稿日期:2009-04-29;修订日期:2009-07-23.

基金项目:国防预研重点项目(No. 51318020101)

1 引言

在空间探测以及新型激光武器领域,各种高陡度、高精度非球面光学零件越来越显现出广阔的应用前景。保形光学头罩(Conformal Optics)就是典型的高陡度非球面零件。使用保形导引头代替传统的半球形导引头,能够显著地减小空气阻力,提高导弹的空气动力学性能,从而可以获得更高的飞行速度、更远的射程和更灵活的机动性能,最终获得极高的战斗效能^[1-3]。典型的保形光学头罩的长径比(L/D)在 1.0 以上(半球面的长径比为 0.5),同时面形精度要求达到微米甚至亚微米级,保形光学镜面的这些特点,也给加工和检测带来了极大的挑战。

目前,用于高陡度非球面的检测技术可分为两大类^[4-7]:光学检测方法和接触式检测方法。光学检测方法主要是利用波面干涉仪的补偿器检测法、动态哈特曼检测法、子孔径拼接检测法等,它们通常被用作工件的最终检验手段。接触式测量的精度在微米亚微米量级,适用于加工过程中的面形测量,是当前非球面加工过程中面形检测的主要手段。接触式测量主要有三坐标法和轮廓仪法。以 Taylor Hobson 公司和德国 LOH 公司为代表的科研机构都对高精度光学镜面坐标测量技术展开了研究,并开发了一系列的产品^[6-7]。然而对于高陡度保形光学镜面而言,由于其纵向高差非常大,通常会超出传感器的量程,同时曲面陡度非常大时侧向力也会影响测量精度,甚至测头无法正常接触工件表面,因此上述商用化产品用于保形光学零件测量存在一定的困难。

曲线、曲面的光滑拼接或延拓是计算机图形学和计算机辅助几何设计中的重要研究内容,在汽车车身的光顺设计以及数字图像的拼接处理等诸多方面都有着广泛的应用。例如干涉测量中的子孔径拼接测量技术,数字图像处理中的多视融合技术,自由曲面的三维拼接测量技术等^[8-11]。

基于上述思想,本文提出了基于多段拼接的高陡度保形光学镜面轮廓测量法,其基本思想是将保形光学镜面轮廓分割为具有一定重叠区域的数段面形轮廓,通过测量系统与工件之间的相对旋转与平移运动,调整工件与测量系统之间的相对位姿,实现分段轮廓的测量。之后利用拼接算法将各段面形轮廓拼接起来,重构出被测工件的面形误差。

2 测量原理与数学模型

2.1 测量原理

测量原理如图 1 所示,将被测工件分为 3 段, AB , CD 和 EF 。测量运动方向为 X 方向,传感器测量方向为 Z 方向, X, Y, Z 满足右手规则。首先,在测量位置(1)下测量 CD 段轮廓;之后将工件绕 Y 轴旋转一定的角度到状态(2),同时,将测量系统沿 X 轴方向平移,将传感器沿 Z 轴方向平移到合适的量程内,测量 AB 段;最后通过类似的旋转与平移运动,在状态(3)下测量 EF 段。其重叠区域分别为 BC 和 DE 。虽然在测量过程中存在着名义旋转运动和平移运动以及各种误差运动,但是重叠区域工件本身的面形是保持不变的,据此可以将分段轮廓拼接起来,重构出被测工件面形轮廓。当然,根据实际需要,可以将被测工件分为更多分段轮廓,但原理是相同的。

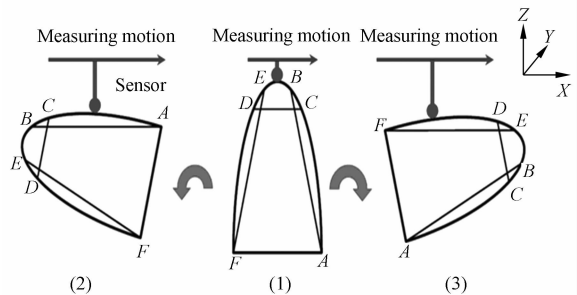


图 1 测量原理图

Fig. 1 Schematic of measuring principle

该方法的关键在于使相邻轮廓部分重叠,利用重叠区域轮廓信息建立各个轮廓之间的相对空间位置关系,据此以坐标变换方式将各个轮廓统一于同一坐标系下,从而消除测量系统与待测表面之间运动误差的影响,得到真实的面形误差分布。

2.2 数学模型

理论上,两段曲线光滑拼接的充要条件是在拼接点处具有相等的数值和斜率^[10],因此,在理想条件下两段光滑曲线的拼接只需要一个重合点即可。但是在实际测量中,考虑到测量误差的影响,往往是选择一段重叠区域而不是一个重叠点,同时为了降低测量误差对拼接结果的影响,采用了基于最小二乘的拼接测量算法^[11]。

假设重叠区域在第 i 段面形轮廓中的测量值为 (x_i, y_i, z_i) , 在第 $i+1$ 段中的测量值为 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 。重叠区域内工件的面形轮廓是保持不变的,变化的只是由于测量系统与被测工件之间的相对机械运动产生的空间位置关系的变化。同时由分段轮廓 i 的测量转换至分段轮廓 $i+1$ 的测量过程中,测量系统相对于被测工件除去存在名义旋转运动与平移运动之外,还存在未知的、对应于空间 6 个自由度的误差运动,即关于 X, Y, Z 坐标轴的平移误差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 以及角位移误差 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 。这些名义运动与误差运动的叠加就是轮廓 $i+1$ 与轮廓 i 之间的空间位置变换关系。

因此可以将上述空间位置转换过程描述为:

$$[x'_{i+1}, y'_{i+1}, z'_{i+1}, 1]^T = [x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}, 1]^T \mathbf{R}_i \mathbf{T}_i \mathbf{R}_{eri} \mathbf{R}_{eyi} \mathbf{R}_{ezi} \mathbf{T}_{ei} \quad (1)$$

其中 $(x'_{i+1}, y'_{i+1}, z'_{i+1})$ 是经过空间位置转换后的第 $i+1$ 段面形轮廓。 $\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i$ 分别是名义旋转运动矩阵和名义平移运动矩阵; $\mathbf{R}_{eri}, \mathbf{R}_{eyi}, \mathbf{R}_{ezi}, \mathbf{T}_{ei}$ 分别是沿 X, Y, Z 方向的角位移误差运动矩阵与平移误差运动矩阵。其表达式如表 1 所示。

表 1 名义运动与误差运动表达式

Tab. 1 Formulations of nominal movement and error movement

变量	表达式	说明
\mathbf{R}_i	$\begin{bmatrix} \cos \alpha_i & 0 & \sin \alpha_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_i & 0 & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	α_i 是第 $i+1$ 段轮廓与第 i 段轮廓之间名义旋转角度值
\mathbf{T}_i	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ P_{xi} & 0 & P_{zi} & 1 \end{bmatrix}$	P_{xi}, P_{zi} 是第 $i+1$ 段轮廓与第 i 段轮廓之间沿 X, Z 方向的名义平移距离
\mathbf{R}_{eri}	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta\alpha_i & \sin \Delta\alpha_i & 0 \\ 0 & -\sin \Delta\alpha_i & \cos \Delta\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\Delta\alpha_i$ 是第 $i+1$ 段轮廓与第 i 段轮廓之间沿 X 方向的角位移运动误差
\mathbf{R}_{eyi}	$\begin{bmatrix} \cos \Delta\beta_i & 0 & \sin \Delta\beta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Delta\beta_i & 0 & \cos \Delta\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\Delta\beta_i$ 是第 $i+1$ 段轮廓与第 i 段轮廓之间沿 Y 方向的角位移运动误差
\mathbf{R}_{ezi}	$\begin{bmatrix} \cos \Delta\gamma_i & \sin \Delta\gamma_i & 0 & 0 \\ -\sin \Delta\gamma_i & \cos \Delta\gamma_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\Delta\gamma_i$ 是第 $i+1$ 段轮廓与第 i 段轮廓之间沿 Z 方向的角位移运动误差
\mathbf{T}_{ei}	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta x_i & \Delta y_i & \Delta z_i & 1 \end{bmatrix}$	$\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ 是第 $i+1$ 段轮廓与第 i 段轮廓之间沿 X, Y, Z 方向的平移运动误差

由于名义运动值是已知的,且误差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 为小量,因此利用一阶 Taylor 展开对式(1)进行化简,可以得到:

$$[x'_{i+1}, y'_{i+1}, z'_{i+1}, 1]^T = [x''_{i+1}, y''_{i+1}, z''_{i+1}, 1]^T \cdot \begin{bmatrix} 1 & \Delta\gamma_i & \Delta\beta_i & 0 \\ -\Delta\gamma_i & 1 & \Delta\alpha_i & 0 \\ -\Delta\beta_i & -\Delta\alpha_i & 1 & 0 \\ \Delta x_i & \Delta y_i & \Delta z_i & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $(x''_{i+1}, y''_{i+1}, z''_{i+1})$ 是经过名义运动转换后的轮廓,即:

$$[x_{i+1}^n, y_{i+1}^n, z_{i+1}^n, 1] = [x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}, 1] \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & 0 & \sin \alpha_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_i & 0 & \cos \alpha_i & 0 \\ P_{xi} & 0 & P_{zi} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$(x_{i+1}^n, y_{i+1}^n, z_{i+1}^n)$ 就是 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 在轮廓 i 的测量坐标系下的表示。在理想条件下 $(x_{i+1}^n, y_{i+1}^n, z_{i+1}^n)$ 与 (x_i, y_i, z_i) 是重叠区域面形在同一坐标系下的表示, 因此应当是相等的。即可以表示为:

$$\begin{cases} x_i = x_{i+1}^n - y_{i+1}^n \Delta \gamma_i - z_{i+1}^n \Delta \beta_i + \Delta x_i \\ y_i = y_{i+1}^n + x_{i+1}^n \Delta \gamma_i - z_{i+1}^n \Delta \alpha_i + \Delta y_i \\ z_i = z_{i+1}^n + x_{i+1}^n \Delta \beta_i + y_{i+1}^n \Delta \alpha_i + \Delta z_i \end{cases}, \quad (4)$$

将重叠区域的测量点坐标 $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ 代入式(3), 得到名义运动后的重叠区域 $(x_{i+1}^n, y_{i+1}^n, z_{i+1}^n)$, 之后与 (x_i, y_i, z_i) 一并代入式(4)建立线性方程组, 求得误差运动参数的最小二乘解, 从而将相邻的两段面形轮廓拼接起来。依此类推, 可以利用多段面形重构出被测工件的面形轮廓。

3 基于最小二乘的迭代算法

3.1 二次采样点匹配误差影响分析

从测量原理可知, 在相邻轮廓的重叠区域测量点对是二次采样的, 同时测量过程中测量系统与工件之间存在相对运动误差。从式(2)可知, 相对运动误差不仅影响面形轮廓测量值的大小, 还影响 X, Y 坐标的大小, 因此给重叠区域内点的匹配带来误差。

X 坐标的误差可以表示为:

$$\delta x_i = \Delta x_i - z_i^n \Delta \beta_i - y_i^n \Delta \gamma_i, \quad (5)$$

Y 坐标的误差可以表示为:

$$\delta y_i = \Delta y_i + x_i^n \Delta \gamma_i - z_i^n \Delta \alpha_i, \quad (6)$$

点的匹配误差最终反映为匹配点的测量误差, 即:

$$\begin{aligned} \delta z_i &= \frac{\partial z_i}{\partial x_i} (\Delta x_i - z_i^n \Delta \beta_i - y_i^n \Delta \gamma_i) + \\ &\frac{\partial z_i}{\partial y_i} (\Delta y_i + x_i^n \Delta \gamma_i - z_i^n \Delta \alpha_i), \quad (7) \end{aligned}$$

由式(5)可见, 点的匹配误差的影响主要取决于被测工件面形轮廓变化率(陡度)的大小。由于

保形光学镜面的陡度非常大, 使得保形光学镜面检测中点匹配误差的影响显著得多, 从而给拼接精度带来不利的影响。这也是保形光学镜面拼接测量与其他常规拼接重构测量的不同之处。

3.2 迭代算法的基本原理

由上述分析可知, 测量系统与工件之间相对运动误差的存在是点匹配误差产生的原因。使用迭代算法的目的就是要使得运动误差逐渐收敛, 减小测量点对之间匹配误差的影响。

误差运动量可以表示为向量空间内一个向量 $\delta(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)$, 则拼接测量原理可以重新表述为:

$$S_i(x_i, y_i, z_i) = A_i S_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}), \quad (8)$$

其中 S_{i+1} 是轮廓 $i+1$ 的重叠区域面形, A_i 为坐标变换算子, 它与向量空间中的一个向量 $\delta_a(\Delta x_a, \Delta y_a, \Delta z_a, \Delta \alpha_a, \Delta \beta_a, \Delta \gamma_a)$ 构成一一映射。算子 A_i 作用于面形 S_{i+1} , 使其变换为面形 S_i 。多段拼接测量技术的关键即求解算子 A_i , 并保证:

(1) S_{i+1} 与 S_i 只是空间方位不同, 而形状应保持一致;

(2) S_i 与轮廓 i 在重叠区域的面形重合;

如前所述, 这种重合只存在于理想状态下。实践中, 条件 2 可以理解为 S_i 与轮廓 i 的重叠区域面形距离取得最小二乘意义的最小值。显然, 要保证上述条件, 必须在相邻两个轮廓的重叠区域内实现点的正确匹配。由于点匹配误差的影响, S_{i+1} 面形中的任意点在轮廓 i 上的匹配点是未知的。点匹配误差的存在使得上述条件 2 无法得到严格满足, 因此使得算子 A 的直接求解变得非常困难。

由 1.2 节可知, 式(4)是近似以重叠区域中坐标分量 X, Y 相同的点作为匹配点来求解运动误差量的, 因此只是算子 A 的近似值, 存在一定的方法误差。不妨将式(4)描述的求解过程记作算子 B , 则式(4)可以重新描述为:

$$S_i(x_{i+1}^n, y_{i+1}^n, z_i) = B_i S_{i+1}(x_{i+1}^n, y_{i+1}^n, z_{i+1}^n), \quad (9)$$

其中, 算子 B_i 与向量空间中的一个向量 $\delta_b(\Delta x_b, \Delta y_b, \Delta z_b, \Delta \alpha_b, \Delta \beta_b, \Delta \gamma_b)$ 构成一一映射。

为此, 可以构建一个迭代过程来求解 A_i 的精

确值。其过程可以描述为:

$$s_i^{(k)} = A^{(k)} s_{i+1}, \quad (10)$$

$$s_i = B^{(k+1)} s_i^{(k)}, \quad (11)$$

由于误差向量 $\delta_a(\Delta x_a, \Delta y_a, \Delta z_a, \Delta \alpha_a, \Delta \beta_a, \Delta \gamma_a)$ 接近 0 向量,因此可取 0 向量在 A 的算子空间中的映射为初值 $A^{(0)}$,根据式(10)可以得到 $S_i^{(0)} = S_{i+1}$,若求得 $S_i^{(k)}$,则根据式(11),即式(4),可以求得 $B^{(k+1)}$,即求得向量 $\delta_b^{k+1}(\Delta x_b^{k+1}, \Delta y_b^{k+1}, \Delta z_b^{k+1}, \Delta \alpha_b^{k+1}, \Delta \beta_b^{k+1}, \Delta \gamma_b^{k+1})$,从而有:

$$\begin{aligned} (\Delta x_a^{k+1}, \Delta y_a^{k+1}, \Delta z_a^{k+1}, \Delta \alpha_a^{k+1}, \Delta \beta_a^{k+1}, \Delta \gamma_a^{k+1}) = \\ (\Delta x_a^k, \Delta x_b^{k+1}, \Delta y_a^k, \Delta y_b^{k+1}, \Delta z_a^k, \Delta z_b^{k+1}, \Delta \alpha_a^k + \\ \Delta \alpha_b^{k+1}, \Delta \beta_a^k, \Delta \beta_b^{k+1}, \Delta \gamma_a^k + \Delta \gamma_b^{k+1}), \end{aligned} \quad (12)$$

该向量对应于第 $k+1$ 次迭代结果 $A^{(k+1)}$,如此可形成算子空间中的一个压缩映射,它收敛于算子空间中的唯一不动点 $A^{[12]}$,即:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} A^{(k)} = A. \quad (13)$$

在上述迭代过程中,随着迭代次数的增加,轮廓 $i+1$ 逐渐靠近轮廓 i ,即轮廓 $i+1$ 对轮廓 i 的偏离程度逐次减小,也等同于误差运动量的逐次减小。误差运动量的减小使得点匹配误差逐渐减小,直至收敛到一定精度范围内,使得前述条件 2 得到满足。因此通过上述迭代操作,可使轮廓拼接得以正确实现。

3.3 迭代步骤

将上述过程进行总结,可以表示为以下几个迭代步骤:

步骤一:

取初值 $\delta_a^0(\Delta x_a^{(0)}, \Delta y_a^{(0)}, \Delta z_a^{(0)}, \Delta \alpha_a^{(0)}, \Delta \beta_a^{(0)}, \Delta \gamma_a^{(0)})$ 为 0 向量,则 $S_i^{(0)} = S_{i+1}$ 。在 $S_i^{(0)}$ 以及轮廓 i 重叠区域内选择若干坐标分量 X, Y 相同的点代入式(4),形成线性方程组,求解最小二乘解,可得 $\delta_b^1(\Delta x_b^{(1)}, \Delta y_b^{(1)}, \Delta z_b^{(1)}, \Delta \alpha_b^{(1)}, \Delta \beta_b^{(1)}, \Delta \gamma_b^{(1)})$ 。根据式(12)求得 $\delta_a^1(\Delta x_a^{(1)}, \Delta y_a^{(1)}, \Delta z_a^{(1)}, \Delta \alpha_a^{(1)}, \Delta \beta_a^{(1)}, \Delta \gamma_a^{(1)})$ 。根据 $\delta_a^1(\Delta x_a^{(1)}, \Delta y_a^{(1)}, \Delta z_a^{(1)}, \Delta \alpha_a^{(1)}, \Delta \beta_a^{(1)}, \Delta \gamma_a^{(1)})$ 对轮廓 S_{i+1} 做坐标变换,可得 $S_i^{(1)}$ 。

步骤二:

求得 $S_i^{(k)}$ 后,在 $S_i^{(k)}$ 以及轮廓 i 重叠区域内选择若干坐标分量 X, Y 相同的点代入式(4),可

得 $\delta_b^{k+1}(\Delta x_b^{(k+1)}, \Delta y_b^{(k+1)}, \Delta z_b^{(k+1)}, \Delta \alpha_b^{(k+1)}, \Delta \beta_b^{(k+1)}, \Delta \gamma_b^{(k+1)})$,根据式(12)得 $\delta_a^{k+1}(\Delta x_a^{(k+1)}, \Delta y_a^{(k+1)}, \Delta z_a^{(k+1)}, \Delta \alpha_a^{(k+1)}, \Delta \beta_a^{(k+1)}, \Delta \gamma_a^{(k+1)})$,据此对 S_{i+1} 做坐标变换,可得 $S_i^{(k+1)}$;

步骤三:

重复步骤二,直至求解得到满足精度要求的 $\delta_a(\Delta x_a, \Delta y_a, \Delta z_a, \Delta \alpha_a, \Delta \beta_a, \Delta \gamma_a)$ 后,对轮廓 S_{i+1} 做坐标变换,实现多段拼接。

4 测量试验

4.1 测量试验系统

在上述分析的基础上,本课题开发了专用的高陡度非球面镜测量试验系统,如图 2 所示。

系统整体采用了气浮导轨加端齿盘的结构形式。其中传动方式为精密低速直流力矩电机加同步带的形式,通过 Renishaw 光栅尺实现闭环运动,横向分辨率为 $1 \mu\text{m}$,气浮导轨直线度在全量程范围内优于 $1 \mu\text{m}$ 。测量传感器为标普 LG-25 型长度计,分辨率为 5 nm 。端齿盘最小分度为 1° 。系统采用大理石结构,以减小温度对测量精度的影响。同时分别在 VC 和 Matlab 平台上开发了测控软件 and 数据处理软件。试验表明,系统单段面形轮廓的测量精度优于 $1 \mu\text{m}$ 。

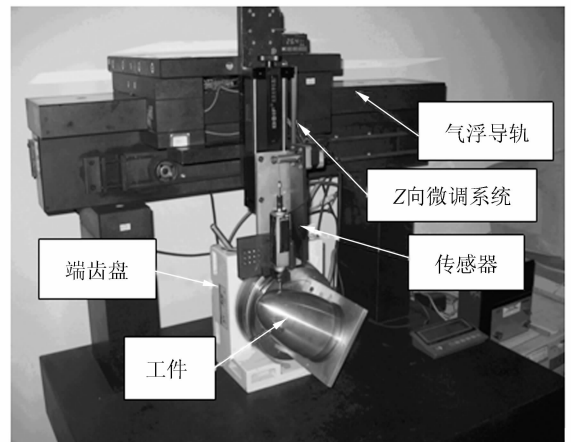


图 2 测量系统实物图

Fig. 2 Photo of measurement system

4.2 分段轮廓的划分

为了验证测量算法的正确性,对口径为 120

mm,长径比为 1.2 的椭圆形保形头罩粗加工工件进行了测量试验,同时与三坐标测量结果进行了比对。

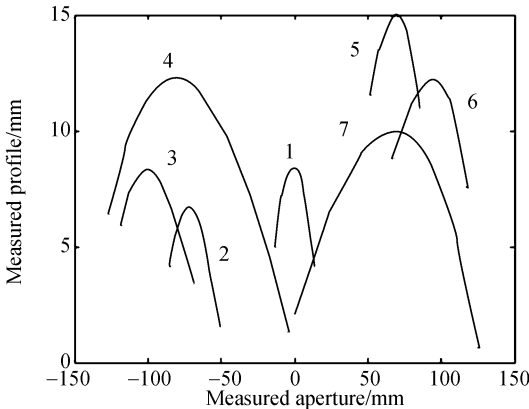
在测量之前首先需要对面形轮廓进行分段划分。进行轮廓划分时主要考虑的因素是:

- (1)传感器的最大测量量程限制;
- (2)传感器所能承受的最大侧向角度;
- (3)重叠区域的大小,根据相关参考文献通常重叠区域的长度为分段轮廓的 20% 以上^[11];
- (4)在满足上述 3 个条件的前提下,分段轮廓应当尽可能地少,重构路径应尽可能地短。

因此,本文结合实际使用传感器的特点,将被测轮廓分为 7 段,分别为:第 1 段(-15 mm, 15 mm),第 2 段(0, 30 mm),第 3 段(15 mm, 45 mm),第 4 段(30 mm, 60 mm),第 5 段(-30 mm, 0),第 6 段(-45 mm, -15 mm),第 7 段(-60 mm, -30 mm)。同时,以各分段轮廓的起点与终点连线与水平线的夹角确定名义旋转运动的角度值。

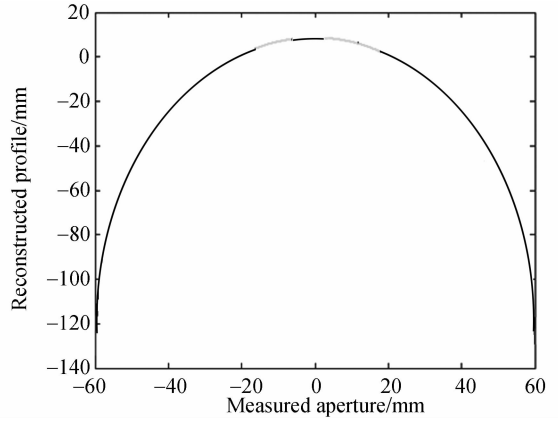
4.3 测量试验结果分析

图 3(a)是测量得到的 7 段面形轮廓值。图 3 (b)为利用上述算法拼接重构出来的面形。图 4 (a)是 6,7 两段面形轮廓在重叠区域的重叠误差,图 4(b)是最终重构出来的工件表面的面形误差分布结果与三坐标测量结果比较,从中可以看出利用拼接重构的方法较好地恢复出了工件的面形误差分布。同时由于是尚未研抛的粗加工工件,因此面形误差较大,使得拼接重构结果与三坐标测量结果几乎是重叠的。表 2 给出的是相邻轮廓重构误差与相应的单段轮廓重复测量误差的比较,其中第 2 行是 7 段面形轮廓的测量重复性误



(a) 7 段面形轮廓

(a) Profiles of seven sections

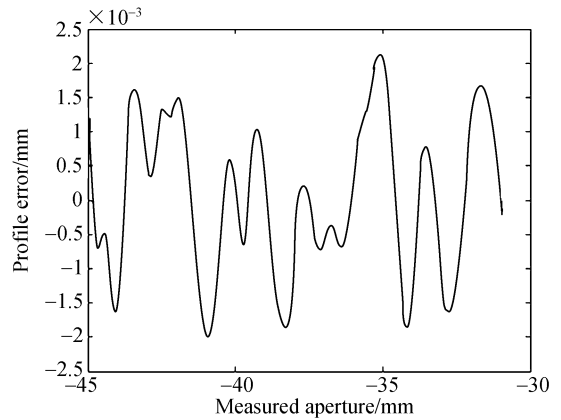


(b) 恢复出来的面形轮廓

(b) Reconstructed profile

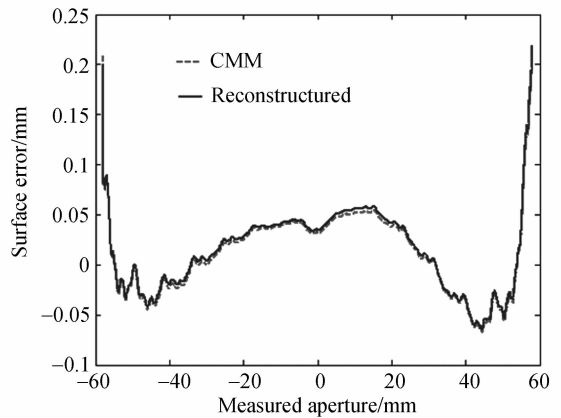
图 3 7 段面形与恢复出来的面形轮廓

Fig. 3 Profiles of seven sections and reconstructed profile



(a) 相邻两段重叠区域的重构误差

(a) Reconstructing error in the overlap



(b) 被测工件面形误差

(b) Surface error of the workpiece

图 4 重构误差与工件面形误差

Fig. 4 Reconstructing error and surface error

差(RMS),第3行是相邻轮廓重构误差(RMS),如第3行第1列是3,4两段轮廓利用上述算法拼接后在重叠区域的误差,第3行第2列是2,3两段相应的重构误差,依次类推。从图4(a)和表2中可以看出重构误差接近单段轮廓测量的重复性误差。

表2 相邻轮廓重构误差与测量重复性误差的比较

Tab.2 Comparision of reconstructing errors and repeated measurement errors (μm)

分段	重复性	重叠区
4	0.49	1.09
3	0.14	0.73
2	0.41	0.80
1	0.83	
5	0.29	0.80
6	0.38	0.78
7	0.19	1.10

参考文献:

[1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社, 2001.
YANG L. *Advanced Optical Manufacturing Techniques* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

[2] 辛企明. 近代光学制造技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1997.
XIN Q M. *Modern Optical Manufacturing Techniques* [M]. Beijing: Defense Technology Press, 1997. (In Chinese)

[3] GRITZ D, MAZZUCA R. Conformal window for the air borne laser aircraft[J]. *SPIE*, 1999, 3706: 227-238.

[4] HEGG R G, CHEN C B. Testing and analyzing conformal windows with null optics [J]. *SPIE*, 2001, 4375: 138-145.

[5] LERNER S A, SASIAN J M, JOHN E. Greivenkamp, *et al.*. Interferometric metrology of conformal domes [J]. *SPIE*, 1999, 3705: 221-226.

[6] 贾立德, 郑子文, 李圣怡, 等. 基于柱面坐标系的新型光学坐标测量机的研制[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 551-555.
JIA L D, ZHENG Z W, LI SH Y, *et al.*. Development of a new optical coordinate measurement machine in cylinder coordinates [J]. *Opt. Precision*

5 结 论

针对高陡度非球面的检测问题,本文提出了基于多段拼接的测量重构数学模型,并建立了基于最小二乘的迭代收敛算法,在此基础上开发建立了高精度的测量试验系统。利用该方法成功解决了高陡度保形光学镜面加工过程中传感器量程以及工件高陡度特征对系统测量能力的限制问题,实现了面形误差的高精度检测。该方法具有一定的普适性,可以作为其他高陡度工件检测参考方法。然而,作为一个新的方法,仍然存在很多问题有待进一步研究,如测量误差对重构精度的影响,测量方法的不确定度分析等。

Eng., 2006, 14(5): 551-555. (in Chinese)

[7] 贾立德, 郑子文, 戴一帆, 等. 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.
JIA L D, ZHENG Z W, DAI Y F, *et al.* Principle and experiments of swing-arm profilometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 499-504. (in Chinese)

[8] 张晓玲, 林玉池, 吴波, 等. 实现物体 3600 轮廓测量的新型轮廓拼接方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 182-185.
ZHANG X L, LIN Y C, WU B, *et al.*. 360° Profile measurement using a novel image connection method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5): 182-185. (in Chinese)

[9] 任潇潇, 邓善熙, 杨永跃. 曲线拼接在火车车轮轮廓几何参数检测中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2003(2): 21-23.
REN X X, DENG S X, YANG Y Y. Application of curvilinear connection to the geometric parameters measurement of train wheel profile[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2003(2): 21-23. (in Chinese)

[10] 芦殿军. Bezier 曲线的拼接及其连续性[J]. 青海大学学报, 2004, 22(6): 84-86.
LU D J. Connection and continuity of the Bezier curve[J]. *Journal of Qinghai University*, 2004,

22(6):84-86. (in Chinese)

- [11] PAHK H J, PARK J S, YEO I. Development of straightness measurement technique using the profile matching method [J]. *Int. J. Mach. Tools Manufact*, 1998, 37(2):135-147.

- [12] 熊洪允, 曾绍标, 毛云英. 应用数学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.

XIONG H Y, ZENG S B, MAO Y Y. *Basic Applied Mathematics*[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1998. (in Chinese)

作者简介:



贾立德(1981—),男,山东东营人,博士,高级工程师,2008年于国防科技大学获得博士学位,主要从事大型复杂结构的健康诊断与寿命预估等方面的研究。E-mail: jiazhonghua135@yahoo.com.cn

●下期预告

四象限探测器特性实验测试

赵馨,佟首峰,姜会林

(长春理工大学,吉林 长春 130022)

研究了当四象限探测器用于光斑中心位置检测时,入射光斑的各种特性和外部环境对象限探测器输出产生的影响。通过理论推导得到了入射椭圆高斯光斑的光斑中心位置与探测器输出关系公式及检测灵敏度公式;搭建实验系统完成了室内及野外测试实验。实验结果表明,室内环境下探测器具有较高的检测精度与细分能力,通过测量探测器的静态噪声曲线得到在极限灵敏度下通过数字滤波可以使器件具有 36 细分的能力。通过测量象限探测器的电压特性曲线完成背景光特性、光斑大小特性、信噪比特性测试实验;野外实验表明,光强闪烁对探测器影响很大,当大气折射率结构常数为 10^{-16} 时,距离为 830 m 时,器件仅具有 7 细分能力,距离为 12.5 km 时,基本没有细分能力,已经不具备光斑检测能力。