

基于圆结构光的复杂深孔内轮廓尺寸测量方法

冷惠文^{1),2)} 徐春广¹⁾ 冯忠伟¹⁾ 肖定国¹⁾

¹⁾(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081) ²⁾(烟台大学机电汽车工程学院, 烟台 264005)

摘要 涡流法、超声法测量深孔截面轮廓尺寸精度低,而光学单点扫描法测量效率低。介绍了一种基于圆结构光的复杂深孔内轮廓3维测量系统,提出了一种采用FFT分析和差分分析进行测试数据处理的方法,能够实现快速高精度测量。测试系统主要由圆结构光发生器、扩束锥镜、成像锥镜、镜头和CCD组成,对于获取的每一幅被测截面的结构光图像,首先提取光条中心,对光条中心上的点作最小二乘法拟合获取光条中心拟合圆心,并以此圆心点将光条中心线展开,展开波形中存在整体形状误差,主要由圆心偏心误差、椭圆形状误差两个周期性误差分量构成,由于二者振动频率与细节分量的振动频率不相同,借助于FFT分析,将两个误差分量分离出来,进而采取措施减小其对系统的影响;差分分析用于去除阴线 and 阳线之间的过渡线。该方法提高了阴线圆与阳线圆尺寸计算的精度和效率,实验结果表明,系统内径测量精度达到0.05 mm。

关键词 圆结构光 复杂深孔 整体形状误差 FFT分析 差分分析

中图法分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8961(2010)07-1084-07

A Method for Measuring Complicated Deep-hole Profile Based on Ring-structured-light

LENG Huiwen^{1),2)}, XU Chunguang¹⁾, FENG Zhongwei¹⁾, XIAO Dingguo¹⁾

¹⁾(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

²⁾(School of Mechatronics & Automobile Engineering, Yantai University, Yantai 264005)

Abstract For the measurement of complicated deep hole profile, both eddy current method and ultrasonic method characterize low accuracy, at the same time, optical scanning with single light point has low efficiency. A 3D measurement system based on ring-structured-light is presented which characterizes high accuracy and processing speed. A data processing method using FFT analysis and difference analysis has been proposed. The system consists of a ring-structured-light generator, a reflection cone mirror, an imaging cone mirror, an optical lens, and a CCD camera. Firstly, we capture a structured-light image of the measured inner surface and extract the stripe center locus of it. Then we find the center of the stripe center locus by curve fitting using the least squares method. Subsequently, we stretch the stripe center image from its center point. In the waveform of the stretch-out-view, there exist eccentricity error and ellipse shape error. The frequencies of these two periodical error components are different from the frequency constitution of the detail component. We can separate them from the waveform with the help of FFT analysis. Therefore the eccentricity error and the ellipse error can be minimized and the accuracy of the system is improved greatly. Difference analysis was used to remove the transition line between the exterior circle and the inner circle. The method can improve both the accuracy and the efficiency of the inner surface parameters measuring. Experiments show that the diameter measuring accuracy can get 0.05 mm

Keywords ring-structured-light, complicated deep-hole, whole shape error, FFT (fast Fourier transform) analysis, difference analysis

0 引言

在机械设备中,深孔类零件使用非常广泛,如各种管道、气缸、兵器中的火炮身管等。对这类零件内轮廓尺寸的检测要求较高,如何快速准确地获取其3维信息,以实现内表面3维重构是当前研究的一个研究热点^[1]。深孔截面轮廓测量的常用方法如涡流法^[2]、超声法^[3]测量精度低,而光学单点扫描法^[4]测量效率相对较低。

基于主动三角法测量原理的结构光光学检测方法^[5-8],解决了快速测量与高精度的矛盾,测量系统自动化程度高,能够实现智能化自适应采样、自动规划路径扫描。

本文介绍一种圆结构光3维测量系统,能够实现复杂深孔截面轮廓尺寸的快速高精度测量。主要介绍系统的构成、测量原理、光条中心的提取分析、光条中心的主要误差来源及减小误差措施,以及应用差分法分离阴线圆与阳线圆测量数据。

1 光学测量系统构成及测量原理

复杂深孔截面轮廓测量系统结构简图如图1所示。环形结构光发生器散射光栅中心点 L 发出的环形光束照到扩束锥镜上,经反射面 PP_1 反射后投射到深孔内表面上的点 K 处,在点 K 产生漫反射,漫反射光线照到成像锥镜上,经反射面 G_1G 反射后由CCD成像, C 点为CCD相机镜头光学中心,在CCD的感光面上形成光敏点 K' 。图1中, γ_1 为扩束锥镜的半锥角(45°); γ_2 为成像锥镜的半锥角(45°)。

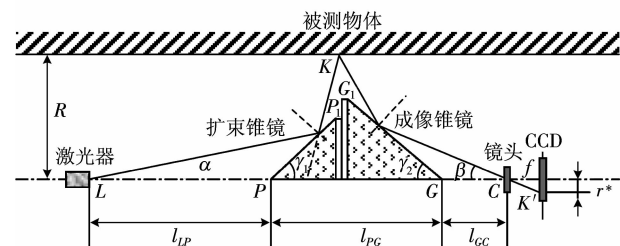


图1 测量系统结构简图

Fig.1 Configuration of the measurement system

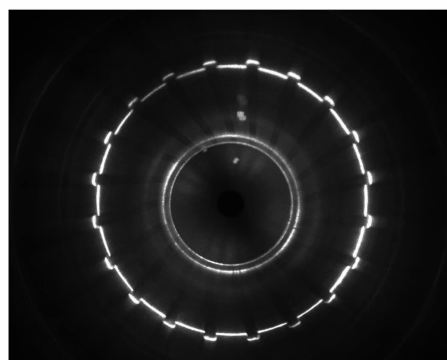
推导可知,CCD图像的像素数 r^* (pixel)与实际被测内表面轮廓半径 R (mm)间的关系为

$$R = \frac{(l_{PC} - l_{LP} \tan \alpha) N f - l_{GC} r^* L}{r^* L + N f \tan \alpha} \quad (1)$$

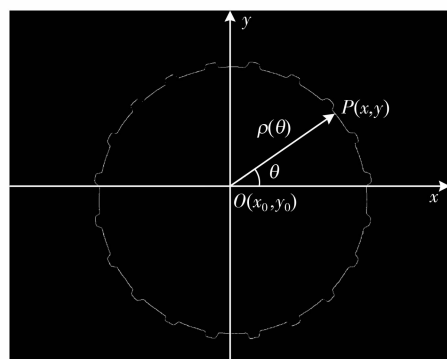
式中, l_{PC} 为扩束锥镜与成像锥镜顶点间的距离; l_{LP} 为激光器散射光栅中心点与扩束锥镜顶点距离; l_{GC} 为成像锥镜顶点与相机镜头光学中心的距离; f 为镜头焦距; α 为结构光光环散射角; N 为CCD相机靶面的满量程像素点数; L 为满量程时CCD相机靶面的成像长度; β 为像点 K' 相对于镜头的视角。

2 光条中心提取

应用上述测量系统对某复杂深孔内表面轮廓进行测量。获取的实验图像如图2(a)所示。由于存在干扰光条,且有用光条具有一定的宽度,需要进行图像处理以提取光条中心。光条中心即为沿光条法线方向的亮度极值点,光条中心的位置表征了被测截面的尺寸参数。作者将光条细线化方法与改进的灰度重心法有机结合,对环形光斑光条中心进行亚像素级提取^[9]。获取的亚像素级光条中心图像如图2(b)所示(用图像表示时仅为像素级)。上述光条中心提取方法具有计算简单,速度快,亚像素级精度,抗噪能力强的优点,而且光条中心的提取仅涉及到图像的局部灰度值,减少了由于激光光源聚焦不准带来的误差。



(a) CCD 图像



(b) 光条中心

图2 CCD图像与光条中心

Fig.2 CCD image and stripe center

3 光条中心组成

图 2(b)中,设 $P(x,y)$ 为光条中心线上的任意一点, $O(x_0,y_0)$ 为光条中心线上点用最小二乘法拟合得到的圆心, $|OP| = \rho(\theta) = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$, θ 表示 OP 方位角, $\theta \in [0, 2\pi]$ 。 $\rho(\theta)$ 的展开图如图 3 所示。

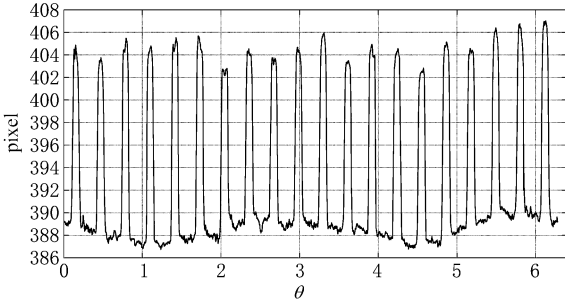


图 3 $\rho(\theta)$ 的展开图

Fig. 3 Stretch-out-view of $\rho(\theta)$

$\rho(\theta)$ 展开图中存在缓变分量,该缓变分量就是光条中心线的整体形状误差。为了便于分析,将图 2(b)中以 $O(x_0,y_0)$ 点为圆心,光条中心线所有点的平均半径值为半径的圆称为基线圆,基线圆外部半径较大的圆称为阴线圆,基线圆内部半径较小的圆称为阳线圆。光条中心极坐标表达式为:

$$\rho(\theta) = \rho_0(\theta) + \rho_1(\theta) + \rho_2(\theta) \quad (2)$$

式中, $\rho_0(\theta)$ 为直流分量,即光条中心的基线圆半径 r ; $\rho_1(\theta)$ 为低频缓变分量,表征基线圆整体形状误差; $\rho_2(\theta)$ 为细节分量,表征光条中心的局部形貌变化。

由于 $\rho(\theta)$ 由不同分量构成,需要对这些分量进行分离,分析误差产生的原因,进而采取相应措施减小测量误差,提高阴线圆和阳线圆半径测量精度。

3.1 直流分量

$$\rho_0(\theta) = r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i(\theta_i) \quad (3)$$

式中, N 为光条中心线计算点数。

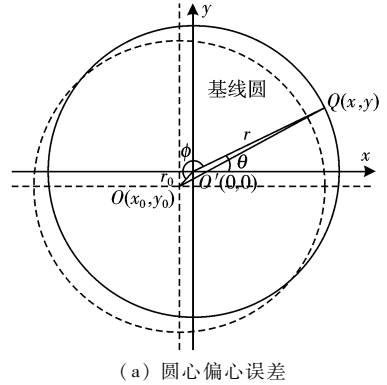
3.2 缓变分量

缓变分量由两部分组成,圆心偏心误差 $\rho_{1e}(\theta)$ 为与椭圆形状误差 $\rho_{1f}(\theta)$, $\rho_1(\theta) = \rho_{1e}(\theta) + \rho_{1f}(\theta)$ 。

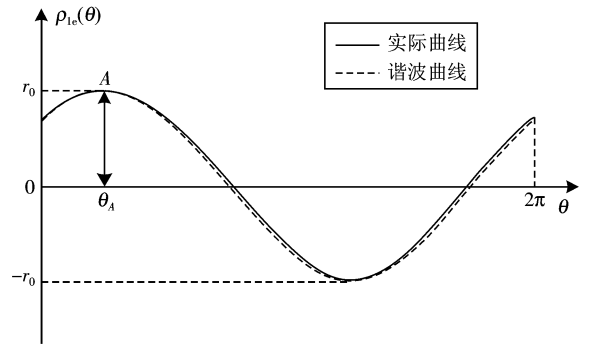
3.2.1 圆心偏心误差($\rho_{1e}(\theta)$)

基线圆圆心的获取是通过光条中心线上点最小二乘法拟合得到的,与实际被测截面的准确中心位置有差异,将这种差异称之为圆心偏心误差,简称为偏心误差。

以被测截面的准确中心位置 $O'(0,0)$ 为坐标原点,建立如图 4(a) 所示坐标系。



(a) 圆心偏心误差



(b) $\rho_{1e}(\theta)$ 波形图

图 4 圆心偏心误差及波形图

Fig. 4 Eccentricity error and its waveform

设 $|OO'| = r_0$, 由于 $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$, $x_0 = r_0 \cos \phi$, $y_0 = r_0 \sin \phi$, 则 $\rho_{1e}(\theta)$ 的参数方程为:

$$\begin{aligned} \rho_{1e}(\theta) &= |OQ| - r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} - r = \\ &= \sqrt{(r \cos \theta - r_0 \cos \phi)^2 + (r \sin \theta - r_0 \sin \phi)^2} - r = \\ &= \sqrt{[r - r_0 \cos(\phi - \theta)]^2 + r_0^2 \sin^2(\phi - \theta)} - r \quad (4) \end{aligned}$$

x_0, y_0 即为相对偏心坐标值, ϕ 角表示 $O'O$ 方位角度。由于拟合圆心 O 是通过最小二乘法得到的, 与实际圆心 O' 间的距离差异一般不会超过一个像素, 即存在 $r_0 < 1$ pixel, 而本测量系统获取的图像中 r 值为几百个像素。式(4)中:

$$\frac{r_0^2 \sin^2(\phi - \theta)}{[r - r_0 \cos(\phi - \theta)]^2} \leq \frac{r_0^2}{(r - r_0)^2} \ll 1$$

则:

$$\begin{aligned} \rho_{1e}(\theta) &\approx (r - r_0 \cos(\phi - \theta)) - r = \\ &= -r_0 \cos(\phi - \theta) \quad (5) \end{aligned}$$

$\rho_{1e}(\theta)$ 波形的频率特征为, 单一频率成分且相位稳定, 无其他倍频成分。设偏心误差 $\rho_{1e}(\theta)$ 周期为 T , 则其唯一频率成分 $f_{1e} = 1/T = f_0$, f_0 为基波频率。

图4(b)为 $\rho_{1e}(\theta)$ 波形示意图,实线为 $\rho_{1e}(\theta)$ 的实际波形,虚线为用谐波近似的波形。为了表征 $\rho_{1e}(\theta)$ 实际波形与谐波近似波形的差异,示意图中 r_0 取较大值, $r_0 = 0.14r$ 。在A点谐波的最大幅值为 r_0 ,相位为 θ_A ,则有 $\varphi = \theta_A \pm \pi$,且 $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。如果能够确定 r_0 与 θ_A ,偏心点的坐标位置 $O(x_0, y_0)$ 可以由式(6)确定:

$$\begin{cases} x_0 = r_0 \cos \phi \\ y_0 = r_0 \sin \phi \end{cases} \quad (6)$$

3.2.2 椭圆形状误差 $\rho_{1f}(\theta)$

椭圆形状误差简称为椭圆误差,形成原因有很多,但主要有以下3个方面:环形激光角度偏移、CCD成像面与被测孔中心线不垂直及被测深孔零件自身由于加工工艺,内表面本身带有椭圆性。

建立如图5(a)所示的坐标系。对于椭圆上的一点 $Q(x, y)$, $x = a \cdot \cos \theta$, $y = b \cdot \sin \theta$, a , b 分别表示椭圆的短轴半径和长轴半径,则椭圆误差 $\rho_{1f}(\theta)$ 的参数方程为:

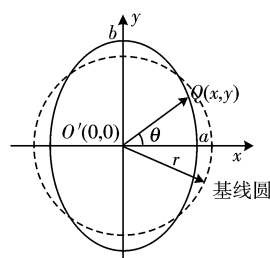
$$\begin{aligned} \rho_{1f}(\theta) &= |O'Q| - r = \sqrt{x^2 + y^2} - r = \\ &= \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} - r = \\ &= \sqrt{a^2 \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} + b^2 \frac{1 - \cos(2\theta)}{2}} - r = \\ &= \sqrt{\left(\frac{b+a}{2} - \frac{b-a}{2} \cos(2\theta)\right)^2 + \left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \sin^2(2\theta)} - r \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\frac{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2 \sin^2(2\theta)}{\left(\frac{b+a}{2} - \frac{b-a}{2} \cos(2\theta)\right)^2} \leq \left(\frac{b-a}{2a}\right)^2$ 。文中所述

测量系统为精密测量系统,已经经过精密调试,所以 a , b 之间的差异至多为几个像素,而 a 值则有几百个像素,则 $\left(\frac{b-a}{2a}\right)^2 \ll 1$ 。式(7)近似为

$$\begin{aligned} \rho_{1f}(\theta) &\approx \frac{b+a}{2} - \frac{b-a}{2} \cos(2\theta) - r = \\ &= -\frac{b-a}{2} \cos(2\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,要求 $r = \frac{b+a}{2}$,其成立的条件是椭圆的短轴半径与长轴半径之比 λ 接近于1。 $\rho_{1f}(\theta)$ 的均值为0。图5(b)为 $\rho_{1f}(\theta)$ 波形图,实线为 $\rho_{1f}(\theta)$ 的实际波形,而虚线为用谐波近似的波形,可以看出二者差异很小,尽管图中椭圆短轴半径与长轴半径之比 $\lambda = \frac{a}{b} = 0.82$ 。



(a) 椭圆误差

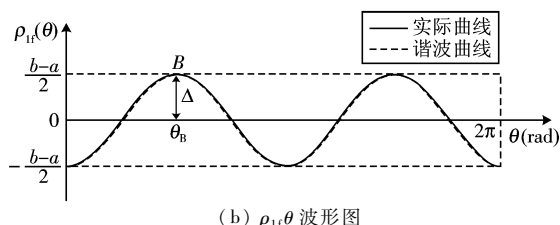


图5 椭圆误差及波形图

Fig. 5 Ellipse error and its waveform

$\rho_{1f}(\theta)$ 波形的频率特征为,以 $2f_0$ 为主,相位稳定。仿真分析表明, $\rho_{1f}(\theta)$ 存在高次谐波,由于 $\rho_{1f}(\theta)$ 偶对称,则高次谐波频率为 nf_0 , $n=4, 6, 8, \dots$,随着谐波次数的增高,谐波振动的幅值衰减,通常认为其谐波振动的主要频率成分 $2f_0, 4f_0, 6f_0$ 及更高次谐波成分由于振动幅值小将其忽略不计^[10]。

在图5(b)中,如果极值点B的幅值为 Δ ,则椭圆短轴半径 a 与长轴半径 b 可以由下式确定:

$$\begin{cases} a = r - \Delta \\ b = r + \Delta \end{cases} \quad (9)$$

B点的相位 θ_B 表征长轴方向。

3.3 细节分量 $\rho_2(\theta)$

本文中深孔零件截面轮廓较为复杂,零件本身加工工艺、在使用的过程中受力、热的作用产生的变形,以及光条中心提取精度限制等,使得光条中心细节分量含有多种频率成分,其最主要的频率成分为基波 $20f_0$ 的类方波,此类方波的产生是由于被测深孔零件自身结构需要。

因此,需要将上述各频率分量分解出来,进行分类比较,也就是模式识别,就可以对误差的类型、大小进行综合分析,进而采取相应措施减小误差,提高截面轮廓尺寸的计算精度。

4 FFT 分析

由于偏心误差 $\rho_{1e}(\theta)$ 与椭圆误差 $\rho_{1f}(\theta)$ 均为周

期成分,且其频率构成与细节分量的主要频率构成有较大的差异。对于周期分量的提取,FFT (fast fourier transform) 分析是一种有效手段^[11]。 $\rho(\theta)$ 为频域有限信号,要求在对 $\rho(\theta)$ 进行截断时正好在其一个完整周期内;同时对 $\rho(\theta)$ 进行周期延拓,即增加采样点,以提高幅值谱估计的精度,减少泄漏误差^[12],图 6 为 4 倍周期延拓得到的幅值谱图 $A(f)$ (局部放大图,未显示直流分量)。

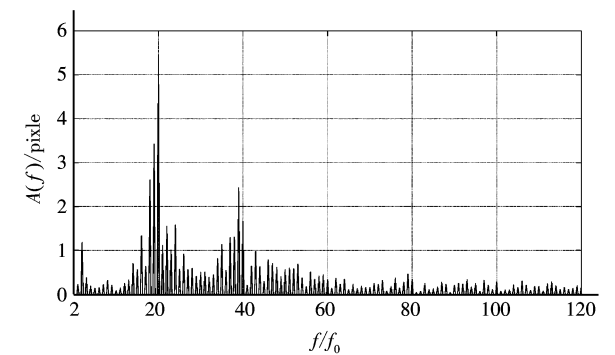


图 6 幅值谱图 $A(f)$ (局部)
Fig. 6 Magnitude spectrum graph $A(f)$ (local)

由前述分析可知,偏心误差、椭圆误差及细节分量频率构成各不相同,FFT 分析能够将各周期分量从 $\rho(\theta)$ 中分离出来。提取直流分量、偏心误差分量、椭圆误差分量后余下的部分为细节分量。各分量的波形图如图 7 所示。

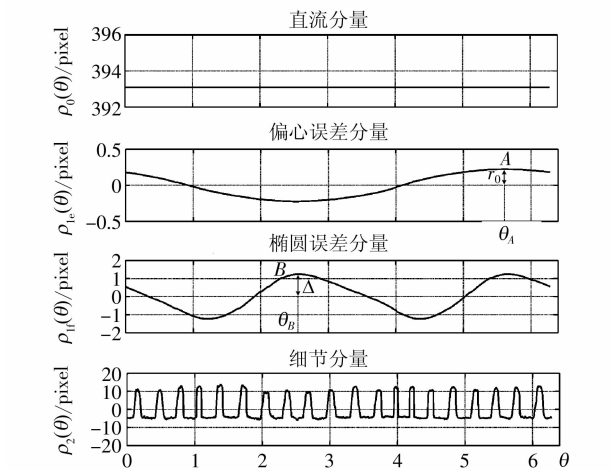


图 7 $\rho(\theta)$ 波形分解图
Fig. 7 Components of $\rho(\theta)$

为了表达清晰,在此各频率分量幅值采用不同的分度。图 7 中,直流分量 $\rho_0(\theta) = 393.0858 \text{ pixel}$; 偏心值 $r_0 = 0.2234 \text{ pixel}$, 偏心角度 $\theta_A = 5.6114 \text{ rad}$; 偏

心坐标 $x_0 = -0.1748 \text{ pixel}$, $y_0 = 0.1390 \text{ pixel}$, 椭圆误差最大值为 1.2380 pixel , 椭圆短轴半径与长轴半径比 $\lambda = 0.9937$, 椭圆长轴方向为 $\theta_B = 2.5108 \text{ rad}$ 。由图 7 可见,细节分量 $\rho_2(\theta)$ 较为平坦,不包含整体形状误差分量。

5 减小误差方法

图 7 的 $\rho_{1e}(\theta)$ 曲线图中, A 为最大幅值点,其幅值与相位的大小分别为 r_0 与 θ_A , 其值可以确定,则由式 (6) 求出偏心值 $x_0 = -0.1748 \text{ pixel}$, $y_0 = 0.1390 \text{ pixel}$ 。由图 4(a) 可知 O' 点的坐标值可以确定。 O' 点作为新的基圆圆心点,就可以消除偏心带来的误差。

由于椭圆误差形成的原因复杂,首先需要通过实验判断椭圆误差是由测量系统产生还是被测物体本身椭圆性产生。

对被测截面一次成像后,将被测零件绕自身轴线旋转 90° , 如果椭圆的长轴短轴方向不发生改变,可以判定该椭圆误差是由测量装置产生的。通过微调高精度定心机构,重新安装 CCD 相机、反射锥镜与成像锥镜等,再次成像试验。反复试验能够减小测量系统产生的椭圆误差;考虑为系统设计补偿装置。

如果椭圆的长轴与短轴方向也旋转了 90° , 则说明被测物体本身存在椭圆误差,这时需要将这一分量保留在原信号中,作为该被测表面的整体形状误差。

6 内表面参数计算

由图 7 细节分量 $\rho_2(\theta)$ 曲线可知,它有 3 个组成部分:阴线圆上的点 $u(i)$, $i = 1, 2, \dots, N_1$; 阳线圆上的点 $v(j)$, $j = 1, 2, \dots, N_2$; 以及过渡线上的点。过渡线的特点是斜率较大,因此,可以取细节分量 $\rho_2(\theta)$ 的一阶差分作为特征分析。

$\rho_2(\theta)$ 第 k 点的一阶前向差分定义为

$$d_forward(k) = \frac{(\rho_2)_{k+1} - (\rho_2)_k}{\theta_{k+1} - \theta_k} \quad (10)$$
$$k = 1, 2, \dots, N - 1$$

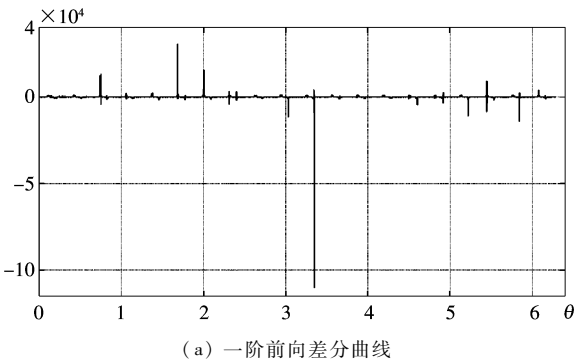
式中, θ_k 表示第 k 点的方位角,其定义如图 2 所示。

第 k 点的一阶后向差分为

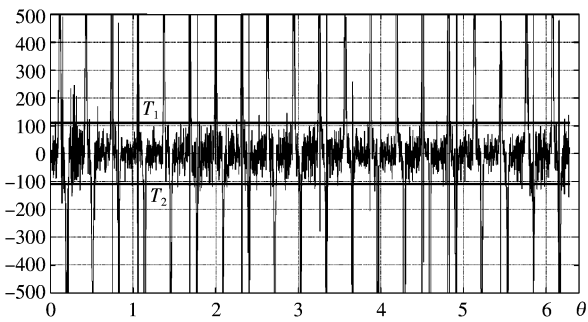
$$d_backward(k) = d_forward(k - 1) \quad (11)$$
$$k = 2, 3, \cdots, N$$

取 $d_forward(N) = d_forward(N - 1)$, $d_backward(1) = d_backward(2)$, $\rho_2(\theta)$ 各点的一阶差分如图 8(a) 所示,在此仅画出了一阶前向差分曲线。

图 8(b) 的局部放大图中, T_1, T_2 分别表示一阶差分的上、下阈值。 $T_1 = 110 \text{ pixel}$, $T_2 = -110 \text{ pixel}$ 。



(a) 一阶前向差分曲线



(b) 局部放大图

图 8 一阶前向差分曲线

Fig. 8 First-order forward difference curve

阴线圆上的点 $u(i)$ 满足下述条件: $[\rho_2(\theta)]_i \geq t_1, T_2 < d_forward(i) < T_1$, 且 $T_2 < d_backward(i) < T_1, i = 1, 2, \cdots, N_1, t_1 = 8.87 \text{ pixel}$, 是由统计分析得到的经验值。

阳线圆上的点 $v(j)$ 满足下述条件: $[\rho_2(\theta)]_j \leq t_2, T_2 < d_forward(j) < T_1$, 且 $T_2 < d_backward(j) < T_1, j = 1, 2, \cdots, N_2, t_2 = -3.83 \text{ pixel}$, 是由统计分析得到的经验值。

阴线圆半径 r_o , 阳线圆半径 r_i 可通过下式计算:

$$\begin{cases} r_o = r + \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} u(i) \\ r_i = r + \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} v(j) \end{cases} \quad (12)$$

阴、阳线圆半径计算标准差如表 1 所示。由表可见,去除过渡线之后数据平稳性提高,减小了测量数据与其真实值的离散程度,提高了测量的精密度。

表 1 半径值标准差

Tab.1 Radius standard deviation

分离方法	/pixel	
	去除过渡线	保留过渡线
阴线圆	0.343 0	2.418 3
阳线圆	1.191 8	1.688 4

计算出 $r_o = 404.414 5 \text{ pixel}$ 和 $r_i = 388.478 0 \text{ pixel}$,分别代入式(1)取代 r^* ,结合系统的结构参数计算出该截面轮廓尺寸,阴线圆直径 $D_o = 136.287 \text{ mm}$,阳线圆直径 $D_i = 131.634 \text{ mm}$ 。由高精度三坐标测量机测量结果分别为阴线圆直径 $D_{or} = 136.328 \text{ mm}$,阳线圆半径 $R_{ir} = 131.586 \text{ mm}$ 。多次实验结果表明,该系统内径测量精度达到 0.05 mm 。

7 结 论

采用圆结构光光学测量系统对复杂深孔截面轮廓尺寸进行测量,具有测量速度快、精度高的特点。本文将提取的光条中心展开为波形分析,并将 FFT 分析应用于结构光图像法 3 维测量中,将偏心误差、椭圆误差两个周期分量从光条中心信息中分离出来,进而采取措施减小测量误差,提高了系统的测量精度。另外,利用一阶差分将阴线圆与阳线圆上的测量数据点从细节分量中分离出来,去除了过渡线的影响,提高了阴线圆与阳线圆尺寸测量精度与效率。通常涡流法、超声法测量精度不高于 0.5 mm ,而光学单点描法测量效率较低。实验表明该系统内径测量精度达到 0.05 mm ,测量速度快。

参考文献 (References)

[1] Zhu Wenjuan, Xu Chunguang, Zhou Shiyuan. Optical measuring system for inner surface dimensions of deep hole[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42 (Supp.): 201-204. [朱文娟,徐春广,周世圆. 深孔内轮廓尺寸光学测量系统[J]. 机械工程学报, 2006, 42(增刊): 201-204.]

[2] Cordell J L. In line inspection: what technology is best[J]. Pipe Line Industry, 1991, 74(7): 47-58.

[3] Xiong Chao, Lv Jiangang, Zhang Jinqiu, et al. Ultrasonic inspection of cannon[J]. Non-destructive Test, 2003, 25(2):

- 102-104,107. [熊超,吕建刚,张进秋,等. 火炮身管超声波检测技术[J]. 无损检测, 2003, 25(2): 102-104,107.]
- [4] Qin Jun, Chen Ying, Yu Pu. Auto non-destruction test optical inspection technology for inner surface of pipe[J]. Machinery, 2001, 39(4): 44-46. [秦俊,陈颖,俞朴. 用于管道内表面自动无损检测的光学技术[J]. 机械制造, 2001, 39(4): 44-46.]
- [5] Zhang Yujin. Image Comprehension and Computer Vision[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 44-46. [章毓晋. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 44-46.]
- [6] Zhang Guangjun, He Junji, Li Xiuzhi. Image processing of circle structured light for inner surface vision inspection[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 102-106. [张广军,贺俊吉,李秀智. 用于内表面测量的圆结构光视觉图像处理办法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 102-106.]
- [7] Zheng Jun, Zhang Wei, Shi Keren, et al. Ring light section based image measurement system for deep holes with complicated inner surfaces[J]. J. Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2004, 44(11): 1456-1459. [郑军,张伟,施克仁,等. 基于环形光切法的复杂深孔图像检测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(11): 1456-1459.]
- [8] Zheng Jun, Xu Chunguang, Xiao Dingguo, et al. A comprehensive measuring system for the inner surface of artillery [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(6): 694-698. [郑军,徐春广,肖定国,等. 火炮身管内表面综合测量系统研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(6): 694-698.]
- [9] Leng Huiwen, Xu Chunguang, Feng Zhongwei, et al. A method for extracting the center of ring-structured-light stripe [C]// Proceedings of Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application. New York, NY, USA: IEEE Computer Society, 2008: 906-910.
- [10] Liao Boyu. Mechanical Failure Diagnosis Fundamental [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1995: 91-98. [廖伯瑜. 机械故障诊断基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 91-98.]
- [11] Huang Changyi, Lu Wenxiang, Xiong Shibo. Technology of Measurement and Test in Mechanical Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 147-153. [黄长艺,卢文祥,熊诗波. 机械工程测量与试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 147-153.]
- [12] Lu Wenxiang, Du Runsheng. Measurement Information Signal Analysis in Mechanical Engineering [M]. Wuhan: Huazhong Science and Technology University Press, 1990: 219-226. [卢文祥,杜润生. 机械工程测试·信息·信号分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1990: 219-226.]