

# 激光与光电子学进展

## 基于菲涅耳衍射的钢珠直径及圆度误差的测量

朱昊<sup>1</sup>, 徐利<sup>1</sup>, 何明耀<sup>1</sup>, 付艳华<sup>1</sup>, 李瑞贤<sup>2</sup>, 王晴岚<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>湖北汽车工业学院数理与光电工程学院, 湖北 十堰 442002;

<sup>2</sup>信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 针对目前钢珠类球形部件的直径和圆度测量系统较为复杂、测量仪器成本较高等问题, 提出一种基于菲涅耳衍射测量钢珠直径和圆度误差的方法。利用圆点标定板校准圆球菲涅耳衍射的峰值点和投影边缘的关系, 根据光强分布曲线测量钢珠直径及圆度误差。实验结果表明, 在不考虑钢珠表面的漫反射及散射的情况下, 对直径为毫米级别的钢珠进行测量时, 其直径和圆度误差的测量不确定度分别在 0.0031 mm (置信水平 95%) 和 0.0046 mm (置信水平 95%) 以内。该测量系统的组成简单, 无需额外的光学系统, 且成本较低。

**关键词** 测量; 菲涅耳衍射; 梯度 Hough 变换; 直径测量; 圆度误差

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0126003

## Measurement of Steel Ball Diameter and Roundness Error Based on Fresnel Diffraction

Zhu Hao<sup>1</sup>, Xu Li<sup>1</sup>, He Mingyao<sup>1</sup>, Fu Yanhua<sup>1</sup>, Li Ruixian<sup>2</sup>, Wang Qinglan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Mathematics, Physics and Optoelectronic Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China;*

<sup>2</sup>*School of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China*

**Abstract** At present, measurement systems for measuring diameter and roundness of steel-ball-type spherical parts have significant drawbacks, such as complexity and high cost. To overcome these challenges, we propose a method based on the Fresnel diffraction. It is found that the diameter and roundness error of a steel ball can be measured according to the light intensity distribution curve, based on the relation between the peak point and projection edge of spherical Fresnel diffraction, which is calibrated using the dot calibration plate. Experimental results show that the measurement uncertainty of the diameter and roundness error of a millimeter steel ball is less than 0.0031 mm (confidence level is 95%) and 0.0046 mm (confidence level is 95%), respectively, without considering the diffuse reflection and scattering of the steel ball surface. Our proposed system is easy to realize, cost effective, and does not need an additional optical system.

**Key words** measurement; Fresnel diffraction; gradient Hough transform; diameter measurement; roundness error

### 1 引言

圆度误差作为圆形工件截面的几何特性, 其测

量在机械生产控制和形状计量等领域中具有重要意义<sup>[1]</sup>。传统的圆度误差的测量方法主要有机械式测量法、激光干涉法和机器视觉测量法。机械探针

收稿日期: 2021-02-28; 修回日期: 2021-03-30; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划(B2020078, B2018066)

通信作者: \*wangql\_lx@huat.edu.cn

式测量法因为具备较大的测量范围而被广泛应用,其中圆度测量仪和三坐标测量仪在商业和科研领域应用最为广泛<sup>[2]</sup>。日本三丰公司的 Roundtest 211 系列圆度测量仪最大测量直径为 300 mm,测量精度达到 0.02  $\mu\text{m}$ ;德国海克斯康公司生产的 SAGER 三坐标测量仪最大测量范围达到 1000 mm  $\times$  1500 mm  $\times$  800 mm,采用 Heidenhain 高分辨率光栅系统使得系统分辨率可达到 0.5  $\mu\text{m}$ ,能满足不同零部件的检测需求。激光干涉法测量圆度近来也被广泛提及,Fan 等<sup>[3]</sup>设计了一种微球圆度的测量系统,利用两个小型干涉仪实现了对标称直径为 1 mm 红宝石球的测量,测量精度达到 1 nm,并且消除了仪器或地面的震动对测量精度的影响。随着图像检测算法的不断改进和完善,基于机器视觉的圆度误差测量方法也得到一定程度的应用,其基本思想是利用机器视觉系统采集零部件的图像,通过图像处理得到其轮廓,实现对零部件圆度误差的测量。朱朝阳等<sup>[4]</sup>利用图像处理实现了对销钉圆度误差测量,测量的相对误差达到 5%。刘庆民等<sup>[5]</sup>运用图像滤波和二值化等方法,对齿形链板圆孔的圆度进行了测量和评定,测量的相对误差率在 1.9% 左右。刘杰等<sup>[6]</sup>研制了一套安装测量系统,该系统利用高分辨

率阵电荷耦合器件(CCD)作为数据接收器,实现了对核电蒸发器内套筒圆度误差的测量,测量精度达到 0.7 mm。

机械式测量法和激光干涉法在测量范围方面具有较大的优势,但机械式主要采用的是探针接触式,会对待测物表面产生损伤,另外为了保证测量精度,对探针的测头有很高的要求,导致整体成本较高。激光干涉法属非接触式光学测量方法,但对系统搭建以及环境控制要求较高。机器视觉测量法属非接触式测量,测量系统结构简单,便于移动,数据采集快速、便捷,操作方便,测量成本较低,尤其适合于工件轮廓的检测。本文采用机器视觉测量法与菲涅耳衍射相结合的方式测量钢珠直径,通过引入圆点型标定板,结合钢珠半径在测量平面的变化,实现对圆度误差的测量。该测量方法简单且容易实现,具有较高的测量精度,适用于现代的生产制造。

## 2 测量原理

平行光束经过半径为  $r$  的圆球后,衍射图样被位于其后相距  $L$  处的 CCD 相机接收,如图 1 所示。圆球位于  $xO_1y$  平面,CCD 相机位于  $\xi O_2\eta$  平面,两平面互相平行且垂直于光轴  $z$ 。

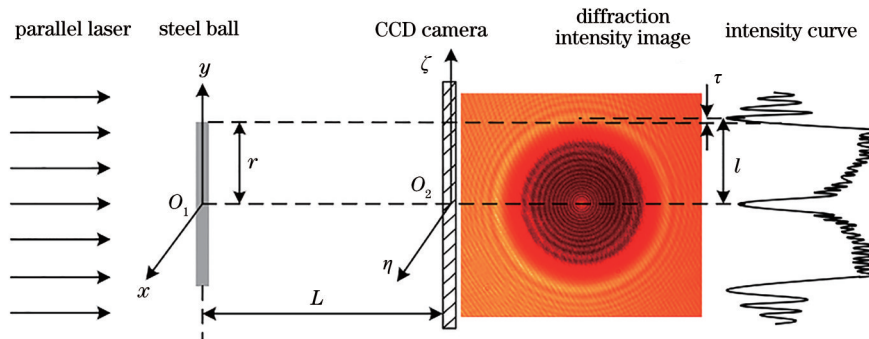


图 1 圆球经菲涅耳衍射后的投影图像

Fig. 1 Projected image of spherical Fresnel diffraction

CCD 相机接收的衍射图像为同心圆环,令峰值轮廓的半径为  $l$ ,圆球的半径为  $r$ ,二者之间的差值为  $\tau$ ,则有

$$r = l - \tau, \quad (1)$$

其中  $l$  可以通过对衍射图像进行图像处理得到,而  $\tau$  则需要通过边缘细分定位算法得到。当平行光垂直入射到圆球边缘时,将产生菲涅耳衍射现象,在其径向方向上,投影边缘某一点以外的光强曲线上极值点与直边衍射阴影区以外的光强曲线上极值点的菲涅耳距离的误差很小<sup>[7]</sup>,因此可以用直边衍

射的方法近似处理<sup>[8]</sup>,其衍射光强  $I$  的表达式为<sup>[9]</sup>

$$I(\xi) \propto \left| F \left[ \sqrt{\frac{2}{\lambda L}} (\xi) \right] - F(-\infty) \right|^2, \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  为入射光波长,  $L$  为相机和钢珠的距离。

由于菲涅耳衍射通常没有解析解,很难通过直接计算得到光强值,因此引入科纽螺线作为估计直边衍射光强分布的工具<sup>[10]</sup>,由科纽曲线的性质很容易计算得到各个极大极小值点与原点的间距。令光线到达原点的振动位相为零,记为  $\varphi_0 = 0$ ,由科纽曲线可知光线到达各极值点的振动位相分

别为

$$\varphi_n = \frac{3}{4}\pi + (n-1)\pi, \quad (3)$$

其中  $n = 1, 2, 3, \dots$ 。各级条纹在 CCD 上与原点之间的距离为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 如图 2 所示, 光线到  $x_1, x_2, \dots, x_n$  与到原点的光程差  $\Delta_n$  为

$$\Delta_n = \frac{3}{8}\lambda + \frac{1}{2}(n-1)\lambda. \quad (4)$$

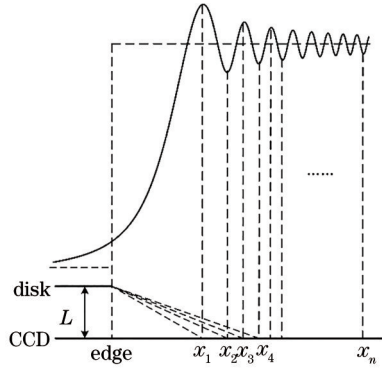


图 2 圆球衍射条纹间距示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spherical diffraction fringe spacing

由图 2 可知,

$$x_n = \sqrt{(\Delta_n + L)^2 - L^2} \approx \sqrt{2\Delta_n L} = \sqrt{\frac{\varphi_n}{\pi}} \lambda L, \quad (5)$$

即,

$$\tau = x_1 = \sqrt{\frac{\varphi_1}{\pi}} \lambda L = \sqrt{\alpha \lambda L}, \quad (6)$$

其中  $\alpha = \varphi_1/\pi$ 。

通过上述推导可准确计算得到直边衍射边缘到衍射峰值的距离。但若被测物是圆球时, 各级极大极小条纹的位置相比标准直边衍射情况下有一定的偏移, 需对偏移量进行考虑, 在应用时可利用标定的方法校正定位边缘。从(6)式可看出,  $\tau$  与衍射光线振动位相  $\varphi_1$  有关, 因此本文选取  $\alpha$  作为标定数据, 得到  $\alpha$  与标定板圆点半径的关系, 即可得到  $\tau$  关于半径  $r$  的表达式, 此关系式具有普适性, 适用于衍射距离  $L$  改变的情况。

### 3 图像处理与极值位置校正定位

为了获得完整的衍射图像, 实验过程中要确保激光器、标定板和 CCD 相机三者位于同一水平线上。波长 650 nm 的平行光经过标定板圆点时发生菲涅耳衍射, 衍射图像被 CCD 相机 (DH-SV-2001FC) 接收, 实验装置如图 3 所示。

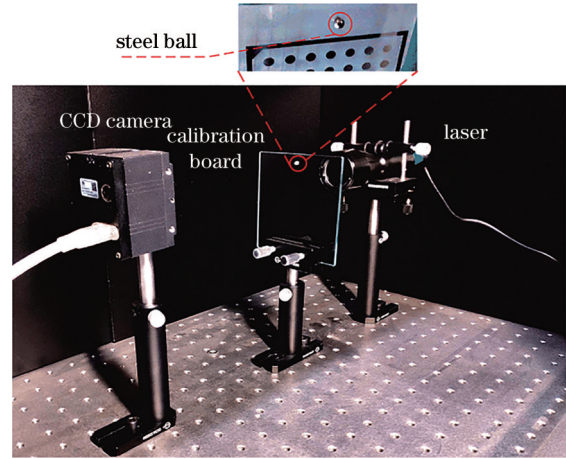


图 3 实验装置图

Fig. 3 Schematic photograph of experimental facility

#### 3.1 衍射图像滤波

从图像灰度变化的角度来看, 噪声和边缘的灰度值都发生了阶跃, 在某些情况下二者不容易区分, 因此如何在有效去除噪声的同时保留更多的细节信息是图像滤波的关键<sup>[11]</sup>。由于光线及所使用的 CCD 相机的影响, 在捕获的图像中存在噪声条纹, 对图像质量及后续图像分析都产生一定的影响。为了达到理想的去噪效果, 同时将去噪操作造成的图像信息损失降到最小, 在频域中将代表噪声的频域分量去除, 其他部分保持不变。鉴于衍射条纹信息在低频部分, 而噪声信号在高频部分, 故采用低通滤波器, 其中巴特沃斯低通滤波器能够实现保留成分和滤除成分之间的平滑过渡, 并且不会产生振铃效应<sup>[12]</sup>, 滤波器的传递函数为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v)/D_0]^{2n}}, \quad (7)$$

其中,  $D_0$  为截止频率,  $n$  为滤波器的阶数, 确定合适的截止频率是滤波效果的关键所在。图 4(a) 为圆点的衍射光强图, 将滤波器的截止频率设置为  $D_0 = 80$ , 滤波阶数设置为 2, 得到如图 4(b) 所示的滤波图像, 可以看出巴特沃斯滤波器对于图像中大部分的噪声有较好的去除效果。

#### 3.2 梯度 Hough 变换衍射中心检测

Hough 变换是由 Hough 于 1962 年提出的一种使用表决原理的参数估计技术, 被广泛地应用于直线和圆的检测问题<sup>[13]</sup>。由于滤波操作能够减少部分噪声, 但是不能完全消除噪声的影响, 故本文选择基于梯度的 Hough 变换对衍射中心进行检测, 该检测算法具有对噪声不敏感、抗干扰性强、精度高及鲁棒性好等特点<sup>[14]</sup>。设待测圆的圆心为  $(a, b)$ ,

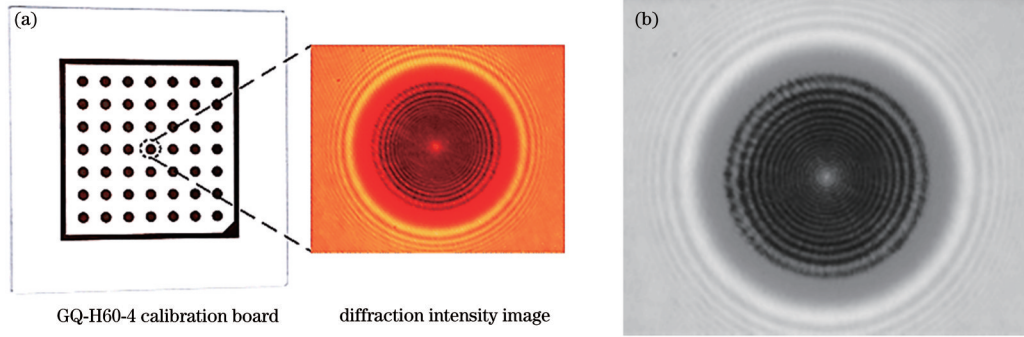


图 4 圆点衍射图。(a)标定板圆点衍射;(b)巴特沃斯滤波图

Fig. 4 Diffraction diagram of dot. (a) Diffraction of calibration board dot; (b) Butterworth filter image

半径为  $r_0$ , 则圆上任意一点  $(x_1, y_1)$  满足方程

$$(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2 = r_0^2. \quad (8)$$

在对目标圆进行检测时,关键是得到该圆的边界信息,而图像的灰度函数的一阶导数是检测边缘信息的重要手段。梯度的 Hough 变换圆心检测基本思路是求出图像的  $x_1$  方向梯度  $G_{x_1}$  和  $y_1$  方向梯度  $G_{y_1}$ , 得到图像的梯度向量,对梯度图像进行阈值化。对得到的二值图像中每个不为 0 的点,找到与其对应的原图中的像素点,设  $\theta$  为梯度的方向角,根据方

向梯度得到圆方程的极坐标形式为

$$\begin{cases} x_1 = a + r_0 \cos \theta \\ y_1 = b + r_0 \sin \theta \end{cases}, \quad (9)$$

其中,  $\sin \theta = G_{y_1} / \sqrt{G_{x_1}^2 + G_{y_1}^2}$ ,  $\cos \theta = G_{x_1} / \sqrt{G_{x_1}^2 + G_{y_1}^2}$ , 根据检测圆的半径求得圆心的坐标,并据此对三维空间的数组进行累加操作。图 5(a)为累积数组的 3D 视图,找到累加数组中的极大值,对应的像素点位置即为圆心坐标,图 5(b)为标定板圆点衍射的中心定位图。

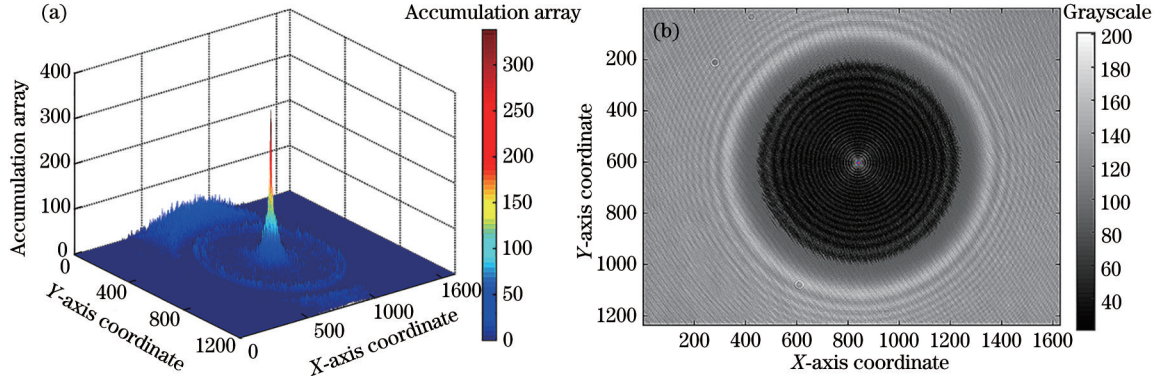


图 5 衍射图像中心点定位。(a)累积数组 3D 图;(b)圆心定位

Fig. 5 Central point location of diffraction image. (a) 3D view of the accumulation array; (b) center position marked

### 3.3 衍射图像一级极大位置标定校正

根据圆心定位的结果,得到衍射图像  $x$  轴方向的光强曲线,图 6 为标定板上直径为 4 mm 的圆点衍射的灰度值随像素点变化曲线,衍射中心为亮斑且曲线对称。为了测得一级衍射极大位置到待测物投影边缘的值  $\tau$ ,需对投影边缘进行准确定位。本文采用的是最小二乘法拟合定位边缘<sup>[10]</sup>,通过粗定

位到边缘大体所在的像素位置,在该像素两边各取相同的像素,连同该像素在内共  $n$  个像素作为样本数据参与拟合,可得到投影边缘的准确位置。

采用上述方法,分别选取直径为 1.25, 2, 3.125, 4 mm 的标定板进行菲涅耳衍射实验,得到  $\alpha$  随标定板圆点半径的变化关系曲线,如图 7 所示。

对图 7 中的曲线进行拟合,可得到如下表达式

$$\alpha = -2.82372 \exp(-3.85759r) + 0.77824. \quad (10)$$

结合(1)、(6)、(10)式得到

$$r = l - \sqrt{[-2.82372 \exp(-3.85759r) + 0.77824] \lambda L}. \quad (11)$$

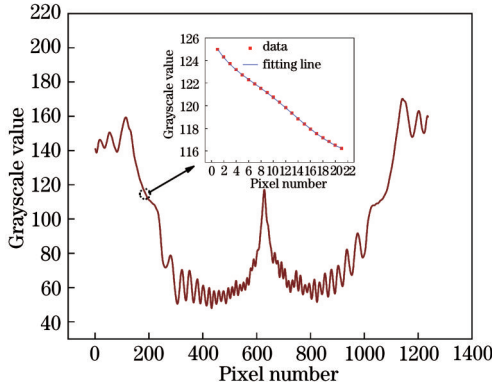


图 6 4 mm 直径圆点衍射的边缘定位

Fig. 6 Edge location of 4 mm diameter dot diffraction

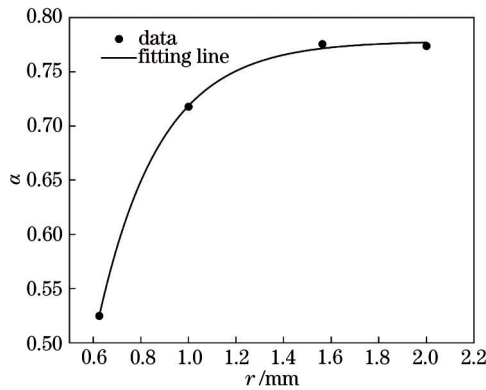


图 7 偏移量的标定曲线

Fig. 7 Calibration curve of offset

## 4 钢珠直径和圆度误差测量

### 4.1 直径测量

将标定板替换为待测钢珠,保持衍射距离  $L$  不变。在不考虑钢珠表面的散射和漫反射的情况下,其菲涅耳衍射图像和标定板圆点的衍射图像具有相同性质,故根据(11)式可计算得到钢珠的直径。当  $L=340$  mm 时钢珠菲涅耳衍射的灰度图如图 8 所示。为了更全面反映钢珠各个光强方向上的直径变化情况,根据定位的衍射中心坐标,取  $N$  条直线上的光强,相邻直线的夹角约为  $10^\circ$ ,即可得到  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围的通过衍射中心直线上的光强样本曲线,标称直径分别为 2, 2.5, 3, 3.5, 4 mm 的钢珠,其直径在测量平面中不同

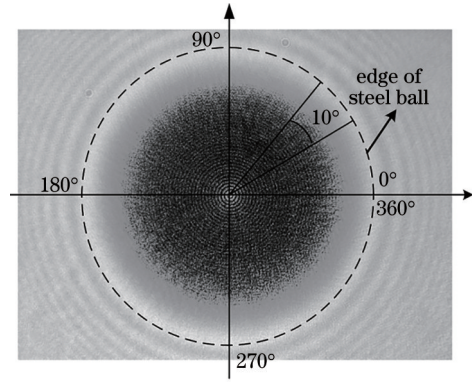


图 8 钢珠衍射图像

Fig. 8 Diffraction image of steel ball

方向上的变化曲线如图 9 所示,根据测量结果得到不同钢珠直径的平均值和标准偏差,如表 1 所示。

### 4.2 圆度误差测量

圆度误差是衡量圆柱和球形零件质量的一个重要指标,根据拟合圆心的不同,目前在圆度误差的测量中主要有最小二乘法(LSCM)、最小外接圆法(MCCM)、最大内接圆法(MICM)和最小区域圆法(MZCM)四种方法<sup>[15]</sup>。其中 LSCM 是最早采用的拟合圆及圆度误差评定方法,因其评定模型较简单、易被工程人员掌握等优点而被广泛应用<sup>[16]</sup>。本文采用最小二乘法对钢珠的圆度误差进行评定,最小二乘圆的示意图如图 10 所示,其中  $R_{\max}$  为最大轮廓圆的半径,  $R_{\min}$  为最小轮廓圆的半径。设被测轮廓圆的边缘坐标测量的点集为  $P(x_i, y_i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$ , 其中  $n$  为测量的数据点数,最小二乘法的数学模型为

$$f(a, b, R) = \min \sum_{i=1}^n \left[ (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2 \right]^2, \quad (12)$$

其中  $(a, b)$  和  $R$  分别为最小二乘法拟合圆的圆心坐标和半径。当数据点不是严格均匀时,传统的最小二乘法在拟合求解圆心和半径时会存在一定的误差,对(12)式作如下变换

$$f(a, b, R) = \min \sum_{i=1}^n \left[ x_i^2 - 2ax_i + y_i^2 - 2by_i + (a^2 + b^2 - R^2) \right]^2, \quad (13)$$

令  $A = -2a, B = -2b, C = a^2 + b^2 - R^2$ , 根据(13)式有

$$f(a, b, R) = \min \sum_{i=1}^n \left[ x_i^2 + Ax_i + y_i^2 + By_i + C \right]^2. \quad (14)$$

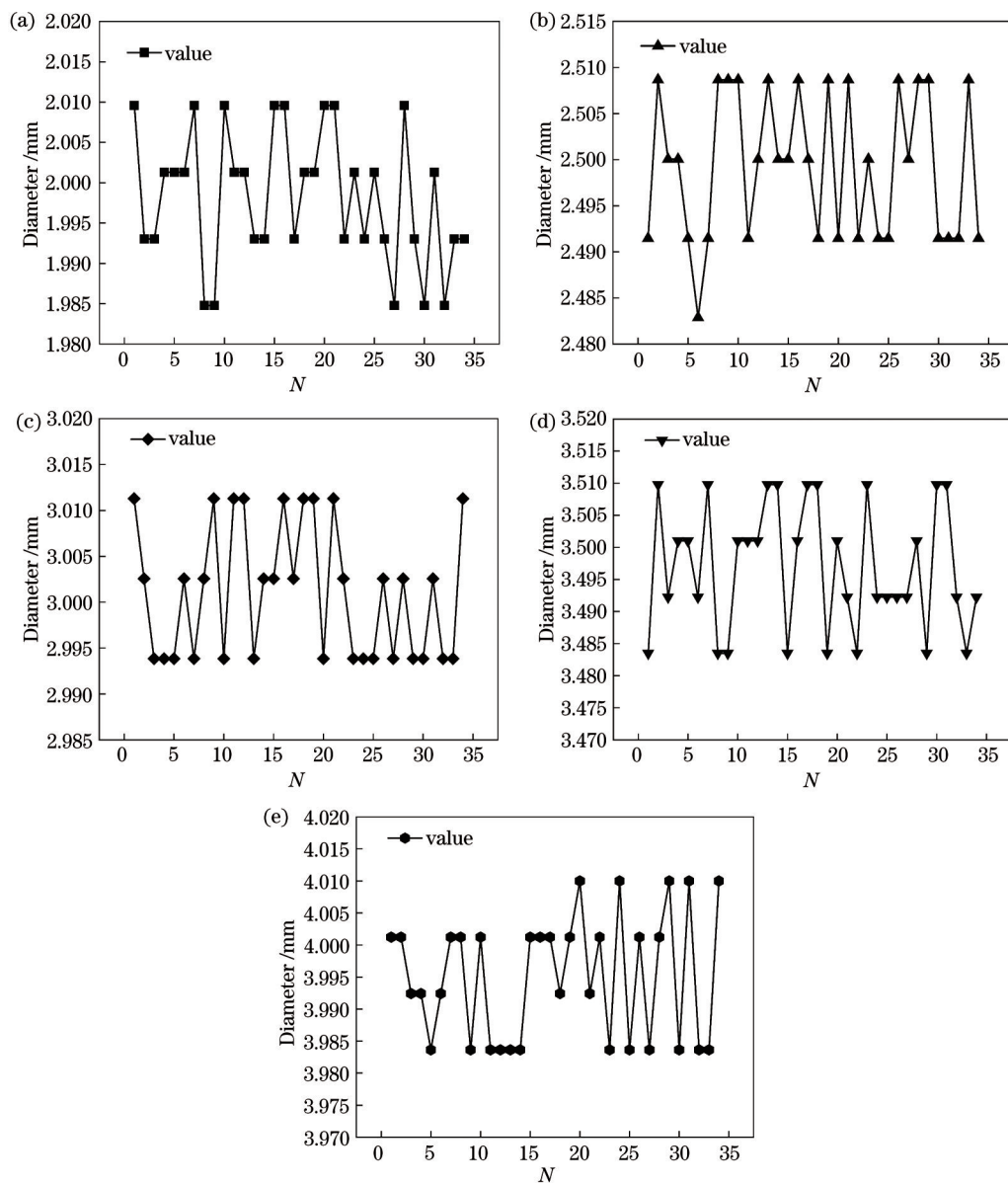


图9 不同直径钢珠在不同光强方向上的直径测量值。(a)  $d=2$  mm; (b)  $d=2.5$  mm; (c)  $d=3$  mm; (d)  $d=3.5$  mm; (e)  $d=4$  mm

Fig. 9 Diameter measurements of steel balls with different diameters in different light intensity direction .(a)  $d=2$  mm;

(b)  $d=2.5$  mm; (c)  $d=3$  mm; (d)  $d=3.5$  mm; (e)  $d=4$  mm

表1 钢珠直径的平均值和标准偏差

Table 1 Mean values and standard deviation of the steel balls with different diameters

unit: mm

| Theoretical value of steel ball diameter | 2      | 2.5    | 3      | 3.5    | 4      |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mean value of the measurement            | 1.998  | 2.499  | 3.001  | 3.497  | 3.995  |
| Standard deviation                       | 0.0084 | 0.0080 | 0.0073 | 0.0100 | 0.0098 |

利用极值条件  $\partial f/\partial A = 0, \partial f/\partial B = 0, \partial f/\partial C = 0$ , 得到

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^n y_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据(15)式求解数据点集即可得到  $a, b, R$ 。设轮廓圆上离最小二乘圆心最远和最近点的坐标为  $(x_{\max}, y_{\max}), (x_{\min}, y_{\min})$ , 则圆度误差  $R_e$  可表示为

$$R_e = \sqrt{(x_{\max} - a)^2 + (y_{\max} - b)^2} - \sqrt{(x_{\min} - a)^2 + (y_{\min} - b)^2} \quad (16)$$

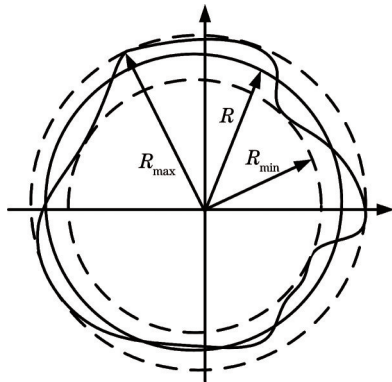


图 10 最小二乘圆法

Fig. 10 Least square circle method

通过计算得到钢珠轮廓点的坐标, 结合最小二乘法得到拟合圆的圆心和半径, 以最小二乘圆的圆心为基准, 作出包络轮廓的最大圆和最小圆, 图 11 为标称直径为 4 mm 的钢珠圆度轮廓圆。在不改变衍射距离  $L$  的情况下, 对标称直径分别为 2, 2.5, 3, 3.5, 4 mm 的钢珠进行实验, 得到其轮廓圆如图 12 所示。根据最大圆和最小圆的半径得到各自的圆度误差, 如表 2 所示, 通过与传统测量取点方法<sup>[17-18]</sup> (Data1 和 Data2) 的对比发现, 本文圆度误差的测量结果比传统测量方法大 4~5  $\mu\text{m}$ , 导致这种差别

表 2 圆度测量结果

Table 2 Results of roundness measurement

unit: mm

| Theoretical value of steel ball diameter | 2      | 2.5    | 3      | 3.5    | 4      |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Experimental data                        | 0.0132 | 0.0136 | 0.0117 | 0.0157 | 0.0139 |
| $R_e$ Data 1                             | 0.0085 | —      | —      | —      | —      |
| Data 2                                   | 0.0086 | —      | —      | —      | —      |

### 4.3 测量不确定度分析

在进行衍射中心的检测与定位时, 不可避免地

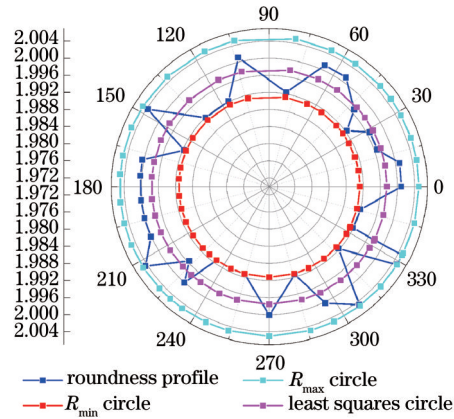


图 11 4 mm 直径钢珠的最小二乘圆和包络轮廓

Fig. 11 Least squares circles and envelope silhouette of 4 mm diameter steel ball

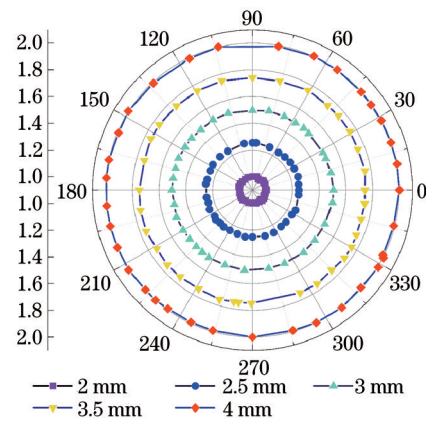


图 12 不同直径钢珠的轮廓图

Fig. 12 Envelope silhouette of different diameters steel balls

主要原因是测量方法导致的误差来源不同以及圆度评定方法不同。

会混杂一些噪声, 实验中利用巴特沃斯低通滤波在很大程度上消除了这部分的影响。在测量系统中,

影响测量准确性的主要因素为衍射距离  $L$ 、激光波长  $\lambda$ 、峰值与衍射中心的间距  $l$  以及  $\alpha$  的误差, 根据 (11) 式得到钢珠直径的测量系统不确定度  $u_B$  为

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial l} u_l\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial \lambda} u_\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial L} u_L\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial \alpha} u_\alpha\right)^2}, \quad (17)$$

其中,  $u_l$  为峰值点到衍射中心距离的不确定度,  $u_\lambda$  为波长的不确定度,  $u_L$  为衍射距离测量的不确定度,  $u_\alpha$  为拟合时由标定板圆点半径的误差引起的不确定度。实验中 CCD 相机的像素经过标定, 其尺寸为  $4.0 \pm 0.3 \mu\text{m}^{[19]}$ , 则由  $l$  引起的测量不确定度为

$$u_{R_e} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_e}{\partial x_{\max}} u_{x_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_e}{\partial y_{\max}} u_{y_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_e}{\partial x_{\min}} u_{x_{\min}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_e}{\partial y_{\min}} u_{y_{\min}}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_e}{\partial a} u_a\right)^2 + \left(\frac{\partial R_e}{\partial b} u_b\right)^2}, \quad (18)$$

其中,  $u_{x_{\max}}, u_{y_{\max}}$  为轮廓圆上距离最小二乘圆心最远点  $(x_{\max}, y_{\max})$  的不确定度,  $u_{x_{\min}}, u_{y_{\min}}$  为轮廓圆上距离最小二乘圆心最近点  $(x_{\min}, y_{\min})$  的不确定度,  $u_a, u_b$  为最小二乘圆心  $(x_a, y_b)$  的不确定度。利用该系

0.60  $\mu\text{m}$ ; 利用多功能光栅光谱仪 (WGD-8) 校准激光器的波长, 得到波长误差为 0.86 nm, 该部分引入的不确定度为 0.55  $\mu\text{m}$ ; 利用标尺测量衍射距离  $L$ , 当衍射距离为 340 mm 时, 以标称直径 4 mm 的钢珠为例, 引入的不确定度为 1.21  $\mu\text{m}$ ; 系数  $\alpha$  由实验中采用的四种标定板共同确定, 其不确定度分别为 1 号标定板 (GQ-H20-1.25) 0.8  $\mu\text{m}$ , 2 号标定板 (GCSL-020207) 1  $\mu\text{m}$ , 3 号标定板 (GQ-H50-3.125) 0.8  $\mu\text{m}$ , 以及 4 号标定板 (GQ-H60-40) 0.5  $\mu\text{m}$ , 合成后得到的不确定度为 0.436  $\mu\text{m}$ 。根据 (16) 式可得圆度误差的测量不确定度表达式

统对不同直径的钢珠进行直径与圆度误差的测量, 引入的系统测量不确定度如表 3 所示, 其中  $U$  (其中包含因子  $k=2$ ) 为置信概率 95% 的扩展不确定度。

表 3 测量不确定度

Table 3 Uncertainty of measurement

unit: mm

| Theoretical value of steel ball diameter |           | 2      | 2.5    | 3      | 3.5    | 4      |
|--|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Uncertainty of diameter                  | $u_B$     | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 |
|  | $U$       | 0.0030 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0031 | 0.0030 |
| Uncertainty of roundness error           | $u_{R_e}$ | 0.0014 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0023 | 0.0019 |
|  | $U$       | 0.0028 | 0.0030 | 0.0036 | 0.0046 | 0.0038 |

根据不确定度评定方法可知, 对直径  $d$  的测量不确定度影响显著的主要因素有直径测量重复性引起的不确定度  $u_A$  和系统误差引起的不确定度  $u_B$  构成, 故直径  $d$  的测量不确定度为

$$u_d = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (19)$$

在实验过程中, 引起测量结果的不确定度的原因, 一是相机拍摄分辨率较低, 导致在衍射中心和投影边缘定位时出现的由像素偏差而引入的误差; 二是装置虽固定于平台上, 但仍能受到振动影响; 另外, 温度、激光的准直程度以及光源稳定性等因素都会对实验数据的测量结果有一定的影响, 这也是本实验下一步需要改进的地方。

## 5 结 语

提出一种基于菲涅耳衍射来测量钢珠的直径和圆度误差的方法, 通过测量钢珠在衍射平面上的直径分布得到其轮廓点坐标, 利用最小二乘法确定

其圆心, 实现对钢珠圆度误差的测量及圆度的评定。实验中设计了钢珠菲涅耳衍射的光路并搭建了光学测量系统, 利用该系统测量了标称直径为 2~4 mm 的钢珠, 结果表明, 钢珠直径测量的扩展不确定度小于 0.0031 mm, 圆度误差测量的扩展不确定度在 0.0046 mm 以内。该方法的测量系统简单, 并且可以实现非接触测量, 在测量领域具有一定的实用价值和应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Cai Y D, Xie B, Ling S Y, et al. On-line measurement method for diameter and roundness error of balls[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2020, 3(3): 218-227.
- [2] Sun C Z, Wang L, Tan J B, et al. A high-accuracy roundness measurement for cylindrical components by a morphological filter considering eccentricity, probe offset, tip head radius and tilt error[J]. Measurement



- Science and Technology, 2016, 27(8): 085008.
- [3] Fan K C, Wang N, Wang Z W, et al. Development of a roundness measuring system for microspheres[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(6): 064009.
- [4] Zhu C Y, Zhao T, Liu Q, et al. Research on measurement technology of dowel roundness based on machine vision[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(8): 216-220.  
朱朝阳, 赵涛, 刘清, 等. 基于机器视觉的销钉圆度测量技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(8): 216-220.
- [5] Liu Q M, Zhang L, Wu L Q, et al. Roundness error evaluation of non-uniformly distributed data points based on machine vision[J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(6): 567-570.  
刘庆民, 张蕾, 吴立群, 等. 基于机器视觉的非均匀分布点圆度误差评定[J]. 计量学报, 2016, 37(6): 567-570.
- [6] Liu J, Li H, Chang H M, et al. System contributing to install inside sleeve and filtering algorithm to evaluate its roundness error[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0608002.  
刘杰, 李华, 常何民, 等. 内套筒安装测量系统及其圆度误差滤除算法[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0608002.
- [7] Jennings J K, McGruder C H. Comparison of the disk diffraction pattern with the straight-edge diffraction pattern in occultations[J]. Astronomical Journal, 1999, 118(6): 3061-3067.
- [8] Luo X H, Hui M. Measurement of circular aperture diameter based on Fresnel diffraction[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(3): 379-383.  
罗晓贺, 惠梅. 基于菲涅耳衍射的圆孔直径测量[J]. 激光与红外, 2018, 48(3): 379-383.
- [9] Liang Q T. Physical optics[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2008: 221-225.  
梁铨廷. 物理光学[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 221-225.
- [10] Wang Y C. Projection caliper system based on linear CCD image sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 34-50.  
王玉城. 基于线阵 CCD 图像传感器的投影测径系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 34-50.
- [11] Bai X D, Shu Q, Du X Y, et al. Improved adaptive bilateral filtering algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041003.  
白晓东, 舒勤, 杜小燕, 等. 改进型自适应双边滤波算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041003.
- [12] Li Q X, Wang L F, Jin J F. A histogram equalization de-fogging algorithm based on Butterworth low-pass filtering[J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2019, 27(3): 61-67.  
李庆玄, 王丽丰, 靳济方. 基于巴特沃斯低通滤波的直方图均衡化去雾算法[J]. 北京电子科技学院学报, 2019, 27(3): 61-67.
- [13] Xu C, Ping X L. Line detection algorithm based on improved random Hough transformation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051001.  
徐超, 平雪良. 基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051001.
- [14] Qu J, Gan L. The application of grads Hough transformation in circle detection[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(1): 101-104.  
瞿钧, 甘岚. 梯度 Hough 变换在圆检测中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(1): 101-104.
- [15] Li X M, Zhang J C, Liu H Q. Determination of the minimum zone circle based on the minimum circumscribed circle[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(1): 017002.
- [16] Huang L F, Wang W, Wu N X. Research of circle fitting and error evaluation algorithm based on least square principle[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(2): 4-6.  
黄力峰, 汪伟, 吴南星. 基于最小二乘原理的圆拟合及误差评定算法研究[J]. 机械工程与自动化, 2020(2): 4-6.
- [17] Li X M, Shi Z Y. The relationship between the minimum zone circle and the maximum inscribed circle and the minimum circumscribed circle[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 284-290.
- [18] Jywe W Y, Liu C H, Chen C K. The min-max problem for evaluating the form error of a circle[J]. Measurement, 1999, 26(4): 273-282.
- [19] Wang B J, Xu L, Zeng W Y, et al. New measuring method of fiber alignment in precision torsion pendulum experiments[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(8): 080401.