[文章编号] 1003－4684(2025)05-0001-05

滚珠直径非接触式测量及圆度边缘检测研究

龚天辉，钟　飞

（湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘　要] 为提高滚珠直径的检测效率，在传统人工检测方法的基础上，设计一种基于光学投影原理的半自动非接触式滚珠直径测量装置，并简要阐述其结构和工作原理。通过滚珠直径的检测数据构建误差补偿模型，采用优化后的模型开展误差测量试验。试验结果表明，检测数据准确率可达到 99％以上；通过圆度边缘检测方法对轴承滚珠的圆度进行评估，圆度准确率能达到 95％以上。因此，滚珠直径非接触式测量方法和圆度边缘检测方法能够满足轴承滚珠直径实际检测的需求。

[关键词] 滚珠直径；非接触式测量；误差补偿模型；边缘检测

[中图分类号] TS203　　[文献标识码] A

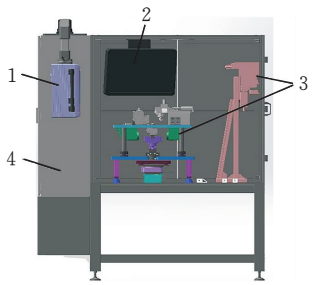
轴承是机械设备中最重要的零部件之一，主要起到支承轴系部件、承受各方向工作载荷、保证轴系零件工作位置及回转精度等作用，广泛应用于飞机、汽车、精密仪器、食品加工等行业[1]。根据摩擦性质的不同，轴承可分为滑动轴承和滚动轴承；按照承受载荷的方向，可分为向心轴承、推力轴承和向心推力轴承。其中，常用的滚动轴承类型包括调心球轴承、调心滚子轴承、圆锥滚子轴承、推力球轴承、深沟球轴承等[2]。

球轴承又称滚珠轴承，是装备制造业中的关键零部件。滚珠直径的误差将导致轴承径向非重复性跳动[3]。此外，该误差还会对系统的临界转速、振动振幅、振动频率、轴向刚度等产生较大影响[4]。传统人工测量滚珠直径的方法存在效率低、劳动强度大、易出现误检漏检、分组不准确等问题[5]。因此，为保障机械设备的安全运行，采用更高效、更精确的测量方法以提高滚珠直径的测量精度，具有重要的研究意义。

1　测量装置整体结构设计

本文设计的一种非接触式滚珠直径测量装置，由滚珠上料机构、滚珠测量机构和滚珠下料机构组成，整体结构如图 1 所示。装置基于投影图像分析法，采用基恩士(Keyence)在线投影图像测量仪对滚珠直径进行非接触式测量。

滚珠直径测量装置具体参数包括：最小测量外径、测量区域大小、测量区域精度、外形尺寸、重量、设备电源、环境温度、相对湿度等(表 1)。



1－人工操作界面；2－投影测量仪界面；
3－滚珠尺寸测量机械部分；4－测量控制部分

图 1　滚珠直径测量装置

表 1　装置测量参数

测量参数	数值
最小测量外径/μm	≥150
测量区域大小/mm	40
测量区域精度/μm	±2
高精度测量区域/mm	26
高精度测量区域精度/μm	±1
重复精度/μm	±0.08
外形尺寸/mm	1400 × 850× 1850
投影测量仪质量/kg	≈2.4
设备总重量/kg	≈260
设备电源	AC220V±10％
设备气源压力/MPa	0.4～0.6
环境温度/℃	0～50
相对湿度 RH/％	≤85％(无凝结)

[收稿日期] 2024－05－12
[基金项目] 湖北省重点研发项目(2023BAB088)
[第一作者] 龚天辉(1999－)，男，湖北荆州人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为机械制造及自动化。
[通信作者] 钟　飞(1970－)，男，湖北天门人，工学博士，湖北工业大学教授，研究方向为测试计量技术及仪器，包装机械自动控制。

2　图形投影测量仪原理

本文采用的是基恩士在线投影图像测量仪，其工作原理为：被测物体经过高亮度 LED 平行光束照射产生阴影轮廓，通过透镜后按一定倍数成像到互补金属氧化物半导体（CMOS）图像传感器上，再根据成像的信息进行尺寸测量。而光学镜头作为投影测量仪的重要部件，能够传递所需的光学信息，并在一定程度上影响成像的优劣，进而影响测量结果的准确性。

远心光学系统是高精度视觉系统中一种常用的光学结构，它满足光学结构中成像清晰、相对孔径大、畸变小、结构简单等基本要求[6]。双远心光学系统[7]相比远心光学系统具有更大的景深和范围更广的物面焦距，能够获得放大倍率更为恒定的图像。因此，本文投影仪采用双远心光学系统。双远心光学系统内部有两个镜片，焦距相互重合（图 2）。假设两个镜片为 K1、K2，光阑位于两个镜片相互重合的焦平面上，入射光线从物面由光路平行射出，经过 K1、K2 后显示在像面中。当物体 A 处于像面的共轭位置时，其折射的图像会显示在接收器 B 处；若物体 A 在原来的位置光轴方向上发生移动，其成像的位置也会发生偏移，但图像尺寸不会发生改变，从而减少了因成像效果与物像不吻合产生的测量误差。

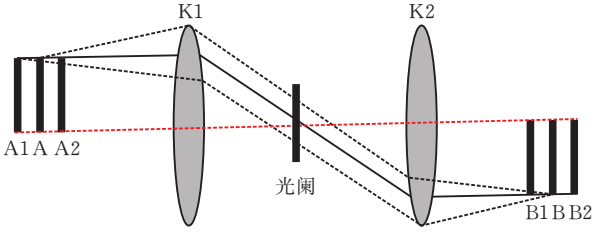


图 2　双远心光学系统

投影测量仪图像的质量与系统各方面硬件条件有关；图像的噪声和分辨率的高低很大程度上取决于图像传感器的质量；采集的图像空间层次感也与光学镜头的空间识别能力有关；图片的对比度也与采用的光源、光照方式等条件相关；除此之外，目标选取的位置远近也对投影仪图像的采集产生影响[8]。

本文采用 TX-5040 系列投影测量仪，利用其亚像素图像处理边缘算法识别进行滚珠的直径测量[9]。为了实现广视野、高精度的测量，将 1 个像素分割为 0.01 以下后进行边缘检测（图 3）。

TX-5040 图像投影测量仪虽然能够较快地检测滚珠的尺寸，但是其检测的范围难以精确掌握。其高精度区域检测的视野只有 Φ26 mm，精度区域检

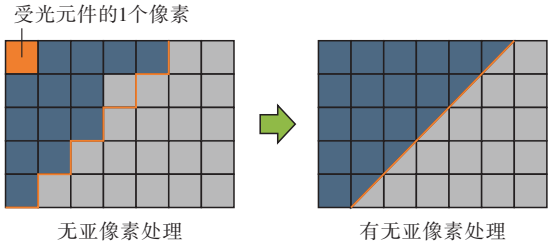


图 3　亚图像定位边缘检测

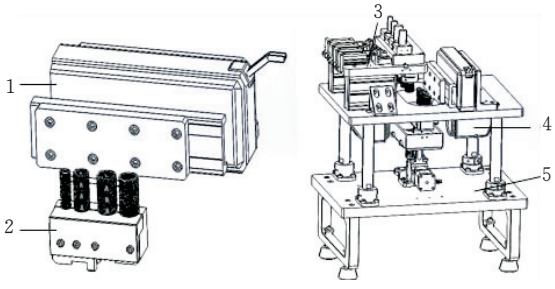
测时的物距景深仅为 10 mm；人工使用测量仪难以控制测量的距离，且为了确保测量的准确率，测量过程中对每个滚珠直径需要进行 10 次检测，测量期间滚珠需要不断旋转以便于选取不同方位的数据，而人工检测无法满足高效的要求。利用机械式模块化设计的方法，融合机械视觉和机械设计理念，将所设计的滚珠直径检测装置和投影测量仪整合，组成一种全新的滚珠尺寸检测装置，其实物如图 4 所示。



图 4　测量机内部结构

3　测量机构及误差补偿模型

滚珠直径测量机构是整个测量装置的核心部分，它由线性模组、落料装置、推料装置、图像投影测量仪、机架组成（图 5）。



1－线性模组；2－落料装置；3－推料装置；
4－图像投影测量仪；5－机构机架

图 5　滚珠直径测量机构

为了验证滚珠直径测量装置的准确性，本文选取了 4 种规格的滚珠（直径分别为 6.000 mm、10.319 mm、12.700 mm、16.000 mm），并提取 80 份已有的测量样本数据。根据预设判定标准（滚珠直径的互差值≤0.002 mm，误差值≤0.003 mm，满足该条件即表示测量成功），本次测试的结果如

表 2 所示。

表 2　测量试验数据

规格/mm	样本数/个	实际合格率/%	检测合格率/%
6.000	80	90	92.5
10.319	80	90	0
12.700	80	95	0
16.000	80	100	57.5

试验数据显示，实际合格率和产品合格率有较大差异，需采用误差补偿方法引入偏差值到测量数据中以替代实际测量结果。构建误差模型[10]：

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 \tag{1}$$

式中：A_0表示固定的补偿误差；X_1，X_2，X_3为各类滚珠直径测量 10 次的数据，为了使模型更加准确，可取不同的值；A_1，A_2，A_3为模型的参数。

采用误差模型加入偏差值后，重新测量得到的数据如表 3 所示。

表 3　第二次测量试验数据

规格/mm	样本数/个	实际合格率/%	检测合格率/%	装置准确率/%
6.000	80	85	100	97.5
10.319	80	92.5	95	100
12.700	80	95	95	100
16.000	80	90	90	100

试验结果表明，滚珠直径测量装置的准确率达到 99%以上，证明采用非接触式滚珠直径测量装置测试的结果与人工测试的结果一致，可以满足滚珠直径实际的检测需求。

4　圆度边缘检测的原理

圆度边缘检测方法（edge detection circles，ED-Circles）是一种将圆的检测分解为直线段检测与圆搜索两个核心步骤的技术。该圆度检测算法可有效抑制虚假圆的检测数量，提升检测准确性。

EDCircles 检测图像的具体流程如下：1）计算图像梯度以生成边缘图像，将所有梯度高于阈值的点选为锚点。2）采用智能路径搜索方法连接所有锚点，形成若干直线段。对于检测到的线段，若其起点与终点位于同一像素邻域，则将该线段视为可能构成完整圆的基础单元[11]。3）使用最小二乘法对这些线段进行圆拟合，并计算拟合误差。如果误差小于 1，则将该圆视为候选圆；若误差不满足要求，则过滤掉无法构成完整圆的线段。此外，当各线段具有相同梯度方向，并且圆上的连续直线段具有相同的角度，EDCircles 则会将满足此条件的三个连续直线段拟合成圆弧[12]。所有圆弧都按长度排序，中心和半径相似的圆弧连接成一个圆。基于 Helmholtz 原理，通过一个反向验证步骤对候选点进行验证，消除了只留下有效圆、近似椭圆的错误检测。根据这一原理可以过滤圆形线段。

根据市场上的滚珠圆度精度要求，对滚珠的圆度进行检测。直径为 3.00～12.70 mm 的滚珠，精度要求一般在 G3—G10；12.7～25.4 mm的滚珠，精度要求一般在 G5-G20。

5　数据集的选取

由于图像测量过程中易受到噪声、光源等因素干扰，采用工业进程控制模块（process control block，PCB）的图像数据集（process control block image dataset，PCBID）和自然图像数据集（nature image dataset，NID）两个公共数据集作为模型训练数据集[12]。为了方便训练，每张图像都至少包含一个圆形，训练之前所有图像均经过手动标记，其原始图像如图 6 所示。

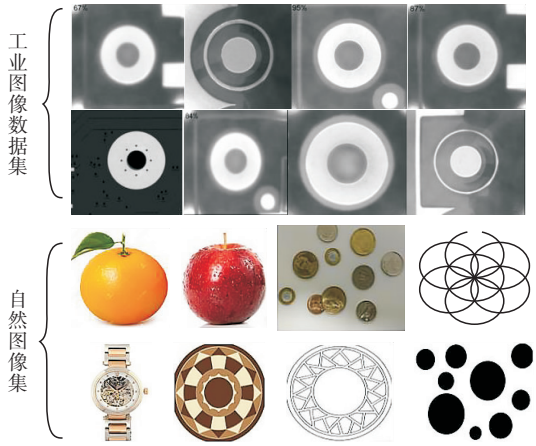


图 6　图像数据集

6　圆度边缘计算及检测

依据 EDCircles 圆度检测原理，物体检测为圆形至少需要满足以下三个条件：

1）组成线段的起点和终点位于同一像素邻域；

2）其组成的各线段具有相同梯度方向；

3）各个连续直线段具有相同的角度。

为了减少测量圆度过程中重复测量和测量错误，依据这三个条件构建的圆度评估公式[14]：

$$S_{\text{core}} = \alpha P_{\text{score}} + \beta R_{\text{score}} + \gamma C_{\text{score}} \tag{2}$$

式中：α、β、γ为模型的相关系数，其满足$\alpha+\beta+\gamma=1$；P_{score}为圆痕检测项；R_{score}为圆度评估项；C_{score}为圆度完整度检测项。

对各分项进行定义：

$$P_{\text{score}} = 1 - r_i/\pi(R^2 - r^2) \tag{3}$$

式中：R 表示 EDCircles 检测到的半径；内圆半径$r=0.6R$；r_i 为输入半径（图 7）。

圆痕检测后需要对 EDCircles 检测到的半径与

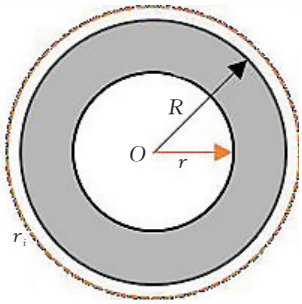


图 7 目标圆圆痕检测[13]

已知半径进行比较并评估。当 $r_i > R$ 时，其评估函数[13]

$$R_{\text{score}} = 1 - \left(\frac{r_i}{R} - \text{floor}\left(\frac{r_i}{R}\right)\right) \tag{4}$$

式中，floor 表示为向下取整，一般情况下的值在 1～2 之间，测量圆与已知圆的半径相近程度。测量圆半径越接近已知圆半径，所得分数则越高，反之则分数越低。

评估函数

$$R_{\text{score}} = r_i / R \tag{5}$$

在 EDCircles 的结果中，不完整的圆形轮廓可能会导致错误计算，因此需要通过等值评估方法预估测量的线段。物体圆度分数的本质是“构成圆的所有边缘像素的概率总和”：假设圆上的像素总数为 M ，则边缘上每个像素形成圆圈的概率为 $1/M$；若边缘像素与圆的理论半径偏差较大，则该像素的构成概率会相应降低。

为了方便计算，可将圆边转换至极坐标系下分析：极坐标系由角度 θ 和半径 ρ 组成，在同一角度下可能存在多个边缘像素，此时需计算所有同角度像素位置的平均值，将其作为该角度下的实际边缘位置。边缘位置与理论圆的偏差越大，其对应的圆度分数应越低。基于此定义的等值线项公式[13]

$$C_{\text{score}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{M} e^{-(\frac{xi-R}{R\sigma})2} \tag{6}$$

式中：σ 用于控制分数，一般取 $\sigma = 0.3$；n 是所有圆形边的总数；M 与极坐标采样的步长有关。如果采样步长为 1°，则 $M = 360/1 = 360$。根据式(6)可知，不完整的轮廓和异常像素越多，M 就会越大，分数越低。

在模型训练前，需对 EDCircles 的参数先进行初始化设置，具体数值为 $\alpha = 0.2$，$\beta = 0.6$，$\gamma = 0.2$。EDCircles 输出的物体圆度分数与实际圆度呈正相关——分数越高，表明物体的圆度精度越高。实验采用 PCBID 数据集与 NID 数据集对模型进行训练，最终得到的分数测试结果如图 8 所示(图中蓝色与绿色圆圈分别代表不同圆形误差对应的参考圈，用于直观区分误差等级)。

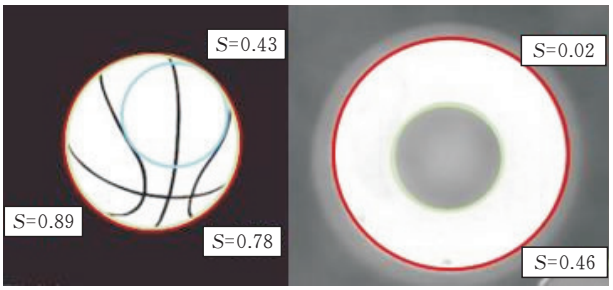


图 8 同一物体检测不同圆度评分状况

图 8 中红色表示检测的圆和圆度评分。依据滚珠的测量精度要求，该模型在对滚珠进行测量时，其圆度评分要求 0.95 以上。

利用训练好的模型对滚珠圆度进行检测。之前进行滚珠直径测量时，利用投影测量仪已经拍摄了滚珠的图像，同时图像已经进行了相关的降噪处理，现在对图像中的滚珠圆度进行检测即可确定滚珠实物的圆度状况。滚珠相关的检测图像如图 9 所示。

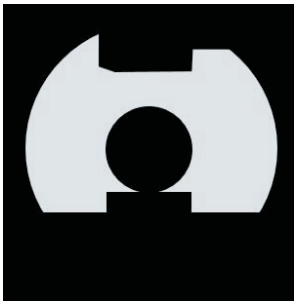


图 9 滚珠直径测量

为了减少多个圆的出现对评分产生的影响，还需要对测量图进行简化处理，去掉其投影测量仪圆形检测范围。选取 80 个不同类型的滚珠用于模型的测量，其测量的结果如表 4 所示。

表 4 滚珠圆度测量

滚珠类型/mm	准确率/%	平均时间/ms
6	91	293
12.7	96	313
10.319	95	295
16	98	281

由表 4 可知，EDCircles 模型的检测速度较快。在对滚珠进行检测时，该模型对直径较大滚珠的检测精度，高于对直径较小滚珠的检测精度。这一结果表明模型对小特征物体的捕捉能力仍有待提升。

需要说明的是，本次测量所使用的滚珠均为符合生产标准的产品。从表 4 的数据可以看出，EDCircles 模型的测量准确率能够达到 95% 以上，该精度水平基本可以满足实际生产中的检测需求。

7 结论

1)为解决滚珠直径测量效率低下的问题，在传

统人工检测方法的基础上，结合投影图像测量技术与机械结构设计，成功搭建了一套非接触式滚珠直径测量装置，有效提升了测量效率。

2)在已有的滚珠直径测量数据中引入偏差值，构建了误差补偿模型；通过该模型对滚珠直径进行重新测量，经试验验证，装置的标准测量成功率超过99%，能够满足实际生产中的检测需求。

3)基于圆度边缘检测方法，利用数据集对相关模型进行训练，并采用评分系统对滚珠圆度进行评估。结果显示，该模型的圆度检测准确率超过95%，同样满足实际检测需求。

[参 考 文 献]

[1] 陈纤.基于深度迁移学习的滚动轴承故障诊断方法研究[D].大庆：东北石油大学，2023.

[2] 田胜利，王智文，赵兴新，等.滚动轴承摩擦力矩和旋转灵活性检测装置[J].轴承，2024(12)：1-6.

[3] 司卓一，余永健，马伟，等.圆柱滚子轴承径向跳动的仿真分析[J].轴承，2019(01)：23-27.

[4] CHEN S，MA F，JI P，et al. Effects of axial preloading displacement and off-sized balls and raceway error on mechanical performance of angular contact ball bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part K-Journal of Multi-body Dynamics，2015，230(04)：293-306.

[5] 王心悦.基于机器视觉的轴承圆柱滚子尺寸测量关键技术研究[D].哈尔滨：哈尔滨理工大学，2021.

[6] 孙丽婷，张继艳，黄章超，等.机器视觉检测的低畸变物方远心光学系统设计[J].厦门理工学院学报，2023，31(01)：33-39.

[7] 刘凌鸿，冯云，农柳华，等.三倍率双远心镜头设计及视场对光学设计影响[J].激光与光电子学进展，2022，59(07)：300-308.

[8] 张进.微型零件高精度影像测量系统中关键技术研究[D].天津：天津大学，2010.

[9] 郭哲宏.基于亚像素边缘检测的圆心定位技术研究与应用[D].南昌：南昌大学，2023.

[10] 付燕.轮廓仪在机械加工中的应用及其误差分析[J].中国机械，2023(11)：53-56.

[11] AKINLAR C，TOPAL C. EDCircles：A real-time circle detector with a false detection control[J]. Pattern Recognition，2013，46(03)：725-740.

[12] LU C，XIA S，HUANG W，et al. Circle detection by arc-support line segments[C]. IEEE International Conference on Image Processing，2017.

[13] LIU W，YANG X，SUN H，et al. A novel subpixel circle detection method based on the blurred edge model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2022，71：1-11.

Study on Non-contact Measurement of Ball Diameter Based on Roundness Edge Detection Method

GONG Tianhui，ZHONG Fei

(*School of Mechanical Engineering，Hubei Univ. of Tech.，Wuhan* 430068，*China*)

Abstract：To improve the detection efficiency of ball diameter，a semi-automatic non-contact ball diameter measuring device based on optical projection principle is designed on the basis of traditional manual detection methods，and its structure and working principle are briefly explained. Construct an error compensation model based on the detection data of ball diameter and conduct error measurement experiments using the optimized model. The experimental results show that the accuracy of detection data can reach over 99%；By using roundness edge detection method to evaluate the roundness of bearing balls，the accuracy of roundness can reach over 95%. Therefore，non-contact measurement methods for ball diameter and roundness edge detection methods can meet the actual detection needs of bearing ball diameter.

Keywords：Ball diameter；Non-contact measurement；Error compensation model；edge detection

[责任编校：张　众]