

基于机器视觉的小型零件圆度测量^{*}

丁哲文¹ 张 瑞^{1,2} 朱振伟^{1,2} 赵华东^{1,2} 刘丙康²

(1. 郑州大学机械与动力工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省智能制造研究院, 郑州 450066)

摘要: 针对小型零件圆度误差测量效率低、精度不稳定等问题, 提出了一种基于机器视觉的小型零件圆度测量方法。通过建立机器视觉检测平台, 获得零件图像。经过预处理后, 通过 Canny 算子结合 8 邻域扩张算法划定感兴趣区域, 采用多项式插值亚像素边缘检测算法获得边缘坐标; 然后, 利用改进区域搜索算法确定准圆心, 并通过最小区域法的几何结构找出最小区域圆心, 从而计算圆度误差。实验结果表明, 圆度误差的测量重复精度为 $8.1\ \mu\text{m}$, 能够实现小型零件的非接触测量。

关键词: 机器视觉; 圆度误差; 边缘检测; 最小区域法; 小型零件

中图分类号: TH16; TG506

文献标识码: A

The Roundness Measurement of Small Parts Based on Machine Vision

DING Zhewen¹ ZHANG Rui^{1,2} ZHU Zhenwei^{1,2} ZHAO Huadong^{1,2} LIU Bingkang²

(1. School of Mechanical and Power Engineering Zhengzhou University Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Intelligent Manufacturing Research Institute Zhengzhou 450066, China)

Abstract: Aiming at the problems such as low efficiency and unstable accuracy of roundness error measurement for small parts, a method of roundness measurement for small parts based on machine vision was proposed. Through the establishment of machine vision inspection platform, the parts image is obtained. After pre-processing, the region of interest is delimited by Canny operator combined with 8-domain expansion algorithm, and the edge coordinates are obtained by polynomial interpolation subpixel edge detection algorithm. Then, the improved region search algorithm is used to determine the quasi-center of the circle, and the minimum center of the circle is found by the geometric structure of the minimum region method, and the roundness error is calculated. The experimental results show that the repeatability of roundness error is $8.1\ \mu\text{m}$, which can realize the non-contact measurement of small parts.

Key words: machine vision; roundness error; edge detection; minimum zone circle; small parts

0 引言

圆度误差是判断机械零件质量的重要参数之一, 会直接影响零件的互换性、旋转精度、摩擦性及使用寿命等, 甚至会影响到产品的使用寿命以及功能的实现。因此, 快速、准确的评定圆度误差是检验圆形零件加工质量的重要标准之一。

目前, 大部分制造厂商仍在采用接触式测量方法测量圆度误差, 例如使用轮廓仪、三坐标测量机等测量工具, 这些方法能够确保较高的测量精度, 但成本高且对环境要求较高^[1]。相比之下, 机器视觉测量具有速度快、无损检测、可在线测量等优点。金守峰等^[2]使用改进 Zernike 亚像素边缘检测获得边缘点, 并使用最小二乘法评定圆度; 吴德刚等^[3]采用模糊遗传边缘检测获取边缘特征, 并使用插值圆度检测算法测量出圆孔的半径等参数; 朱丹丹等^[4]使用 Zernike 算子定位边

缘, 并使用 3 准则剔除粗大噪声, 然后利用最小二乘法评定圆度, 其测量重复精度为 $9.6\ \mu\text{m}$ 。索振鹏等^[5]利用灰度梯度边缘检测获取边缘后, 使用最小二乘法计算圆度误差。韩宗旺等^[6]对工件轮廓进行三维重构, 提出一种自适应搜索逼近法评定圆度, 其测量值与三坐标测量仪的平均有 $7.6\ \mu\text{m}$ 的误差。

传统的人工接触式方法用于小型零件圆度检测存在诸多问题, 包括效率低、精度低、无法实时检测等问题。此外, 现有研究中存在提取边缘特征的方法耗时长、计算量大、圆度评定方法精度低且原理不符合国际标准的最小条件等问题。为解决这些问题, 本文提出了一种基于机器视觉的小型零件圆度测量方法。采用 8 邻域扩张算法划分感兴趣区域 (region of interest, ROI), 并结合多项式插值亚像素检测算法实现对小型零件边缘的精准定位, 缩短计算时间, 提高定位精度。在此基础上, 结合改进区域搜索算法和最小区域法的几何结构,

收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-08-03

^{*} 基金项目: 郑州市协同创新重大专项项目 (18XTZX12006)

作者简介: 丁哲文 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为图像处理 (E-mail: dzw@gs.zzu.edu.cn); 通信作者: 张瑞 (1970—), 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为智能制造 (E-mail: lyzr@zzu.edu.cn)。

引用本文: 丁哲文, 张瑞, 朱振伟, 等. 基于机器视觉的小型零件圆度测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(4): 171-174, 180.

DING Zhewen, ZHANG Rui, ZHU Zhenwei, et al. The roundness measurement of small parts based on machine vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(4): 171-174, 180.

用于测量圆度误差,从而提高圆度误差测量的准确度。

1 边缘检测

在视觉检测过程中,边缘检测是决定测量精度的关键因素之一。

1.1 Canny 算子边缘检测与 ROI 区域划分

常用的一阶边缘检测算子中,Canny 算子因其抗干扰能力强、检测精度高而被应用广泛。本文采用 Canny 算子对待测零件的边缘进行初步定位,并以此边缘为基准进行 8 邻域扩张,将邻域范围内的像素点划定为感兴趣区域(ROI)。图 1a 为 Canny 算子检测出来的边缘,图 1b 展示了 8 邻域扩张后的 ROI,之后进行亚像素边缘检测时只计算 ROI 内的像素点。这种方法可以显著减少计算时间,提高检测效率。

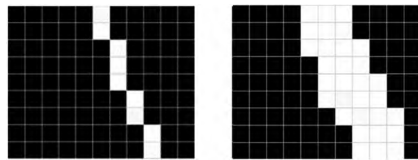


图 1 Canny 边缘检测及邻域扩展图

1.2 多项式插值的亚像素边缘检测

随着工业的快速发展,边缘检测要求的精度也不断提高,受到硬件限制的像素级已经无法满足高精度测量的需求,因此提出了不受像素尺寸大小影响的亚像素边缘检测。目前亚像素检测主要分为插值法、拟合法和矩方法 3 类^[7]。在达到相同的精度下,插值法计算速度快,且对任意窗口尺寸都适用。本文采用多项式插值法进行亚像素边缘检测^[8]。

二次多项式插值法原理为:

对相邻 3 点 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) , 满足 $y_0 < y_1$ 且 $y_2 < y_1$, 二次多项式插值的插值函数如式(1)所示。

$$f(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} \cdot f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} \cdot f(x_1) + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \cdot f(x_2) \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为插值函数。

对函数 $f(x)$ 进行微分,分别令 $\frac{df(x)}{dx} = 0$, $\frac{df(x)}{dy} = 0$, 得到插值点坐标 (x, y) 。

$$x = x_1 + \frac{f(x_0) - f(x_2)}{f(x_0) - 2f(x_1) + f(x_2)} \quad (2)$$

$$y = y_1 + \frac{f(x_0) - f(x_2)}{f(x_0) - 2f(x_1) + f(x_2)} \quad (3)$$

设边缘像素的梯度幅值函数为 $R(x, y)$ 。如图 2 所示 R_1 、 R_{-1} 、 R_0 分别代表点 M 、 N 、 O 的梯度幅值。幅值最大的 O 点会被 Canny 算子检测为边缘点,但实际上在 O 点和 M 点之间存在 P 点,它的梯度幅值 R_p 大于其它点,因此 P 点

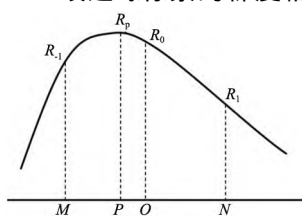


图 2 相邻三点梯度幅值

能更适合表示边缘。

对边缘点 $O(x_0, y_0)$ 进行二次多项式插值,获得亚像素边缘点坐标 $P(x_p, y_p)$:

$$\begin{cases} x_p = x_0 + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \times \frac{D}{2} \cos(\theta) \\ y_p = y_0 + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \times \frac{D}{2} \sin(\theta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: D 为相邻像素点到像素点的距离 θ 为梯度方向与 X 轴正向夹角。该算法定义了 8 个方向模板 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 、 360° 分别为模板的方向表示为图片实际边缘方向,顺着模板方向顺时针转 90° 为梯度方向。

算法流程为:

步骤 1: ROI 区域中的像素点与 8 个方向的模板进行卷积计算;

步骤 2: 卷积计算结果绝对值最大的值为该点的梯度幅值 R_0 ,并将对应模板的方向顺时针旋转 90° 获得梯度方向;

步骤 3: 沿着该点的梯度方向找到相邻点 M 和 N ,并计算两点梯度幅值,设为 R_{-1} 和 R_1 ,根据 $R > R_{-1}$ 且 $R > R_1$ 进行判断,若满足条件则带入式(4)计算亚像素坐标,否则跳过。

2 圆度误差评定

圆度误差评定方法主要有 4 种,分别为:最小二乘法、最小外接圆法、最大内接圆法和最小区域法^[9-10]。其中,最小二乘法是应用最为广泛的方法,但不满足国际标准定义的最小条件。最小外接圆法和最大外接圆法在确定轮廓的外接圆和内接圆时可能存在多个解,因此应用不便。最小区域法符合标准定义的最小条件,但属于无约束非线性化问题,难以直接求解^[11]。本文针对小型零件的圆度评定,提出了一种通过改进区域搜索算法和最小区域法的几何结构相结合的方法。首先,利用最小二乘法拟合圆,将以最小二乘圆圆心为圆心,最小二乘圆度误差为半径的圆设为初始搜索区域,进行迭代,获得准圆心。接下来,利用最小区域法“2+2”几何结构和准圆心确定同心圆的内圆和外圆各两个点。最终,求解出圆度误差。

2.1 最小区域法圆度误差评定原理

圆度误差为实际轮廓两个最小同心圆的半径之差,计算公式为:

$$\begin{cases} f_{\max} = \max\{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}\} \\ f_{\min} = \min\{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}\} \\ e = f_{\max} - f_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中: (x_0, y_0) 为最小区域圆圆心坐标, (x_i, y_i) 为采样数据点, f_{\max} 为采样数据点到圆心的最大距离, f_{\min} 为采样数据点到圆心的最小距离, e 为圆度误差。

最小区域法的几何结构为“2+2”形式^[12-13]。该

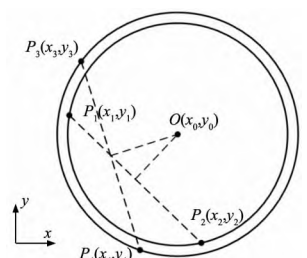


图 3 “2+2”几何结构

结构由采样点中 4 个非共线点决定,其中两个点位于同心圆外圆上,另外两个点位于内圆上,并且它们以最小的半径差值包围了所有的采样点。此外,外圆两点形成的线段和内圆两点形成的线段满足相交条件^[14]。图 3 中 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 为外圆控制点, $P_3(x_3, y_3)$ 、 $P_4(x_4, y_4)$ 为内圆控制点。由几何关系得,最小区域圆心 $O(x_0, y_0)$ 为外圆控制点与内圆控制点连线的中垂线交点。

线段 P_1P_2 中垂线公式为:

$$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 \quad (6)$$

同理,线段 P_3P_4 中垂线式为:

$$(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = (x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 \quad (7)$$

联立式(6)~式(7),可得到 4 个控制点确定的最小区域圆心 $O(x_0, y_0)$, 内圆半径 R_i , 外圆半径 R_o 分别为:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1-x_2 & y_1-y_2 \\ x_3-x_4 & y_3-y_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 \times (x_1^2-x_2^2+y_1^2-y_2^2) \\ 0.5 \times (x_3^2-x_4^2+y_3^2-y_4^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_i = \sqrt{(x_1-x_0)^2 + (y_1-y_0)^2} \quad (9)$$

$$R_o = \sqrt{(x_3-x_0)^2 + (y_3-y_0)^2} \quad (10)$$

2.2 评定步骤

步骤 1: 通过最小二乘法^[15]:

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + ax_i + y_i^2 + by_i + c)^2 \quad (11)$$

根据 $\frac{\partial f}{\partial a} = 0$ 、 $\frac{\partial f}{\partial b} = 0$ 、 $\frac{\partial f}{\partial c} = 0$, 获得方程组:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^n y_i^3 + \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: n 为数据点总数, (x_i, y_i) 为样本数据点。

$$\begin{cases} x_{\text{lsm}} = -\frac{a}{2} \\ y_{\text{lsm}} = -\frac{b}{2} \\ r_{\text{lsm}} = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(12)求出 a, b, c 后,根据式(13)获得最小二乘圆圆心 $O_{\text{lsm}}(x_{\text{lsm}}, y_{\text{lsm}})$ 和半径 r_{lsm} 。由式(5)获得初始圆度误差 e_0 。

步骤 2: 将以 $O_{\text{lsm}}(x_{\text{lsm}}, y_{\text{lsm}})$ 为搜索中心 $O_s(x_s, y_s)$, e_0 为半径 R 的圆设为圆形搜索区域,并将圆 n 等分,获得搜索点 P_j ,其坐标由式(14)获得;

$$\begin{cases} x_j = x_s + R \cos\left(\frac{360^\circ}{j}\right) \\ y_j = y_s + R \sin\left(\frac{360^\circ}{j}\right) \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中: (x_s, y_s) 为当前搜索区域圆心, (x_j, y_j) 为搜索点坐标, n 为被等分数量。

步骤 3: 根据式(5)计算出搜索点的距离差值,并选出搜索点中最小距离差值 e_{new} ,并记录其坐标 $(x_{\text{new}}, y_{\text{new}})$ 。如果搜索区域半径 R 小于指定的迭代精度 ε , 则停止迭代,转到步骤 5。否则,进行下一步骤;

步骤 4: 如果 $e_{\text{new}} \geq e_0$, 保持搜索中心 O_s 不变,将 R

缩小 10 倍;如果 $e_{\text{new}} < e_0$, R 不变,将搜索中心 O_s 的位置变为 $(x_{\text{new}}, y_{\text{new}})$, e_0 由 e_{new} 代替,返回步骤 2。图 4 展示了圆形搜索区域的迭代过程,其中 $n=8$, O_s 为初始搜索区域的圆心, P_j 为搜索点, $(x_{\text{new}}, y_{\text{new}})$ 为下次迭代的搜索中心;

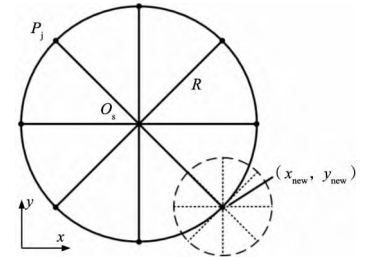


图 4 圆形搜索区域示意图

步骤 5: 将迭代结束后的搜索中心 O_s 设为准圆心,计算采样点到准圆心的距离,并选取距离最大值,次大值和最小值的采样点;

步骤 6: 将满足相交条件的采样点依次设为次近点,并根据式(5)和式(8),选出距离差值最小的采样点为次近点;

步骤 7: 根据式(8)~式(10),计算同心圆的圆心、内径 R_i 和外径 R_o 。并计算采样点到圆心的最小距离 d_{min} 和最大距离 d_{max} ,若 $d_{\text{min}} < R_i$,说明有点在内圆内,将最小距离的采样点设为次近点,并返回步骤 6;若 $d_{\text{max}} > R_o$,将同心圆的圆心设为搜索中心 O_s ,并返回步骤 3;若上述情况均不满足,则该采样点为次近点;

步骤 8: 计算圆心坐标和圆度误差值。

流程图如图 5 所示。

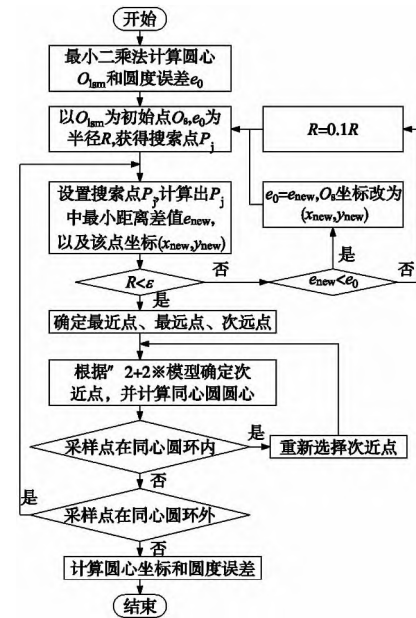


图 5 圆度误差评定流程图

2.3 圆度评定方法验证

为了验证算法的可行性和准确性,采用文献[11]中圆度误差为 0.002 mm 的 14 个数据点和文献[10]中的 39 个数据点进行验证。本文方法取迭代精度 $\varepsilon = 0.000\ 001$, $n=12$ 并分别与最小二乘法、区域搜索法进行对比,对比结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 对 14 个数据点的数据对比结果 (mm)

方法	圆心坐标		圆度误差
	x	y	
最小二乘法	1.062×10^{-4}	-8.268×10^{-5}	0.002 188 81
区域搜索法	-4.963×10^{-9}	-7.231×10^{-8}	0.002 000 08
文献[12]提出方法	0	0	0.002 000 00
本文方法	0	0	0.002 000 00

表 2 对 39 个数据点的数据对比结果 (mm)

方法	圆心坐标		圆度误差
	x	y	
最小二乘法	0.035 551 7	-0.053 592 3	0.009 193 93
区域搜索法	0.035 615 0	-0.052 929 4	0.008 537 57
文献[10]M2C	0.035 600 0	-0.052 900 0	0.008 600 00
本文方法	0.035 615 0	-0.052 929 5	0.008 537 47

从表 1 可以看出,基于区域搜索的圆度误差评定法比最小二乘法准确性更高,但仍有一些误差,并且该方法易受到步长和搜索方向的影响。通过本文方法测量得到的圆度误差值为 0.002 mm,与标准值一致,这表明本文方法能够准确的检测的圆度误差。从表 2 可以看出本文方法求解出来的圆度误差值 0.008 537 47 mm 相较于其它方法更小。

3 实验分析

3.1 小型零件圆度测量系统

为了获得小型零件图像,建立了一个小型零件圆度测量系统,如图 6 所示,该系统主要包括工业相机、远心镜头、光源等。为满足检测需求,选用分辨率 5472×3648 的 CCD 工业相机,以获得高品质图像。光源采用 LED 背光光源,可以减少环境光线对采集图像

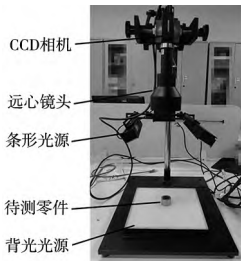


图 6 小型零件圆度测量系统

的影响,并突出检测目标的轮廓边缘。系统的部分设备参数如表 3 所示。待测零件是外径环规。图 7 展示了外径环规图像,其中图 7a 为外径环规,图 7b 为工业相机拍摄的背光图像原图。在检测过程中,通过工业相机获取外径环规图像,实时传输到计算机进行处理。

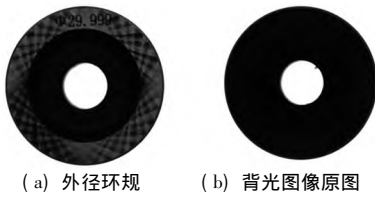


图 7 外径环规图像

表 3 部分设备参数

设备	型号
CCD 相机	MV-CE200-10GM
镜头	MVL-KY-0275-260
背光光源	MV-LBSS-200-200-W

3.2 相机标定和图像预处理

相机获得的图像以像素为单位,若想获得零件的实际圆度误差,需要确定每个像素所代表的物理尺寸。通过相机采集 20 张左右在不同位姿下的圆形标定板图像后,利用张定友标定法,获得相机内参、畸变系数和圆心坐标等参数后,进行畸变矫正并求出像素当量 $k=0.008\ 755\ \text{mm/pixel}$ 。

图像矫正完成后,进行灰度化、引导滤波去除噪声以及基于 Ostu 的二值化阈值分割等预处理操作。图 8

和图 9 分别为滤波后的图像和二值化图像。



图 8 滤波图像

图 9 二值化图像

3.3 圆度测量结果

为验证本文提出的测量方法的重复性和准确性,将外径环规的外圆作为检测目标。对外径环规的外圆重复测量 10 次,并在圆度评定时分别使用最小二乘法、区域搜索法和本文方法进行对比。测量结果如图 10 所示。

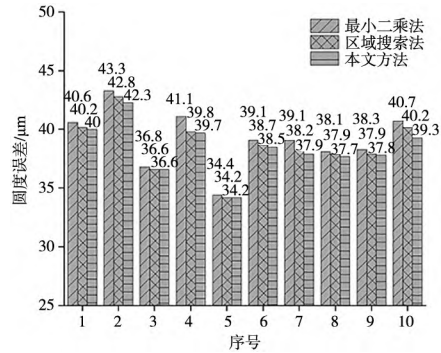


图 10 测量结果

表 4 测量结果对比

(μm)

方法	圆度测量平均值	均方差
最小二乘法	39.2	2.482
区域搜索法	38.7	2.325
本文方法	38.4	2.167

由图 10 和表 4 可以看出,本文方法的圆度测量结果平均值为 38.4 μm,均方差为 2.167 μm,均比区域搜索法和最小二乘法更小,并且重复精度为 8.1 μm,说明本文方法测量的数据分布比较集中,波动小,重复性较好。

4 结论

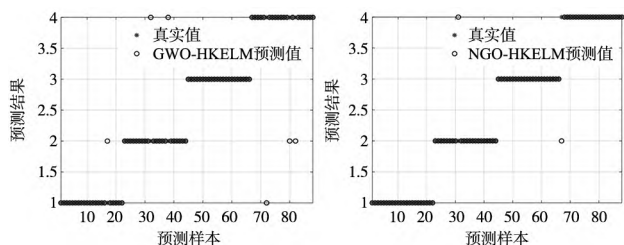
针对小型零件圆度测量存在的问题,搭建了基于机器视觉的小型零件圆度测量系统,通过 Canny 边缘检测、8 邻域算法划定 ROI、多项式插值亚像素边缘检测提高了边缘定位的速度和精度。

提出了一种改进的圆度检测方法,结合了改进区域搜索算法和最小区域法的几何结构。该方法对采样点的分布没有特殊要求,能够有效测量的圆度误差,克服了区域搜索法等算法无法找到最小区域圆心的缺点。此外,该方法对迭代精度、步长等参数要求不高,提高了测量结果的稳定性。实验结果表明:本文方法测量结果的准确性相较于最小二乘法和区域搜索法有所提升,重复精度为 8.1 μm,验证了本文方法的有效性,能够实现小型零件的圆度误差非接触测量。

[参考文献]

- [1] 周晓东,张雅超,谭庆昌,等.基于结构光视觉技术的圆柱度测量新方法[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(2):524-9.
- [2] 金守峰,范荻,陈蓉,等.面向回转类零件圆度的机器视觉测量方法与试验[J].机械设计与研究,2016,32(4):117-119,124.

(下转第 180 页)



(e) GWO-HKELM 的预测结果 (f) NGO-HKELM 的预测结果

图6 6种故障诊断模型的分类准确率

为进一步验证 NGO-HKELM 算法的性能,每个故障诊断模型分别运行 20 次,计算各故障诊断模型的平均分类准确率和分类时间,比较这几种模型,结果如表 3 所示。

表3 6种模型的比较结果

诊断模型	平均识别准确率/%	平均寻优时间/s
SVM	89.772 7	1.922 4
NGO-SVM	94.381 2	1.637 3
HKELM	92.045 5	1.779 8
PSO-HKELM	94.318 2	1.131 1
GWO-HKELM	93.181 8	1.480 8
NGO-HKELM	97.727 3	1.068 1

通过分析表 3 可知,在 6 种故障诊断识别模型中, HKELM 诊断模型的平均准确率为 92.045 5%,比传统的支持向量机高了 2.272 8%,平均寻优时间也比 SVM 短了 0.142 6 s。NGO-HKELM 诊断模型平均准确率为 97.727 3%,比 PSO-HKELM 和 GWO-HKELM 诊断模型分别高了 3.409 1%、4.545 5%, NGO-HKELM 诊断模型平均寻优时间为 1.068 1 s,比 PSO-HKELM 和 GWO-HKELM 诊断模型分别短了 0.063 s、0.412 7 s。实验证明,经过群体智能优化的 HKELM 诊断模型故障识别的准确率更高、寻优时间更短以及收敛速度更快。

4 结束语

(1) 由于电动机转子故障信号的非线性动态特征较难有效提取。实验利用基于 ICEEMDAN-MSE-KPCA 的特征提取方法,将 ICEEMDAN 应用于故障振动信号的分解和重构,计算重组信号的多尺度样本熵值,形成特征向量。采用 KPCA 对高维的特征向量进行降维。获得了较好的预处理效果。

(2) 利用 NGO 算法,获取 HKELM 的全局最佳参数,

提高诊断模型的准确率,解决了传统分类器存在优化速度慢、调整参数多、易陷入局部最优等问题。

(3) 通过实验验证,对比 SVM、NGO-SVM、HKELM、PSO-HKELM、GWO-HKELM 故障模型。NGO-HKELM 诊断模型的平均准确率更高,可达 97.727 3%,平均寻优时间为 1.068 1 s,收敛速度快。

【参考文献】

- [1] 杨丽湘. 基于 LMD 方法的转子系统故障诊断研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [2] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报, 2002(2): 113-118.
- [3] 蒋玲莉, 谭鸿创, 李学军, 等. 基于 CEEMDAN 排列熵与 SVM 的螺旋锥齿轮故障识别[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 33-40.
- [4] COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing[J]. Biomedical Signal Processing & Control, 2014, 14(11): 19-29.
- [5] 杨超, 杨晓霞, 李灵飞. 基于灰色关联度和 ELM 的轴承性能退化趋势预测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(11): 105-108.
- [6] 吴宪, 崔亚男, 代以, 等. 基于 KELM 的轴承故障诊断方法[J]. 内江科技, 2018, 39(12): 2.
- [7] 秦波, 孙国栋, 王建国. H-K-ELM 在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 机械设计与制造, 2018(8): 11-14.
- [8] 段照斌, 杜海龙, 张迪, 等. 基于 KPCA 和 ELM 的新型民机舵机系统故障诊断[J]. 计算机仿真, 2022, 39(1): 25-28.
- [9] 毛清华, 张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6): 1155-1164.
- [10] HUANG G B, ZHOU H, DING X, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B, 2012, 42(2): 513-529.
- [11] SMITS G F, JORDAAN E M. Improved SVM regression using mixtures of kernels[C]//Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks, 2002.
- [12] OUYANG T, ZHA X, QIN L, et al. Wind power prediction method based on regime of switching kernel functions[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2016, 153: 26-33.

(编辑 祝智铭)

(上接第 174 页)

- [3] 吴德刚, 赵利平. 基于机器视觉的圆孔尺寸测量系统研究[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 1014-1018.
- [4] 朱丹丹, 王洪喜, 王建华, 等. 基于图像处理的粗糙边缘盲孔圆度误差测量[J]. 工具技术, 2021, 55(4): 91-95.
- [5] 索振鹏, 宫爱玲. 基于图像灰度梯度的圆度检测算法[J]. 激光杂志, 2016, 37(8): 134-136.
- [6] 韩宗旺, 张伟, 程祥, 等. 基于机器视觉的短轴零件圆度检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(10): 93-96.
- [7] 陈小卫, 徐朝辉, 郭海涛, 等. 利用极值梯度的通用亚像素边缘检测方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(5): 500-507.
- [8] 李智超. 基于机器视觉的孔组直径测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [9] CAO Z M, WU Y, HAN J. Roundness deviation evaluation method based on statistical analysis of local least square circles[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(10): 1-13.

- [10] 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-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2009, 33(3): 284-290.
- [11] 岳龙龙, 黄强先, 梅隼, 等. 基于最小包容区域法的圆度误差评定方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 42-48.
- [12] CALVO R, GOMEZ E. Accurate evaluation of functional roundness from point coordinates[J]. Measurement, 2015, 73: 211-225.
- [13] RIVLIN T J. Approximation by circles[J]. Computing, 1979, 21(2): 93-104.
- [14] 岳龙龙. 圆度和球度误差评定模型研究及其仿真[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [15] 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.

(编辑 赵蓉)