

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209326

# 基于机器视觉的发动机气缸壁珩磨角测量方法

张农 黄凯 罗亮 郎霄 郑敏毅

(合肥工业大学汽车与交通工程学院 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对实际工业检测中发动机气缸壁珩磨角人工测量存在效率低、精度低等问题,提出了一种基于机器视觉的发动机气缸壁珩磨角测量方法。首先利用 Gabor 最优滤波通道算法处理样本图像获得线性特征增强后的网纹图像,再对网纹图像进行 DFT 转化获取傅里叶频谱图像,然后基于数字微分分析算法获取频谱图像中的峰值直线并计算两条峰值直线的夹角作为计算结果,同时与基于 Camera Measure 测绘软件手动测量结果进行对比。通过实现测试结果表明:该方法相对于手动测量结果的误差仅为 0.33%,重复测量的均值差为 $\pm 1^\circ$ 以内;在检测时间上,检测一个工件的平均时间为 0.53 s。该测量方法测量精度高、测量速度快等优势,可以有效地取代工业检测中的人工测量。

**关键词:** 气缸套珩磨网纹;珩磨角;Gabor 滤波;数字微分分析算法(DDA);机器视觉

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## Crosshatch-angles detection of cylinder bore based on machine vision

Zhang Nong Huang Kai Luo Liang Lang Xiao Zheng Minyi

(School of Automotive and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low efficiency and low precision in manual measurement of honing Angle of engine cylinder wall in practical industrial testing, a measuring method based on machine vision was proposed. Firstly, Gabor optimal filter channel algorithm is used to process the sample image to obtain the enhanced linear feature pattern image. Then, DFT transformation is performed on the pattern image to obtain the Fourier spectrum image. Then, the peak lines in the spectrum image are obtained based on the digital differential analysis algorithm and the included Angle of the two peak lines is calculated as the calculation result. Meanwhile, the results were compared with the manual measurement results based on Camera Measure software. The test results show that the error of this method is only 0.33% compared with manual measurement, and the mean difference of repeated measurement is within  $\pm 1^\circ$ . In terms of detection time, the average detection time of a workpiece is 0.53s. This method has the advantages of high precision and fast speed, which can effectively replace manual measurement in industrial testing.

**Keywords:** cylinder liner honing texture; crosshatch-angle; Gabor filter; digital differential analyzer algorithm; machine vision

## 0 引言

气缸套是发动机的核心部件,其放置在机体的气缸体孔内,上由气缸盖压紧固定,其内表面气缸壁与缸盖、活塞共同构成气缸的工作空间—燃烧室。在燃烧室内,气缸壁承受着活塞的侧推力,成为活塞往复运动的导程,所以气缸壁是装配表面。高温气体压力使气缸壁产生切向拉应力和径向压应力,所以气缸壁也是工作表面。气缸套的制作工艺直接影响到发动机的装配与使用性能。气缸套的加工过程中,气缸壁的珩磨工艺是其中重要工艺之一,使得气缸壁表面具有斜交网纹状沟槽的同时具有平台面的结构<sup>[1]</sup>。平

台网纹不仅可以增强存储润滑油的功能还具有缩短发动机磨合时间、提高发动机功率、减少机油燃烧、降低污染排放、延长发动机排放等功效,所以平台网纹结构被广泛推广<sup>[2-4]</sup>。

气缸壁的珩磨加工过程中,珩磨角是影响珩磨网纹质量的重要参数之一。合适大小的珩磨角可以通过稳定油膜和减少机油消耗来增加内燃机的工作性能与使用寿命。在加工流水上增添珩磨角的检测流程是气缸套加工过程中不可少的步骤。当前常用的检测方法有两种,都是基于人工的检测方法:一种是采用特殊制作的薄膜,该薄膜具有良好的拓印效果,将其拓印在气缸壁内壁上,制作拓

印样本,再放到显微镜下进行观察分析;而第二种测量方法依赖于进口仪器三维测量仪器,该仪器主要是基于光学成像的原理进行观察并采集图像,基于图像分析其夹角大小。这两种检测方法中,第一种检测效率低下且依赖人工操作,可能存在系统误差与过失误差,并且效率低下。而第二种方法又依赖于精密检测仪器,成本高,且效率依旧低下。由此可知,若想实现在线自动检测,寻找一种具备高精度与高效率且低成本的检测方法就显得非常重要了。目前在国内已有很多学者对于珩磨角的检测展开研究:张红菊等<sup>[5]</sup>通过对珩磨加工及珩磨角形成过程的分析,介绍了一种检测珩磨角的方法,采用涂料均匀涂抹在气缸套内孔面,使用透明胶带进行拓印,然后将拓片放置于白纸或透明平板玻璃上,使用显微镜进行手动检测珩磨角。刘乔楠等<sup>[6]</sup>提出了一种基于改进的 Hough 变换缸套内面珩磨角检测方法,采用了图像预处理算法与 Canny 算子获得处理后的图像,再通过改进后的 Hough 变换网纹直线特征提取方法,计算提取直线夹角的平均值,得到缸套珩磨角值;刘丽等<sup>[7]</sup>提出了一种基于 Hough 变换和清零法的缸套内面缸套内面珩磨角检测方法,采用了邻域运算与自适应中值滤波等方法进行图像处理,再采用 Hough 变换与清零法相结合的直线提取算法,根据所提取的直线特征计算珩磨角;Ramamoorthy<sup>[8]</sup>通过探索气缸套图像的频域特征,提出了一种基于傅里叶变换和霍夫变换的图像处理算法,用于从捕获的气缸套表面图像中自动评估珩磨角度。

目前国内所采用的方法大多还停留在人工检测方法,而当前已有的检测方法无法达到在线检测要求,针对现有的检测方法中实时性与准确性不足的问题,研究基于机器视觉<sup>[9-11]</sup>的气缸壁珩磨角自动检测方法,通过将算法计算结果与基于图形用户界面程序与量角器的手动方法所得结果进行对比,验证检测算法的准确性,进而实现珩磨角的自动检测功能。

## 1 珩磨角的相关知识

珩磨角是珩磨加工时刀具两个运动方向所形成的夹角,是衡量气缸壁质量的重要参数之一。如图 1 所示,珩磨角  $\alpha$  是两个方向的珩磨网纹直线的夹角,Garbon 等<sup>[12]</sup>研究了不同珩磨角度值对缸套性能的影响。珩磨角在气缸套中心线方向的夹角为  $125^\circ \pm 15^\circ$ ,在气缸壁内径的切线方向为  $55^\circ \pm 15^\circ$ 。本文中,珩磨角  $\alpha$  使用钝角表示。当  $\alpha$  角较小时,储油能力会降低,发动机会因为机油含量较低而出现损耗,降低发动机寿命。当  $\alpha$  角较大时,会破坏油膜稳定性,加速机油损耗,导致排放超标等恶劣影响。可见珩磨角是评价发动机气缸壁质量的重要参数之一,因此筛选出珩磨角大小合适的气缸套是工业检测中的必要过程。机械行业标准 JB/T 5082.7-2011 中规定珩磨角的大小在气缸套轴线方向的夹角应该为  $125^\circ \pm 10^\circ$ <sup>[13]</sup>。

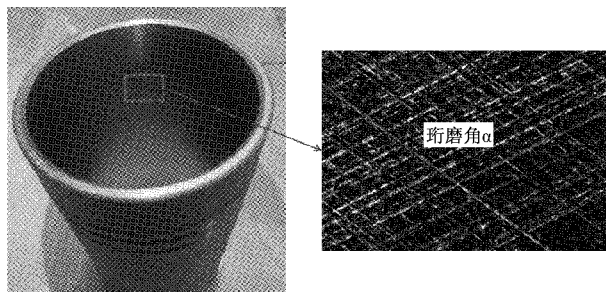


图 1 气缸壁珩磨角  $\alpha$

## 2 珩磨角检测算法

### 2.1 检测算法的思路与流程

基于珩磨网纹的结构特性,为了高效精准的测算珩磨角,文中提出一种新的珩磨角自动检测算法,测算的流程如图 2 所示。图像采集时,受光照环境以及采集设备质量等多种因素的影响,可能会出现网纹图像的噪声较多,且线性特征相对不明显。文中提出了一种方法,将图像进行 Gabor 滤波处理和二维离散傅里叶变换将图像从空间域转换到频域,再根据图像再傅里叶域特性使用 DDA 算法快速确定频谱图像中的两个频谱峰值,而两个峰值之间的相位差即所要计算的珩磨角值,误差为算法测量值与基于图形测量工具手动测量均值之间的差值与测量值之间的比值,本文取误差值上限为 1%,若结果满足误差要求,则结束测量,若不满足,则调整 Gabor 滤波器参数,直至算法测算误差在要求范围内。

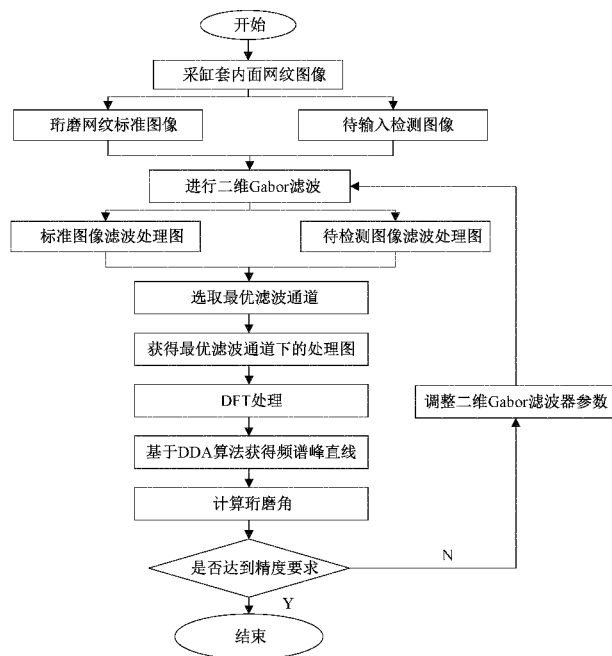


图 2 算法流程

如果基于当前所设计的滤波器组所获得的最优滤波通道的基础上,获得的图像处理效果达不到计算精度要求时,

选择合适步长对先前所设计的滤波器组进行角度偏移,获得新的滤波器组,再进行最优滤波通道筛选,然后重新计算珩磨夹角值。

## 2.2 图像增强

在图像采集的过程中,由于采集设备的质量以及光照环境等因素导致各类噪声的出现,使图像质量并不理想,导致所采集到的样本图像都有明显的噪声污染,严重的影响了网纹图像的特征表现,影响了珩磨角的测量。有学者表明,Gabor 滤波器非常适用于纹理图像的检测与分离<sup>[14]</sup>。所以本文使用 Gabor 滤波器进行图像增强处理,提高网纹特征,降低噪声干扰。

### 1) Gabor 滤波器

一维的 Gabor 滤波器是处理一维信号最佳的带通滤波器,而二维 Gabor 滤波器则是用来处理二维信号的一种空间滤波器。二维 Gabor 滤波器是一个基于高斯函数构造的复正弦函数,能够提取给定区域的频域特性<sup>[15]</sup>,其通用表达式为:

$$g_{pq}(x, y; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma) = e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}} e^{i(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \varphi)} \quad (1)$$

经整理,可得到实部和虚部分别为:

$$\begin{cases} g_{pq\text{ real}}(x, y; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma) = e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}} \cos(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \varphi) \\ g_{pq\text{ imag}}(x, y; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma) = e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}} \sin(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\begin{cases} x' = x \cos\theta + y \sin\theta \\ y' = -x \sin\theta + y \cos\theta \end{cases}$ ; 其中  $\lambda$  为波长参数;  $\theta$  为滤波方向;  $\varphi$  为调谐函数的相位偏移;  $\gamma$  控制滤波器核函数的长宽比;  $\sigma$  为高斯滤波器的方差。  $p, q$  分别为尺寸放大倍数和滤波器旋转次数,  $p = 1, 2, \dots, S, S$  为最大放大倍数,  $q = 1, 2, \dots, L, L$  为旋转的最大数;  $g_{pq}(x', y'; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma)$  为以  $g_{pq}(x, y; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma)$  为初始函数,经过尺寸放大和旋转所得的样本函数,  $x'$  和  $y'$  为旋转变换后的坐标。将第  $k$  幅待检测的样本图像设为  $I_k(x, y)$ , 将经过滤波后的图像设为  $I_{pq}(x, y)$ , 则

$$I_{pq}(x, y) = \{ [g_{pq\text{ real}}(x, y; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma) \cdot I_k(x, y)]^2 + [g_{pq\text{ imag}}(x, y; \lambda, \theta, \varphi, \sigma, \gamma) \cdot I_k(x, y)]^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

### 2) 最优滤波通道选取

最优滤波通道选取的方法<sup>[16]</sup>是基于标准图像与待检测图像的标准差、方差、均值等基础统计学特征构建的补偿函数来选取的。其中滤波通道为建立的 gabor 滤波器组的不同方向和尺寸的核函数。由于希望获得的滤波结果与标准样本结果最接近,所以选取计算结果最小的核函数为最优滤波通道。方法具体为:基于图像基础特征建立变异系数<sup>[17]</sup>,补偿函数为待检测网纹图像与标准网纹图像滤波后所得图像的变异系数做差。差值越大,网纹图像的沟槽纹

理不规整,网纹平台与沟槽的对比度小;差值越小,待检测网纹图像与标准网纹图像的网纹排布越近似,沟槽纹理越是整齐,纹理特征越是明显。使用不同通道对待检测图像与标准图像进行计算,得到补偿函数最小的通道即为最优滤波通道。

$$e_d(i) = \frac{\delta_d(i)}{\mu_d(i)} \quad (4)$$

$$e_s(i) = \frac{\delta_s(i)}{\mu_s(i)} \quad (5)$$

$$J(i) = e_d(i) - e_s(i) \quad (6)$$

式中:  $e_d(i), e_s(i)$  分别为第  $i$  个滤波通道的待检测网纹图像和标准网纹图像的变异系数;  $i$  为滤波通道  $i = 1, 2, \dots, SL$ ;  $\delta_d(i), \delta_s(i)$  分别为第  $i$  个滤波通道的待检测网纹图像和标准网纹图像的像素标准差;  $\mu_d(i), \mu_s(i)$  分别是第  $i$  个滤波通道的待检测网纹图像和标准网纹图像像素均值;  $J(i)$  为第  $i$  个通道的补偿函数。补偿函数最小值  $J_{best}$  对应的滤波通道为最优滤波通道。

$$J_{best} = \min_{1 \leq i \leq SL} \{J(i)\} \quad (7)$$

最优滤波通道下获得的滤波图像即最优滤波通道图,其有效的保留了珩磨网纹图像的纹理特征,同时显著消除了由于采集设备原因造成的噪声干扰。

## 2.3 二维离散傅里叶变换

假设  $f(x, y)$  表示  $m \times n$  的图像,则二维离散傅里叶变换的公式如下<sup>[18]</sup>:

$$F(u, v) = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (8)$$

其中,  $(u, v)$  为频域空间的坐标系。

将图像进行傅里叶变换,得到的图像对比度大大提高。如果图像在空间域表现出周期性结构,傅里叶域将把这些结构分别映射到它的低频和高频区域。傅里叶变换具有良好的抗噪性能、方向保持性能和周期性特征增强性能。傅里叶变换是旋转相关的,也就是说,以一个角度旋转原始图像,变换后的图像也将同样旋转相同的角度。如图 7 所示,在空间域中具有特定角度方向的所有直线转换到傅里叶域中时,傅里叶域中会呈现单一地均匀的直线,而该直线与原图像中的直线相互正交。

## 2.4 频谱峰直线提取与夹角计算

数字微分分析算法(digital differential algorithm, DDA)是一种线段扫描转换算法,以单位间隔对样本取样获取路径上的直线。DDA 直线绘制算法是基于图像平面中的两点已知点的坐标开始绘制的。在珩磨网纹的傅里叶频谱图像中,图像具备共轭对称与低频中心位于频谱居中的图像中点的特征。所以选择图像边框上关于中心对称的两点作为直线绘制的基础,直线会经过高频的中心,而直线所经历的像素累合即可作为该方向的频谱权值,权值最高的直线方向即为频谱峰的角度方向。

选取左上角点与左下角拐点作为初始点,进行图像遍

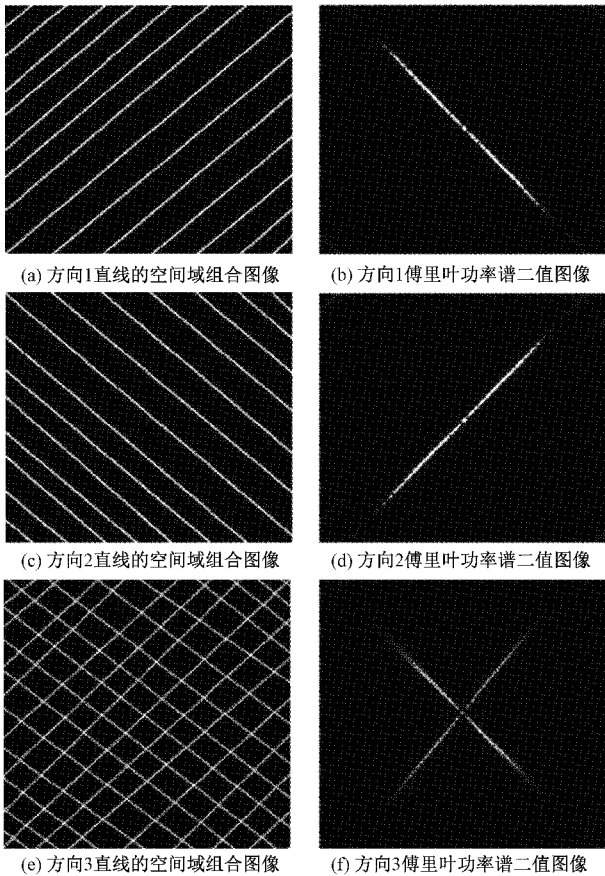


图 3 傅里叶变换性质

历, 获取每一条穿越低频中心点的直线所经历像素的累合值。该方法可以借助于频谱图像共轭对称与低频中心位于频谱居中后的图像中点的特性, 融合 DDA 直线绘制算法, 使得可以以中点为定点, 旋转遍历图像中的高频幅值, 快速确定峰值的准确角度。具体处理过程如下:

1) 确定遍历初始点, 选取左上角点与左下角拐点, 利用 DDA 直线绘制算法, 获取基于初始点的直线所经历所有像素点的坐标值;

2) 根据像素值的坐标, 进行累合计算, 然后放置于累加器中;

按顺时针, 再次确定新的两个坐标点, 然后重复 1), 2) 的操作, 直至遍历一圈, 获得一个一维列表;

3) 设定一定的阈值, 确定阈值范围内的最大值, 然后获得该局部最大值两端坐标点;

4) 计算两条直线的夹角, 即为珩磨珩磨角;

5) 根据以上步骤最终获得四个坐标点, 代表着两条具备局部最大值的直线。如图 7(d), 四个点的坐标为最终检测出的两条直线端点, 条线段的两端点用 Point1、Point2 来表示,  $\beta$  表示与  $x$  轴之间的夹角

### 3 实验与结果分析

为了验证珩磨角检测算法的有效性, 搭建了如图 4 所

示的图像采集装置, 对发动机气缸壁进行实验检测。图像采集装置系统模块包括: 计算机控制与图像处理单元、图像采集工作台、成像系统以及对应的探测器支撑臂装置。探测器支撑臂抓握图像的成像系统设备插入放置在图像采集工作台上的气缸套样件内。实验在 PC 机上基于 python 3.10.2 平台与 OpenCV 3.3.0 来实现, 所用的 PC 配置: CPU Intel Core i7-8750H CPU, 2.20 GHz, 内存 16 G。

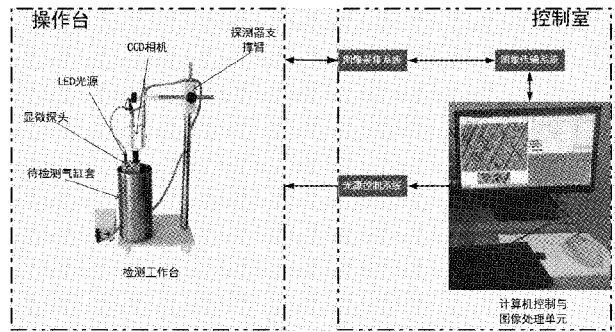


图 4 气缸壁珩磨网纹图像采集装置系统结构

气缸壁珩磨网纹图像采集系统可以分为两个部分, 分别是操作台执行部分与控制室控制部分。工作流程为: 将带检测的样本放置在检测工作台中间, 将探测器支撑臂抓握成像设备置于气缸壁内侧, LED 光源曝光设备与成像设备同轴放置于成像设备四周。有计算机控制与图像处理单元输出控制指令, 控制激光曝光强弱, 调整探测器支撑臂到图像采集合适位置。此时将采集到的图像与图像处理单元进行连接, 将图像输送到系统中, 最终在计算机中以数字图像的形式呈现。

在珩磨角检测过程中, 样本图像的分辨率越高, 检测到的图像珩磨网纹的尺寸精度越精确, 但是算法处理时间也越长。为平衡算法的用时与精度, 在此选用图像分辨率为  $960 \times 960$  的被检测珩磨网纹图像, 如图 5 所示, 本文在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内设计  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ , 4 个不同方向的滤波器, 并且在每个方向上分别设计了滤波器核尺寸大小为 7、9、11、13、15、17, 六个不同尺寸大小的滤波器。经过算法计算, 发现当使用  $45^\circ$  方向和尺寸为 11 的滤波通道时, 补偿函数的值最小。如果基于当前所设计的滤波器组所获得的最优滤波通道的基础上, 获得的图像处理效果达不到计算精度要求时, 选择合适步长对先前所设计的滤波器组进行角度偏移, 获得新的滤波器组, 再进行最优滤波通道筛选。

如图 6 所示, 其中图 6(a) 为珩磨网纹标准图, 为所采集图像中噪声最少, 纹理最清晰, 图 6(b) 为珩磨网纹待检测图, 为所采集图像中随机选取的一张样本图, 而图 6(c) 为最优滤波通道图。

将最优滤波通道图像进行二维离散傅里叶变换后得到频谱图, 如图 7 所示。再经过二值化处理简化算法处理, 使用 DDA 算法检测频谱峰直线, 如图 8 所示。得到两条峰值直线的起止点坐标点, 然后计算两直线夹角。

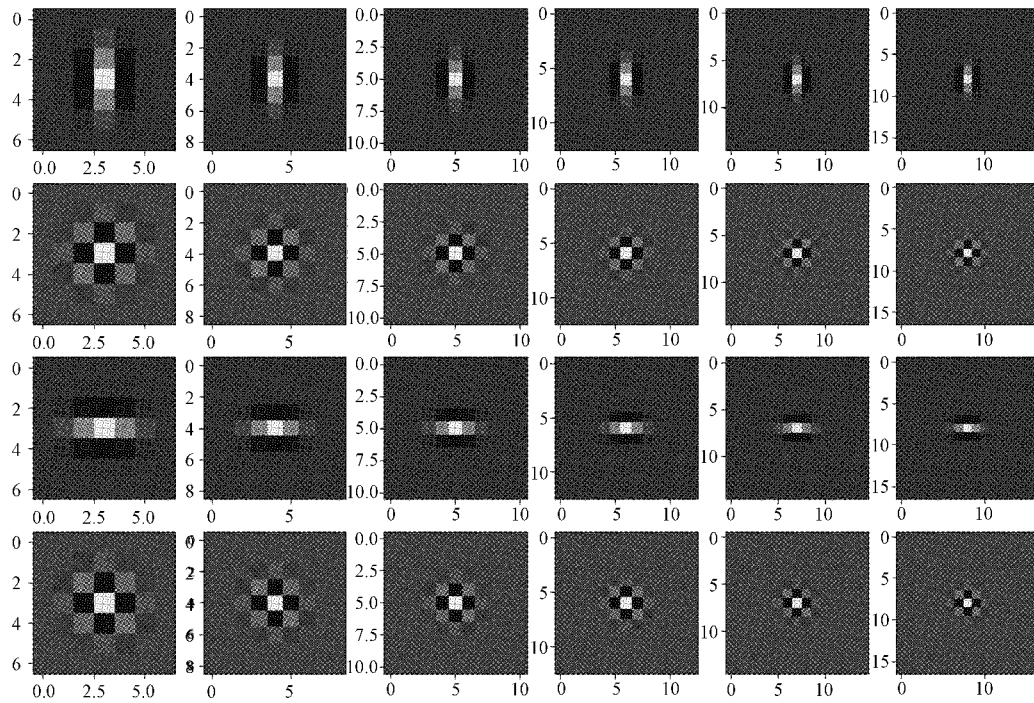


图 5 4 方向 6 尺度 Gabor 滤波器组

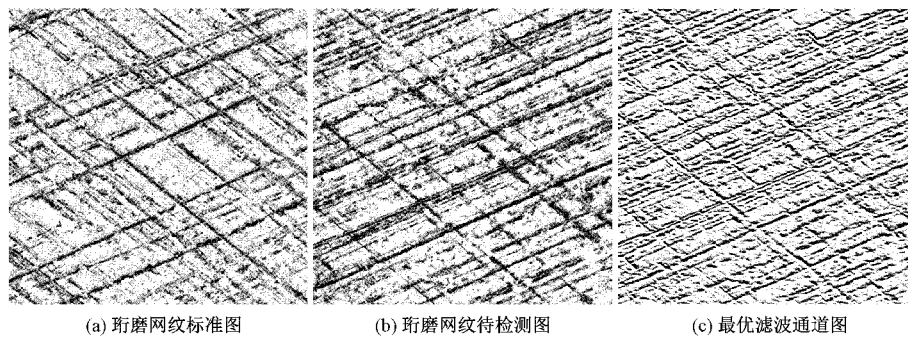


图 6 滤波前后对比

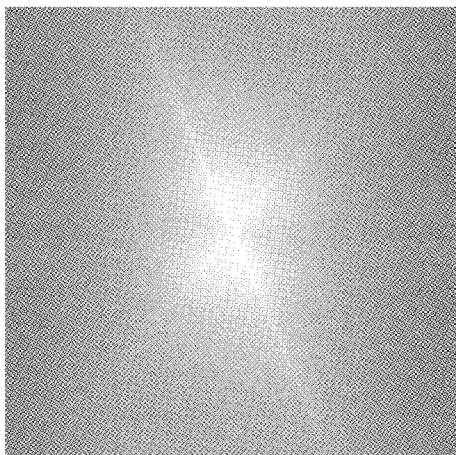


图 7 频谱图像

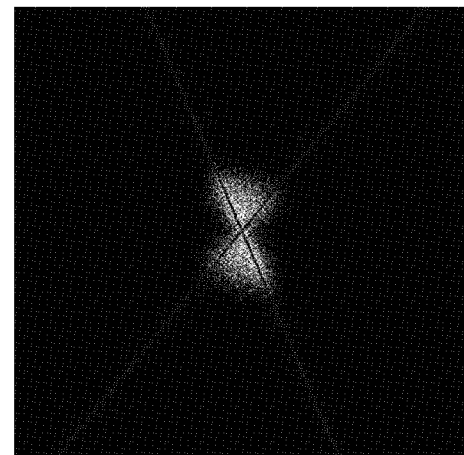


图 8 算法检测图像

计算的两直线参数以数组返回,如表 1 所示,其中 Point\_start 与 Point\_end 分别代表直线的起止点坐标, $\beta$ 代

表直线与 X 轴之间的夹角。

对所采集的图像使用图形用户界面程序 Camera Measure

表 1 文中算法的试验数据

序号	Point_start	Point_end	$\beta$
Line1	[253,0]	[706,960]	64.74°
Line2	[838,0]	[121,960]	-53.24°

软件,进行量角器手动测量,采集图像中网纹特征明显具有代表性的夹角 10 个,取其均值为手动测量的珩磨角值,如图 9 所示。基于图形用户界面程序软件所测量的夹角均值与真实值之间存在较小误差,当算法测量值与基于软件手动测量值之间的误差较小时,可以认为算法测量值与真实值之间的误差较小。在直接获取真实值的前提下,本文采用基于图形用户界面程序软件的手动测量均值作为参考,衡量算法测量值的精确度。

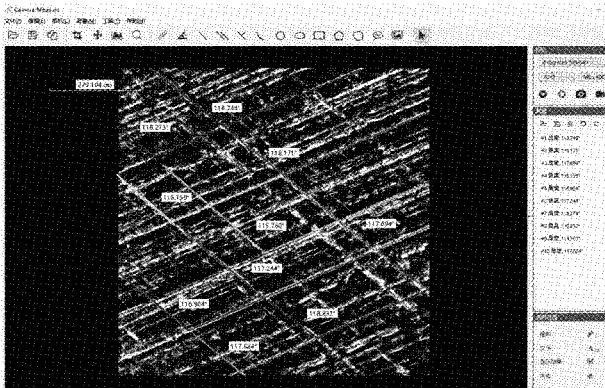


图 9 基于图形用户界面程序的手动测量

基于图像用户界面程序 Camera Measure 软件测得的具有代表性珩磨角数据如表 2 所示。

表 2 基于图形用户界面程序所采集数据

序号	角度/(°)
1	118.748
2	118.171
3	117.694
4	116.159
5	116.964
6	117.244
7	118.273
8	118.232
9	115.760
10	117.624

根据表 2 中数据,求得均值角度为 117.487°,而根据上文所提的珩磨角检测算法所得结果为 117.98°,所以可得该样本图像的检测误差为 0.42%。从所采集的图像中,选取 30 幅具有代表性的结构清晰样本图像进行珩磨角检测,将获得的结果与人工检测结果进行比较并计算误差。结果基于本文所提出的检测方法误差保持在 1% 以内,检测误差的平均值为 0.33%,结果如图 10 所示。而在检测时间上,检测一幅样本图像的时间为 0.53 s。

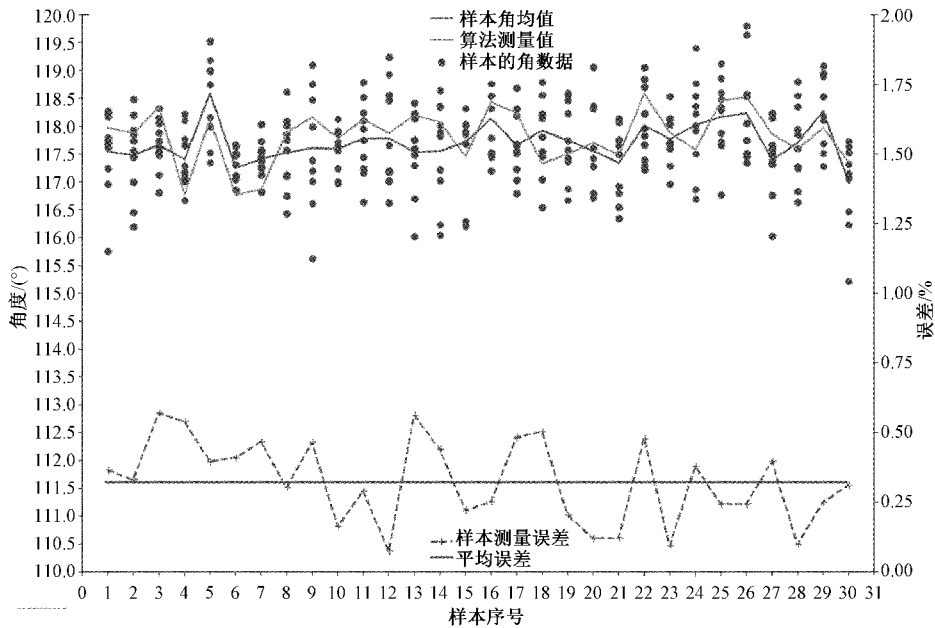


图 10 30 幅样本图像的人工与文中算法检测结果

综上,本文所提的基于机器视觉的珩磨角测算方法相对于传统的人工复膜检测方法提高了检测效率与检测精度,而相对于使用进口的检测仪器降低了成本,具有很好地替代性。

### 4 结 论

珩磨角的检测是后续珩磨网纹质量评判的基础,珩磨

网纹的质量检测其中关键的一个问题就是如何快速准确的将珩磨夹角检测出来。采用基于机器视觉的珩磨角检测方法,相对于传统的珩磨角检测方法而言,检测更加快速,减少了由于人工检测的人为误差、漏检等问题,有效提高了珩磨角检测的可靠性,并且实验结果表明,文中所提方法无论是在速度还是准确性上都优于传统人工检测方法,可以有效地取代工业检测中的人工测量。

### 参考文献

- [1] 韩闯. 缸体平台网纹质量的影响因素分析及 DOE 方法的应用[J]. 内燃机与配件, 2015(1): 29-33.
- [2] MEZGHANI S, DEMIRCI I, YOUSFI M, et al. Mutual influence of crosshatch angle and superficial roughness of honed surfaces on friction in ring-pack tribo-system[J]. Tribology International, 2013, 66: 54-59.
- [3] BIBOULET N, BOUASSIDA H, LUBRECHT A A. Cross hatched texture influence on the load carrying capacity of oil control rings [J]. Tribology International, 2015, 82: 12-19.
- [4] 潘晓彬, 尤祖盛, 唐亚明, 等. 缸套磨合面储油能力评价方法研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(1): 95-97.
- [5] 张红菊, 熊晓华, 王勇, 等. 珩磨网纹夹角的形成原理及检测方法的探讨[J]. 内燃机与配件, 2017(17): 58-59.
- [6] 刘乔楠, 张仁杰, 李倩倩. 基于改进的 Hough 变换缸套内面网纹夹角检测[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 14-20, DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2017.15.004.
- [7] 刘丽, 穆平安, 张仁杰. 基于 Hough 变换和清零法的缸套内面网纹角检测[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 179-185, DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.027.
- [8] RAMAMOORTHY B. An accurate and robust method for the honing angle evaluation of cylinder liner surface using machine vision [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55(5): 611-621.
- [9] 刘文婧, 赵俊, 王少锋. 基于机器视觉的受电弓滑板厚度检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 128-133, DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107928.
- [10] 董霏, 侯北平, 刘宇, 等. 基于机器视觉的线缆导体质量检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 144-153, DOI:10.13382/j.jemi.B2002952.
- [11] 张聪聪, 牟莉. 基于机器视觉的图像边缘检测算法研

究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 80-85, DOI: 10.19652/j.cnki.femt.2002269.

- [12] GRABON W, PAWLUS P, WOS S, et al. Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests [J]. Tribology International, 2017, 113: 137-148.
- [13] 刘久万, 王明泉, 张加中. 解读新标准 JB/T 5082.7-2011(《内燃机气缸套平台珩磨网纹技术规范及检测方法》)[J]. 内燃机与配件, 2013(7): 38-39.
- [14] 牛慧, 赵艳东. 基于改进 Gabor 小波变换的人脸情感识别[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5): 124-129, DOI: 10.19651/j.cnki.emt.1903472.
- [15] MUNAWAR H S, AGGARWAL R, QADIR Z, et al. A gabor filter-based protocol for automated image-based building detection[J]. Buildings, 2021, 11(7), DOI:10.3390/buildings11070302.
- [16] LI Y, ZHOU X. Fabric defect detection with optimal gabor wavelet based on radon [C]. 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems(ICPICS), IEEE, 2020: 788-793.
- [17] 李俊峰, 李明睿. 基于多方向 Gabor 滤波的导光板轻微线刮伤检测方法研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(4): 395-401.
- [18] ZHANG X, SU Q, YUAN Z, et al. An efficient blind color image watermarking algorithm in spatial domain combining discrete Fourier transform [J]. Optik, 2020, 219, DOI:10.1016/j.ijleo.2020.165272.

### 作者简介

张农, 博士, 教授, 主要研究方向车辆动力学及控制、主被动液压互联悬架、机器视觉等。

E-mail: nong.zhang@uts.edu.au

黄凯, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉检测。

E-mail: 957142416@qq.com

罗亮(通信作者), 博士, 助理研究员, 主要研究方向为智能制造与控制、新能源汽车关键零部件等。

E-mail: Liang\_LUO@hfut.edu.cn

郎霄, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉检测。

E-mail: 1461284514@qq.com

郑敏毅, 博士, 讲师, 主要研究方向为车辆动力学、模态分析及参数识别、主被动液压互联悬架、机器视觉等。

E-mail: zheng\_minyi@hfut.edu.cn