

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002952

基于机器视觉的线缆导体质量检测研究*

董 霏 侯北平 刘 宇 吴颖东

(浙江科技学院 自动化与电气工程学院 杭州 310023)

摘 要:针对现有人工检测费时费力的问题,提出了一种基于机器视觉的线缆导体质量检测方法,能够方便、高效地检测线缆导体质量。分析线缆截面图像中刀痕的特征后,提出了一种基于 Gabor 滤波器的刀痕纹理消除方法;根据线缆导体分布规律,研究了一种导体根数分层分析算法。实验表明,所提出的刀痕纹理消除方法能有效提高导体轮廓检测效果,提出的根数自动检验算法能实现对导体根数的分层检验,可以帮助检验人员快速地检出导体根数,计算缺漏情况。

关键词: Gabor 滤波;导体质量分析;纹理消除;机器视觉

中图分类号: TP391.4;TP317.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Research on quality inspection of cable conductor based on machine vision

Dong Fei Hou Beiping Liu Yu Wu Yingdong

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the problem of the time-consuming and labor-intensive manual inspection, a MV (machine vision)-based cable conductor quality inspection method is proposed, which can inspect the cable conductor quality conveniently and efficiently. After analyzing the characteristics of the knife mark in the cross-section image of the cable, a method based on Gabor filter is proposed to eliminate this texture. According to the distribution rules of cable conductors, a hierarchical analysis algorithm based on clustering is proposed. The experimental results demonstrate that the proposed method can effectively improve the effect of conductor contour detection, and implemented the layered inspection of conductor number, which can help inspectors quickly inspect the number of conductors and find the defects.

Keywords: Gabor filtering; conductor quality analysis; texture removing; machine vision

0 引 言

电线电缆的需求量随着各行业发展逐年递增,产品不合格率随之呈上升趋势,线缆的可靠性和安全性也越来越受到关注。导体作为线缆的重要组成部分,其质量性能直接影响到线缆的使用寿命、导电能力以及使用安全。导体质量不合格,将会增大电能损耗,引起线缆发热、电气短路、火灾等事故^[1],给国家和人民生命财产带来巨大损失。因此,对线缆导体质量进行分析、检验至关重要。

导体质量与导体根数、截面积、直径以及材质有

关^[2-3];导体在绞丝生产工艺过程中,根数时有错漏发生,导致电阻值不符合标准;由于导体在线缆原材料成本中占比较高,有些企业在生产过程中故意偷工减料,造成导体实际截面偏小、材质不达标。目前,线缆导体质量检验还处于繁杂低效的人工手动检测阶段。例如,导体根数主要通过检测人员手工计数,在根数较多的情况下(37、61、91根),人工计数耗时耗力,易于数错;导体的截面积也是通过人工进行手动测量。传统线缆导体检测方法步骤复杂、自动化程度低、检测结果难以数字化。随着无损检测技术的发展,机器视觉技术被应用到自动计数^[4-6]、质量检测^[7-9]和尺寸测量^[10-12]上。侯维岩等^[4]提出使用图像处理的方式解决捆扎棒材计数问题;Hong等^[7]将机

收稿日期: 2020-02-12 Received Date: 2020-02-12

* 基金项目:浙江省公益性技术应用研究计划项目(2017C33119)资助

器视觉应用于水产品质量检测;唐静莹等^[10]设计了一种基于机器视觉的系统来测量异形转子铜排截面积。机器视觉已成功解决了相关行业中的无损检测、自动计数等技术难题,线缆导线质量检测问题与相关行业具有共性,但同时具有特殊性,自动测量问题亟待解决。

针对以上问题,本文提出了一种基于机器视觉的线缆导体质量检测方法。整体处理流程如图1所示,为提高处理速度,首先对采集的线缆截面图像进行预处理,提取导体感兴趣区域;针对截面图像中刀痕纹理的特点,利用Gabor滤波器^[13-17]、霍夫线变换^[17-19]提取刀痕纹理,并将其作为掩模去除刀痕干扰;接着进行图像分割以获得导体轮廓,计算导体根数并拟合圆心距离;然后对导体根数进行分层分析;最终得到导体质量检测结果。

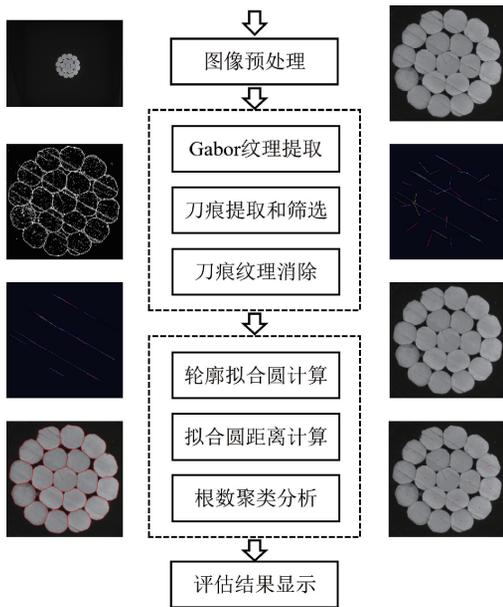


图1 整体处理流程

Fig. 1 The flow chart of overall process

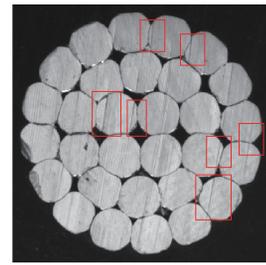
1 线缆导体截面图像纹理分析

获取线缆导体截面图像后,首先针对其典型纹理分布情况进行分析,确定导体区域、边缘灰度分布等特点;采用几种经典方法进行分割,分析其难点及原因;最后对线缆截面图像的方向性进行描述。

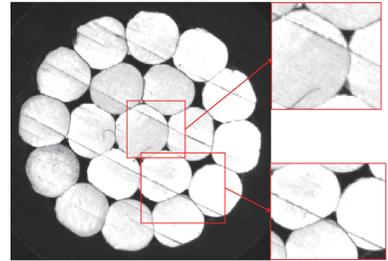
1.1 线缆截面图像空间结构描述

线缆截面导体的典型纹理分布情况如图2所示,图2(a)的红色矩形框标记了7处刀痕位置,在光源与工业相机视野下刀痕将导体区域分隔成若干子区域;图2(b)右侧红框中的子图是图中红色矩形框区域的局部放大图像,很明显,刀痕将完整的导体区域分隔成两部分。

如图2所示,线缆截面纹理分布特征表现如下:



(a) 线缆截面图1
(a) Cable cross-section image 1



(b) 线缆截面图2
(b) Cable cross-section image 2

图2 线缆截面纹理图例

Fig. 2 Example of cable cross-section texture

- 1) 按照国标规定的检测要求,待测的线缆导体截面在切割后不可避免的存在较为明显的刀痕;
- 2) 导体区域灰度值较大,背景灰度值小;
- 3) 导体区域中心处为1根或多根导体,其他导体分层围绕中心导体排布;
- 4) 单根导体呈类圆形,面积大小相似;
- 5) 导体表面随机分布有平行状的条形刀痕,刀痕纹理方向在同一截面图像中基本保持一致;
- 6) 刀痕纹理的灰度值略小于导体表面灰度值,但与导体之间边缘灰度值非常接近,刀痕破坏了导体内部纹理,而有的刀痕还连接了导体边界,给后续的图像分割造成困难。

1.2 线缆截面图像常规分割测试

机器视觉中常用的图像分割主要有阈值分割、边缘检测、分水岭等经典方法。本文调整好参数后,分别对图3(a)所示原图采用OSTU阈值分割、Canny边缘检测、分水岭^[16]分割进行处理,效果如图3(b)~(d)所示,发现存在如下不同程度的问题:

- 1) 由于导体连接紧密,直接阈值化分割难以获取单个导体区域;
- 2) 由于线缆截面图像纹理的特点,直接提取的边缘被刀痕纹理严重干扰;
- 3) 使用基于区域的分水岭算法进行分割,同样因为刀痕纹理干扰而导致分割结果不佳。

因此,常规的分割方法难以正确获取导体轮廓。

1.3 线缆截面图像的方向特征分析

在前面研究基础上继续对刀痕纹理图像特征进行分

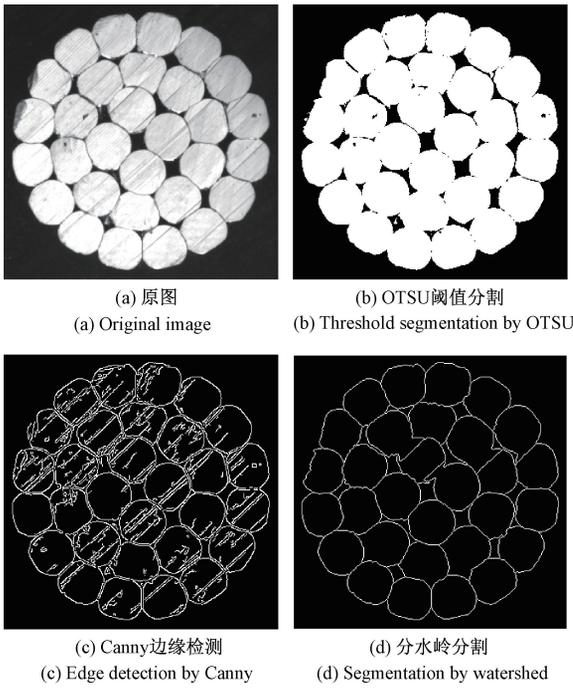


图 3 经典分割方法效果图

Fig. 3 Segmentation results by classical method

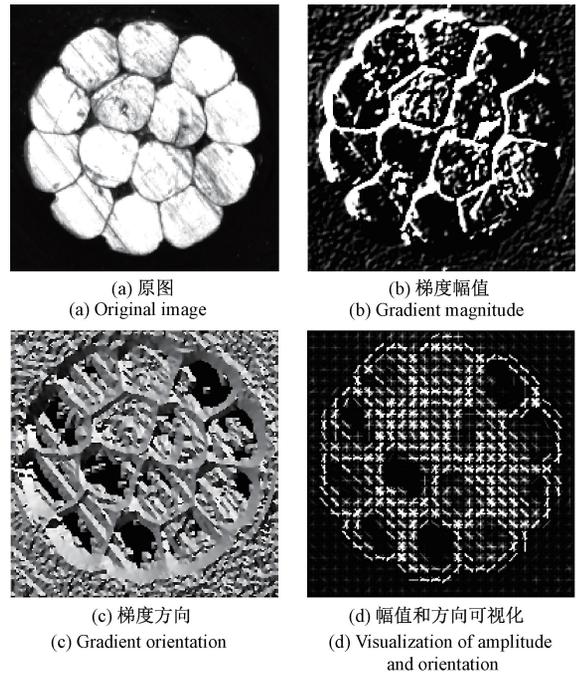


图 4 线缆截面梯度幅值和方向

Fig. 4 Gradient amplitude and direction of cable cross-section

析,计算图 4(a) 所示典型线缆导线截面图像的梯度幅值和方向特征,结果如图 4(b)、(c) 所示;将梯度的幅值和方向进行加权统计后如图 4(d) 所示,可得到截面图像中纹理梯度幅值和方向的分布情况,具体描述如下:

1) 在梯度幅值图中,导体边缘和划痕具有较大幅值,外圈的较小幅值噪声是由导体外侧的绝缘部分引起的,因为绝缘部分表面也有刀痕纹理,同时也存在由不同绝缘材料带来的分层边缘;

2) 在梯度方向图中,可看出划痕方向具有显著的一致性,方向相近的区域表现得更加平坦,方向突变的区域则会出现尖峰,导体边缘的梯度方向沿着导体边缘缓慢变化,而刀痕纹理的梯度方向在局部和整体上都基本是一致的。

综合以上分析,线缆截面刀痕纹理的灰度分布与导体边缘相近,难以采用常规方法进行分割;刀痕纹理具有明显的直线性、方向性和同向性,可以根据这些特征提取出刀痕纹理;基于区域的分割方法也严重受到刀痕纹理干扰,可以先消除刀痕纹理,再进行分割。

2 基于 Gabor 滤波的刀痕纹理消除

通过以上对线缆截面纹理干扰图像的研究,发现需要采用具有方向选择特性的算子提取刀痕区域,本文提出了基于 Gabor 滤波的刀痕纹理消除算法。为降低计算复杂度,提升运算效率,首先对截面图像进行预处理,得

到导体区域所在位置,去除无关背景;然后采用多方向 Gabor 滤波器进行纹理检测,获取平行条纹状的刀痕纹理响应及方向角;接着统计出刀痕主方向,利用霍夫变换检测出目标刀痕;将检测到的刀痕纹理作为掩模,在导体感兴趣图像区域消除刀痕。

2.1 图像预处理

线缆截面原图如图 5(a) 所示。图 5(a), 无关的背景占据了较大部分,为了避免后续计算消耗不必要的计算时间,先对原图进行灰度化、二值化处理,计算最小外接矩形面积,取面积最大的外接矩形,获得的导体部分感兴趣区域如图 5(b) 所示。

2.2 基于 Gabor 滤波的刀痕纹理提取

在截面图像中,刀痕表现为方向一致、平行的线状划痕,其显著的纹理特征是方向一致性。由于二维 Gabor 在空间和频率域中有较好的尺度和方向选择特性^[14-15],利用 Gabor 滤波器提取刀痕纹理特征。二维 Gabor 滤波函数如下所示^[14]:

$$G(x, y, \lambda, \theta_k, \sigma, \gamma) = \frac{\gamma}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x'^2 + (\gamma y')^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi x'}{\lambda} + \varphi\right) \quad (1)$$

$$x' = x \cos\theta_k + y \sin\theta_k \quad (2)$$

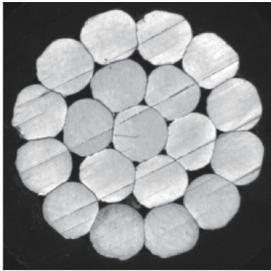
$$y' = -x \sin\theta_k + y \cos\theta_k \quad (3)$$

其中, (x, y) 为像素坐标; λ 为滤波器的波长, $\lambda = \pi/2$, 用于控制滤波器中并行条纹的大小和数目; θ_k 为滤



(a) 线缆截面原图

(a) Original image of cable-section

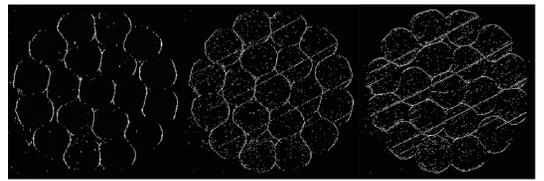


(b) 导体感兴趣区域

(b) The region of interest of the conductor

图 5 图像预处理

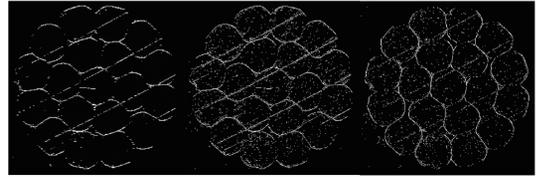
Fig. 5 Image preprocessing



(a) $k=0$

(b) $k=30$

(c) $k=60$



(d) $k=90$

(e) $k=120$

(f) $k=150$

图 6 Gabor 滤波响应示例图

Fig. 6 Examples of Gabor filters responses

$$R_{mr} = \begin{cases} \max_k R_{\theta_k}(x, y), & \max_k R_{\theta_k}(x, y) > t_r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{mro} = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{\theta_k} R_{\theta_k}(x, y), & R_{mr} > 0 \\ -1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, R_{mr} 为最大响应幅值图; R_{mro} 为最大响应对应的方向角图; 阈值 t_r 设置为 20。

图 5(b) 的 180 个方向 Gabor 滤波图计算最大响应幅值及方向角效果如图 7(a)、(b) 所示, Gabor 滤波器提取了导体表面带有方向特征的纹理, 但其中含有较多噪声, 在方向角图中非目标区域数值干扰了后续的处理。使用式 (5) 和 (6) 计算的最大响应幅值及相应方向角如图 7(c)、(d) 所示, 去除了大量幅值和方向角图中的干扰点。

接着使用概率霍夫变换检测直线, 从图 7(c) 中检测到的所有直线如图 8(c) 所示, 从中检测出大量线段, 包括刀痕纹理及导体边缘直线部分; 使用所有线段的方向角投票, 保留得分最多方向角的直线段。为了避免导体边缘部分检测出大量线段干扰投票结果, 首先对最大响应幅值进行再处理。但由于导体边缘点的方向各异性, 刀痕纹理点方向存在一致性, 因此可以通过对最大响应方向角投票, 去除部分干扰。

由于平行直线虽然具有方向一致性, 但每根刀痕的方向角存在差别, 因而将最大响应方向角图中 180 个方向角划分为 36 个范围内进行投票, 将投票结果排序后从最大响应幅值图中保留频数最大的前 n_θ 个角度范围的点; $n_\theta = 8$ 的结果如图 8(a) 所示, 下一步的最大响应幅值图直线检测效果如图 8(b) 所示, 可见, 导体边缘很少被识别为直线段。最终投票筛选的刀痕纹理如图 8(d) 所示。

2.3 刀痕纹理消除

基于快速行进的修复算法 (FMM)^[20-21] 具有修复速度快、避免线性结构产生模糊和断裂的优点。在提取刀

波器的方向角, 用于控制滤波器并行条纹的方向, 修改方向角便可以获取对特定方向的纹理响应; $k \in \{1, 2, \dots, 180\}$, 为滤波器的方向角集合, 为能在更精细方向尺度下找到刀痕纹理的方向响应, 采用 180 个不同方向的 Gabor 滤波器 (每个方向均匀间隔 1°) 进行滤波, $\theta_k = k\pi/180$; σ 为高斯函数的标准差, 控制滤波器的尺度大小, 采用 $\sigma = 1.0$; γ 控制滤波函数的长宽比, 针对所述条形刀痕纹理目标, 采用 $\gamma = 0.5$; φ 控制滤波器的初相角, 决定滤波器的平行黑白条纹分布, 根据刀痕纹理的特点, 采用 $\varphi = \pi$ 。

对导体感兴趣区域图像 $I_{roi}(x, y)$ 进行滤波, 得到 180 个方向的响应图像 $R_{\theta_k}(x, y)$:

$$R_{\theta_k}(x, y) = -G(x, y, \lambda, \theta_k, \sigma, \gamma) * I_{roi}(x, y) \quad (4)$$

其中, * 代表卷积运算。

图 6 所示为图 5(b) 经过不同方向角 Gabor 滤波器卷积后的响应图, 图 6(a) ~ (f) 分别为当 k 取值为 0、30、60、90、120、150 时的响应图。

从图 6 可看出, 通过不同方向角的 Gabor 滤波器选择了对应方向的纹理特征。背景在不同方向角时响应非常小, 导体边缘在不同方向角均有响应, 而刀痕纹理只在特定角度上具有较大响应。根据这一特点, 计算图像中每个像素点在 180 个方向上的最大响应值及其对应的 Gabor 滤波核的方向。同时为去除噪声干扰, 在取最大响应时, 设置阈值 t_r , 大于阈值的响应记为最大响应值并记录方向角, 否则值置为 0, 并设置方向角为 -1° 。

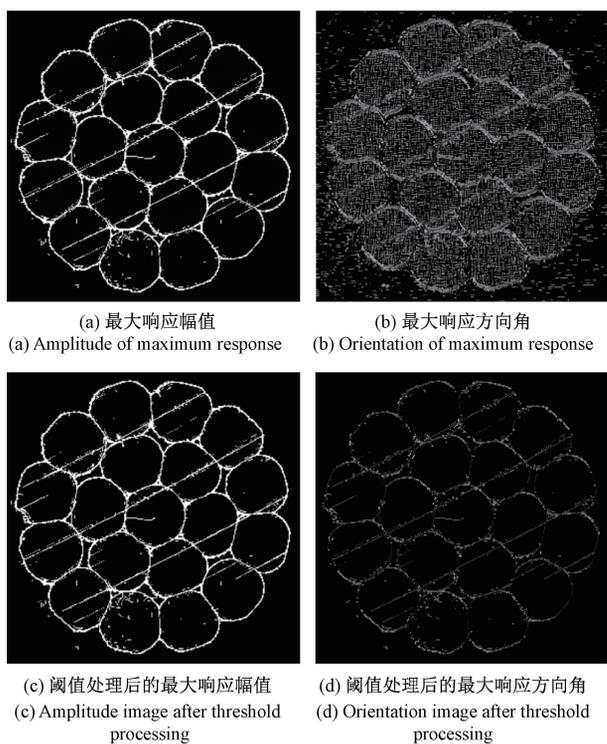


图 7 最大响应幅值图及相应方向角图

Fig. 7 Maximum response amplitude and the corresponding orientation

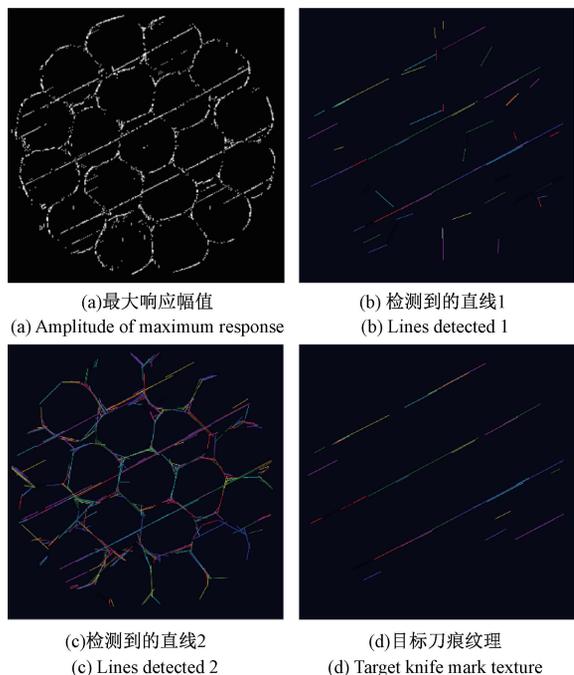


图 8 提取刀痕纹理

Fig. 8 Extracted knife mark texture

痕纹理后,将提取的刀痕纹理矩阵作为掩模,使用 FMM 算法消除导体区域的刀痕纹理,从而减少刀痕对导体轮

廓提取的干扰。刀痕纹理消除的效果如图 9 所示,其中图 9(a)为原图,图 9(b)为消除刀痕纹理后的图像,图中大部分平行划痕被消除;图 9(c)中红色矩形框标注了 4 个刀痕区域进行消除刀痕纹理前后的比较,在原图中这些刀痕将完整的导体区域分隔成两半,在消除刀痕后,导体区域变得完整,为下一步处理打下了基础。

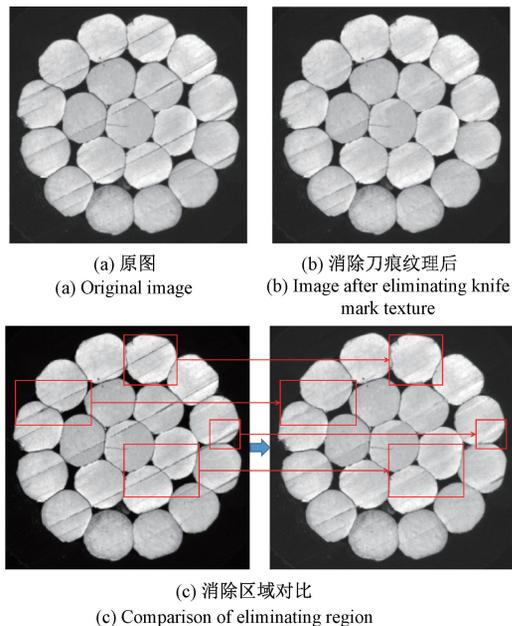


图 9 消除刀痕纹理

Fig. 9 Image after eliminating knife mark texture

3 导体根数分层分析

线缆导体根数是评估电缆质量的重要参数,而线缆在生产过程中可能会出现错漏、生产厂商偷工减料等情况,从而导致导体根数不达标,直接影响导体截面积、直流电阻等参数。为实现线缆导体质量检测,在刀痕纹理消除的基础上,本文提出了一种导体根数分层分析算法。

导体质量分析的流程如图 10 所示。在对导体区域消除刀痕纹理后,首先提取单根导体区域的轮廓,并计算导体的根数;接着定位所有轮廓的拟合圆心,分别计算拟合圆心到整股导体拟合圆心的距离;最后使用聚类算法分析该线缆导体的层数,检验导体总根数是否达标。对导体轮廓进行分层标记,检测导体根数,若根数有误,则确定缺漏位置。

提取所有导体轮廓后,统计轮廓数目以获取导体根数。由于线缆导体根数服从先验分布规律,当中心为 1 根单线时,绞线结构可由 7、19、37、61 或 91 根等径线材料构成,由内至外每层递增 6 根单线;若中心线大于 1 根时,导体总根数 N 与层数 m 有关^[22]:

$$N = (m + 1)(3m + 2) \tag{7}$$

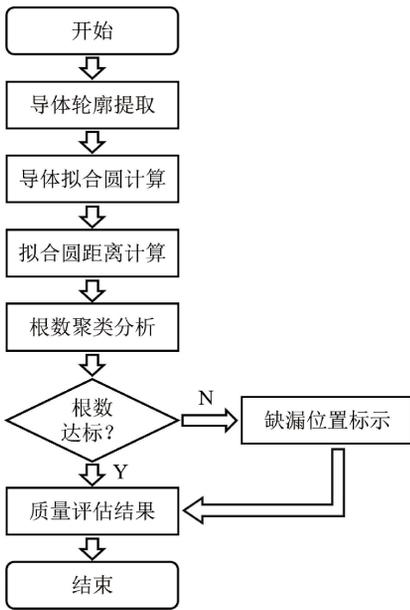
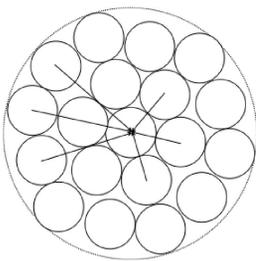


图 10 导体质量检测流程

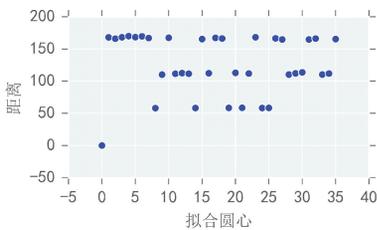
Fig. 10 Flow chart of conductor quality inspection

根据这一先验规律,即可对分割所得的导体轮廓数目进行分层评估。线缆截面中导体的分布如图 11(a)所示,导体分层围绕成圆形排布,根数逐层递增。图 11(a)的 6 根线分别是左侧最外层 3 个拟合圆心、右侧第 2 层 3 个拟合圆心与整个区域拟合圆心的连线,在同一层的连线长度相似且近似等间隔分布。



(a) 线缆截面导体分布

(a) Conductor distribution of cable cross-section



(b) 导体拟合圆心距离分布

(b) Distance distribution of center of conductor fitting circle

图 11 导体排列规律

Fig. 11 Distribution rule of the conductors

计算第 n 个单导体轮廓拟合圆心与整股导体拟合圆心的距离 D_n , 每个拟合圆心的空间位置与距离 D_n 的关系如图 11(b)所示,图中出现明显的阶梯分层现象,可见同一层每根导体拟合圆心距离整股的拟合圆心是近似相等的,因而可通过聚类算法进行分层分析。结合以上先验规律,导体根数分层分析算法具体步骤如下。

1) 计算轮廓拟合圆心

提取到导体轮廓后,拟合整股导体区域圆心 C_z 及 N 个单根导体轮廓圆心 C_n 。

2) 计算圆心距离

计算 C_n 与 C_z 的欧氏距离 D_n , 其中, $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

3) 导体位置聚类分析

使用均值漂移聚类算法^[23-24]对 N 个距离 D_n 进行聚类分析,得到总层数 L 以及每个距离 D_n 的层标记 l_n 。计算每一层的平均距离 \bar{D}_i , 其中, $i \in \{1, 2, \dots, L\}$; 并根据 \bar{D}_i 从小到大的排序结果对每个距离点重新标记为 l'_n , 以此计算每一层的实际根数 S_i 。

4) 根据先验式(5)检验根数

先根据 L 计算标准总根数 \tilde{N} 与 N 进行比对,检验总根数是否达标。接下来计算每一层的标准根数 \tilde{S}_i 与 S_i 进行比对,检验每一层根数是否达标。若有不达标情况,输出缺少根数及所在层。

4 实验及分析

4.1 刀痕纹理消除结果分析

刀痕纹理检测的效果如图 12 所示,图 12 展示了两张线缆导体截面图像刀痕纹理的检测效果。其中图 12(a)为原图,图 12(b)为 Gabor 滤波响应图,图 12(c)为直线检测效果,图 12(d)为经过筛选的刀痕纹理。从图中可以看出,经过 Gabor 滤波后,有效地检测出了导体的边缘和刀痕纹理;其后在 Gabor 滤波响应的基础上进行直线检测,可以看出得到了大量直线,其中包括刀痕直线和导体边缘可能被误判的直线;根据刀痕直线的特点进行筛选,从图 12(d)列图中可以看到,一些无关的直线被剔除。

为测试刀痕纹理消除效果,使用两种方法进行比较。方法 A 为直接使用分水岭进行分割;方法 B 为先使用提出的方法消除刀痕纹理后使用分水岭进行分割。将提取的导体区域边缘进行标记,效果如图 13 所示。图 13 列举了 3 个不同线缆导体截面图像的处理效果,其中图 13(a)列为线缆截面导体原图,图中具有明显的刀痕纹理干扰,部分刀痕甚至将一些导体区域分隔成两半;图 13(b)为消除刀痕纹理的效果图,可以看到大部分的刀痕

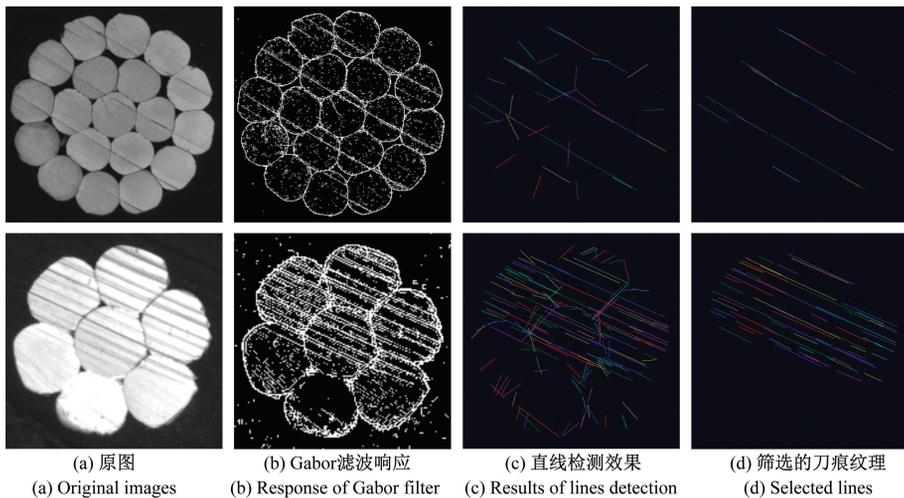


图 12 刀痕纹理检测效果

Fig. 12 Results of lines detection

纹理被消除,直观地表现了消除方法的有效性;图 13(c)列为方法 A 的分割效果,由于原图中的刀痕干扰,导致分

割结果异常;图 13(d)列为方法 B 的分割效果,可以看到在去除了刀痕纹理后,对导体区域的分割相对更加准确。

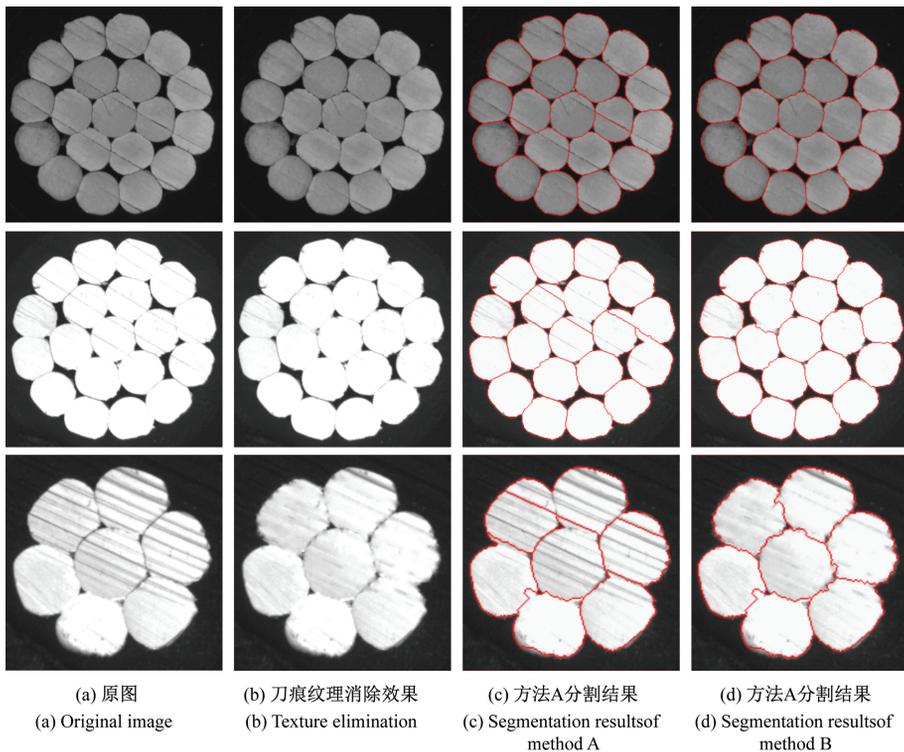


图 13 刀痕纹理消除效果对比图

Fig. 13 Comparison of different method

从分割区域获得的导体根数来看,图 12 中第一个样例中共有 19 个单导体,方法 A 分割出 21 个导体区域,可以看到由于原图中明显的刀痕干扰,导致在区域分割时易将部分导体划分为两个区域导致分割错误;而方法 B 共分割出 19 个导体区域,在去除刀痕后,分割出的区域

数目正确。由此从直观边缘分割效果及分割数目上验证了刀痕纹理消除的有效性。

4.2 导体根数分层结果分析

根据提取的轮廓对线缆导体根数进行分析,结果如

图 14 所示。图 14(a)、(b) 标出了所有导体轮廓的拟合圆心。图 14(c)、(d) 分别为图 14(a)、(b) 中导体拟合圆心与整股拟合圆心距离的聚类分析结果, 可见这些距离值呈现明显分层, 直观地表现出导体的空间位置关系。经过分析后, 将距离点根据不同层标记为不同颜色, 则图 14(a) 中共有 3 层, 每层导体数为 1、6、12。根据上述公式进行检验, 根数达标; 图 14(c) 共有 4 层, 每层导体数为 1、6、12、18, 根数达标。

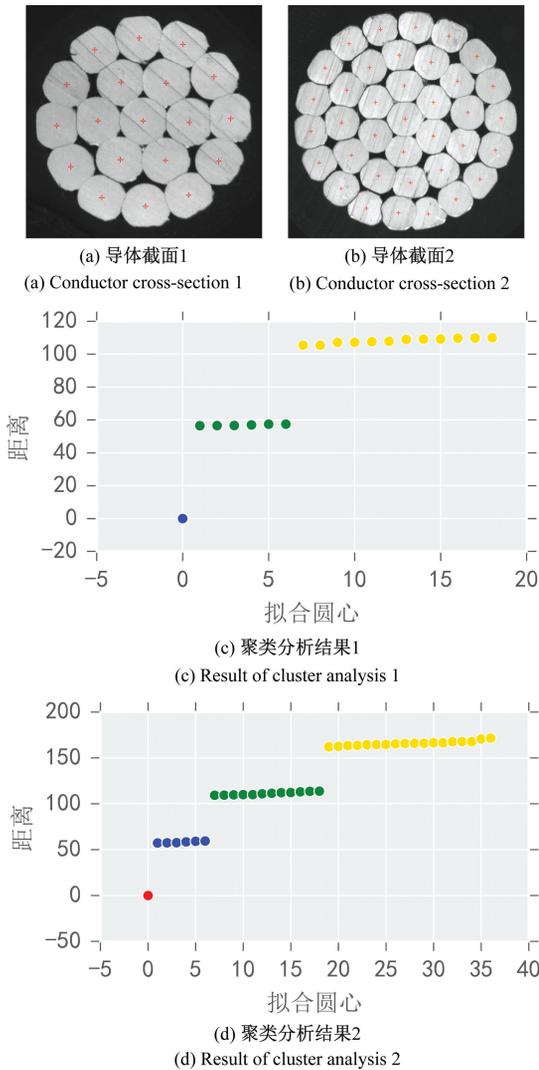


图 14 导体根数聚类分析

Fig. 14 Cluster analysis of number of conductors

5 结论

针对当前线缆行业中产品质量人工检测方法中存在的不足, 提出了一种基于机器视觉的线缆导体质量检测方法。首先分析线缆导体截面图像, 研究了基于 Gabor 特征的刀痕纹理消除算法, 消除刀痕纹理干扰, 提高导体轮廓提取效果; 对提取的导体轮廓进行根数分层自动分

析, 自动评估线缆导体根数质量。

实验结果显示, 本文所提出的刀痕纹理消除方法能提升单根导体轮廓定位性能; 导体根数分层分析方法能有效提升线缆导线质量检测性能, 本文提出的方法在线缆检测行业的产品质量检测中具有积极意义。

参考文献

- [1] 赵琳琳. 电线电缆抽样检测问题分析[J]. 科技创新导报, 2016, 13(36): 53-54.
ZHAO L L. Analysis of sampling inspection of electric wires and cables[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(36): 53-54.
- [2] 萧宏, 齐向勇, 唐洪涛. 电线电缆导体导电性能质量控制标准的研究[J]. 建筑电气, 2018, 37(10): 54-58.
XIAO H, QI X Y, TANG H T. Study on quality control standards for electrical conductivity of wire and cable conductors. Building Electricity, 2018, 37(10): 54-58.
- [3] 全国电线电缆标准化技术委员会. GB/T 3956-2008, 电缆的导体[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National technical committee for standardization of electric wires and cables. GB/T 3956-2008, Conductor of Cables[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [4] 侯维岩, 张利伟, 党麟, 等. 一种基于图像处理的棒材计数测量系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1100-1106.
HOU W Y, ZHANG L W, DANG M, et al. Design and implementation of bar count measurement system based on image processing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1100-1106.
- [5] GRIFT T E, ZHAO W, MOMIN M A, et al. Semi-automated, machine vision based maize kernel counting on the ear[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 171-180.
- [6] 曹三, 赵宏, 甄小刚, 等. 多工位图像拼接的超高叠层薄片计数仪器开发[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 117-123.
CAO S, ZHAO H, ZHEN X G, et al. Apparatus with sequential image stitching for counting ultrahigh stacked substrates[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8): 117-123.
- [7] HONG H, YANG X, YOU Z, et al. Visual quality detection of aquatic products using machine vision[J]. Aquacultural Engineering, 2014, 63: 62-71.
- [8] TONG J H, SHI H F, WU C Y, et al. Skewness correction and quality evaluation of plug seedling images based on Canny operator and Hough transform[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 155: 461-472.

- [9] 罗根, 倪军. 基于机器视觉的手机屏幕玻璃尺寸检测及崩边评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 92-96.
LUO G, NI J. Glass size measurement and edge collapse assessment of mobile phone screens based on machine vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 92-96.
- [10] 唐静莹, 熊瑞平, 孙飞, 等. 基于机器视觉的异形转子铜排截面积图像测量系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(5): 79-83.
TANG J Y, XIONG R P, SUN F, et al. Design of image measurement system for cross-sectional area of special-shaped rotor copper bar based machine vision [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(5): 79-83.
- [11] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于齿轮局部图像的齿距机器视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(02): 225-231.
ZHI SH, ZHAO W ZH, ZHAO W H, et al. Visual measurement method of pitch machine based on gear local image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 225-231.
- [12] 李俊晖, 石守东, 谢志军, 等. 基于边缘重建的双绞线绞距实时检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 86-95.
LI J H, SHI SH D, XIE ZH J. Twisted-pair pitch real-time detection method based on edge reconstruction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 86-95.
- [13] PARIDA P, BHOI N. 2-D Gabor filter based transition region extraction and morphological operation for image segmentation [J]. Computers & Electrical Engineering, 2016, DOI: 10.1016/j.compeleceng.2016.10.019.
- [14] 彭晓光, 王彪, 唐超颖, 等. 基于 Gabor 滤波和形态学变换的手臂静脉线提取[J]. 计算技术与自动化, 2018(1): 121-125.
PENG X G, WANG B, TANG CH Y, et al. Arm vein extraction based on gabor filter and morphological transform [J]. Computing Technology and Automation, 2018(1): 121-125.
- [15] 鲁志芳, 杨海俊. 基于 Gabor 滤波的虹膜识别系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(12): 221-225.
LU ZH F, YANG H J. Design of iris recognition system based on gabor filtering [J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(12): 221-225.
- [16] SREESHAN K, DINESH R, RENJI K. Enhancement of thermographic images of composite laminates for debond detection: An approach based on Gabor filter and watershed [J]. NDT & E International, 2019, 103: 68-76.
- [17] BABASHAOORI S, EZOJI M. Average fiber diameter measurement in Scanning Electron Microscopy images based on Gabor filtering and Hough transform [J]. Measurement, 2019, 141: 364-370.
- [18] CUALAIN D O, HUGHES C, GLAVIN M, et al. Automotive standards-grade lane departure warning system [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2012, 6(1): 44.
- [19] 黄晓青. 基于 Hough 变换的高速公路车道线检测算法设计[J]. 宁夏师范学院学报, 2018, 39(4): 59-63, 74.
HUANG X Q. Design of highway lane detection algorithm based on Hough transform [J]. Journal of Ningxia Normal University, 2018, 39(4): 59-63, 74.
- [20] HUAN X L, MURALI B, ALI A L. Image restoration based on the fast marching method and block based sampling [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2010, 114(8): 847-856.
- [21] GONG X, LIU J Y, ZHOU W H, et al. Guided depth enhancement via a fast marching method [J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(10): 695-703.
- [22] 何自鹏. 铝合金电缆导体制造技术与质量控制探究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(3): 213-215, 217.
HE Z P. Research on manufacturing technology and quality control of aluminum alloy cable conductor [J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(3): 213-215, 217.
- [23] UNAL Y, POLAT K, KOCER H E. Classification of vertebral column disorders and lumbar discs disease using attribute weighting algorithm with mean shift clustering [J]. Measurement, 2016, 77: 278-291.
- [24] 赵华茗, 余丽, 周强. 基于均值漂移算法的文本聚类数目优化研究[J]. 数据分析与知识发现, 2019, 3(9): 27-35.
ZHAO H M, YU L, ZHOU Q. Determining best text clustering number with mean shift algorithm [J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2019, 3(9): 27-35.

作者简介



董霏, 2017 年于浙江科技学院获得学士学位, 现为浙江科技学院硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉、纹理分析。

E-mail: donffe@163.com

Dong Fei received B. Sc. from Zhejiang University of Science and Technology in 2017.

Now he is a M. Sc. candidate at Zhejiang University of Science and Technology. His main research interests include machine vision and texture analysis.



侯北平, 2005年于浙江大学获得博士学位, 现为浙江科技学院教授、硕士生导师, 主要研究方向为机器视觉与模式识别、纹理分析。

E-mail: bphou@zust.edu.cn

Hou Beiping received his Ph. D. from

Zhejiang University in 2005. He is currently a professor and M.Sc. supervisor at Zhejiang University of Science and Technology. His main research interests include machine vision and pattern recognition, and texture analysis.