DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108143

基于频域滤波的电缆线芯图像纹理消除研究*

侯北平,张晓刚,朱 文,陈天亮,陈凌超
(浙江科技学院自动化与电气工程学院 杭州 310023)

摘 要:电缆作为电力传输的重要部分,其线芯质量关系到用电安全及传输效率。在利用机器视觉技术测量电缆线芯结构参数时,刀痕纹理严重影响了图像分割效果,降低了测量精度。针对这一问题,提出了一种基于改进频域滤波的线芯截面图像刀痕纹理消除方法:首先采用相对总变差模型分解线芯截面图像,得到纹理图像描述;对线芯截面纹理图像进行快速傅里叶变换,分析刀痕纹理在频域中的能量主方向;研究改进型巴特沃斯陷波滤波器,设计椭圆形的邻域窄阻带以降低刀痕纹理对应的带状区域能量,从而消除刀痕纹理。实验结果表明,该方法的刀痕纹理消除率可达 92%,提升了电缆线芯质量检测的效率。

关键词: 视觉测量;巴特沃斯陷波滤波器传递函数;刀痕纹理消除;傅里叶变换
中图分类号: TP391 TH741 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.4050

Research on texture removal of the cable core image based on frequency domain filtering

Hou Beiping, Zhang Xiaogang, Zhu Wen, Chen Tianliang, Chen Lingchao
(*School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China*)

Abstract: As an essential part of the power transmission, the quality of the cable core is important for power safety and transmission efficiency. However, the knife mark texture in the cross-sectional image of the cable core affects the image segmentation effects seriously, which could reduce the measurement accuracy while using visual measurement for cable structural parameter detection. To solve this problem, this article proposes an improved frequency domain filtering to eliminate the knife mark texture of cable core cross-section image. Firstly, the cable core cross-section images are decomposed by the relative total variation (RTV) model to obtain the texture image. Then, the texture image is processed by fast Fourier transform to achieve the main energy direction of the texture. Finally, the Butterworth notch filter with oval-shaped neighborhood narrow stopband is designed to reduce the energy of the corresponding band-shaped area. Experimental results show that the elimination rate of knife mark texture is 92%, which proves the effectiveness of the proposed method.

Keywords: visual measurement; transfer function of Butterworth notch filter; knife mark texture elimination; Fourier transform

0 引 言

近年来,我国对电线电缆的需求量迅速增加,特别是在电力和信息传输方面使用量巨大。电缆线芯的可靠性和安全性也成为电缆生产检测重要指标,电缆线芯的结构尺寸不达标、导体耐压性不合格等因素都会严重影响电缆在实际使用时的可靠性和安全性[1-2]。因此对电缆线芯质量检测至关重要。基于机器视觉[3-4]的测量平台在测量电缆线芯质量指标的过程中,电缆线芯截面图像中的刀痕纹理显著,而且具有明显的方向一致性,严重影响后续图像处理效果。因此,电缆线芯截面的刀痕纹理干扰问题亟待解决[5-6]。

目前,利用机器视觉实现线芯的参数智能化测量是一个重要的发展趋势[7-9],但检测时需要将待检电缆加工成样本段。而在制样过程中,采集到的图像易受刀具行程变化、刀具磨损及电缆线芯的自身材质等因素影响,产生明显的刀痕纹理干扰,部分刀痕会被误认为导体轮廓

收稿日期:2021-06-23 Received Date: 2021-06-23
*基金项目:浙江省基础公益研究计划(LGG21F030004)、浙江省重点研发计划(2021C04030)项目资助

边缘,从而影响电缆线芯测量参数,导致数据不可靠。针对图像纹理干扰消除,许多学者进行了深入研究。陈丽等[10]提出了一种基于总变差模型和频域处理的方法去除雨线纹理;于涛等[11]设计了一种巴特沃斯带阻滤波器,滤除了条纹噪声;许杨等[12]设计了一种改进的谱残差视觉显著模型,解决了工件图像中方向性纹理干扰缺陷检测的问题;傅艺扬等[13]提出了一种基于纹理消除滤波算法,实现了花织物纹样的提取;徐敏等[14]提出了一种基于 5×5 邻域像素点相关的影视频图像划痕修复算法,修复了视频图像中的划痕。图像处理方法已成功解决了相关行业中的图像纹理消除问题,为电缆线芯截面图像的纹理消除研究提供了很好的借鉴。

为了有效地消除电缆线芯截面图像上的刀痕纹理干扰,本文提出了一种基于改进频域滤波的电缆线芯截面刀痕纹理图像消除方法。该方法采用相对总变差模型[15]分解电缆线芯截面图像,分别得到结构图像和刀痕纹理图像。对纹理图像进行快速傅里叶变换,并设计了一个具有自适应方向角度的频域滤波器对刀痕纹理进行滤除。该方法对线芯参数的高精度测量至关重要。

1　线芯截面图像纹理频域分析

如图 1 所示,获取多种类型的线芯截面图像后,通过分析发现存在如下特点:

1)刀痕呈现平行条状,具有方向一致性;2)刀痕长短不一,形态复杂,分布存在随机性;3)刀痕深浅不一,对应图像中灰度值差别较大;4)刀痕纹理的灰度值略小于线芯表面灰度值。综合以上特点分析,不同类型的线芯截面图像刀痕的数量及形态各有差异,而刀痕的方向基本是一致的。在空间域中分析相对较复杂,因此,本文通过傅里叶变换到频域空间进行分析。

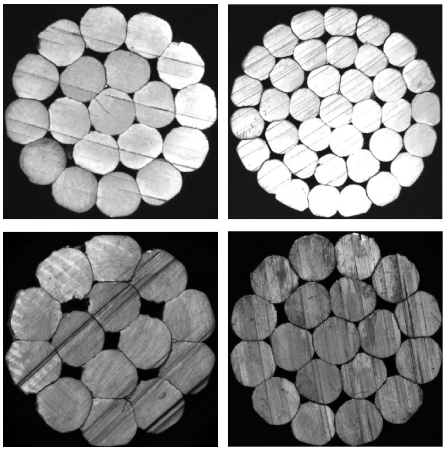


图 1　线芯截面纹理图例

Fig. 1　Examples of cable core cross-section texture

1.1　傅里叶变换

假设含噪声图像 $f(x,y)$ 的像素大小为 $M \times N$, 进行傅里叶变换,其变换表达式为:

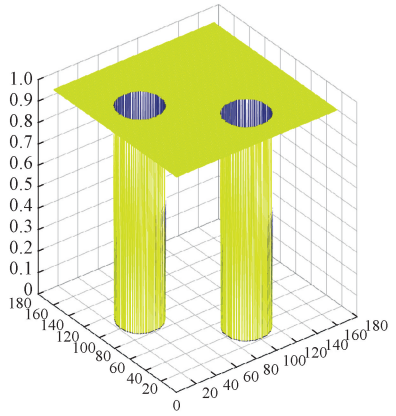
$$F(u,v)=\frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\cdot e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \tag{1}$$

图像经过傅里叶变换映射到频域空间后[16],频谱图像中每个区域都对应空间域中的某一特定的频率成分,可以获取原始图像的频率分布[17]。空间域图像中不同灰度值的像素点对应不同的频率特性,边缘区域在频谱图中呈现出高亮的能量分布。因此,在频域空间设计相应的滤波器,可以削弱对应频域能量峰值,消除相应的条纹状纹理干扰。

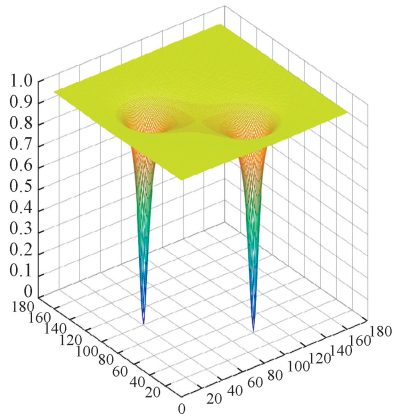
1.2　陷波滤波器的选择

陷波滤波器是一种能量可以在特定频率区域迅速衰减,以阻碍此频率区域通过的滤波器。因而,利用陷波滤波器可以削弱特定范围内频率区域的能量,从而消除本文中的刀痕条状纹理干扰。

陷波滤波器的邻域阻带可以阻止预定的中心频率邻域内的频率信息[18]。图 2 分别显示该频域滤波器的两种形态:理想陷波滤波器和巴特沃斯陷波滤波器。



(a) 理想陷波滤波器
(a) Ideal notch filter



(b) 巴特沃斯陷波滤波器
(b) Butter Worth notch filter

图 2　两种陷波滤波器的三维透视图

Fig. 2　Three-dimensional diagram of two notch filters

当噪声的频率点较少或者比较分散时,适合利用陷波滤波器来消除噪声成分。本文选用巴特沃斯陷波滤波器。虽然阻频带越陡峭,频率抑制性越好,但易产生振铃现象,而巴特沃斯陷波滤波器则可以平滑图像[19]。

陷波滤波器中频率点 (u,v) 到 $(-u_0,-v_0)$ 和 (u_0,v_0) 距离表达式分别如下:

$$D_1(u,v)=\left[\left(u-\frac{M}{2}-u_0\right)^2+\left(v-\frac{N}{2}-v_0\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

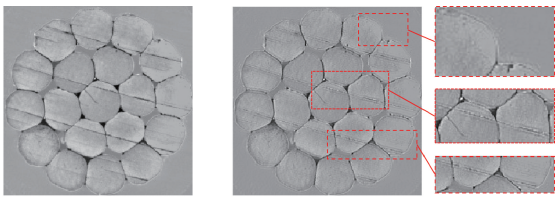
$$D_2(u,v)=\left[\left(u-\frac{M}{2}+u_0\right)^2+\left(v-\frac{N}{2}+v_0\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

巴特沃斯陷波滤波器的产生公式为:

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})=\frac{1}{1+\left[\dfrac{D_0^2}{D_1(u,v)D_2(u,v)}\right]^n} \tag{4}$$

式中:D_0 为截止频率点到频率中心点的距离。

采用基于圆形邻域阻带的巴特沃斯陷波滤波器对刀痕纹理图像进行滤波,其效果如图 3 所示。



(a)滤波前纹理图像 (a)Texture image before filtering

(b) 滤波后纹理图像 (b)Texture image after filtering

图 3 滤波前后纹理图像对比

Fig. 3 Comparison of texture images before and after filtering

对比图 3(a)和(b)可见,使用基于圆形邻域阻带的传统陷波滤波器滤除刀痕纹理效果不佳,导体轮廓边缘产生严重的模糊和振铃现象[20-21]。

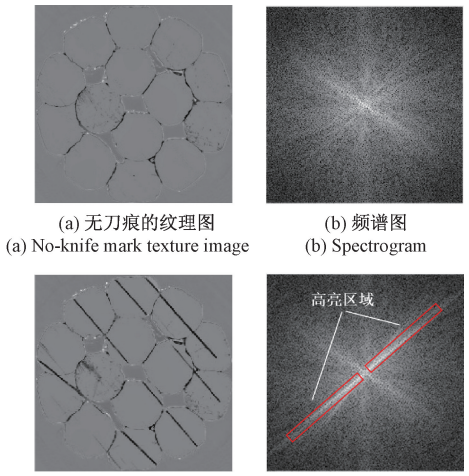
2 改进的巴特沃斯陷波滤波器设计

由前面分析,基于圆形邻域阻带的巴特沃斯陷波滤波器虽然可以滤除刀痕纹理,但同时会滤除多余的频域有效信息,造成测量数据失真。因此,需要改进频域滤波器的邻域阻带形状,提升检测效果,本文提出了一种基于椭圆形的巴特沃斯陷波滤波器。

2.1 滤波器阻频带形状分析

无刀痕纹理图像和含有刀痕纹理图像经过快速傅里叶变换后,分别得到的频谱图 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})$、$\boldsymbol{F}_1(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})$,如图 4 所示。

从图 4 分析可知,频域中高亮条状区域是由空间域中刀痕纹理引起的,如图 4(d)所示。其中,傅里叶频谱



(a) 无刀痕的纹理图 (a) No-knife mark texture image

(b) 频谱图 (b) Spectrogram

(c) 含刀痕的纹理图 (c) Knife mark texture image

(d) 频谱图 (d) Spectrogram

图 4 无刀痕和含刀痕纹理图及其频谱图

Fig. 4 Texture image and its spectrogram without knife mark and knife mark

图像的中心点区域为低频部分,包含了图像的大部分信息,为了减小此区域频谱能量,需设计一个邻域阻带为长条状的巴特沃斯陷波滤波器。

2.2 滤波器阻频带形状设计

为了滤除频域中高亮条形区域中的频率分量,本文设计了邻域阻带为椭圆形的滤波器。已知巴特沃斯陷波滤波器函数如式(4)所示,需要确定截止频率点对应的邻域阻带 D_1 和 D_2 的形状,其形状为倾斜椭圆状,如图 5 所示。

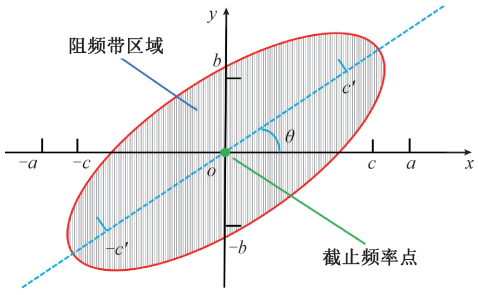


图 5 倾斜的椭圆

Fig. 5 Oblique ellipse

若椭圆形的邻域窄阻带倾斜角度为 θ,长轴为 a,短轴为 b,椭圆区域点为 $D(x,y)$,则有:

$$D(x,y)=\left[(x\cos\theta+y\sin\theta)^2+\left(\frac{a^2}{b^2}\right)\cdot(y\cos\theta-x\sin\theta)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

此时,需要将倾斜后的椭圆区域移动到频率截止点处,若频率截止点坐标分别为 (x_1,y_1) 和 (x_2,y_2),则移动

后的椭圆区域坐标(x_1',y_1')和(x_2',y_2')表示为:

$$\begin{cases} x_1' = x + x_1 \\ y_1' = y + y_1 \end{cases}, \quad \begin{cases} x_2' = x + x_2 \\ y_2' = y + y_2 \end{cases} \tag{6}$$

由式(4)、(5)可绘制出巴特沃斯陷波滤波器的三维透视图,如图 6 所示。

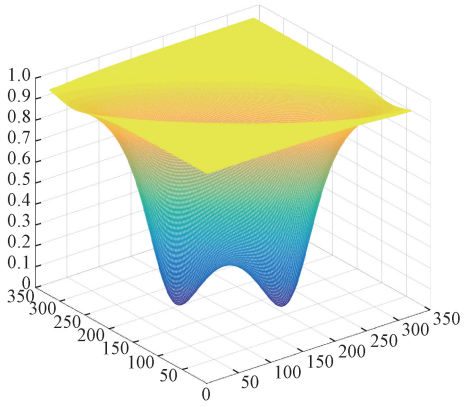


图 6　巴特沃斯陷波滤波器三维的透视图

Fig. 6　Three-dimensional diagram of Butterworth notch filter

设计的频域滤波器能够针对刀痕纹理在频域中的频率点分布特征进行分析,为后续有效地滤除刀痕纹理做准备。

3　电缆线芯截面图像刀痕消除

电缆线芯截面图像刀痕消除工作流程如图 7 所示。

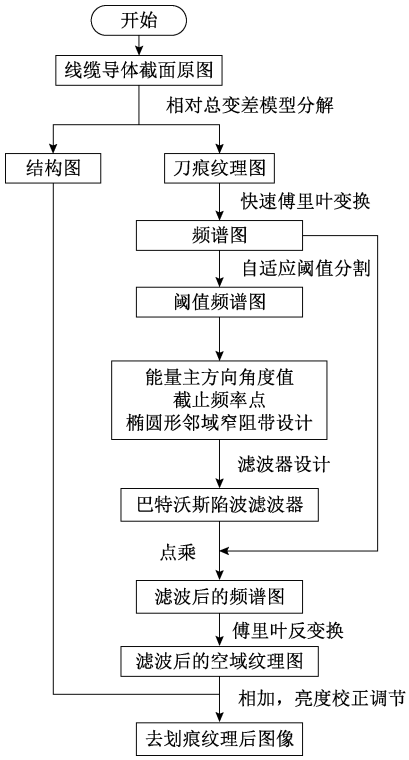


图 7　去刀痕算法流程

Fig. 7　The flow of the algorithm for removing knife marks

在频域中,对含有刀痕纹理的图像进行滤波可表示为:

$$\boldsymbol{T}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v}) = \boldsymbol{F}_1(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v}) \cdot \boldsymbol{H}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v}) \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{F}_1(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})$为线芯截面纹理图像经过快速傅里叶变换后的矩阵;$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})$为频域滤波器传递函数,其模型可表示为式(4);$\boldsymbol{T}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})$为滤波后的频谱矩阵。

在频域内对图像进行滤波的关键在于如何确定阻频带区域,因此,需要将刀痕纹理图像从空间域变换到频率域,并进行处理。

3.1　相对总变差模型的导体截面图像分解

相对总变差模型具有一般性和随意性,可以有效地分解图像中的结构信息和纹理信息,适用于非统一或各向异性的纹理[22]。因而可以将电缆线芯截面图像分解为轮廓结构图像和含刀痕纹理图像。

在实际的图像分解过程中,电缆线芯样本的种类不同,纹理特征也存在差异。$D_x(p)$、$D_y(p)$为像素 p 在 x 和 y 两个方向上的总像素窗口的总变差:

$$D_x(p) = \sum_{q \in \boldsymbol{R}(\boldsymbol{p})} g_{p,q} \cdot |(\partial_x \boldsymbol{S})_q| \tag{8}$$

$$D_y(p) = \sum_{q \in \boldsymbol{R}(\boldsymbol{p})} g_{p,q} \cdot |(\partial_y \boldsymbol{S})_q| \tag{9}$$

式中:p 为图像像素点的索引;$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{p})$为以 p 为中心的矩形区域;$\boldsymbol{S}$ 为输出结构图像;$g_{p,q}$ 为高斯核函数。

高斯核函数为:

$$g_{p,q} \propto \exp\left(-\frac{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{10}$$

式中:σ 为控制窗口的空间比例,在分解结构和纹理图像过程中起重要作用。

为了从纹理元素中区分突出的结构,除了变差 D 外,还需要引入 $L_x(p)$、$L_y(p)$,计算像素 p 为中心的窗口在 x 和 y 两个方向上总像素窗口的固有变差:

$$L_x(p) = \left| \sum_{q \in \boldsymbol{R}(\boldsymbol{p})} g_{p,q} (\partial_x \boldsymbol{S})_q \right| \tag{11}$$

$$L_y(p) = \left| \sum_{q \in \boldsymbol{R}(\boldsymbol{p})} g_{p,q} (\partial_y \boldsymbol{S})_q \right| \tag{12}$$

为了进一步增强纹理和结构之间的对比度,特别是视觉显著[23]的区域,将 L 和 D 结合起来,构建结构纹理分解正则化模型,该模型函数为:

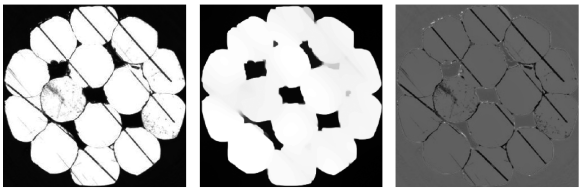
$$\arg\min_S \sum_D \left\{ (S_p - I_p)^2 + \lambda \times \left[\frac{D_x(p)}{L_x(p) + \varepsilon} + \frac{D_y(p)}{L_y(p) + \varepsilon} \right] \right\} \tag{13}$$

式中:$(S_p - I_p)^2$为保真项;I_p 为输入灰度图像中索引为 p 的像素值;S_p 为输出结构图中索引为 p 的像素值;$\lambda > 0$,用来控制保真项与相对总变差模型的权重;ε 代表一个很小的正数,为避免分母出现零;同时引入相对总变差模型$\left(\frac{D_x(p)}{L_x(p) + \varepsilon} + \frac{D_y(p)}{L_y(p) + \varepsilon}\right)$,得到分解后的结构纹理图像。

假设通过相对总变差模型分解原始图像 $\boldsymbol{I}$ 得到结构图像 $\boldsymbol{S}$ 和刀痕纹理图像 $\boldsymbol{T}$，则有：

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{I}-\boldsymbol{S} \tag{14}$$

利用相对总变差模型对含刀痕纹理的线芯截面图像进行结构纹理分解后的效果如图 8 所示，图 8(c)中包含线芯轮廓信息和明显的刀痕纹理信息。



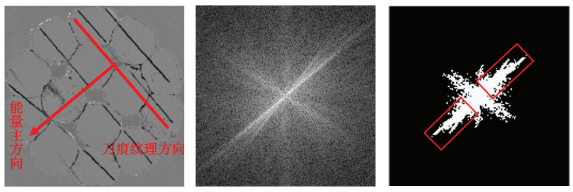
(a) 原图 (a) Original image　(b) 结构图 (b) Structure image　(c) 纹理图 (c) Texture image

图 8　电缆线芯截面分解图

Fig. 8　Decomposition diagram of cable core cross-section

3.2　频域中计算纹理主方向

线芯截面纹理图像经过快速傅里叶变换，得到频谱图像，对频谱图进行阈值分割，得到阈值频谱图。刀痕纹理图像的傅里叶变换效果如图 9(b)所示，阈值频谱图如图 9(c)所示。



(a) 纹理图 (a) Texture image　(b) 傅里叶频谱图 (b) Fourier spectrogram　(c) 阈值频谱图 (c) Threshold spectrogram

图 9　纹理图的傅里叶频谱分析

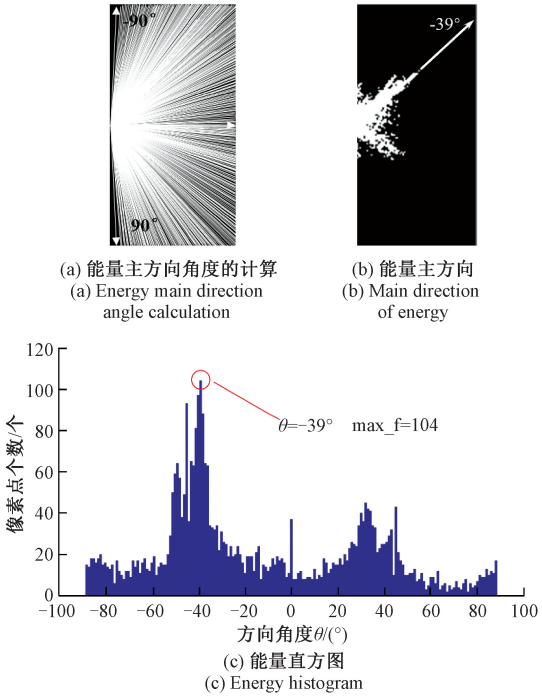
Fig. 9　Fourier spectrum analysis of the texture image

由图 9(a)、(b)可知，刀痕纹理方向垂直于能量主方向。为了准确地确定能量主方向的角度值，分析图 9(c)，图像具有中心对称特性，因而只需考虑右半侧部分。以图像中心点为起点，向(−90°，90°)范围的方向上发出均匀的 360 条射线，统计落在射线上像素值为 1 的像素点个数，最终绘制出能量直方图，如图 10(c)所示。

图 10(c)为阈值频谱图的能量直方图，其主方向角度 θ 为−39.0°。

3.3　滤除频域中刀痕能量部分

获取能量主方向角度值后，结合计算出的截止频率点的坐标及阻频带带宽，利用式(4)、(5)设计巴特沃斯陷波滤波器，并滤除傅里叶频谱图像 $\boldsymbol{F}_1$ 中刀痕纹理对应的频率部分。



(a) 能量主方向角度的计算 (a) Energy main direction angle calculation　(b) 能量主方向 (b) Main direction of energy　(c) 能量直方图 (c) Energy histogram

图 10　能量主方向分析

Fig. 10　Main direction analysis of energy

3.4　傅里叶反变换获取去刀痕后图像

滤波后，进行傅里叶逆变换，该变换公式为：

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}\boldsymbol{F}(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v})\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(ux/M+vy/N)} \tag{15}$$

根据上述算法，可以得到消除刀痕后的纹理图像 $\boldsymbol{T}'$，然后再采用基于相对总变差模型，将结构图像 $\boldsymbol{S}$ 与 $\boldsymbol{T}'$ 相加重构出图像，其原理表达式为：

$$\boldsymbol{I}'=\boldsymbol{T}'+\boldsymbol{S} \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{I}'$ 为重构后图像，即消除刀痕纹理后的电缆线芯截面图像。

4　实验及分析

本实验采用的线芯测量平台如图 11 所示。该平台主要包括：相机、光学镜头、光源、光源控制器、测试电缆样品及工业平板电脑等组成部分。其中，工业平板电脑为 Windows 10 64 位操作系统，1 000 Mbps 以太网卡；相机为 Basler ace 的千兆网口系列。

为保证相机获取高保真度、高精确度的线芯截面图像，选用远心镜头，结合环形光源，将三者固定在同一竖直方向实验平台支架上。采用机器视觉对采集到的线芯图像进行参数测量。

实验主要针对文献[5]方法与本文方法的纹理消除结果进行对比。实验数据均为相同的线芯样本图像。实验过程包括对样本图像进行刀痕纹理消除、分割并提取

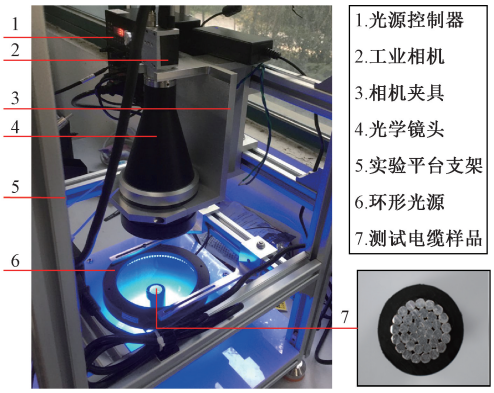


图 11　电缆线芯测量平台

Fig. 11　Cable core measuring platform

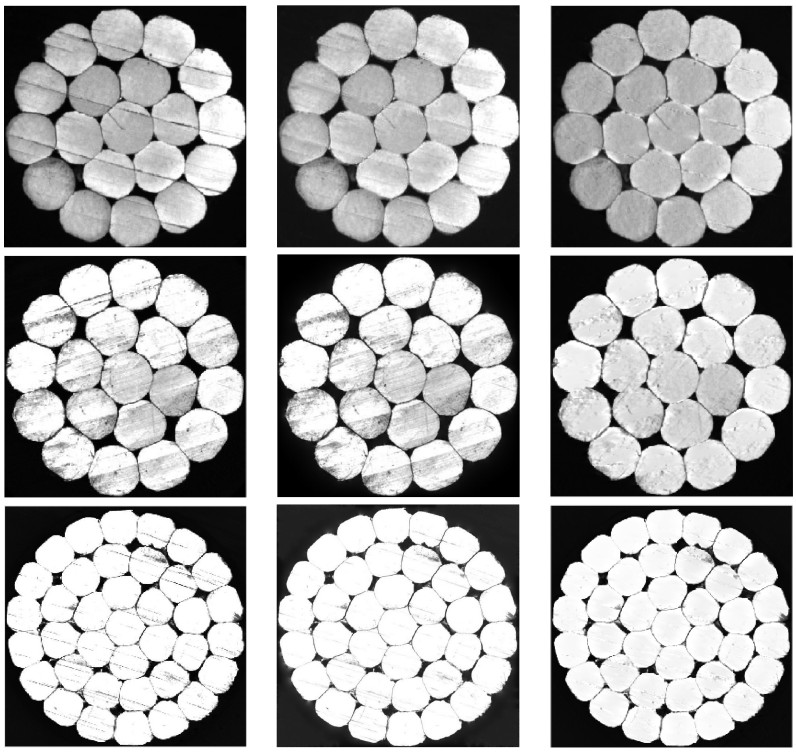
图像轮廓。最后在消除效果和正确分割图像数量上分别对两种方法进行定性和定量分析。

本文实验硬件采用 Intel Core i7 @ 2.50 GHz,8 GB 的内存,软件环境采用 MATLAB R2016b 语言。

4.1　刀痕纹理消除结果定性分析

刀痕纹理消除效果对比如图 12 所示。图 12(a)为含刀痕纹理的原图;图 12(b)和(c)分别为文献[5]方法消除后的图像和本文方法消除后的图像。

对比两种算法的消除效果,可以发现,文献[5]方法能消除大部分的刀痕纹理,但仍存在未消除部分,且该方法在处理纹理特征较复杂的图像时不稳定;本文方法能够明显地消除刀痕纹理,且图像边缘信息保留较完整。



(a) 含刀痕纹理的原图
(a) The original image with knife mark texture

(b) 文献[5]方法消除结果
(b) Elimination results of method in literature [5]

(c) 本文方法消除结果
(c) Elimination resultsof method in this article

图 12　不同算法的刀痕图像消除效果对比

Fig. 12　Comparison of the knife mark image elimination effects of different algorithms

为了测试刀痕纹理消除效果,使用 3 种方法进行比较。方法 A 为直接使用分水岭算法进行分割;方法 B 为先使用文献[5]方法消除刀痕纹理后,进行分水岭分割;方法 C 为先使用本文方法消除刀痕纹理后,进行分水岭分割[24]。将提取的导体区域边缘进行线条标记,效果如图 13 所示。图 13 中列举了 4 种不同电缆线芯截面图像的处理效果,其中图 13 的(a)、(d)、(g)、(j)为含有刀痕纹理的线芯截面原图,图 13 的(b)、(e)、(h)、(k)为文献[5]方法消除刀痕纹理后的线芯分割结果图,图 13 的(c)、(f)、(i)、(m)为本文方法消除刀痕纹理后的线芯分割结果图。

从 3 种方法的图像分割结果可以直观地看出:

1)方法 A 的分割效果图中有明显的刀痕纹理干扰,部分刀痕甚至将一些单根导体区域分隔成两半;

2)方法 B 存在误分割的情况,未完全消除的刀痕纹理严重干扰了图像分割,但其效果优于方法 A;

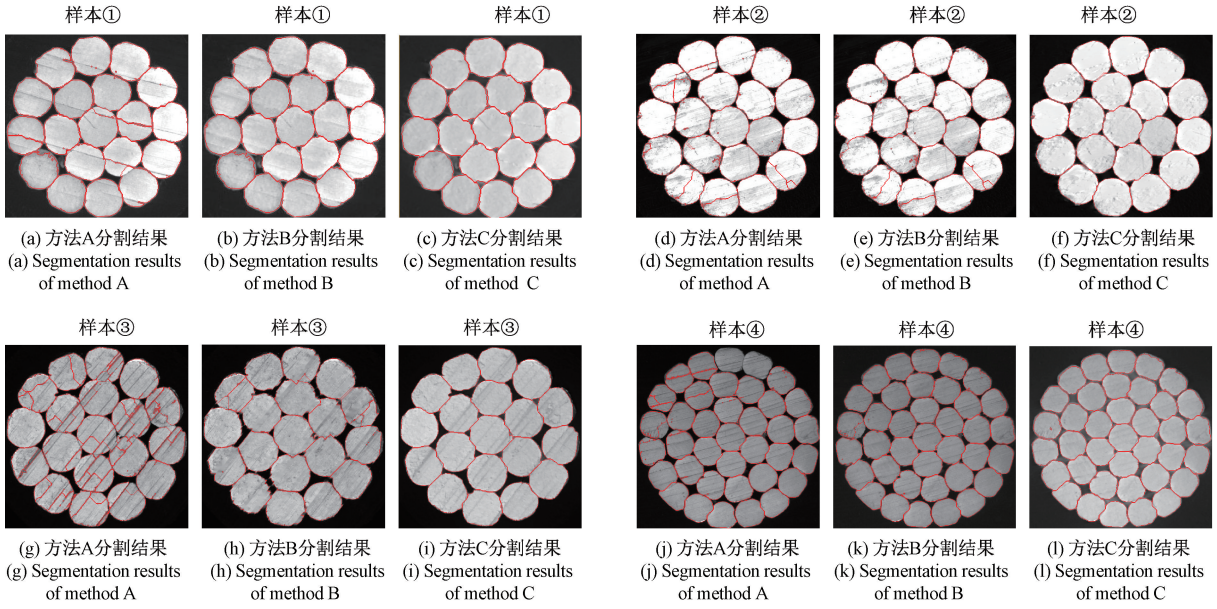


图 13 4 种刀痕纹理样本采用不同方法消除效果对比

Fig. 13 Comparison of elimination effects of four knife mark texture samples by different methods

3) 方法 C 的分割效果图中,分割出来的轮廓边缘线与每根导体区域边缘基本吻合。

实验表明,消除刀痕纹理后,对电缆线芯区域分割更加准确,验证了消除刀痕纹理的有效性和重要性,且本文方法的消除效果要略优于文献[5]方法。

4.2 刀痕纹理消除结果定量分析

为了进一步对比、分析两种方法的消除效果,选取了 5 种不同种类电缆样本,每种样本使用电缆线芯测量平台采集 20 幅不同刀痕纹理方向、不同光源亮度值的线芯截面图像进行测试,正确分割并标注轮廓线,定量分析两种方法的消除效果。

针对两种方法刀痕纹理消除结果的定量分析实验步骤如下:

1) 采用电缆线芯测量系统获取线芯截面图像并提取图像感兴趣区域;

2) 利用不同方法消除刀痕纹理;计算出峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)、结构相似性(structural similarity, SSIM) 和代码运行时间等参数,记录数据于表 1 中。

3) 针对刀痕纹理消除后的线芯截面图像,使用分水岭算法分割并提取每根导体的轮廓边缘,分别统计两种方法消除效果后分割的正确、错误数据,如表 2 所示。

4) 对比分析两种方法的刀痕纹理消除效果。

如表 1 所示,两种方法滤除刀痕纹理后, SSIM 值明显下降,其值基本保持在 0.8~0.9 左右,证明两种方法滤除刀痕时保留了有用信息;文献[5]方法的 SSIM 值略高于本文方法,但在同一软硬件环境中,本文方法代码运行时间少于文献[5]方法。

表 1 文献[5]方法与本文方法的刀痕纹理消除对比数据

Table 1 The comparison data of mark texture elimination between the method in literature [5] and this method

样本编号	方法	PSNR/dB	SSIM	运行时间/s
1~20	本文方法	27.093	0.836	3.763
	文献[5]方法	29.318	0.899	136.586
21~40	本文方法	26.579	0.804	3.974
	文献[5]方法	30.463	0.903	204.473
41~60	本文方法	25.753	0.785	4.249
	文献[5]方法	24.344	0.835	123.558
61~80	本文方法	26.036	0.817	4.257
	文献[5]方法	22.546	0.823	105.419
81~100	本文方法	26.442	0.796	4.950
	文献[5]方法	20.617	0.817	100.946

表 1 中,文献[5]方法的代码运行速度明显低于本文方法。文献[5]方法因为需要计算 180 个方向角度响应图像,比较耗时。

由表 2 测试数据表明,利用本文方法消除刀痕纹理后正确分割的数量多于文献[5]方法。本文方法的消除率达 92%,验证了纹理消除的有效性。其中,表 2 数据的具体分析如下:

1) 两种方法消除率在 95% 以上的第 3、4 类样本图像,其刀痕纹理特征较浅、方向一致性好且数量少,两种

表 2　不同方法的线芯截面图像轮廓分割数据对比

Table 2　Comparison of test data for contour segmentation of core section images with different methods

样本类别	方法	样本总数/幅	正确分割数量/幅	错误分割数量/幅	消除率/%
1	本文方法	20	19	1	95
	文献[5]方法	20	18	2	90
2	本文方法	20	15	5	75
	文献[5]方法	20	12	8	60
3	本文方法	20	20	0	100
	文献[5]方法	20	20	0	100
4	本文方法	20	20	0	100
	文献[5]方法	20	19	1	95
5	本文方法	20	18	2	90
	文献[5]方法	20	16	4	80
总计	本文方法	100	92	8	92
	文献[5]方法	100	85	15	85

方法都能较好地消除刀痕纹理并正确地提取出导体轮廓;

2)两种方法消除率在 80%~95%的第 1、5 类样本图像,其刀痕纹理呈现分布随机,深浅、长短不一,较明显等特点,影响了两种方法的纹理消除效果。文献[5]方法局限于平行且细长条状的刀痕消除,块状像素不能消除,但是使用本文方法均能消除;

3)两种方法消除率在 80%以下的第 2 类样本图,其刀痕纹理呈现多而杂、刀痕处与导体区域像素值相差不大等特点,且导体数量较多,严重影响两种方法的纹理消除效果。但本文方法消除后的正确分割数量多于文献[5]方法。

综上,本文方法适用于多种、较复杂的刀痕纹理特征消除,算法较为稳定。但是,在样本图像的刀痕纹理分布复杂、导体数量较多的情况下,本文方法易受影响,存在区域处理不稳定的现象,在纹理消除的过程中也会去除有用的信息部分,这些问题将是接下来的研究重点。

5　结　　论

本文针对刀痕纹理干扰电缆线芯参数测量的问题,提出了基于改进频域滤波的电缆线芯截面图像纹理消除方法。从频域角度分析刀痕纹理分布特点,改进了巴特沃斯陷波滤波器的陷波区域,采用椭圆形的窄阻带邻域降低刀痕纹理对应的能量区域,消除了刀痕纹理。最后,针对本文方法和文献[5]方法的消除效果进行了对比实验。实验结果表明,本文提出的方法适用于多种、较复杂的刀痕纹理特征消除,刀痕纹理消除率为 92%,具有较好的稳定性。在机器视觉测量电缆线芯质检指标场景中,该方法对于提高电缆线芯质量检测精确度具有重要意义。

参考文献

[1] 薛玉祥. 电线电缆抽样检测问题分析[J]. 科学技术创新, 2018(15): 189-190.
XUE Y X. Analysis of sampling inspection of electric wires and cables [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(15): 189-190.

[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[J]. Building Electricity, 2018, 37(10): 54-58.

[3] 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(2): 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.

[4] 钱晓亮, 张鹤庆, 张焕龙, 等. 基于视觉显著性的太阳能电池片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1570-1578.
QIAN X L, ZHANG H Q, ZHANG H L, et al. Solar cell surface defect detection based on visual saliency[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1570-1578.

[5] 董霏, 侯北平, 刘宇, 等. 基于机器视觉的电缆线芯质量检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 144-153.
DONG F, HOU B P, LIU Y, et al. Research on quality inspection of cable conductor based on machine vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 144-153.

[6] ZH W, DONG F, HOU B P, et al. Segmenting the semi-conductive shielding layer of cable slice images using the convolutional neural network [J]. Polymers, 2020, 12(9): 1-14.

[7] 孔盛杰, 黄翔, 周崩, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.
KONG SH J, HUANG X, ZHOU K, et al. Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 247-255.

[8] 刘磊, 王冲, 赵树旺, 等. 基于机器视觉的太阳能电池片缺陷检测技术的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 47-52.
LIU L, WANG CH, ZHAO SH W, et al. Research on solar cells defect detection technology based on machine vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10): 47-52.

[9] 王清晨, 景军锋. 采用机器视觉的金属表面横向裂纹检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 71-77.
WANG Q CH, JING J F. Horizontal crack detection of metal surface based on machine vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 71-77.

[10] 陈丽, 黄玉清, 郭江. 雨天条件下基于总变差和频域处理的车牌检测[J]. 自动化仪表, 2017, 38(4): 76-80.
CHEN L, HUANG Y Q, GUO J. License plate inspection based on total variation and frequency-domain processing under rainy condition[J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(4): 76-80.

[11] 于涛, 王慧聪, 杨世凤. 基于虚拟仪器的动车图像条纹噪声消除算法[J]. 天津科技大学学报, 2015, 30(4): 65-69.
YU T, WANG H C, YANG SH F. Strip noise reduction algorithm for bullet train image based on virtual instrument[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2015, 30(4): 65-69.

[12] 许杨, 刘丽冰, 杨泽青, 等. 基于改进谱残差的工件表面缺陷检测方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(10): 102-105,110.
XU Y, LIU L B, YANG Z Q, et al. Surface defect detection of machined parts based on improved spectral residual [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(10): 102-105,110.

[13] 傅艺扬, 刘妹琴, 樊臻, 等. 基于纹理滤波和颜色聚类的提花织物纹样自动提取方法[J]. 丝绸, 2019, 56(12): 9-15.
FU Y Y, LIU M Q, FAN ZH, et al. Automatic pattern extraction of jacquard fabric based on texture filtering and color clustering[J]. Journal of Silk, 2019, 56(12): 9-15.

[14] 徐敏, 丁友东, 于冰, 等. 基于5×5邻域像素点相关性的划痕修复算法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(5): 686-693.
XU M, DING Y D, YU B, et al. Scratch repair algorithm based on 5 × 5 neighborhood pixels correlation[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2018, 24(5): 686-693.

[15] LI X, QIONG Y, YANG X, et al. Structure extraction from texture via relative total variation [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2012, 31(6): 1-10.

[16] 孙丹, 王莉莉. 基于空-频域映射与虚警抑制的弱小目标检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 31-39.
SUN D, WANG L L. Dim target detection algorithm based on spatial-frequency domain mapping and false alarm suppression [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 31-39.

[17] 邹园园. THz 图像条纹噪声消除方法研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
ZOU Y Y. Research on stripe noise elimination method of THz image [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009.

[18] 余胜威, 丁建明, 吴婷, 等. MATLAB 图像滤波去噪分析及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
YU SH W, DING J M, WU T, et al. MATLAB image filtering denoising analysis and its application [M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[19] 章原发, 张京晶, 高婕. 基于数字滤波的图像去噪方法[J]. 现代计算机, 2020(31): 58-63.
ZHANG Y F, ZHANG J J, GAO J. Image denoising method based on digital filter [J]. Modern Computers, 2020(31): 58-63.

[20] DU S L, LIU Y G, YE M, et al. Single image deraining via decorrelating the rain streaks and background scene in

gradient domain[J]. Pattern Recognition, 2018, 79: 303-317.

[21] KANG L W, LIN C W, FU Y H. Automatic single image based rain streaks removal via image decomposition[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2012, 21(4): 1742-1755.

[22] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. Digital image processing using MATLAB [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.

[23] 李晖, 吴佳宁, 苑玮琦, 等. 基于视觉显著性的木板实时分类方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 237-244.
LI H, WU J N, YUAN W Q, et al. Real-time classification of wood based on visual significance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 237-244.

[24] 张文飞, 韩建海, 郭冰菁, 等. 改进的分水岭算法在粘连图像分割中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(6): 243-248.
ZHANG W F, HAN J H, GUO B J, et al. Application of improved watershed algorithm in adhesion image segmentation[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(6): 243-248.

作者简介

侯北平(通信作者),2005 年于浙江大学获得博士学位。现为浙江科技学院自动化与电气工程学院教授、硕士生导师、中国仪器仪表学会微型计算机应用学会理事。主要研究方向为机器视觉与模式识别、图像处理。

E-mail: bphou@zust.edu.cn

Hou Beiping (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2005. He is currently a professor and a master advisor in the School of Automation and Electrical Engineering at Zhejiang University of Science and Technology. His current research interests include machine vision and pattern recognition, and image processing.

张晓刚,2019 年于浙江工业大学之江学院获得学士学位,现为浙江科技学院在读硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、纹理分析。

E-mail: xiaogang_zh@163.com

Zhang Xiaogang received his B. Sc. degree from Zhijiang College at Zhejiang University of Technology in 2019. He is currently a master student at Zhejiang University of Science and Technology. His main research interest includes machine vision and texture analysis.