

# 基于图像处理技术的油污干扰下硅钢片缺陷检测\*

彭宽宽, 龚时华, 王子悦, 李德龙

(华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

**[摘要]** 油污干扰下的硅钢片表面缺陷检测难点在于所获取的图片包含多种干扰信息。为了能够在检测到缺陷的同时去除干扰信息,提出了一种基于图像处理技术的无损检测方法。采用中值滤波配合维纳滤波抑制硅钢片表面的纹理干扰方法。然后连接并补全断开的油污轮廓边缘,获得油污区域掩膜去除油污边缘的干扰。再制作亮斑掩膜,去除油污表面亮斑边缘的干扰。最后仅留下缺陷边缘。经试验,该方法能够有效检测出油污干扰下的硅钢片表面缺陷,例如细小缺陷、表面刮伤和裂纹。

**关键词:** 图像处理; 油污干扰; 硅钢片缺陷; 边缘断点连接; 维纳滤波; 中值滤波

## Defect Detection of Silicon Steel Strip Under Oil Pollution Disturbance Based on Image Processing Technology

PENG Kuankuan, GONG Shihua, WANG Ziyue, LI Delong

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**[ABSTRACT]** The difficulty of surface defect detection of silicon steel strip under oil pollution is that the images obtained contain a variety of interference. In order to remove the interference while detecting defects, a nondestructive detection method based on image processing technology was proposed. Median filter and Wiener filter were employed to suppress the texture interference on the surface of silicon steel strip. Then the disconnected oil contour edge was connected and completed, after which oil pollution area mask was made to remove the interference of oil pollution edges. Bright spot mask was made to remove the interference of bright spot edge on oil surface. Finally, only the edge of the defect was left. Upon test, the method can effectively detect the surface defects of silicon steel strip under oil pollution interference, such as small defects, surface scratches and cracks.

**Keywords:** Image processing; Oil pollution interference; Edge breakpoint connection; Wiener filter; Median filter

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.20.077

硅钢也称为电工钢,是一种重要的金属材料。它具有铁损和矫顽力小、磁导率和磁感应强度高特点,在航天器仪表仪器以及航天发电系统中应用广泛。硅钢片生产工艺十分复杂,在轧制的过程中,容易出现划痕、裂纹、孔洞、刮伤、毛刺、辊印、氧化铁皮、锈斑等缺陷<sup>[1-2]</sup>。不光滑的硅钢片表面会导致产品的叠片系数和冲片性降低从而影响产品性能。当硅钢片表面毛刺较为严重时甚至会导致硅钢片层间短路,引发涡流效应产生大量热量<sup>[3]</sup>。有缺陷的硅钢片被应用到航天器仪表仪器中时,这些硅钢片更容易磨损、腐蚀、生锈,影响仪表仪器工作性能的同时也会缩短其使用寿命。航天器

发电机铁芯由硅钢片制成,带有缺陷的硅钢片由于铁损较大,能量损耗严重,损耗的能量转化为热能,这不仅会降低发电机的发电效率,更会导致发电机温度上升,严重的时候可能会烧坏线圈,造成不可估量的损失。航空航天器工作在高空,飞行速度快,受到冲击大,不断经受着恶劣环境的考核<sup>[4]</sup>,因此航天器对硅钢片的质量要求更为严格。为了提高硅钢片的质量,在生产过程中对硅钢片进行表面缺陷检测是必不可少的环节。

长期以来,人们对钢材表面缺陷检测一直十分重视。20世纪50年代,钢材的表面缺陷检测主要是通过人工目测来实现的。由于当时钢材的生产速度较低,人工目测基本满足在线检测要求。但其缺点也十分明显,比如人随着疲劳的累积和自身情绪的影响,容易漏检和

\* 基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX04007-031-06); 国家自然科学基金面上项目(51375192)。

误检,检测效果较差<sup>[5]</sup>。随着科技的进步,钢材的生产速度也越来越快,人工检测已经无法满足表面缺陷检测的基本要求。更为先进的无损检测技术开始应用到钢材表面缺陷检测之中。较为典型的有涡流检测技术、超声波探伤法和机器视觉检测技术等。涡流检测技术通过给线圈施加正弦电流激励,使钢材表面产生涡流,涡流又反作用于线圈来反馈钢材表面信号。当钢材表面存在缺陷的时候,涡流检测器便能检测出信号的变化,从而判断钢材是否存在缺陷。超声波探伤技术向待检测的钢材发射高频声波,当钢材存在缺陷的时候,缺陷会将一部分声波反射回来形成回波,这些回波经过系统的检测、放大、处理,最终转化成数字信号,从而反映出钢材的缺陷情况<sup>[6]</sup>。以上方法都具有局限性,例如涡流检测技术需要外加大电流励磁,对能源造成浪费。超声波探伤技术检测速度慢,一般用于离线检测<sup>[7-8]</sup>。近年来随着图像处理技术的迅速发展,将图像处理技术应用到钢材表面缺陷检测受到人们的重视。使用工业相机采集待检测钢材图像,采用图像处理技术能够快速检测出钢材表面缺陷,识别缺陷类型,满足在线检测的要求,相比于其他检测技术具有较大的优势<sup>[9]</sup>。因此,越来越多的学者采用机器视觉进行缺陷检测的研究。

硅钢片表面粘有油污时<sup>[10]</sup>,加大了表面缺陷检测的难度。第一,为了去除油污干扰,需要对油污区域进行图像分割,而油污与背景对比度低,完全将油污从背景中分割出来变得十分困难。第二,油污表面在光源下发生镜面反射形成亮斑,在进行缺陷边缘提取时可能会将亮斑误认为缺陷。另外,硅钢片表面具有大量的杂乱纹理,也会干扰缺陷边缘的提取。针对这些问题,本文使用中值滤波配合维纳滤波的方法,既滤除背景纹理的干扰,又能保留缺陷细节。使用断点连接的方法补全油污轮廓边缘,对油污轮廓近似较好,能将油污从图像中完整分割出来,此时封闭的油污轮廓边缘的干扰很容易被去除。分析图像的灰度直方图,制作亮斑掩膜,能够准确去除亮斑干扰。

## 1 图像获取与分析

图像采集装置主要由一台面阵 CCD 相机和一台 LED 光源构成。CCD 相机具有体积小、功率小、噪声小、成像清晰的优点。LED 光源具有功率低寿命长、光效好的优点。CCD 相机将图像采集之后通过网口传输到计算机以便进行后期的处理,如图 1 所示。本文用于分析的图像分辨率为 640×480。

图 2 为试验中采集得到的硅钢片表面细小缺陷的图像。可以看到硅钢片表面纹理杂乱无章,遍布整张图

像。虚线内为油污区域,缺陷被油污覆盖,油污与背景对比度较低导致油污部分轮廓十分不明显,加大分割油污区域的难度。油污表面受到光源影响发生镜面反射,导致亮度极高形成亮斑,在提取缺陷边缘时和油污内的真实缺陷产生混淆。这些现象都会对硅钢片缺陷检测产生干扰。

## 2 油污区域掩膜

### 2.1 图像去噪

中值滤波是一种应用极其广泛的非线性滤波方法,能够有效滤除图像噪声干扰,同时能较好保留边缘的锐度<sup>[11]</sup>。硅钢片图片背景纹理杂乱,对油污轮廓提取产生极大干扰。本文选用中值滤波来抑制硅钢片背景干扰信息。随着滤波窗口的增大,滤波的效果更加明显,杂乱的背景趋于平滑,当然缺陷的细节也丢失得越多。但油污的部分轮廓由于原本对比度较高,滤波之后依旧能保持较高对比度。本文选用 21×21 的大窗口对灰度图像进行中值滤波,得到图像如图 3 所示。图中可以观察到硅钢片杂乱的纹理基本被滤除,缺陷细节丢失严重,油污部分边缘得到保留且锐度较高。

### 2.2 轮廓补全

硅钢片表面油污区域与背景区域对比度较低,部

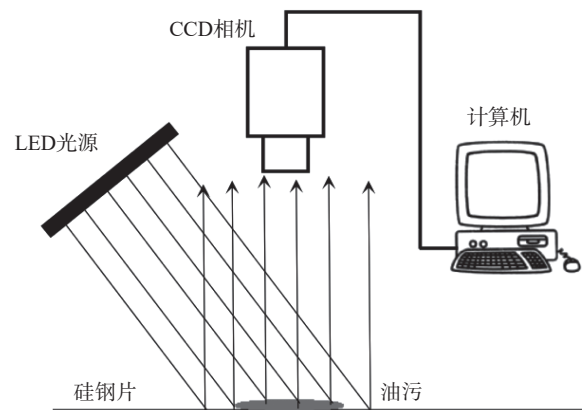


图1 图像采集示意图

Fig.1 Schematic of the image acquisition



图2 油污干扰下的硅钢片

Fig.2 Silicon steel strip under oil pollution disturbance

分边缘不明显无法提取,采用 Canny 算子得到的油滴轮廓边缘不连续,缺口较大,如图 4 (a) 所示。而图像填充需建立在连续闭合的轮廓基础之上,传统的应对策略是采用形态学闭操作使得轮廓封闭。但油滴轮廓缺口较大,采用形态学闭操作也难以将轮廓补全,需要找到合适的结构元素。有时即使将轮廓补全了,其轮廓也与对象原本轮廓相差较大,如图 4 (b) 所示。因此本文提出了边缘断点连接的方法,将有较大缺口的轮廓边缘断点连接在一起,从而形成封闭的轮廓,再进行图像填充。断点连接方法如下,得到图片的边缘检测图之后,第一步对边缘检测图进行断点检测,根据 Zhang<sup>[12]</sup> 提出的八邻域判断标准,如图 5 (a) 所示,为了判断  $p_1$  是否为断点,只需判断其八邻域像素点之和是否为 1 (1 代表白色,0 代表黑色),若为 1 则代表八



图3 中值滤波后的图像  
Fig.3 Image after median filtering



(a) 油污边缘检测图 (b) 用形态学闭运算得到的油污掩膜

图4 形态学闭运算缺点

Fig.4 Shortcoming of morphological close operation operations

$p_9$	$p_2$	$p_3$	$p_9$	$p_2$	$p_3$
$p_8$	$p_1$	$p_4$	$p_8$	$p_1$	$p_4$
$p_7$	$p_6$	$p_5$	$p_7$	$p_6$	$p_5$

(a) 八邻域像素之和为 1 (b) 八邻域像素直角排列

图5 像素点为断点的情况

Fig.5 Case where a pixel is breakpoint

邻域中有一个像素点为白色,认为  $p_1$  点为断点。判断公式十分简单,

$$p_2+p_3+p_4+p_5+p_6+p_7+p_8+p_9=1$$

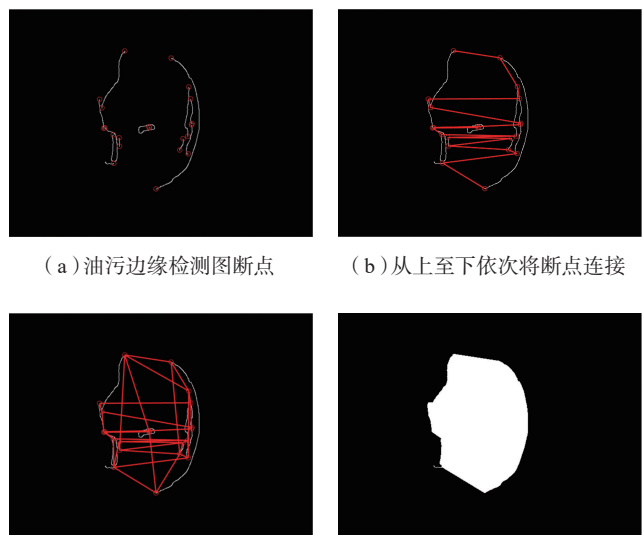
另外,本文指出还有一种情况也可以判断为断点。如图 5 (b) 所示,八邻域像素点中有两个像素点和中心位置构成直角排列,则认为  $p_1$  为断点。依据这两个检测原则对油污的边缘检测图进行断点检测,结果如图 6 (a) 所示。标记断点位置之后,从上至下按行扫描断点,将行方向(纵向)上距离最近的断点依次相连,如图 6 (b) 所示。再从左至右按列扫描断点,将列方向(横向)上距离最近的断点依次相连,得到图 6 (c)。这样可将轮廓补全,且接近油污原本的轮廓形状。形成封闭的轮廓之后,使用 Matlab Imfill 函数能够直接对图像进行填充得到图像油污掩膜,如图 6 (d) 所示。

### 3 缺陷信息提取

#### 3.1 边缘提取

上文中,中值滤波虽然去除了背景噪声的干扰,但滤波窗口较大,有时甚至比缺陷还大,导致缺陷边缘细节丢失严重。为了能够得到更多的缺陷边缘细节,采用维纳滤波对原始灰度图进行降噪,得到输出图像图 7 (a)。

维纳滤波是一种线性滤波器,能够有效去除加性噪声和乘性噪声。其原理是找到原始清晰图片的估计值使之和原始图片之间的均方误差最小,因此也被称为最小均方误差法<sup>[13]</sup>。



(a) 油污边缘检测图断点 (b) 从上至下依次将断点连接

(c) 从左至右依次将断点连接 (d) 油污掩膜

图6 轮廓边缘补全过程

Fig.6 Process of contour edge completion

在进行维纳滤波时,首先计算图像的局部方差,当某一像素点邻域的方差大时,滤波器的平滑效果较弱。当邻域方差小时,滤波器的平滑效果较好。维纳滤波器根据邻域方差的大小自适应地调整滤波参数,针对图像不同区域的特点进行选择滤波,可以更好地保留图像的边缘和低频细节信息<sup>[4]</sup>。

滤波之后缺陷边缘与背景对比度依旧较大,为了能够去除背景纹理干扰并保留缺陷边缘,采用 Canny 算子提取图像边缘时,将阈值设置为 [0.15,0.29],此阈值对图像边缘对比度要求较为严格,只有高对比度的边缘才能被检测出来,如图 7 (b) 所示。此时边缘检测图上除了有缺陷的边缘信息,还留有亮斑边缘干扰信息和部分油污轮廓干扰信息。

### 3.2 去除亮斑干扰

观察油污污染下的硅钢片的灰度直方图,如图 8 所示。发现图片整体灰度值偏低,灰度整体呈现正态分布,峰值右边亮度越大则像素个数越少。在当灰度值大于 202 时,累积的像素个数都不超过 100,但 255 这个灰度值处像素个数却较高,为 519。这种现象是由油污亮斑造成的。因此,本节记录图片中所有灰度值为 255 的点的坐标位置,将灰度值为 255 的像素点变为黑色,其余

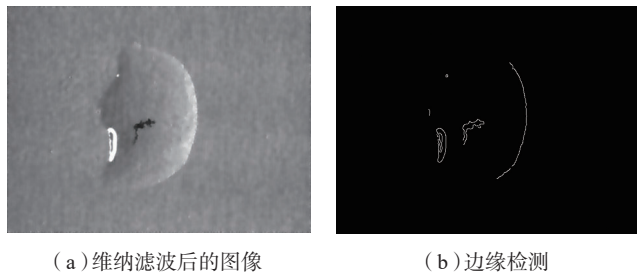


图7 维纳滤波后边缘检测

Fig.7 Edge detection graph after Wiener filtering

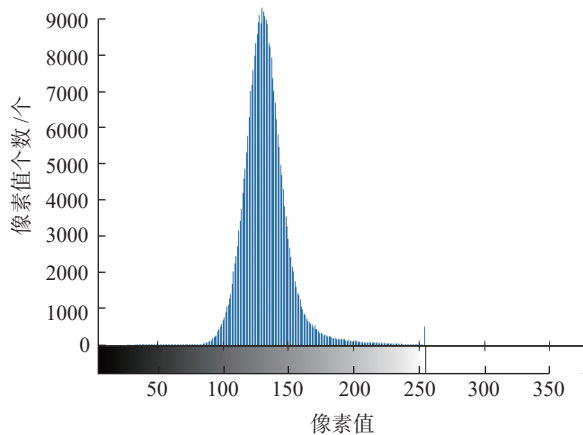


图8 原始图像灰度直方图

Fig.8 Gray-scale histogram of original image

像素点变为白色,得到去除亮斑的掩膜。为了能够完全覆盖亮斑区域,将掩膜进行膨胀处理,结果如图 9 (a) 所示。将此掩膜与上一步得到的含有亮斑边缘干扰的边缘检测图(图 7 (b))进行“与”运算,能够准确地去除亮斑的边缘干扰,此时图中只剩下油污边缘干扰,如图 9 (b) 所示。

### 3.3 去除油污边缘干扰

原始油污掩膜图 6 (d) 与图 9 (b) 做“与”运算之后得到的结果依旧包含油污边缘无用信息。为了将其去除,利用形态学腐蚀处理缩小油污掩膜,再与图 9 (b) 进行“与”运算,最后的边缘检测图只剩下缺陷的边缘信息,将其进行膨胀处理后如图 10 所示。至此所有干扰被消除,缺陷被准确地检测出来。本文方法整体流程如图 11 所示。

值得指出的是,对油污掩膜进行形态学腐蚀处理后,靠近油污边缘的缺陷会连同油污边缘被一起去掉。因此,本方法无法检测出靠近油污边缘的缺陷。

## 4 试验结果与讨论

硅钢片在生产的过程中产生的缺陷种类较多,除了细小缺陷以外,最为常见缺陷的还有表面刮伤、裂纹等。利用本文提出的方法对油污干扰下表面刮伤和裂纹这两种缺陷进行缺陷检测,如图 12、13 所示。表面刮伤和裂纹缺陷均被准确地检测出来,并且油污边缘干扰和亮斑干扰均被去除。本方法对油污下的硅钢片缺陷检测取得了较好的效果。

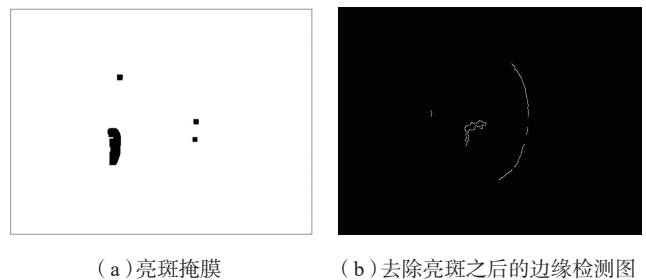


图9 去除亮斑干扰过程

Fig.9 Process of removing spot disturbance

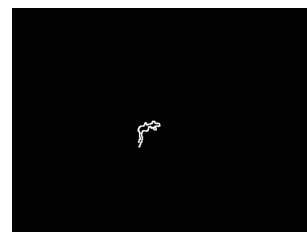


图10 缺陷边缘

Fig.10 Defect edge

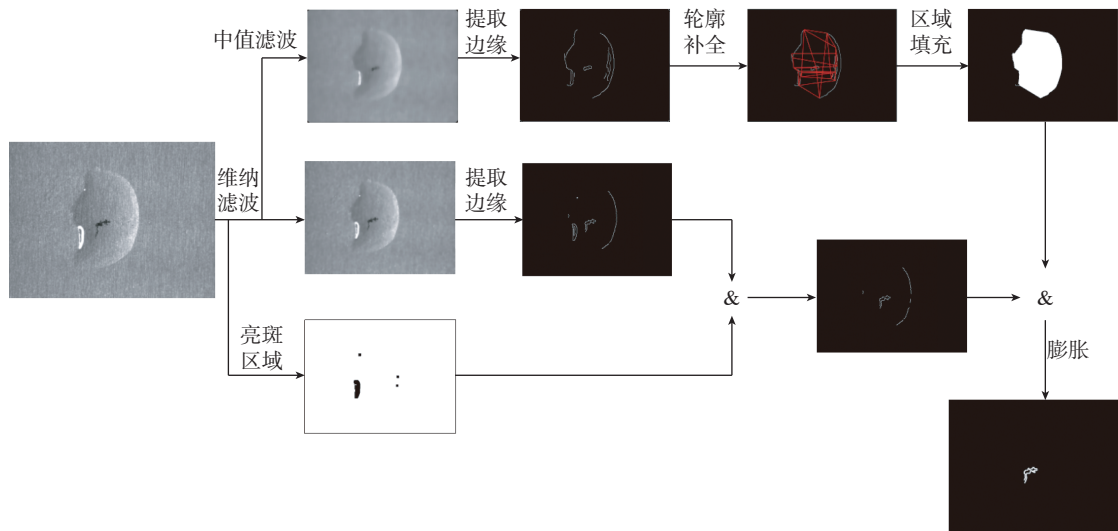


图11 方法总体流程图

Fig.11 Flow chart of the proposed method

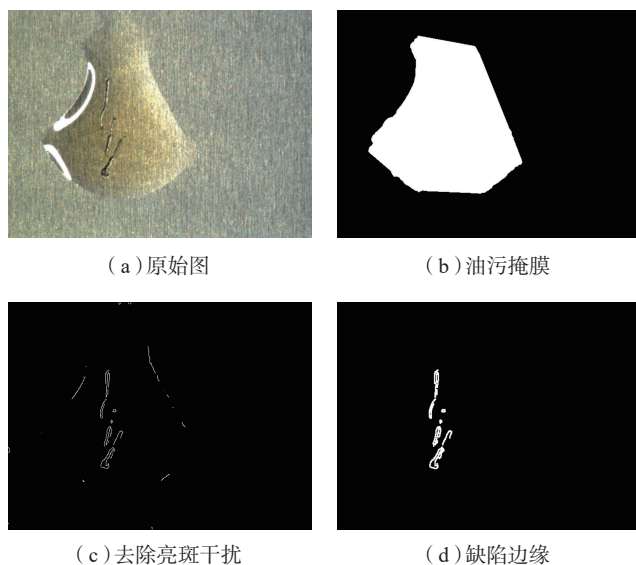


图12 油污干扰下硅钢片表面刮痕检测

Fig.12 Scratch-defect detection of silicon steel strip surface under oil pollution disturbance

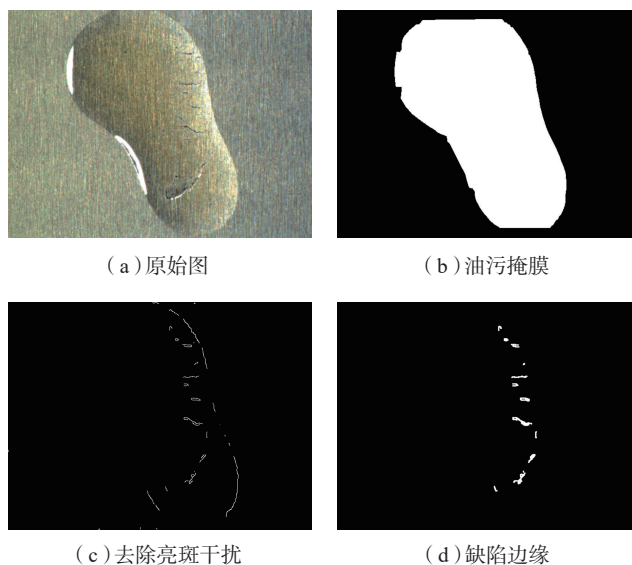


图13 油污干扰下硅钢片表面裂纹检测

Fig.13 Crack-defect detection of silicon steel strip surface under oil pollution disturbance

## 5 结论

针对油污污染下的硅钢片缺陷检测难题,本文提出了一种新的解决方法。其中关键步骤为:

(1) 选用中值滤波配合维纳滤波去除硅钢片图片杂乱纹理的干扰。

(2) 采用边缘断点检测并依次连接的方法对不完整的油污轮廓边缘进行补充,解决油污与背景对比度低导致的油污区域难以分割的问题。

(3) 采用制作亮斑掩膜的方法,准确去除亮斑干扰。

本方法除了能够检测出油污中硅钢片的细小缺陷,对硅钢片表面刮伤以及裂纹的检测也能达到理想的效果。但本方法无法检测出十分靠近油污边缘的缺陷。

## 参考文献

[1] 余诗怡, 郝振洋. 航空发动机内置式永磁容错发电系统的研究[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2775-2787.

YU Shiyi, HAO Zhenyang. Fault-tolerant internal permanent magnet generation system used in aviation engines[J]. Acta Aeronautica

et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2775–2787.

[2] 曲家庆. 关于我国冷轧硅钢生产现状和需求预测[J]. 中国钢铁业, 2007(1): 20–22.

QU Jiaqing. China's current CR silicon steel production and demand forecast[J]. China Steel, 2007(1): 20–22.

[3] 荣光. 冷轧硅钢的生产工艺概述[J]. 本钢技术, 2008(3): 25–27, 31.

RONG Guang. Production introduction of cold rolled silicon steel[J]. Bengang Technology, 2008(3): 25–27, 31.

[4] 王安东, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机用高强度铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 航空制造技术, 2017, 60(20): 95–103.

WANG Andong, CHEN Yueliang, BIAN Guixue, et al. Research progress on corrosion fatigue of high strength aluminum alloy of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(20): 95–103.

[5] 秦振兴. 冷轧钢板表面质量在线监测系统研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2012.

QIN Zhenxing. Research of cold-rolled steel sheet surface quality on-line monitoring system[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2012.

[6] 李乐刚, 刘松平, 刘菲菲, 等. 大型复合材料构件超声快速检测[J]. 航空制造技术, 2009, 52(Z1): 101–103, 107.

LI Legang, LIU Songping, LIU Feifei, et al. Fast ultrasonic inspection of large composites component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(Z1): 101–103, 107.

[7] 丁智, 王立功. 带钢表面质量检测系统的研究现状及展望[C]// 第九届中国钢铁年会. 北京: 冶金工业出版社, 2013.

DING Zhi, WANG Ligong. Development and perspective of strip surface quality inspection system[C]// Proceedings of the Ninth China Iron and Steel Annual conference. Beijing: Metallurgical Industry Press Co., Ltd., 2013.

[8] 吴平川, 路同浚, 王炎. 钢板表面缺陷的无损检测技术与应用[J]. 无损检测, 2000, 22(7): 312–315.

WU Pingchuan, LU Tongjun, WANG Yan. Nondestructive testing technique for strip surface defects and its applications[J]. Nondestructive Testing, 2000, 22(7): 312–315.

[9] 张建川. 红钢棒材表面缺陷图像采集与检测系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

ZHANG Jianchuan. Study on image acquisition and inspection system for red steel rod surface defects[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[10] SONG K C, HU S P, YAN Y H, et al. Surface defect detection method using saliency linear scanning morphology for silicon steel strip under oil pollution interference[J]. ISIJ International, 2014, 54(11): 2598–2607.

[11] 展慧, 李小昱, 王为, 等. 虫眼板栗的图像识别方法研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 121–124.

ZHAN Hui, LI Xiaoyu, WANG Wei, et al. Research on image recognition technology of worm hole chest nut[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8): 121–124.

[12] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3): 236–239.

[13] 张立亚, 孟庆勇, 杨坤. 基于维纳滤波的矿井监控图像的复原技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(1): 129–132.

ZHANG Liya, MENG Qingyong, YANG Kun. Recovery technology of mine monitoring image based on Wiener filtering[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(1): 129–132.

[14] 袁文成, 杨德兴, 陈超. 图像混合噪声的一种组合滤波消除方法[J]. 微处理机, 2007, 28(4): 78–80, 83.

YUAN Wencheng, YANG Dexing, CHEN Chao. A synthetic filtering method for restoration of images contaminated by mixed noise[J]. Microprocessors, 2007, 28(4): 78–80, 83.

通讯作者: 龚时华, 博士, 教授, 主要从事激光相关特种加工装备控制研究, E-mail: gongshihual@hust.edu.cn.

(责编 知舟)

(上接第69页)

[9] DAICW, DING W F, ZHU Y J, et al. Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy with a vitrified CBN wheel[J]. Precision Engineering, 2018, 52: 192–200.

[10] MA C S, CHENG D, ZHU X H, et al. Investigation of a self-lubricating coating for diesel engine pistons, as produced by combined microarc oxidation and electrophoresis[J]. Wear, 2018, 394–395: 109–112.

[11] ZHANG Z Y, HUO F W, WU Y Q, et al. Grinding of silicon wafers using an ultrafine diamond wheel of a hybrid bond material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51: 18–24.

[12] MATTHEW A, KYRIAKI K, SHREYES M. An investigation of graphite nano platelets as lubricant in grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(12–13): 966–970.

[13] SHAJI S, RADHAKRISHNAN V. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(1): 51–59.

通讯作者: 丁文锋, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为超硬磨料工具技术、高速超高速磨削加工技术、难加工材料高效精密加工技术, E-mail: dingwf2000@vip.163.com.

(责编 大漠)