

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.12.006

# 基于机器视觉的磁钢片缺陷检测研究

周 江,任 锟\*,帅英琦,陈英豪

(浙江理工大学 机械与自动控制学院,浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对磁钢片人工检测效率低、误检率高以及劳动强度大等问题,对磁钢片缺陷种类及缺陷特征方面进行了研究,对磁钢片缺陷检测流程进行了分析归纳,提出了一种基于机器视觉的磁钢片缺陷检测算法,实现了磁钢片缺陷检测自动化。通过二值化和闭操作对图像进行预处理,将目标区域面积与模板区域面积进行了比较,实现了零件掉角和粘连缺陷检测。通过采用均值滤波算法对初始图像平滑处理,对所得图像与模板图像对应像素灰度值进行了作差运算,选出了差值大于规定值的区域,实现了磁钢片裂纹和结晶缺陷检测。研究表明,相比人工检测,实验所采用的算法能够准确判断磁钢掉角、粘连、结晶以及裂纹缺陷,较传统人工目测检测方法准确率提高10%,并提高了检测效率,降低了劳动力。

**关键词:** 机器视觉; 二值化; 闭操作; 均值滤波; 缺陷检测; 磁钢

**中图分类号:** TH878; TP274.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2014)12-1541-06

## Machine vision based defect detection on magnetic steel sheet

ZHOU Jiang, REN Kun, SHUAI Ying-qi, CHEN Ying-hao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at low manual detection efficiency, high rate of false detection and high labor intensity, defect types and characteristics of magnetic steel sheet were researched, and the process of detection was analyzed, an algorithm based on machine vision was proposed to achieve automated defect detection of magnetic steel sheet. The area of the target region, obtained by means of the closing operation and binarization, was compared with the template to select missing corner and adhesion defects. The mean filter was used to smooth the initial image, the gray value difference operation was utilized between the resulting image and the template image, and then the region with gray value more than a predetermined value was selected to mark the defect of crack or crystallization. The results indicate that the algorithm can determine the defects of missing corner, adhesion, crystallization and crack with 10% higher in accuracy than manual detection, improved the detection efficiency and reduces labor.

**Key words:** machine vision; binarization; closing operation; mean filter; defect detection; magnetic steel

## 0 引 言

随着电子信息产业的高速发展,对高频电感元件(如高频变压器、小型电感器等)的需求越来越大,磁钢片作为电感元件的主要组成部分,广泛应用于电子、机械、医疗器械、玩具、以及航天航空等领域<sup>[1-2]</sup>。磁钢片置于钢制模具中的粉末压制成型,成型过程中,混入杂质时容易产生裂纹、粘连、结晶及掉角缺陷<sup>[3]</sup>,如直接

使用带缺陷的磁钢片,将给电感原件整体可靠性带来负面影响。如何在使用前对磁钢片进行缺陷检测,以避免带缺陷磁钢片的使用是后续产品整体质量的重要保证。目前,研究人员主要采用人工目视的方法检测和微磁检测方法<sup>[4]</sup>,人工目视检测方法需要翻转实现缺陷检查,工作效率低,特别当检测数量较大时,容易产生视觉疲劳,导致缺陷诊断的一致性和准确性无法得到保证,产生由主观因素造成的较大误差。微磁检测方法采用微磁传感器检测磁钢的裂纹缺陷,但是

收稿日期: 2014-08-22

作者简介: 周 江(1989-),男,浙江绍兴人,主要从事纺织机械自动化控制方面的研究. E-mail: zhoujiangdede@126.com

通信联系人: 任 锟,男,副教授,硕士生导师. E-mail: renkun\_2008@sina.com

无法检测粘连、结晶及掉角缺陷。目前还没有学者提出对磁钢片的裂纹、粘连、结晶及掉角缺陷进行完整地系统检测方法。

随着数字化图像处理技术和计算机视觉技术的不断进步,通过工业相机配合特定的光源、镜头获取目标物体的图像,采用数字图像处理技术<sup>[5]</sup>,实现表面裂纹检测<sup>[6-10]</sup>、表面损伤检测<sup>[11]</sup>以及轮廓形状检测<sup>[12]</sup>的方法已经得到了广泛应用。

本研究针对磁钢片人工检测效率低、误差率高以及劳动强度大等问题,提出基于机器视觉的磁钢片缺陷检测算法,通过二值化和闭操作对图像进行预处理,将目标区域面积与模板区域面积进行比较,实现零件掉角和粘连缺陷检测。采用均值滤波算法对初始图像平滑处理,对所得图像与模板图像对应像素灰度值进行作差运算,选出差值大于规定值的区域,实现磁钢片结晶和裂纹缺陷检测。

## 1 检测系统的建立

### 1.1 缺陷的分类及特征

磁钢片如图1所示。其主要缺陷有裂纹、结晶、掉角及粘连。

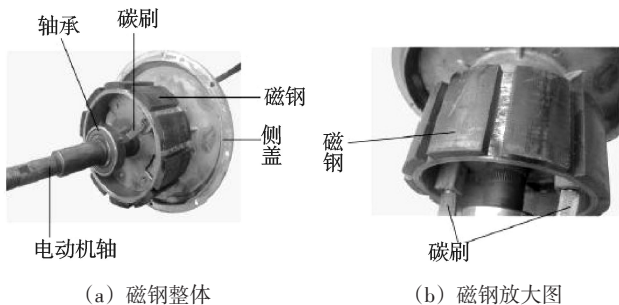


图1 磁钢

表面有结晶的磁钢片如图2(a)所示。

结晶区域的灰度值较周围区域的灰度值小,产生裂纹的磁钢片如图2(b)所示。

裂纹区域的灰度值也小于周围区域灰度值。掉角的磁钢片如图2(c)所示。其所占面积小于相同视野和焦距下标准模板所占区域面积。

而粘连的磁钢片如图2(d)所示。其所占区域面积大于模板区域面积。

因此,掉角和粘连的磁钢片可通过所占区域面积来检测缺陷,大于或者小于模板合格面积区间的均为次品。而掉角和结晶缺陷的磁钢片可通过灰度值小于周围区域这一特征来实现其缺陷检测。

### 1.2 视觉系统的构成

由于检测时磁钢片在传送带上匀速运动,当采用

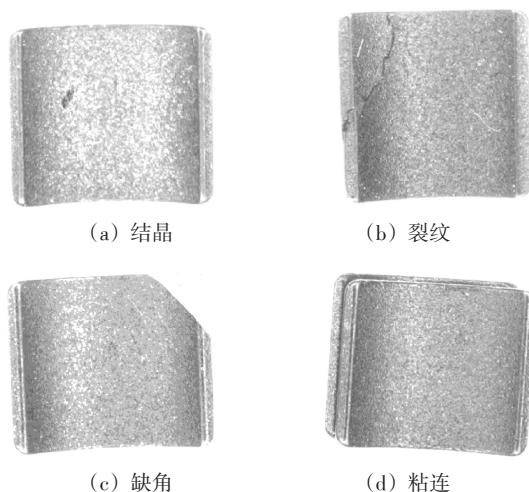


图2 磁钢片特征

面阵相机时,传送带速度达到1 m/s时所拍摄的图像已不清晰,无法实现检测要求,而线阵相机与面阵相机相比,只有一行感光元件,能够实现高扫描频率和高分辨率,达到在高速运动时获取满足磁钢片缺陷检测要求的清晰图像。实验中视觉检测系统中主要由日本comptar百万像素镜头、LED光源、美国Teledyne DALSA公司的线阵CCD相机以及计算机。视觉系统识别框图如图3所示。

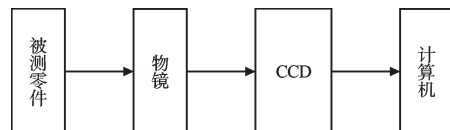


图3 视觉系统识别框图

实验采用的线阵相机Spyder3 SG-14-01K80是千兆网工业数字相机,无需图像采集卡,所获得的图像直接由计算机保存并处理。高像素相机配以合适的高分辨率的镜头才能使两者的能力充分发挥。SG-14-01K80的分辨率为1 024,像素尺寸14.3  $\mu\text{m}$ ,根据纳奎斯特采样定理,1 mm内有 $N$ 条黑白线对,即 $N$ 条白线和 $N$ 条黑线,共 $2N$ 条线。本研究以摄像机的一个感光元对应以一条白线或黑线,那么摄像机在1 mm内需要有 $2N$ 个感光元来对应 $N$ 条白线和 $N$ 条黑线,摄像机的感光元密度就是 $2N/\text{mm}$ ,摄像机镜头选择原理如图4所示。

SG-14-01K80的像素密度为 $1/0.0143=69.93$ 。即每毫米对应约有70个像素,因此选择相机镜头的分辨率为 $70/2=35\text{ lp/mm}$ 。

相机和镜头必须配以合适的光源才能突显目标物体,选择光源的目标要求:

- (1) 增强待处理的物体特征;
- (2) 减弱不需要关注的物体和噪声的干扰;

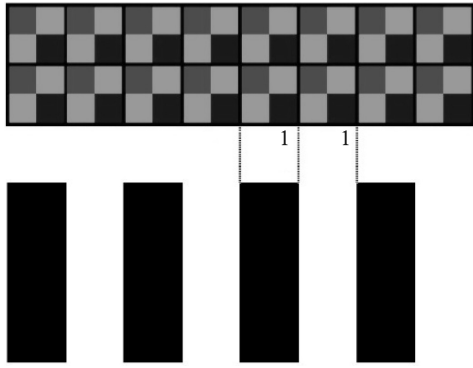


图4 摄像机镜头选择原理

(3) 不会引入额外的干扰<sup>[13]</sup>。

光源主要采用发光强、功耗低、散热小以及寿命高的LED光作为光源。由于被检测物体表面有凹凸,在一般光源容易产生阴影,而间接照射DOME灯,它是通过半球型的内壁多次反射,可以消除阴影。笔者通过实验验证间接照射DOME灯下拍摄出来的照片能有效地满足选择光源的要求。

## 2 检测算法

### 2.1 面积检测算法

一幅数字图像可定义为一个二维函数  $f(x, y)$ , 其中  $x$  和  $y$  是平面坐标, 在任一处空间  $(x, y)$  的幅值  $f$  称为图像在该点的灰度。相机所拍摄的灰度图像的灰度值范围为0~255。由于在相同视野、焦距以及光照条件下, 磁钢片在图像中所占区域像素尺寸是相同的, 所检测零件区域所占面积与标准模板所占区域面积的比较, 可转换为检测零件所占像素总数与标准模板所占像素总数之间的比较。

为使零件区域与背景区域分离出来, 需要对图像进行分割, 由于所检测的零件与背景之间的对比度较大, 本研究将图像二值化:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq f(x, y) \leq 250 \\ 0, & 250 < f(x, y) \leq 255 \end{cases} \quad (1)$$

由于零件材质原因部分表面产生较强的反射, 导致该区域的灰度值较大在二值化后被剔除了, 在区域内部产生空洞如图5所示, 若不作处理则将对面积的

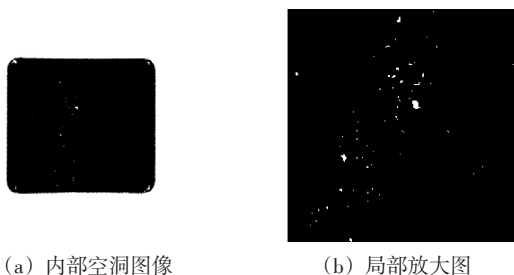


图5 典型的二值化图像

计算带来一定的误差。

为了消除内部空洞导致面积减小的误差, 必须对图像进行形态学闭操作, 即先对图像进行膨胀, 再进行腐蚀操作。

以图像函数来表示形态学运算操作的对象, 设  $g(x, y)$  为输入图像,  $b(x, y)$  为结构元, 结构元  $b$  对输入图像的膨胀记为  $g \oplus b$ , 定义为:

$$(g \oplus b)(s, t) = \max \{ g(s-x, t-y) + b(x, y) | (s-x, t-y) \in D_g \text{ 和 } (x, y) \in D_b \} \quad (2)$$

式中:  $D_g, D_b$  —  $g$  和  $b$  的定义域。

结构元  $b$  对输入图像的腐蚀记为  $g \ominus b$ , 定义为:

$$(g \ominus b)(s, t) = \max \{ g(s+x, t+y) - b(x, y) | (s+x, t+y) \in D_g \text{ 和 } (x, y) \in D_b \} \quad (3)$$

式中:  $D_g, D_b$  —  $g$  和  $b$  的定义域。

闭操作机理如图6所示。由D与A的对比可见闭操作消除了图形内部的细小空洞, 有效地满足了填补内部细小空洞的要求。

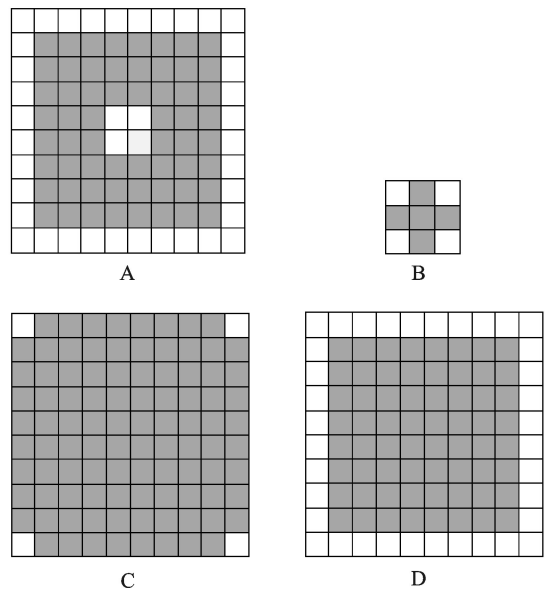


图6 闭操作机理图

A—原始图像; B—所构建的结构元; C—B结构元对A经过膨胀后的结果; D—B结构元对C进行腐蚀后的结果, 即D为A经过闭操作后的结果

在经过二值化和闭操作之后, 对于一副  $m \times n$  的图像, 计算区域所占像素总数如下式所示:

$$A = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n g(x, y) \quad (4)$$

将  $A$  值与合格区间作比较, 若在合格区间内, 则磁钢片合格; 若小于合格区间下限, 则磁钢片有掉角缺陷; 若大于合格区间上限, 则磁钢片为粘连缺陷。

### 2.2 裂缝及结晶缺陷检测算法

本研究在对100个裂纹缺陷样品的裂纹生长方向

进行统计时,发现裂纹走向均为如图7(a)所示的斜角,而由于受制造模具的影响,磁钢片凹侧中间部位容易在出模时产生结晶,出现晶斑(如图2(a)所示)。

为避免边缘棱角灰度值突变对裂纹缺陷的检测带来干扰,本研究综合裂纹缺陷的生长方向,结合结晶出现位置,对如图7(b)所示的黑色方框内的部分进行裂纹及结晶缺陷检测。

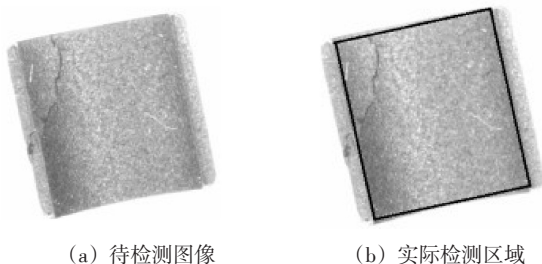


图7 检测区域

由于裂纹及结晶区域的灰度值对较周围区域的灰度值反差较大,而受零件形状(弧形)的影响,导致两边较中间部分弱,两边区域的灰度值较中间部分低,且两边的灰度值接近于裂纹的灰度值,若采用灰度值二值化来提取裂纹区域将带来极大的干扰,无法准确地检测出裂纹及结晶区域,因此本研究采用先对实际检测区域进行均值滤波,针对滤波后得到的数字图像与原图像灰度值进行作差运算,求出差值满足条件的区域。

使用3×3邻域的线性空间滤波机理如图8所示。

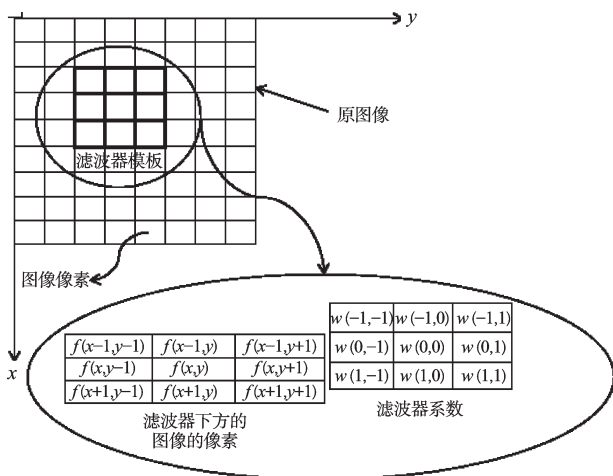


图8 大小为3×3的滤波器模板的线性空间机理

图像任一点 $(x,y)$ ,滤波器响应 $g(x,y)$ 是滤波器系数与该滤波器包围的图像像素的乘积之和:

$$g(x,y) = w(-1,-1)f(x-1,y-1) + w(-1,0)f(x-1,y) + \dots + w(0,0)f(x,y) + \dots + w(1,1)f(x+1,y+1) \quad (5)$$

滤波器的中心系数 $w(0,0)$ 对准位置 $(x,y)$ 的像素。综合所处理图像的目标特征,该实验采用21×21领域的

线性空间滤波器,则对应的 $g(x,y)$ 可由下式表示:

$$g(x,y) = \frac{\sum_{s=-10}^{10} \sum_{t=-10}^{10} w(s,t)f(x+s,y+t)}{\sum_{s=-10}^{10} \sum_{t=-10}^{10} w(s,t)} \quad (6)$$

其中: $x$ 和 $y$ 是可变的, $w$ 中的每个系数都可以访问数字图像的每个像素,当 $w$ 中心访问的对象在 $f$ 的边界时,可以对边界进行适当的填充,以3×3滤波器对图像第一个像素进行访问为例。边界的填充元素均为0,其示意图如图9所示。

$$\begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \quad \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ & 1 & 1 & 1 \\ & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

(a) 填充前

(b) 填充后

图9 边界填充

本研究采用的滤波系数 $w$ 为21×21的矩阵:

$$w = \frac{1}{21} \times \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

为选出裂纹区域,本研究将经过均值滤波后的图像与原图像的灰度值作差运算。设 $g_o$ 为原始图像, $g_m$ 为经过均值滤波后的图像,参数 $offset$ 为处理时所设置的界限,

$$g_o \leq g_m - offset \quad (7)$$

本研究将满足式(7)的像素点提取出来,所得到的区域即为裂纹或结晶区域。

### 3 缺陷检测实验

#### 3.1 图像的获取

磁钢片缺陷检测系统示意图如图10所示,磁钢片放置在料斗里,经上料输送带把被检测零件移动到整列输送带上,在整列机构的作用下,零件会比较整齐有序地排列在输送带上,通过调节伺服电机转速可以调节出料速度,整列输送带上的物件在分离盘的作用下移至工作台上,调节分离盘步进电机转速和工作台伺服电机转速可获得被检测物件之间的间距。工作

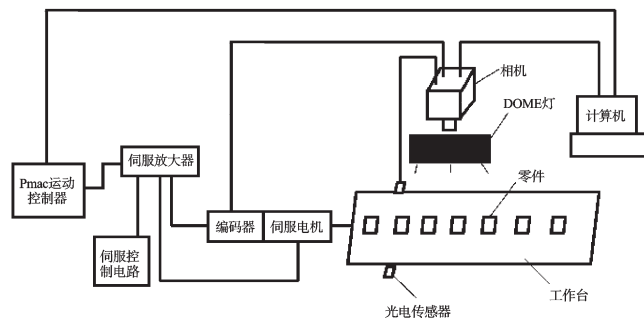


图10 磁钢片缺陷检测系统

台在水平方向向右移动,在检测过程中,光电传感器一旦感知到零件经过,便产生一个触发信号给线阵相机,线阵相机在接收到光电开关传来的外部触发信号后,开始计数延时工位,当零件到达线阵相机拍摄工位时,相机开始拍照。完成拍照后,通过千兆网络将图像传给计算机,并开启检测程序,进行表面检测。当检测到物件为次品时,电磁阀打开,气体经过吹管将次品剔除至缺陷料斗里,并计数。次品最后检测结果显示在用户界面。

### 3.2 缺陷检测

在获取图像后,程序开始对所得到的图像进行缺陷检测,由缺陷检测流程(如图11所示)可知,首先进行目标区域进行提取,原图像经过二值化和闭操作后所得的结果如图12所示。

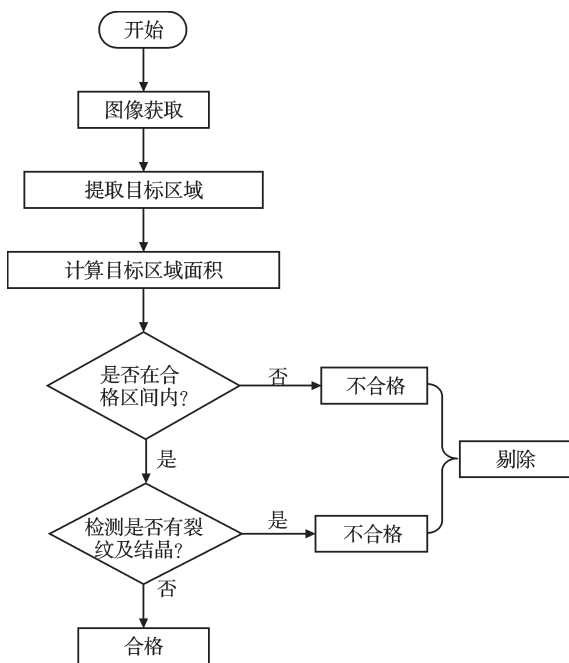


图11 零件检测流程图

本研究运用式(4)计算提取出的区域面积,将所得的值与标准磁钢片的合格区间作比较,标准磁钢片合格区间为经过大量合格磁钢片面积进行数理统计所获得。

当获得磁钢片面积时,本研究将数据与合格区间进行比较,若大于合格区间则为粘连缺陷,若小于合格区间则为掉角缺陷,因此不在合格区间内的磁钢片均为次品,直接由吹管将其剔除至缺陷料斗里并计数。

当磁钢片所占区域面积在合格区间内时,由缺陷检测流程图(如图11所示)可知,程序进入裂纹及结晶缺陷检测阶段,首先提取出检测裂纹及结晶的区域,进行均值滤波,均值滤波前、后如图13所示。

本研究将经过均值滤波的图像与原图像灰度值

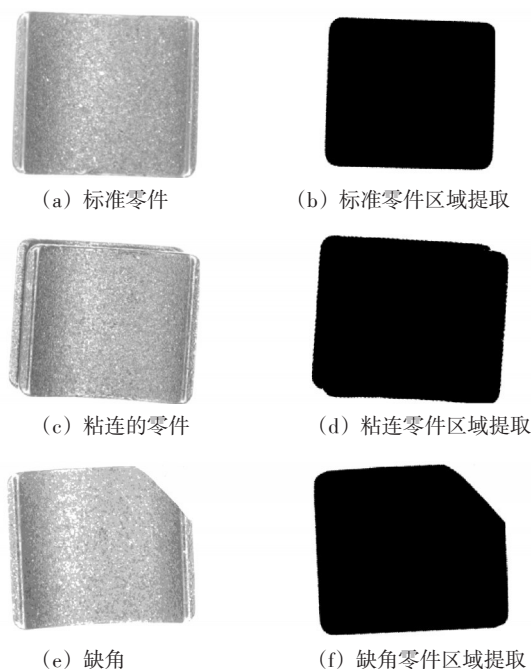


图12 区域提取

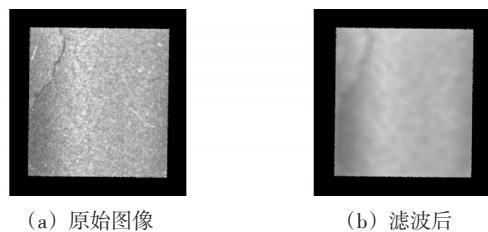


图13 均值滤波前、后对比

作差运算,将满足式(7)的区域提取出来,若提取出来的区域为空,则所检测的磁钢片为合格,当区域不为空时,则为有裂纹或结晶缺陷的磁钢片,打开电磁阀,气管将其剔除并计数。裂纹及结晶缺陷检测示意图如图14所示,红色部分为检测出的裂纹及结晶缺陷。

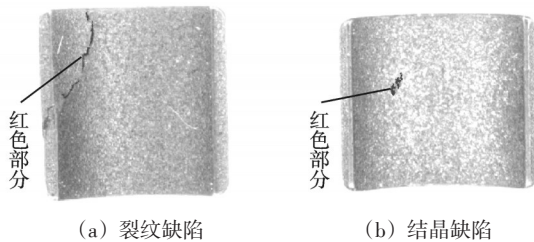


图14 裂纹及结晶缺陷检测

图7(a)所检测出的裂纹缺陷在用户界面中显示的界面示意图如图15所示。

### 3.3 检测结果分析

本研究对相同的1 000个磁钢片分别进行人工目视检测和实验所提出的基于机器视觉的磁钢片自动化缺陷检测,记录每次实验的时间和缺陷率,记录所



图15 裂纹识别

得的多次实验数据如表1~3所示,并对所得的多次实验结果进行分析与验证。得出的检测精度提高了10%,检测效率提高了30%。

表1 检测时间表

|      | 检测时间 $t/m$ |     |     |     |
|------|------------|-----|-----|-----|
|      | 第1组        | 第2组 | 第3组 | 第4组 |
| 人工检测 | 45         | 42  | 50  | 43  |
| 自动检测 | 32         | 33  | 33  | 32  |

表2 缺陷率表

|      | 缺陷率 $u/\%$ |     |     |     |
|------|------------|-----|-----|-----|
|      | 第1组        | 第2组 | 第3组 | 第4组 |
| 人工检测 | 3.3        | 2.8 | 2.7 | 3.2 |
| 自动检测 | 4.0        | 4.1 | 4.0 | 4.0 |

表3 误检率表

|      | 误检率 $w/\%$ |     |     |     |
|------|------------|-----|-----|-----|
|      | 第1组        | 第2组 | 第3组 | 第4组 |
| 人工检测 | 0.7        | 1.2 | 1.3 | 0.8 |
| 自动检测 | 0          | 0.1 | 0   | 0   |

## 4 结束语

本研究提出了一种将机器视觉应用到磁钢片缺陷检测的方法,针对视觉系统所获得的图像通过缺陷检测算法判断磁钢片是否有缺陷,有效地克服了人工

检测的主观性带来的误差和低效。笔者提出了一种速度快、准确度高和检测结果客观的算法,有效地满足了磁钢片生产过程中对次品的缺陷检测的需求,检测精度提高了10%,检测效率提高了30%,降低了劳动力和企业生产成本。

本研究提出的算法可运用于零件表面缺陷区域与周围区域灰度值有差异的表面缺陷检测,以及适用于检测与标准零件表面面积有一定差异的缺陷零件。

## 参考文献(References):

- [1] 黄宇,敬勇,孙钦,等. 铁铝硅软磁材料的应用及发展[J]. 金属材料与冶金工程,2013,41(2):53-57.
- [2] 晏强,朱瑞,胡顺,等. 磁性材料(软磁)行业市场发展现状与对策[J]. 产经透视,2013(12):70-71.
- [3] 刘军. 粉末冶金与陶瓷成型技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [4] 于润桥,付鑫,夏桂锁,等. 钕铁硼磁钢微磁检测方法及试验研究[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版,2014,30(4):92-96.
- [5] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine Vision Algorithms and applications[M]. Germany: Wiley, 2008.
- [6] 杨攀,姜立军,李哲林. 基于机器视觉的螺纹零件头部裂纹检测[J]. 计算机应用与软件,2013,30(4):51-54.
- [7] 王恒迪,孙二东,刘翠萍. 基于机器视觉的轴承套圈漏车加工工序的检测方法[J]. 机械,2013(9):77-80.
- [8] 张亚军,齐杏林,董成基. 基于机器视觉的枪弹钢芯自动检测系统[J]. 兵工自动化,2012(7):12-15.
- [9] GUNATILAKE P, SIEQEL M W, JORDAN A G, et al. Image Understanding Algorithms for Remote Visual Inspection of Aircraft Surface[C]//Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering. SanJose: [s. n.], 1997:2-13.
- [10] P M J, WRIGHT A, LODGE R. Automatic Identification of cracks in road surfaces[J]. Image Processing and Its Applications, 1999(2):671-675.
- [11] 王丹民,康勇. 钢板表面质量机器视觉检测系统设计[J]. 自动化仪表,2011,32(3):44-46.
- [12] 彭向前,陈幼平,余文勇. 一种基于机器视觉的浮法玻璃质量在线检测系统[J]. 制造业自动化,2007,29(12):50-52.
- [13] 朱宝伟. 机器视觉中的光源照明设计[J]. 电子科技, 2013,26(3):80-82.

[编辑:李辉]

## 本文引用格式:

周江,任锐,帅英琦,等. 基于机器视觉的磁钢片缺陷检测研究[J]. 机电工程,2014,31(12):1541-1546.

ZHOU Jiang, REN Kun, SHUAI Ying-qi, et al. Machine vision based defect detection on magnetic steel sheet[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(12):1541-1546.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>