

# 分层提取匹配印刷电路板元器件缺陷检测

赵翔宇<sup>1</sup>, 周亚同<sup>1</sup>, 何峰<sup>1</sup>, 王帅<sup>2</sup>, 张忠伟<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学电子信息工程学院, 天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401;

2. 北京市安视中电科技有限公司, 北京 100871)

**摘要:** 文中提出了一种基于数学形态学与种子填充相结合的分层提取匹配算法, 检测印刷电路板 (PCB) 中的贴片电阻和电容丢失与立碑、集成电路 (IC) 芯片丢失与极性错误等缺陷。算法分为 PCB 图像预处理、分层提取、模板分类匹配 3 部分。算法的关键在于消除无关信息干扰并通过种子填充算法对各类元器件进行分层提取, 然后将不同元器件分别进行基于单链表的模板分类匹配。本算法在检测长度为 19 cm、宽度为 13.5 cm 的 PCB 样本时, 在确保精度为 0.1 mm 以上的情况下最快检测速度可以达到 2 s/块。

**关键词:** 机器视觉; 电路板元器件检测; 数学形态学; 种子填充; 分层提取; 模板分类匹配

中图分类号: TB487

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2018)08-0084-06

## Hierarchical Extraction Matching Printed Circuit Board Components Defect Detection

ZHAO Xiang-yu<sup>1</sup>, ZHOU Ya-tong<sup>1</sup>, HE Feng<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>, ZHANG Zhong-wei<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology,

Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, Tianjin 300401, China;

2. Beijing An shi zhong dian Technology Co., Ltd., Beijing 100871, China)

**Abstract:** A hierarchical extraction classification matching algorithm based on mathematical morphology and seed filling is proposed to detect the defects of printed circuit board (PCB) include the missing and cocked of chip resistors and capacitors also include the missing and polarity errors of IC chip. The algorithm is divided into three parts: PCB image preprocessing, hierarchical extraction and template classification. The key to the algorithm is to eliminate irrelevant information interference and the various components of PCB are extracted by seed filling algorithm. And then different components were based on single-linked list of template classification and matching. This algorithm is used to detect PCB samples with a length of 19 cm and a width of 13.5 cm, in the case of ensuring a precision of 0.1 mm or more, the fastest detection speed can be up to 2 sec/block.

**Keywords:** machine vision; circuit board components detection; mathematical morphology; seed filling; layered extraction; template classification match

### 0 引言

印刷电路板 (printed circuit board, 简称 PCB) 越来越精细化和高密度化<sup>[1]</sup>。传统的人工印刷电路板缺陷检测手段由于效率低、准确率差等原因已经不再适用<sup>[2-3]</sup>。机器视觉现已成为高密度 PCB 的主要检测手段<sup>[4-5]</sup>。目前机器视觉检测系统主要由工业相机、镜头、光源<sup>[6]</sup>等硬件和算法软件架构而成<sup>[7]</sup>, 其检测 PCB 的缺陷主要分为 3 个方向:

(1) PCB 纹路检测: PCB 加工初始, 会对电路板进行蚀刻操作, 而在蚀刻时纹路的断裂会导致整体电路无法运行。李正明等提出了一种基于数字图像处理的 PCB 缺陷检测算法<sup>[8]</sup>, 利用标准图像与待检测图像进行对比, 通过连通域数与欧拉数相结合, 来检测电路板中纹路出现的多线、少线、断线等缺陷。

(2) PCB 锡点检测: 对带有纹路的电路板进行镀锡操作时, 由于机械因素会导致多锡或少锡等缺陷, 因此, 谢宏威等提出了一种基于增量聚类的智能锡点缺陷检测算法<sup>[9]</sup>。作者根据锡点外观归纳分类, 将关键子区域的面积特征应用于焊盘特征的提取与分类, 从而实现对多批次不同锡点检测。

(3) PCB 元器件检测: 将贴片电容、贴片电阻、集

基金项目: 中国博士后基金 (F2013202254); 河北省自然科学基金 (E2016202341); 教育部人文社会科学研究规划基金 (15YJA630108); 2017 年省级研究生创新资助项目 (CXZZSS2017035)

收稿日期: 2017-06-30

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成电路芯片(integrated circuit chip, 简称 IC 片)等元器件安装在 PCB 基板上时,会发生漏装、装反、安装不严等情况。为此程良伦等提出了一种基于二值投影的 PCB 元器件安装缺陷检测算法<sup>[10]</sup>,通过对比元器件  $x$  和  $y$  方向的二值投影来检测出元器件是否存在缺陷。但是这种算法只是针对单独个体元器件的缺陷检测。而不同元器件的特性不尽相同,当检测整块 PCB 时误检率很高。

对于目前 PCB 中元器件的缺陷检测,传统算法都是基于整体识别。然而由于一块完整的 PCB 中包含的元器件以及元器件间的关系十分复杂,导致检测算法普遍存在着效率低、误检率高等问题。张静等在检测 PCB 中焊盘、钻孔是否存在缺陷时提出了一种采用 Gerber 文档的 PCB 表观检测算法<sup>[11]</sup>,引入 Gerber 文档对 PCB 光电图像分层处理,并利用形态学自动修正解析后的 Gerber 文档,建立精确标准板。虽然上述算法并没有检测 PCB 中元器件的缺陷,但是这种分层处理思路值得借鉴。

## 1 本文算法

本文算法主要包括图像预处理、分层提取、模板分类匹配 3 个部分。图像预处理又细分为图像定位、图像矫正、图像剪裁 3 个步骤,算法的具体架构图如图 1 所示。

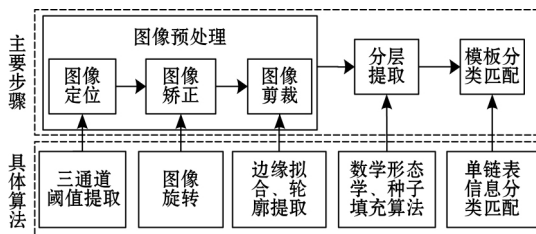


图 1 PCB 缺陷检测算法架构

从图 1 看出,本文首先通过数学形态学<sup>[12]</sup>滤除无关信息干扰,然后利用种子填充算法<sup>[13]</sup>根据三通道特征信息将 PCB 中的元器件分层提取出来,并在提取的过程中通过 RGB 和 HIS<sup>[14]</sup>两个颜色空间的相互转换,最终将贴片电容、贴片电阻、IC 片归为不同类别,并分别将其与模板对比匹配,实现精确匹配检测。

## 2 PCB 图像预处理

如图 2 所示,由于工人在放置 PCB 的过程中很难使之保持水平,若想对其进行缺陷检测,首先需要将每一块 PCB 进行相对位置矫正,即将 PCB 中特有的标定点作为基准点,通过定位基准点与图形数学变换使 PCB 图像实现对准。

在 PCB 生产初始,各大生产商已经为 PCB 定位

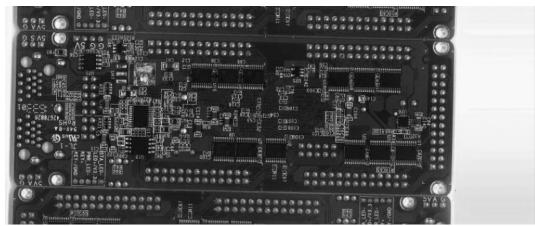


图 2 待检测 PCB 图像

提供了若干标定点,例如图 2 中的 PCB 左上与右下两个位置就有此标定点,放大后如图 3 所示。

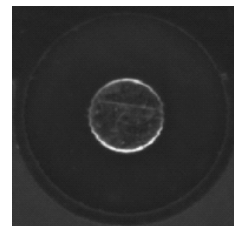


图 3 标定点图

现提取图 3 所示标定点并获得其位置信息,以供下一步图像矫正使用。熊光洁等曾提出一种快速提取标定点的算法<sup>[15]</sup>,该算法的优点在于采用了自适应阈值处理图像,但由于将彩色图像变换成了灰度图像,失去了很多可用信息。考虑到三通道图像的可用信息要高于单通道图像,因此本文基于三通道图像进行阈值提取,最终得到标定点。

提取标定点之后,通过 PCB 中左上与右下两个标定点可以求出整体 PCB 偏移的角度,根据此角度可以将 PCB 的上边缘线归置到水平位置。经过旋转归置后的图像如图 4 所示。

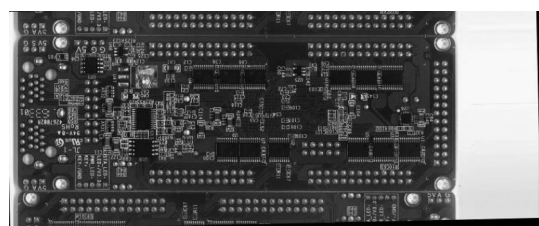


图 4 旋转归置后的图像

PCB 在传送带上传输的过程中,例如图 4 中,包含一个待检测 PCB、两个相邻 PCB 的边缘部分、白色的传送带以及由于图像旋转所造成的黑边现象。因此图像预处理的最后一步是提取一块完整的 PCB 图像。乔闹生等曾提出一种应用于 PCB 图像的边缘信息提取算法<sup>[16]</sup>,本文以此为基础提取 PCB 图像,最终提取的一个完整 PCB 图像如图 5 所示。

## 3 数学形态学与种子填充相结合的分层提取

目前对于元器件的分层提取,主要是基于像素值进行。在整块 PCB 中,由于 IC 片面积大,像素值低最易提

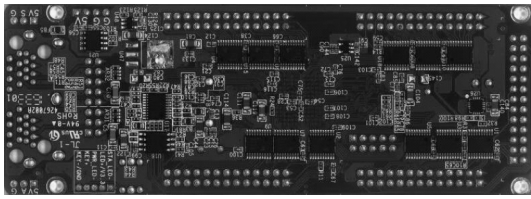
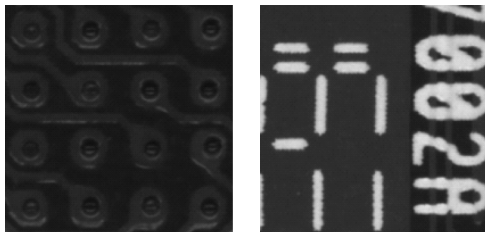


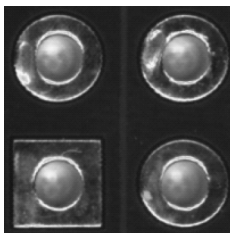
图5 剪裁后的完整PCB图像

取,而贴片电容和贴片电阻由于其密集化、精细化等特性,提取难度大,并且在提取过程中存在很大的干扰因素。具体干扰大致分为3类:PCB在基板生产过程中蚀刻所留下的纹路;为了方便用户在PCB上印刷的元器件标注信息;PCB加工镀锡后,锡点和锡盘所带来的干扰<sup>[17]</sup>。PCB的具体干扰图像如图6所示。



(a) 基板纹路干扰

(b) 标注信息干扰



(c) 焊盘焊锡干扰

图6 从PCB上提取的干扰图像

因此,本文首先通过腐蚀运算将PCB中蚀刻纹路和油漆标注的图像腐蚀干净,然后通过种子填充法分层提取IC片、贴片电容和贴片电阻,并剔除焊盘焊锡干扰。在分层提取过程中,对于贴片电阻和IC片是在RGB空间上提取的,而对于贴片电容则是在HIS空间上提取的。HIS空间是从人的视觉系统出发,直接使用颜色三要素作为分量,即色调(hue)、饱和度(saturation)和亮度(intensity)。HIS空间中的3个分量可以由RGB的3个分量换算而来,具体换算公式如下:

$$H = \begin{cases} \theta (B \leq G) \\ 360 - \theta (B > G) \end{cases} \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{3} (R + G + B) \quad (2)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)] \quad (3)$$

其中:

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-G)(G-B)]^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

分层提取贴片电容时主要利用HIS空间中的H分量。PCB的H分量图像如图7所示,贴片电容的H分量图像如图8所示。

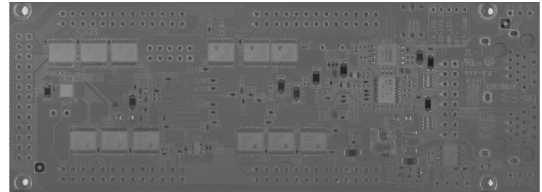


图7 PCB的H分量图像

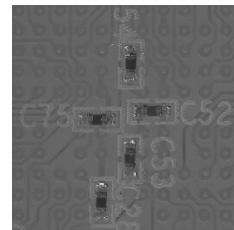


图8 贴片电容的H分量图像

数学形态学与种子填充相结合的分层提取步骤如下:

- (1) 首先获取PCB图像的宽和高;
- (2) 定义一个二维数组,用来储存自己设定的 $3 \times 3$ 结构元素(结构元素根据PCB中的“油漆字”图像信息而定);
- (3) 为了防止越界,不处理最左、最右、最上和最下4个边上的像素,而从图像的第二行第二列开始将三通道的像素值都赋为0,利用结构数组判断该像素的八邻域中是否全为前景点,将符合条件的像素的灰度值赋为255,否则灰度值保持不变;
- (4) 循环步骤(3),直到处理完所有像素;
- (5) 定义一个二维数组,用来存储自己设定的 $3 \times 3$ 结构元素(结构元素根据PCB中的“纹路”图像信息而定);
- (6) 循环步骤(3),直到处理完所有像素;
- (7) 图像腐蚀完成后,设定IC片三通道阈值范围 $[a_1, b_1]$ ;重新从PCB图像的左上角坐标为(0,0)点开始全图遍历搜索;
- (8) 当遍历搜索到满足阈值范围 $[a_1, b_1]$ 的像素点后,就将此点作为种子点,并将其三通道值都填充为255;
- (9) 从此点开始,继续搜索与此点相邻的邻域(4邻域或8邻域);
- (10) 若有满足阈值范围 $[a_1, b_1]$ 的像素点,那么

这一点将成为新的种子点,并将其三通道值填充为 255,然后重复步骤(2);

(11) 当种子的邻域搜索不到满足阈值范围的像素点时搜索结束,将之前所填充的一片区域作为一个连通域,并判定这就是一个 IC 片;

(12) 继续向下遍历 PCB 图像,并重复(8)~(11)步的操作,直到最终将连通域即 IC 片的全貌提取出来。

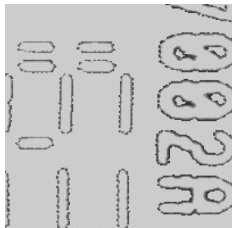
(13) 将提取出的贴片电阻和贴片电容的信息,包括中心  $x$  坐标、中心  $y$  坐标、重心  $x$  坐标、重心  $y$  坐标、长、宽和面积都存入单链表中,命名为 IC 片链表;

(14) 重新设定贴片电容的三通道阈值范围  $[a_2, b_2]$  重复(7)~(13)操作,将其中的  $[a_1, b_1]$  改为  $[a_2, b_2]$ ,最终将链表命名为贴片电容链表;

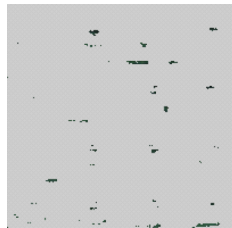
(15) 重新设定贴片电阻的三通道阈值范围  $[a_3, b_3]$  重复(7)~(13)步骤,将其中的  $[a_1, b_1]$  改为  $[a_3, b_3]$ ,最终将链表命名为贴片电阻链表;

(16) 对贴片电容链表和电阻链表中的信息进行过滤,滤除长宽比小于 1.2 的连通域信息(由于锡盘为标准正方形,而贴片电阻和贴片电容都为长方形,因此用长宽比滤除锡盘),则最终得到的 3 个单链表全为元器件信息。

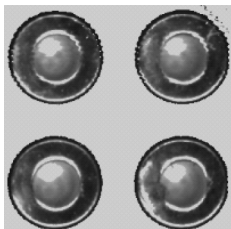
经过以上步骤,可获得标注信息干扰、基板纹路干扰和焊盘焊锡干扰图像如图 9 所示。



(a) 标注信息干扰的处理图



(b) 基板纹路干扰的处理图



(c) 焊盘焊锡干扰的处理图

图 9 各种干扰处理图像

PCB 图像在去除各种干扰后,结果如图 10 所示。从图 10 中可见,标注信息干扰和基板纹路干扰都得到了很好消除,但焊盘焊锡干扰由于其具有反光性,导致三通道值不固定,最终消除效果并不明显。因此需要通过种子填充算法在分层提取元器件的过程中,利用连通域的形状信息将其完全滤去。最终提取元器

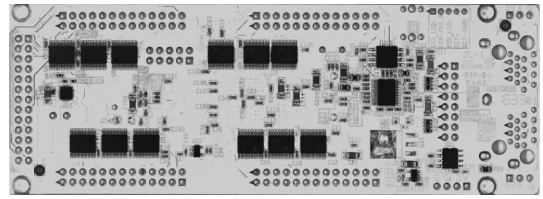
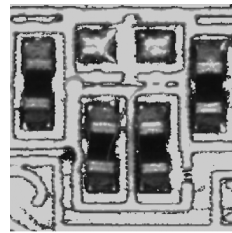
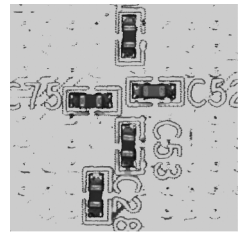


图 10 处理后的 PCB 图像

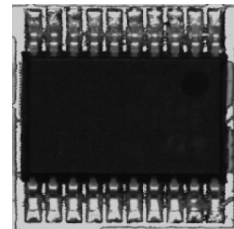
件如图 11 所示。



(a) 提取的电阻



(b) 提取的电容



(c) 提取的 IC 片

图 11 从 PCB 中提取的元器件图像

#### 4 模板分类匹配

在 PCB 自动检测领域,模板匹配是应用广泛的算法<sup>[18]</sup>,但是传统模板匹配都是将 PCB 作为一个整体来对待,没有考虑到不同元器件之间的差异对模板匹配带来的影响。因此本文为了充分利用分层提取元器件的优势,提取一种新的基于单链表的模板分类匹配算法。

具体步骤如下:

(1) 分别创建 2 个包含 7 个成员的结构体 StrSrc 和 StrCur。

(2) 获取模板单链表头指针,并将第一个结点数据域中存储的数据信息(贴片电阻的面积、左边界  $x$  坐标、右边界  $x$  坐标、上边界  $y$  坐标、下边界  $y$  坐标、重心  $x$  坐标、重心  $y$  坐标)赋予结构体 StrSrc。

(3) 获取当前待检测单链表头指针,并将第一个结点数据域中存储的数据信息(贴片电阻的面积、左边界  $x$  坐标、右边界  $x$  坐标、上边界  $y$  坐标、下边界  $y$  坐标、重心  $x$  坐标、重心  $y$  坐标)赋予结构体 StrCur。

(4) 将结构体 StrSrc 中的 7 个单元信息与结构体 StrCur 中的 7 个单元信息进行整理,即通过左边界  $x$  坐标、右边界  $x$  坐标、上边界  $y$  坐标和下边界  $y$  坐标单

元得到贴片电阻的中心坐标。因此,最终需要匹配的  
为贴片电阻面积、中心坐标( $x_1, y_1$ )和重心坐标( $x_2, y_2$ ) 3 个信息。

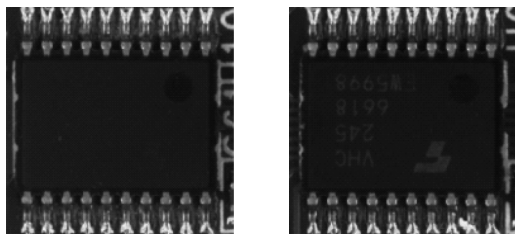
(5) 根据精度要求,设置面积误差  $e_1$  和位置误差  $e_2$ 。将操作(4)中得到的两组信息做减运算,若面积、位置运算结果分别小于误差  $e_1$  和误差  $e_2$ ,则用绿色框标记 StrCur 所对应的贴片电阻,若位置运算结果小于误差  $e_2$ ,面积运算结果大于  $e_1$ ,则用黄色框标记 StrCur 所对应的贴片电阻,记为立碑缺陷。

(6) 若面积、位置运算结果分别大于误差  $e_1$  和误差  $e_2$ ,则将当前待检测单链表指向下一个结点,并重复操作(4)和操作(5),直到遍历至单链表的尾结点为止,若面积、位置运算结果总是大于误差  $e_1$  和误差  $e_2$ ,则用红色框标记 StrSrc 所对应的贴片电阻,记为丢失缺陷。

(7) 将模板单链表指向下一个结点,并将结点数据域中存储的数据信息重新赋予结构体 StrSrc,重复操作(3)~(6)。

(8) 重复操作(7),直到遍历至单链表的尾结点为止。

由于 IC 片存在丢失和极性错误两种缺陷,因此,IC 片检测要与贴片电容和贴片电阻检测方式不同。某典型 IC 片的图像如图 12 所示。



(a) 字迹模糊的 IC 片 (b) 字迹清晰的 IC 片

图 12 IC 片图像

如图 12 所示,IC 片在生产过程中会在特定位置印刷一个特殊的标定点,这个标定点就代表着 IC 片的极性,控制 IC 片安装的正反<sup>[19]</sup>。其中具体标定点提取方法与第 1 节提取旋转标定点的算法相同。

### 5 实验部分

目前,PCB 缺陷检测系统的硬件组成器件含有:分辨率为 4k 的 DALSA( CCD) 灰度线阵相机<sup>[20]</sup>、焦距为 35 mm 的 Ricon 镜头、线阵冷光源、工控机、传送带、外接同轴编码器与激光传感器。DALSA 灰度线阵相机与 Ricon 镜头组成图像采集模块,当激光传感器感应到 PCB 进入相机采集范围内,通过同轴编码器外触发相机进行拍摄。软件代码语言为 C++,运行平台为

Microsoft Visual C++ 2010。具体运行平台如图 13 所示。

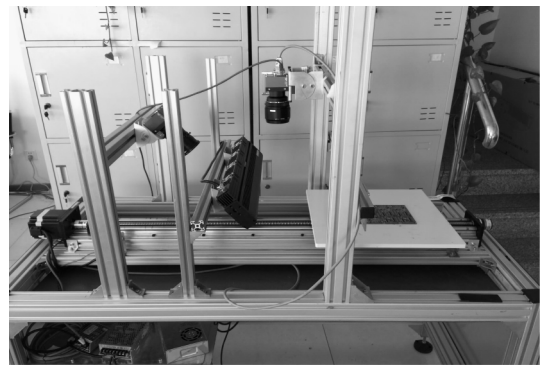


图 13 实验仿真平台图

对 PCB 样品在实验平台上进行重复性试验,6 种缺陷造成链表中连通域信息变化如表 1 所示。

表 1 缺陷效果

	连通域面积	连通域中心坐标
贴片电阻立碑	变小	变大或变小
贴片电阻丢失	零	零
贴片电容立碑	变小	变大或变小
贴片电容丢失	零	零
IC 片丢失	零	零
IC 片极性错误	不变	不变

其中 IC 片极性错误缺陷不会造成连通域信息变化,而 IC 片中的标定点连通域中心坐标会有差错。

### 6 结论

本文提出了一种基于数学形态学和种子填充相结合的分层提取分类匹配算法检测 PCB 元器件缺陷,具体缺陷包括贴片电容、贴片电阻的丢失与立碑,IC 片的丢失与极性错误。

总体算法分为图像预处理、分层提取和模板分类匹配 3 部分,其中图像预处理又细分为图像定位、图像矫正、图像提取 3 个步骤。在分层提取过程中,利用数学形态学和种子填充相结合滤除 PCB 上的各种干扰信息,然后分层提取贴片电容、贴片电阻和 IC 片,之后将贴片电容、贴片电阻和 IC 片分别存入单链表中,利用本文提出的基于单链表的模板分类匹配算法,最终检测元器件是否存在缺陷。

本文所供 PCB 样品长 19 cm、宽 13.5 cm,根据 AOI 性能指标评定标准<sup>[21]</sup>,用本文提出的缺陷检测算法检测此 PCB,经过重复性试验,在保证精度为 0.1 mm 以上的情况下最快速度可以达到 2 s/块。

参考文献:

[1] 武锦辉,闫晓燕,王高.基于无损检测的高分辨率 PCB 板

- 焊点缺陷检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2013(6): 90-92.
- [2] AYOUB G. Real-time SPC with AOI [J]. Surface Mount Technology Magazine, 2001, 15(6): 36-38.
- [3] SHIRVAIKAR M. Trends in automated visual inspection [J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2006, 1(1): 41-43.
- [4] 熊光洁, 马树元, 聂学俊, 等. 基于机器视觉的高密度电路板缺陷检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2011(8): 1824-1826.
- [5] MAR N S S, YARLAGADDA P K D V, FOOKES C. Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(5): 949-962.
- [6] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine Vision Algorithms and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [7] JUDI H M, KAPOYAH K, ASHAARINS. Visualising automatic product inspection of PCB units [C]//International Conference on Electrical Engineering and Informatics. IEEE, 2009: 204-207.
- [8] 李正明, 黎宏, 孙俊. 基于数字图像处理的印刷 PCB 缺陷检测[J]. 仪表技术与传感器, 2012(8): 87-89.
- [9] 谢宏威, 张宪民, 邝泳聪, 等. 印刷 PCB 焊点的智能检测[J]. 光学精密工程, 2011(9): 2154-2162.
- [10] 程良伦, 江伟欢. 基于二值投影的 PCB 元件安装缺陷检测算法研究[J]. 计算机工程与设计, 2010(3): 642-646.
- [11] 张静, 叶玉堂, 谢煜, 等. 采用 Gerber 文档的印刷 PCB 表面检测[J]. 光学精密工程, 2013(10): 2679-2687.
- [12] 向静波, 苏秀琴. 基于数学形态学的金字塔图像去噪[J]. 光子学报, 2009(2): 457-460.
- [13] 姜慧研, 冯锐杰. 基于改进的变分水平集和区域生长的图像分割方法的研究[J]. 电子学报, 2012(8): 1659-1664.
- [14] 黄飞, 吴敏渊, 曹开田. 基于 HIS 空间的彩色图像分割[J]. 小型微型计算机系统, 2004(3): 471-474.
- [15] 熊光洁, 马树元, 刘瑞祯. PCB 检测中圆 Mark 的快速精确定位[J]. 计算机工程, 2012(11): 211-213; 216.
- [16] 乔闹生, 张奋. 一种印刷 PCB 缺陷图像边缘信息提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2015(20): 11-15; 27.
- [17] 黄杰贤, 李迪, 叶峰, 等. 挠性印制 PCB 焊盘表面缺陷的检测[J]. 光学精密工程, 2010(11): 2443-2453.
- [18] LIAO C T, LEE W H, LAI S H. A flexible PCB inspection system based on statistical learning [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2012, 67(3): 279-290.
- [19] 吴晖辉, 张宪民, 洪始良. 综合边缘和颜色特征的 IC 类贴装器件的检测[J]. 光学精密工程, 2009(9): 2283-2291.
- [20] 李颖, 谭立新, 李斌. 基于机器视觉的 PCB 在线检测设备的图像采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2007(7): 43-45.
- [21] LOH H H, LU M S. Printed circuit board inspection using image analysis [J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 1999, 35(2): 426-432.
- 作者简介: 赵翔宇(1992—), 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与机器视觉。E-mail: 276861613@qq.com
- 通讯作者: 周亚同(1974—), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器学习与模式识别。E-mail: zyt@hebut.edu.cn

(上接第 83 页)

## 5 结束语

本文设计了一种基于单片机的电磁阀检测系统, 与传统的电磁阀检测装置相比, 该系统操作简单, 具有体积小、成本低等优点。后续可以对系统继续改进, 比如把单片机换成运算速率更快的 ARM 系列单片机, 设计液晶屏接口, 直接在液晶屏上显示电磁阀的检测结果, 对系统的算法进行深度优化, 提高检测的效率以及成功率。

参考文献:

- [1] 刘林林. 自动变速箱换挡电磁阀检测系统的设计与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [2] 朱均超, 张斌, 张宝峰. 电磁阀式喷油器电气特性检测系统[J]. 自动化与仪表, 2017, 34(11): 78-81.
- [3] 舒军辉. 电磁阀线圈综合性能检测系统的研制[D]. 杭州: 中国计量大学, 2015.

- [4] 何娜, 王擎宇, 芮万智. 电磁发射用直线感应电机位置检测系统[J]. 电机与控制科学, 2015, 25(11): 99-101.
- [5] 陈利翔, 邵振国, 张逸. 电磁式电流互感器谐波比值误差实验分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 35(4): 67-69.
- [6] 郭太平. 基于 ARM 和 LabVIEW 高频电磁涡流检测系统集成设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [7] 张威. 差分电磁式钢水液位检测系统的设计[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
- [8] 陈春亮. 电磁融合无损检测仪器设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [9] 张旭辉, 夏宏波, 吴海雁, 等. 电牵引采煤机远程控制系统通信模块设计与实现[J]. 工矿自动化, 2015, 41(8): 17-21.
- [10] 郭骥翔. 电磁式继电器寿命预测参数检测系统的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.

作者简介: 王强(1980—), 硕士, 讲师, 主要研究领域为汽车