

# 基于形态学的 PCB 缺陷快速检测技术

王 栋<sup>1</sup> 解则晓<sup>2</sup>

(中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)<sup>1</sup> (中国海洋大学工程学院 青岛 266100)<sup>2</sup>

**摘 要** 提出了一种基于数学形态学的 PCB 自动缺陷检测算法。在对测试图像进行距离变换时,将参考图腐蚀后的边缘作为感兴趣区域使用,边缘上的每个点都具有线路边界的相应距离信息。对边缘上的距离图像进行直方图分析后得出合格线路的距离信息,以该距离为参照,可以快速地检测出各种缺陷。结合轮廓特征的对比,其能够进行准确的缺陷类型识别。实验证明,所提算法能够快速检测出 PCB 图像中的各种缺陷,并能进行准确的自动分类识别。

**关键词** 印刷电路板检测,形态学处理,距离变换,缺陷检测

中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Novel PCB Defect Detection Based on Morphology Image Process

WANG Dong<sup>1</sup> XIE Ze-xiao<sup>2</sup>

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)<sup>1</sup>

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The automatic PCB optical defect detection algorithm based on mathematical morphology was promoted. The edge is extracted from referential image after erode operation. If the edge is used as the ROI for the distance transform of test image, each point on the edge will have the corresponding distance to the border of the track. Threshold of the distance image can rapidly detect defects of PCBs. Combined with the comparison of contour feature, the algorithm can accurately identify the types of defect. Experiments show that the algorithm can quickly detect all kinds of defects in PCB images, and can make accurate automatic classification and recognition.

**Keywords** Printed circuit board inspection, Morphology image processing, Distance transform, Defect detection

## 1 引言

PCB 的自动视觉检测是机器视觉领域的一个典型应用。PCB 中往往蕴含复杂而细微的图形,人工视觉检测易疲劳,经常发生漏判和误判。PCB 自动视觉检测系统不受人的主观因素影响,可以持续不断地快速进行检测,并且结果可以量化评估<sup>[1]</sup>。

近年来,出现了很多基于视觉的 PCB 缺陷检测算法,大致可分为参考法、非参考法和混合法<sup>[2]</sup>。参考法是将待检测 PCB 图像与标准 PCB 图像进行逐个点或者逐个特征比较,算法实现比较简单直观。其最普遍的方法是图像差分算法,但是两幅图像直接进行差分运算需要图像间精确的配准,光照、轻微偏移和变形等因素,都会使图像间的差分运算产生残差,造成误判。非参考法不需要标准 PCB 图像,直接根据 PCB 图形的设计规则来判断待检测 PCB 图像是否存在瑕疵。数学形态学处理常见于该类方法,形态学方法能够高效率计算线路的宽度,检测线宽和线距等缺陷。PCB 图像中复杂的图形需要复杂的运算来确定规则,运算复杂,而且不能检测满足规则的缺陷,如线路图形丢失。混合法结合参考法与非参考法,希望克服两种方法的缺陷,发挥各自的优势来完成检测。

许多学者提出了各种 PCB 缺陷检测算法,如文献<sup>[1]</sup>通

过检测焊孔间导体的连通性,形成连接信息表,通过对比参考图与测试图之间连接信息表的差异,实现快速的缺陷检测。文献<sup>[3]</sup>对图像进行数学形态学处理后得到线路骨架,分析骨架,得出焊孔间的连接信息,再进行缺陷检测。文献<sup>[4]</sup>采用边缘轮廓比对算法,找出参考图像与待测试图像中图形的差异。此类方法的突出优点是对参考图像与待测试图像间的配准精度要求低,能够准确检测出断路和短路等重大缺陷,但对线路上的宽度细小变化等潜在缺陷不敏感,如针孔、焊孔和线路位置偏离、腐蚀不足、腐蚀过度、马刺和鼠咬等<sup>[7]</sup>。

文献<sup>[5]</sup>改进了图像差分算法,通过异或、非、填充等操作实现了 PCB 缺陷检测和分类识别。文献<sup>[6]</sup>结合形态学分割和图像差分算法,首先将参考图进行形态学分割,将图像分割成方形、焊孔、粗线和细线 4 种图形元,再分别对这几种图形元进行差分处理,实现缺陷检测与分类。文献<sup>[7]</sup>首先提取标准 PCB 图像的骨架,再进行形状分解,形成三层的模板树。按照线路设计规则对骨架进行形态学处理后,再与待检测 PCB 图像进行对比,得出缺陷检测结果。文献<sup>[8]</sup>针对图像差分算法中产生的差影问题,采用形态学处理去除虚假缺陷。此类方法通过图像差分算法可以检测出各种重大和潜在缺陷,但需要对配准精度和照明等因素造成的差影进行处理。

文献<sup>[9]</sup>在对 PCB 图像进行增强、滤波和二值化等一些

王 栋(1979—),男,博士生,工程师,主要研究方向为机器视觉、图像处理与分析,E-mail:wangdong@ouc.edu.cn;解则晓(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为逆向工程、机器视觉、水下三维探测技术。

处理后进行粒子分析。测量图像中每个图形的各类参数作为标准模版,如周长、最远点间距离等,通过与参考图标准模版的对比,实现 PCB 缺陷检测。文献[10]将小波变换和多分辨率分析应用于 PCB 检测。

基于上述文献分析,本文提出一种基于数学形态学的 PCB 自动缺陷检测算法。该算法将形态学处理中的腐蚀、形态梯度和距离变换方法运用到 PCB 参考比较法缺陷检测中,可快速检测各种缺陷,同时能够量化线宽异常变化。

## 2 基于形态学的 PCB 缺陷快速检测算法

基于形态学的 PCB 缺陷快速检测算法的前提是待检测图像与参考图像较好的配准,主要流程如下(见图 1):(1)待检测 PCB 图像和参考 PCB 图像预处理;(2)将待检测图像与参考图像比对,找出不一致的部分;(3)缺陷分析和分类。

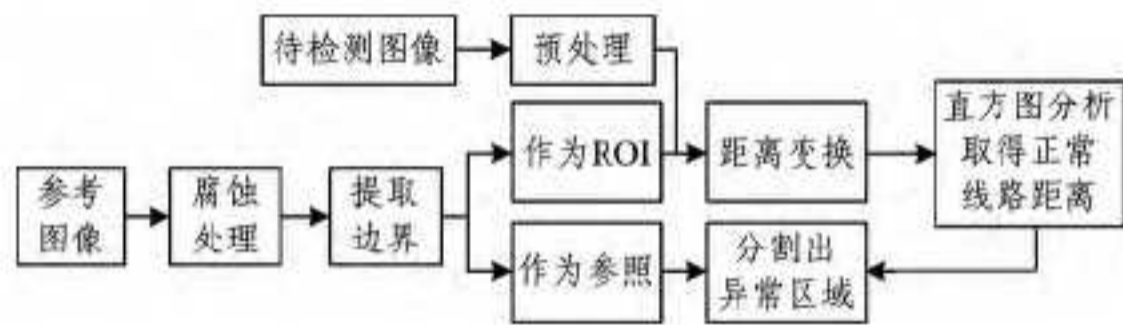


图 1 算法流程

首先使用自定义的结构元对参考图像进行腐蚀处理,得到“瘦身”后的线路区域,然后通过形态梯度处理线路区域得到区域边界的近似值。将该边界在对待检测图像进行距离变换时作为感兴趣区域使用,边界上的每个点的像素值代表到线路边界的距离。要检测缺陷仅需要对边界上的距离图像进行阈值分割即可。

图 2 所示为 PCB 线路局部放大后的效果,轻微的位置或者角度偏移、照明等因素都会产生线路区域边界的变化。这些变化就是导致测试图像与参考图像进行差分处理时产生差影的原因。

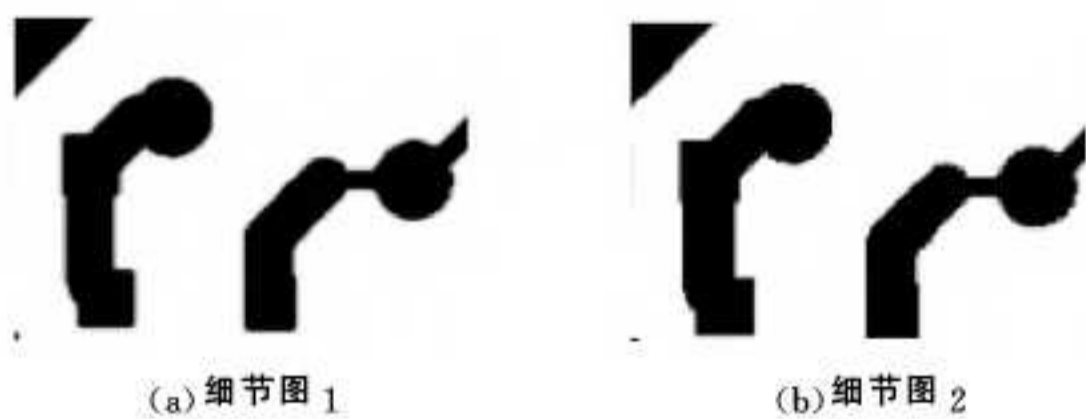


图 2 放大后的 PCB 图像局部区域

对参考图像先进行腐蚀“瘦身”处理,使线路区域边界向内部收缩。在参考比对过程中参考图像边界将位于待检测图像线路区域内部,从而避免了待检测图像线路区域边界细微变化的影响。

### 2.1 形态学图像处理

数学形态学被定义为一种分析空间结构的理论[11],主要有 4 个基本运算:膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。首先将 PCB 图像滤波后转换为二值图像,根据腐蚀和膨胀运算的定义,设  $R$  为图像集合, $S$  为结构元素,对于图像集合  $R$  中每一点  $x$ ,有:

$$\text{腐蚀: } R \odot S = \{x: S(x) \in R\}$$

$$\text{膨胀: } R \oplus S = \{x: S(x) \cap R \neq \emptyset\}$$

腐蚀是对结构元素  $S$  平移后得到的参考点,算法过程表示为:

$$dst(x, y) = \min_{(x', y') \in S} src(x + x', y + y')$$

为了使线路局域均匀地向中间收缩,本文自定义了基于原点对称的  $7 \times 7$  像素的八边形结构元素,如图 3 所示。

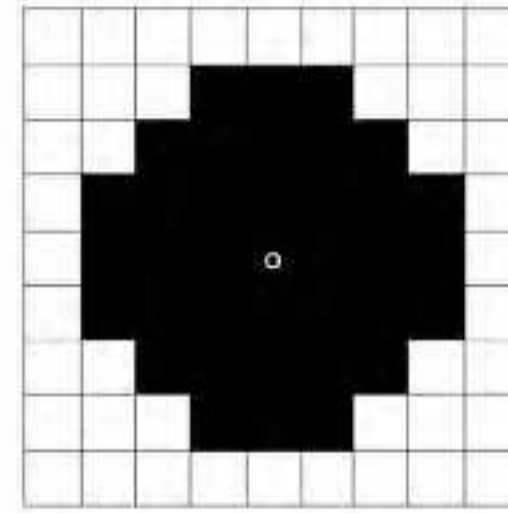


图 3 结构元素

图像腐蚀效果如图 4 所示,需要提取“瘦身”后线路区域的边界。基于轮廓控制点构成链表来计算边界的算法过于复杂。为避免大量运算以提高处理速度,算法中使用二值形态学的基本运算代替复杂的轮廓提取算法。从区域  $R'$  中减去对区域  $R'$  进行适当的腐蚀后得到的区域,即可得到区域边界的近似值。 $\partial R'$  表示边界,则  $\partial R' = R' - R' \odot S'$ 。

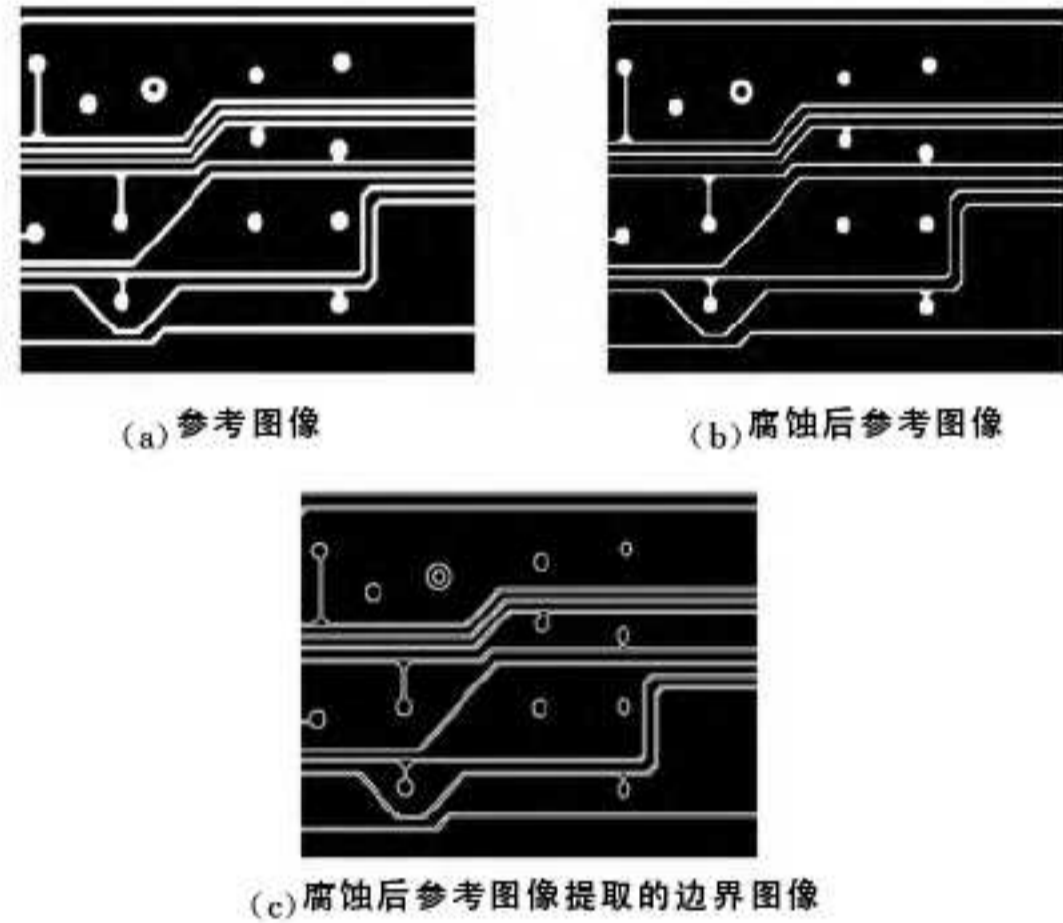


图 4 参考图像腐蚀后提取边界的过程

### 2.2 距离变换

距离变换是一个重要的形态学操作,该操作返回的结果是一幅图像。该图像的像素值代表的是区域  $R$  内每一个点到区域外  $\bar{R}$  所有点的距离的最小值,二值图像中  $\bar{R}$  通常为像素值为零的点组成的背景。明显有:区域边界上的点的距离都是 1,内部的点的计算距离与选择路径方式有关,常见的方式有 4-连通距离、8-连通距离和欧氏距离。如果两点坐标为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ ,则

$$4\text{-连通距离公式: } d_4 = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

$$8\text{-连通距离公式: } d_8 = \max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|)$$

$$\text{欧氏距离公式: } d_e = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

为了简化运算,使用基本位移(水平和垂直、对角线、马步)构成掩码,可以精确估计距离。使用的  $5 \times 5$  掩码如表 1 所列。

表 1 自定义  $5 \times 5$  掩码

2.8	2.1969	2	2.1969	2.8
2.1969	1.4	1	1.4	2.1969
2	1	0	1	2
2.1969	1.4	1	1.4	2.1969
2.8	2.1969	2	2.1969	2.8

选取一幅包含多种缺陷,且已经与参考图像配准完毕的待检测图像。将图 4(c)从参考图像腐蚀后提取的边界图像

作为待检测图像的感兴趣区域,进行距离变换处理,结果如图5所示。

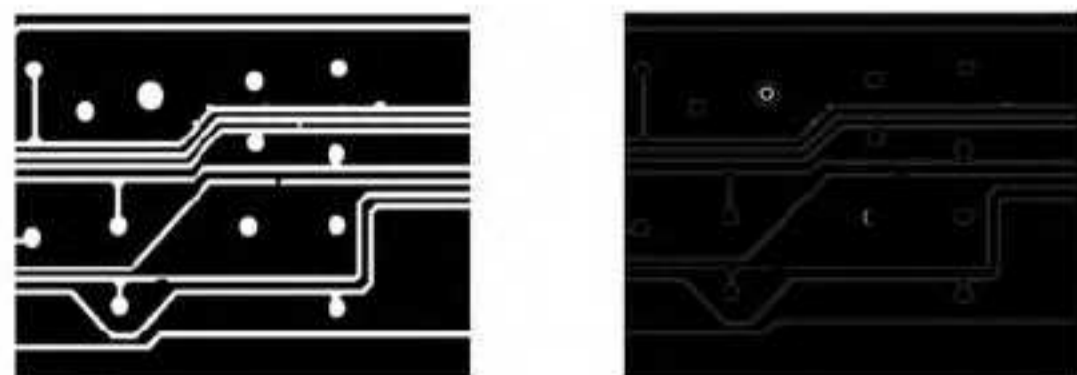


图5 待检测图像距离变换效果

从图5(b)可以直观看出缺陷位置的像素值,也就是相应的距离发生了变化。线路上太宽的部分像素值变大,线路太窄的部分像素值变小,断路、鼠咬、偏离和过度腐蚀等缺陷造成的部分线路区域的缺失会使得像素值变为零。

### 2.3 提取缺陷

对距离图像进行灰度直方图分析,去掉像素值为零的背景,可以看出线路区域灰度值呈现一个明显的峰,缺陷位置灰度值在直方图中轻微波动,如图6所示。



图6 距离图像的灰度值直方图

从图6可以看出直方图的峰与正常线路相对应,根据峰的位置确定一个阈值范围 $\{g_{min}, g_{max}\}$ 。阈值范围可以将检测允许的线路宽度误差计入,根据线宽变化的大小值,判定缺陷是否要被检出。如果PCB自动视觉检测系统的光照能够保持恒定,那么阈值范围在设置时被选定,后期检测就不用被调整。阈值分割得到正常线路区域的处理为:

$$S = \{g(x,y) \in R' \mid g_{min} \leq g(x,y) \leq g_{max}\}$$

本文提取到直方图中峰值为55,反复实验得出经验值,将扩大阈值范围为 $\{30, 80\}$ 。参考图像提取的边界图像减去阈值分割后正常线路图像,就可以得到缺陷区域。缺陷区域如图7所示。

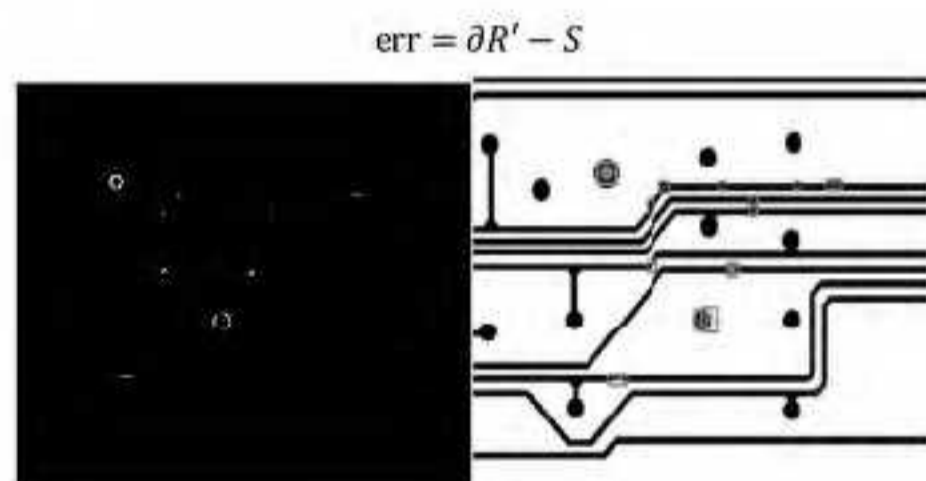


图7 检测出缺陷区域图像

### 3 缺陷分类识别

通过对距离图像进行直方图分析,得到了正常PCB线路区域到参考边缘的距离信息,以这个标准的距离作为参考就可以对比出待检测图像线路宽度的异常变化。

假设距离图像直方图的峰处数值为 $g_0$ ,以参考图像提取的边界 $\partial R'$ 作为距离图像的ROI,设置允许的距离误差为 $T$ ,像素值 $g$ 与 $g_0$ 的比较会得出3种结果:

- (1) 如果 $|g - g_0| \leq T$ ,则认为此处线路正常;

- (2) 如果 $g > g_0 + T$ ,说明此处线路变宽。参考图8,可以看出其中的短路(2)、腐蚀不足(3)、马刺(5)、少孔(8)会造成缺陷区域的线路变宽。

- (3) 如果 $g_0 - T < g \leq 0$ ,说明线路区域变窄, $g$ 值越小,缺损越大,直至 $g = 0$ ,代表了线路区域消失,造成这种结果的缺陷类型是:断路(1)、腐蚀过度(4)、鼠咬(6)、针孔(9)和线路丢失(10)的情况。其中断路和线路丢失的缺陷情况一定会使 $g = 0$ 。

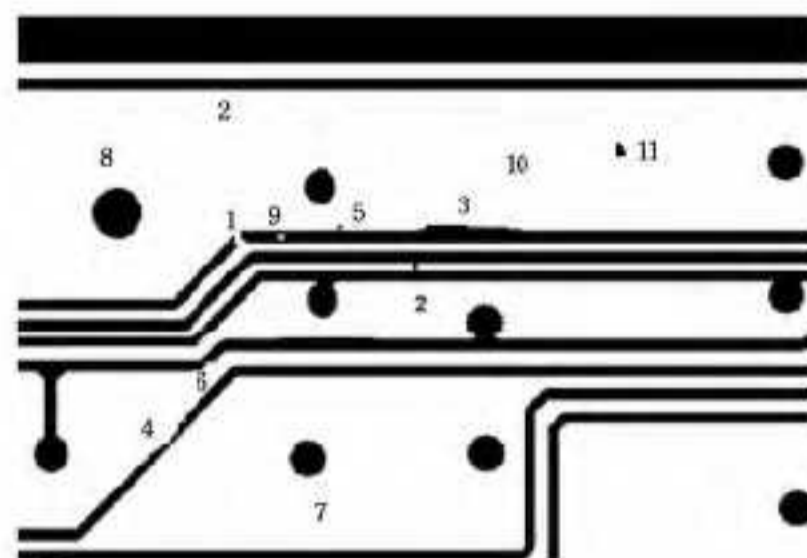


图8 PCB中的缺陷

从图8可以看出,短路、少孔、线路丢失会造成轮廓数量的减少,断路、针孔和余铜会造成轮廓数量的增加,腐蚀不足、腐蚀过度、马刺和鼠咬都会造成线路宽度异常变化,不影响轮廓数量,区别在于产生缺陷区域的面积,位置偏离不改变轮廓的数量,但是对应轮廓的位置会发生偏移。

对比两幅图像对应位置上的轮廓特征变化,结合缺陷的特征可以进行分类自动识别。主要的判别项目有:轮廓数量和外接矩形等基本特征、缺陷与轮廓的位置关系、缺陷面积。综上,缺陷与判断条件的关系如图9所示。

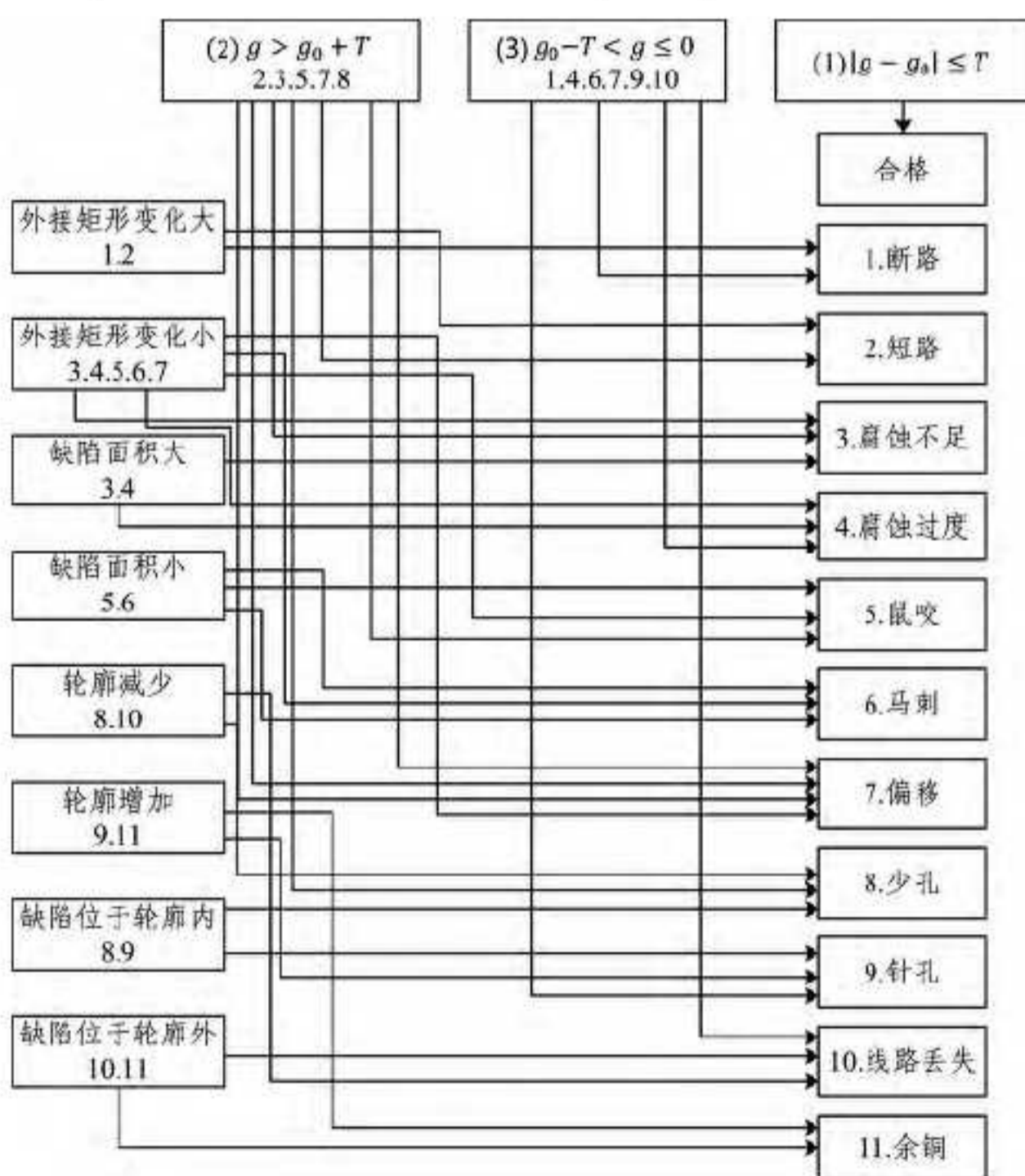


图9 缺陷分类识别

### 4 实验

利用本文算法测试一系列包含缺陷的PCB图像。这些  
(下转第225页)

器,2010,4(2):7-11

[2] 胡国雄,杨忠.旋翼无人机精确视觉定位定向方法,中国, CN104298248A[P]. 2015-01-21

[3] 林聚财,韩军,陈航明,等.基于彩色图像的玻璃绝缘子缺陷诊断[J]. 电网技术,2011,35(1):127-133

[4] 姚春雨,金立军,闫书佳.电网巡检图像中绝缘子的识别[J]. 系统仿真学报,2012(9):1818-1822

[5] 程中.基于改进的最大类间方差算法的图像分割研究[J]. 计算机科学,2009,36(5):276-278

[6] Huang Lan, Zhou Chun-guang, Wang Kang-ping. Hybrid ant colony algorithm for traveling salesman problem[J]. Progress in Natural Science,2003,13(4):295-299

[7] Van den BERGH F. An analysis of particle swarm optimizers

[D]. Pretoria;University of Preteria,2001

[8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C] // Proc. of the IEEE Conf. on Neural Networks, IV. Perth: IEEE Press,1995:1942-1948

[9] Lei Zhi-shu, Zhang Yan-bo. Oval shaped curve fitting problem of several new algorithms [J]. Journal of Shanghai jiaotong, university,2002,8:1210-1210

雷志术,张雁波.椭圆定形曲线拟合问题若干新型算法[J]. 上海交通大学学报,2002,8:1210-1213

[10] 张修军,郭霞,金心宇.带标记矫正的二值图像连通域像素标记算法[J]. 中国图象图形学报,2003,8(2):198-202

[11] 黎自强,腾弘飞.广义 hough 变换:多个圆的快速随机检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18:27-33

(上接第 186 页)

图像提前与对应的参考图像进行配准,并预处理为二值图像。检测结果如图 10 所示,各种缺陷均被检出。

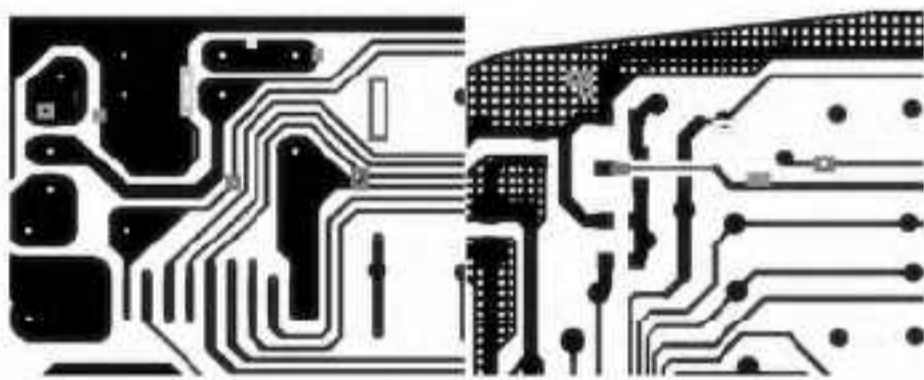


图 10 缺陷检测及类型识别结果

图中对不同类型的缺陷分别进行了标记,缺陷具体参数如表 2 所列。

表 2 缺陷具体参数

编号	缺陷外接矩形 rect=x,y,w,h	类型	编号	缺陷外接矩形 rect=x,y,w,h	类型
1	175,133,24,24	8	1	210,98,22,21	8
2	247,145,11,14	6	2	224,98,22,21	8
3	355,90,11,58	4	3	224,112,22,21	8
4	434,48,18,11	1	4	271,215,18,12	1
5	414,233,14,18	5	5	392,162,33,17	4
6	518,61,12,18	6	6	437,233,29,11	3
7	571,226,27,25	2	7	525,212,18,11	1
8	589,111,29,74	10			

结束语 实验证明了该算法能够检测出 PCB 图像中的各种缺陷,并能对缺陷类型进行自动识别,具有简单直观、检测速度快、检测结果可以量化分析和缺陷分类准确等优点。而且检测结果受光照变化和图像配准精度低等因素的影响小,算法鲁棒性较强。

## 参 考 文 献

[1] Tatibana M H, Lotufo R, de A. Novel Automatic PCB Inspection Technique Based on Connectivity[C] // Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing,1997. 1997:187-194

[2] Moganti M, Ercal F, Dagil C H, et al. Automatic PCB Inspection algorithms: A survey[J]. Computer Vision and Image Under-

standing,1996,6(2):287-313

[3] Lin Li-zong, Zhou Luo-shan, Wan Jian-ding, et al. Study of PCB Automatic Optical Inspection System Based on Mathematical Morphology[C] // International Conference on Computer Technology and Development. 2009:405-408

[4] Guo Feng-lin, Guan Shu-an. Research of the Machine Vision Based PCB Defect Inspection System[C] // International Conference on Intelligence Science and Information Engineering. 2011: 472-475

[5] Kaur B, Kaur G, Kaur A. Detection and classification of Printed circuit board defects using image subtraction method[C] // Recent Advances in Engineer and Computational Sciences (RAECS). 2014:1-5

[6] Putera S H I, Ibrahim Z. Printed circuit board defect detection using mathematical morphology and MATLAB image processing tools[C] // IEEE 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC). 2010:359-363

[7] 刘尚军,程宪平. PCB 瑕疵图象实时视觉检测方法的研究[J]. 计算机工程与应用,2002,16:71-74

[8] 熊邦书,熊振姣,莫燕,等.线路板缺陷的图像检测方法[J]. 半导体光电,2012,33(2):303-306

[9] Kumar M, Singh N K, Kumar M, et al. A Novel Approach of Standard Data Base Generation for Defect Detection in Bare PCB [C] // IEEE International Conference on Computing, Communication & Automation (ICCCA). 2015:11-15

[10] Ibrahim Z, Al-Attas S A R, Aspar Z. Analysis of the wavelet-based image difference algorithm for PCB inspection[J]. IEEE Proceedings of the 41st SICE Annual Conference,2002,4(5-7): 2108-2113

[11] Soille P. Morphology Image Analysis(2 edition)[M]. Berlin: Springer-Verlag,2003

[12] Ma Can, Mao Jian-xu, Mao Jian-ping. Research and Develop on PCB Defect Intelligent Visual Inspection Robot[C] // Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO). 2012:1-4