

文章编号 1004-924X(2010)11-2443-11

# 挠性印制电路板焊盘表面缺陷的检测

黄杰贤,李 迪,叶 峰,张舞杰

(华南理工大学 机械与汽车学院,广东 广州,510640)

**摘要:**针对挠性印制电路板(FPC)上的焊盘表面缺陷,提出一种基于图像处理技术的智能检测方法。首先,根据缺陷的表现形式对焊盘缺陷进行归纳与分类,采用最大熵值法量化提取焊盘的颜色特征和面积特征;然后,通过评估灰度共生矩阵(GLCM)对纹理颜色变化特征与纹理结构特征量化的有效性,将其应用于焊盘纹理特征的量化与提取。实验分析显示,缺陷焊盘与非缺陷焊盘在某个或多个特征上存在着明显的差异。基于该特点,建立了 BP 神经网络,以焊盘的颜色、面积、纹理结构、纹理颜色变化特征值作为神经网络的输入,通过学习大量样本,获取最佳权值参数,最终实现对 FPC 焊盘表面缺陷的检测,检测准确率高达 94.6%,50 个焊盘的检测时间为 300 ms。实验结果表明:本文提出的检测方法不仅能够有效地对焊盘表面缺陷进行识别,而且能够满足在线检测对速度的要求。

**关键词:**挠性印刷电路板;焊盘;特征提取;灰度共生矩阵;神经网络

**中图分类号:** TN710; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2443

## Detection of surface defection of solder on flexible printed circuit

HUANG Jie-xian, LI Di, YE Feng, Zhang Wu-jie

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China  
University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In order to detect the surface defect on the solder of a Flexible Printed Circuit(FPC), an inspecting technology based on image processing was presented. Firstly, all the defects on the FPC were classified into several defection sorts according to their defection characters. Then, the maximum entropy was used to locate the solder and extract the square and color characters. After estimating the effectness of the Grey Level Co-occurrence Matrix(GLCM) on the quantification for color and structure characters, it was introduced to quantify and extract colorific and structural textures for solders. An analysis on experiments indicates that the defective solder is obviously different from the non-defective solder in several kinds of quantified charaters. On the basis of the result above, the BP neural network was established and four kinds of characters were selected as the input of neural network. After all neural network weight parameters were adjusted to the optimization through sample training, the performance of the proposed defect detection algorithm was finally evaluated in an on-line testing. Test shows that 50 inspecting targets cost 300 ms, and the inspecting accuracy can reach 94.6%. The experimental result demonstrates that proposed method can detect accurately the solder defect with low false alarms, and the efficiency can satisfy the requirement of defect inspection in online and real time.

收稿日期:2010-02-24;修订日期:2010-03-24.

基金项目:广东省部产学研结合基金资助项目(No. 2009B090300200)

**Key words:** Flexible Printed Circuit (FPC); solder; character extraction; Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM); neural network

## 1 引言

挠性印制电路板(FPC)是以聚亚胺或聚脂薄膜为基材制成的一种高可弯曲、卷绕的印刷电路板。与普通印刷电路板(PCB)相比,挠性印刷电路板具有重量轻、可立体配线、所占空间较少等优点。目前,该类电路板广泛应用于电脑、手机、LCD 显示屏等产品,随着电子产品不断朝微小型化发展,挠性印刷电路板将具有越来越广阔的应用空间。不过随着市场竞争的日益激烈,终端电子产品制造商对 FPC 的品质保障提出越来越严苛的要求,其中以用于焊接芯片的焊盘质量为甚。目前,针对 FPC 焊盘金面的外观检测,国内很多企业仍采用人工目视检测的方法,这存在效率低、可靠性差、检测质量不高等弊端。由于劳动力成本的不断上升,电路集成密度将越来越高,人工目视检测必然逐渐被机器视觉检测所淘汰<sup>[1]</sup>。

在基于机器视觉的 FPC 缺陷检测方法中,华南理工大学王庆香<sup>[2]</sup>通过提取焊盘金面的纹理特征,再使用 Garbor 滤波器提取金面上的缺陷特征,实现了缺陷识别。但此方法由于计算复杂导致计算时间长,不适合实时性生产检测。台湾工业技术研究所提出利用标准 FPC 图像于实际图像做插影法的图像处理<sup>[3]</sup>来对 FPC 上的缺陷进行判断,但是采用该方法对 FPC 的焊盘金面进行检测时受到焊盘与 MARK 制造工艺误差的制约,很容易将正确的焊盘错判,从而导致错判率较高,造成企业的损失。D.-M. Tsai 和 B.-T. Lin<sup>[4]</sup>通过用信息熵描述 PCB 金手指的焊盘颜色变化特征和焊盘方向特征,并利用这些特征来实现对 PCB 金手指上表面缺陷的检测。从实验结果看出,该方法能实现对 PCB 金手指上的缺陷进行检测,检测效率可以满足生产需求。但是,该方法仅仅对金面表面纹理类型的错误有效,难以检测

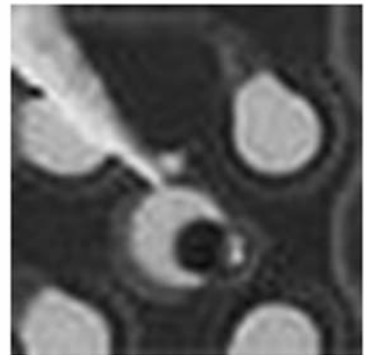
其他类型的缺陷。

基于前人的研究基础,本文针对 FPC 焊盘缺陷,提出一种基于神经网络的 FPC 智能检测算法。该算法首先对 FPC 焊盘金面做特征提取,例如颜色、形状、面积、纹理等。然后在此基础上建立起 BP 神经网络,通过对足够多的好、坏焊盘样品的学习,得到神经网络的最佳权值,实现 FPC 焊盘缺陷的最佳判别功能。文章分别阐述了焊盘金面主要缺陷类型,基于缺陷判别特征的提取,神经网络算法的实现,最终给出了实验结果。

## 2 缺陷类型分类

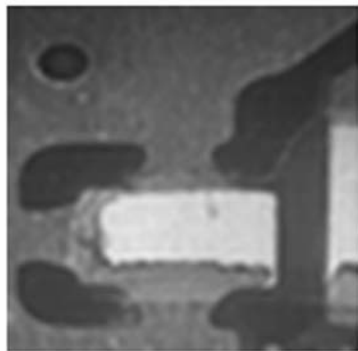
本文针对 FPC 的焊盘金面表面缺陷进行了检测。首先针对金手指表面常见的缺陷,根据其缺陷的表现形式进行分类(见图 1),利用缺陷所造成的颜色特征异常,面积特征异常和纹理特征异常作为缺陷判别标准。图 1 为焊盘金面缺陷分类图。

图 1 显示,图 1(a),(b),(c)属于面积特征异常;(d),(e),(f)属于纹理特征异常;(g),(f)属于颜色特征异常。本文在对缺陷特点的分析并对缺陷进行归类的基础上,研究出了一套适合线上实时检测的缺陷识别技术。

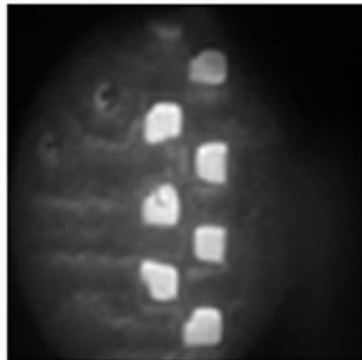


(a) 焊盘损坏

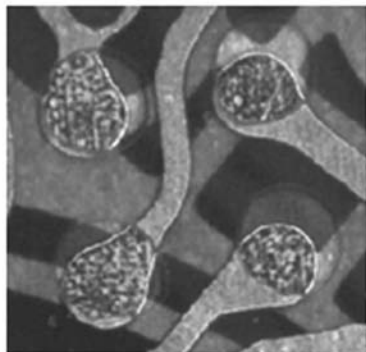
(a) Pad damage



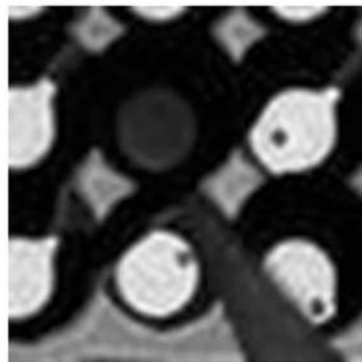
(b) 防焊焊盘  
(b) Pad covered



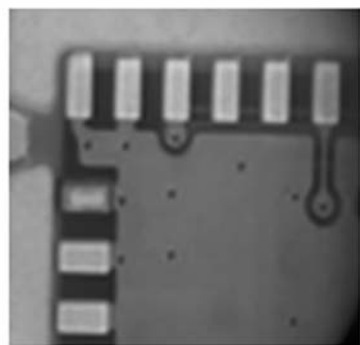
(f) 焊盘颗粒  
(f) Granule on pad



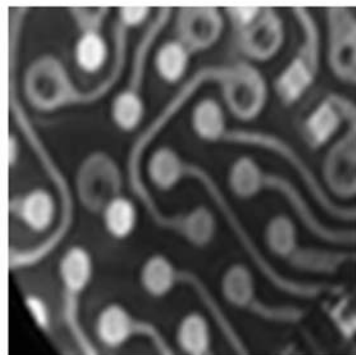
(c) 焊盘变小  
(c) Pad grows smaller



(g) 露铜  
(g) Pad over copper



(d) 焊盘污染  
(d) Pad pollution



(h) 漏镀  
(h) Gold missing



(e) 划伤  
(e) Scratch

图 1 缺陷分类图

Fig. 1 Catalogue of defected pads

### 3 基于最大熵值法的 FPC 焊盘金面分割

基于最大熵值对不同信噪比和不同大小的目标均能产生比较好的图像分割效果,是一种具有实用价值的阈值选取方法<sup>[5-6]</sup>。从图 2(a)可以看出,FPC 包含了金面与背景信息,因此,在本试验中采用最大熵值法对 FPC 金面进行图像分割。具体分割方法如下:

定义 FPC 焊盘金面信息熵为:

$$H_A(t) = - \sum_{i=0}^t (p_i/p_t) \lg(p_i/p_t), \quad (1)$$

背景的信息熵为:

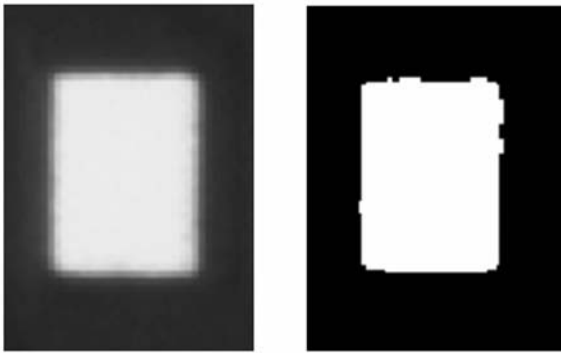
$$H_B(t) = - \sum_{i=t}^{L-1} (p_i/1-p_t) \lg(p_i/1-p_t), \quad (2)$$

上述表达式中,  $L$  为最大的灰度级;  $p_i = n_i/N \times M$ , 为频率;  $M, N$  为图像尺寸;  $n_i$  为灰度级为  $i$  的统计量,  $p_t = \sum_{i=1}^t p_i$ 。

最佳灰度阈值  $t = \epsilon$  可以通过以下表达式来求取:

$$f(\epsilon) = \max\{H_A(t) + H_B(t)\}. \quad (3)$$

获得最佳灰度分割阈值之后, 不仅可以实现对金面定位, 而且可作为 FPC 焊盘金面的颜色特征, 同时通过统计大于灰度阈值的像素个数获取 FPC 焊盘的面积特征。



(a) 原始图像

(b) 分割后图像

(a) Original image

(b) Segmented image

图 2 FPC 金面分割图

Fig. 2 Image segment on FPC solder

## 4 纹理分析

大多数工业产品的表面皆有比较规则的纹理特征, 同种产品、同种工艺的纹理特征具有相似甚至相同的特点, 例如布匹、切削工件、铜箔、钢材表面等。从图 1 中可以看出带缺陷的 FPC 焊盘在纹理的表现形势上存在着明显的差异, 因此, 可以通过焊盘金面纹理的纹理差异来判断焊盘的好坏。本文中通过灰度共生矩阵 (Grey Level Co-occurent Matrix, GLCM) 来实现对焊盘金面颜色

纹理与结构纹理特征的量化。

### 4.1 灰度共生矩阵

GLCM 是一种分析图像纹理特征的重要方法<sup>[7-8]</sup>, 通过计算图像中一定距离和一定方向的两个像素之间的灰度相关性, 对图像的所有像素进行统计, 得到纹理的综合信息。数学表达方式如下:

$$P(i, j, d, \theta) = \{(x, y), (x+Dx, y+Dy) | f(x, y) = i, f(x+Dx, y+Dy) = j\}, \quad (4)$$

式(4)中:  $x=0, 1, 2, \dots, M-1$ ;  $y=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。其中  $M, N$  分别是图像的长、宽尺寸,  $x, y$  是图像的像素坐标;  $i, j=0, 1, \dots, L-1$ , 是灰度级,  $L$  是最高级灰度;  $Dx, Dy$  是位置偏移量, 具有方向性;  $d$  为灰度共生矩阵的生成步长, 为灰度共生矩阵的生成方向, 取  $0, 45, 90, 135^\circ$  等 4 个方向。

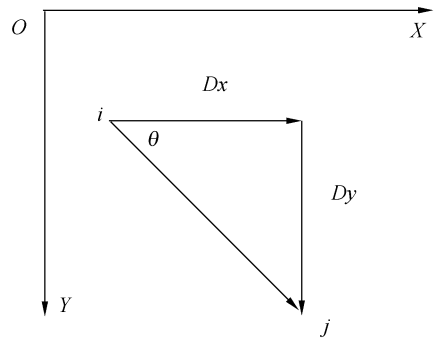


图 3 灰度共生矩阵关系图

Fig. 3 Relation of GLCMs

在三维  $xyz$  坐标区域内, 设  $oxy$  为图像的像素坐标平面, 灰度坐标为  $z$  轴,  $x$  方向像素总数为  $M$ ,  $y$  方向像素总数为  $N$ 。从灰度值为  $i$  的像素点出发, 距离为  $Dx, Dy$  的另一个像素点位置上出现灰度值为  $j$  的概率或频率, 其关系如图 3 所示。

### 4.2 基于纹理颜色变化的分析

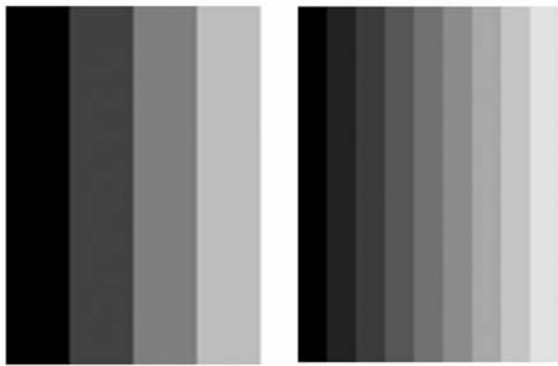
在本实验中, GLCM 的距离与角度参数分别设置为  $d=1; \theta=0$ ; 采用 GLCM 的信息熵值来量化金面的纹理颜色变化特征, 数学表达式如下<sup>[9-10]</sup>:

$$E_c = \sum_i^N \sum_j^N P(i, j, d, \theta) \log P(i, j, d, \theta). \quad (5)$$

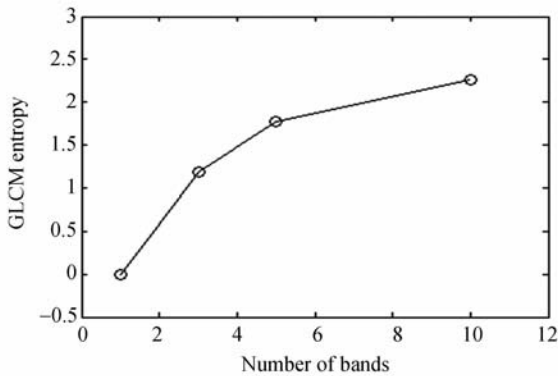
为了有效评估灰度共生的信息熵对颜色变化量化的有效性, 对图 4 中的单色图、三色图、五色图、十色图进行了 GLCM 信息熵的量化。E<sub>c</sub> 表示量化结果。从图 4(e) 的量化图可以看出各色图的量化值分别为: 0, 1.189, 1.770, 2.266, 并且熵值随着颜色的复杂度增加而不断上升。



(a) 单色图 (a) Single band  
(b) 三色图 (b) Three bands



(c) 五色图 (c) Five bands  
(d) 十色图 (d) Ten bands



(e) 各色图的灰度共生矩阵信息熵评估

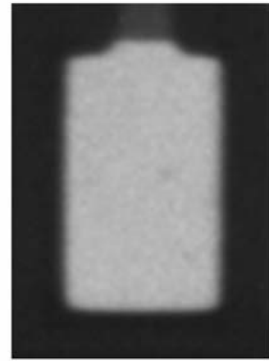
(e) Every band estimation of GLCM entropy

图 4 色度图与其灰度共生矩阵信息熵评估

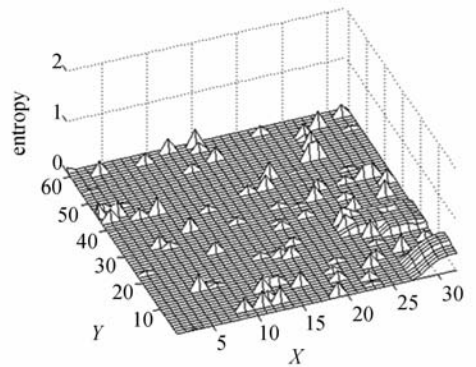
Fig. 4 Estimation of entropy based on GLCM

现将 GLCM 的熵值量化法应用于焊盘金面的纹理颜色特征提取, 图 5(a) 为无缺陷的焊盘, 图 5(c), (e) 为带缺陷的焊盘。图 5(b), (d), (f) 分别是对图 5(i), (a), (c), (e) 信息熵量化结果。

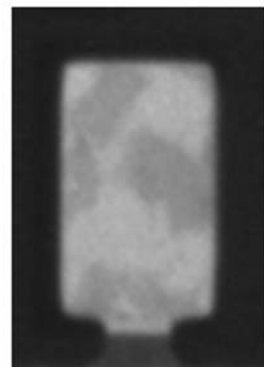
从结果可以看出: 无缺陷的焊盘金面信息熵值比较小或者说基本为 0, 带缺陷的区域信息熵值比较大。因此, 采用灰度共生矩阵信息熵能够有效地对纹理颜色缺陷进行区分。



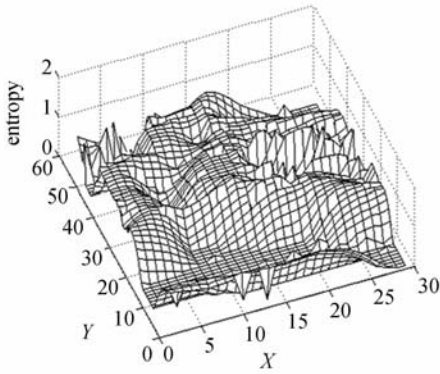
(a) 无缺陷焊盘 (a) No defect



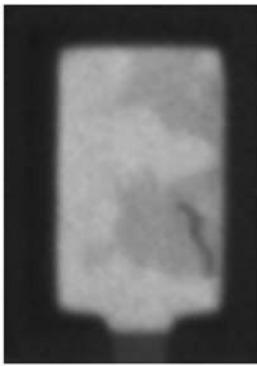
(b) 无缺陷焊盘熵量化效果 (b) Entropy image



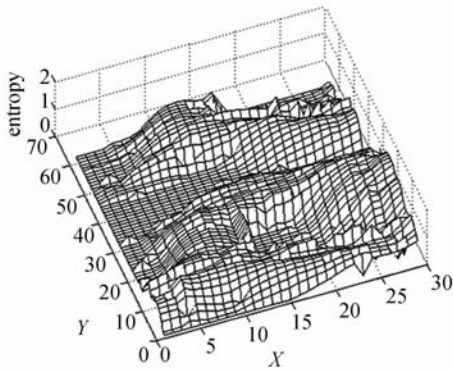
(c) 脏污焊盘 1 (c) Polluted solder 1



(d) 脏污焊盘 1 熵量化效果  
(d) Entropy image for solder 1



(e) 脏污焊盘 2  
(e) Polluted solder 2

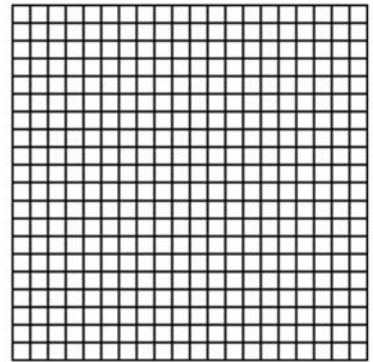


(f) 脏污焊盘 2 量化效果  
(f) Entropy image for solder 2  
图 5 纹理颜色熵量化效果对比图  
Fig. 5 Entropy images on solders

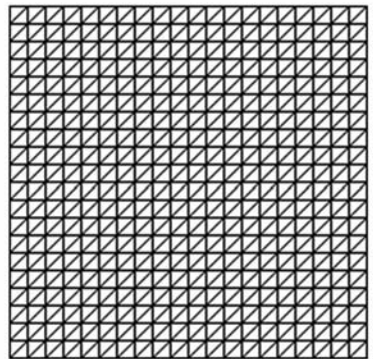
对比度来实现对 FPC 金面结构特征的量化。GLCM 的对比度数学表达式如下：

$$E_s = \sum_i^N \sum_j^N (i - j)^2 P(i, j, d, \theta) . \quad (6)$$

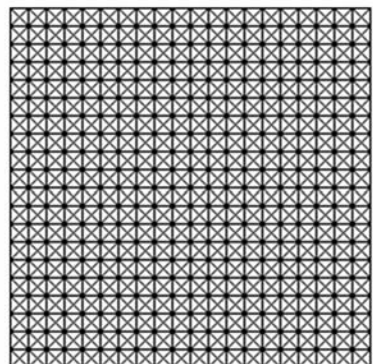
为了评估 GLCM 对比度对纹理结构特征量化的有效性,本文选取了带 2 个方向、3 个方向、4 个方向纹理结构与砂纸纹理的图像进行结构量化。量化值  $E_s$  如图 6(e),从图可以看出对比度的值随纹理结构复杂度的增加而增加,各方向的量化值分别为:3.403,6.049,8.318,9.0。



(a) 双方向图  
(a) Two directions



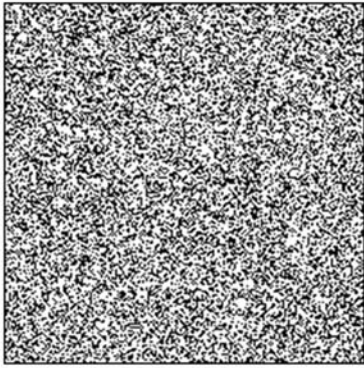
(b) 三方向图  
(b) Three directions



(c) 四方向图  
(c) Four directions

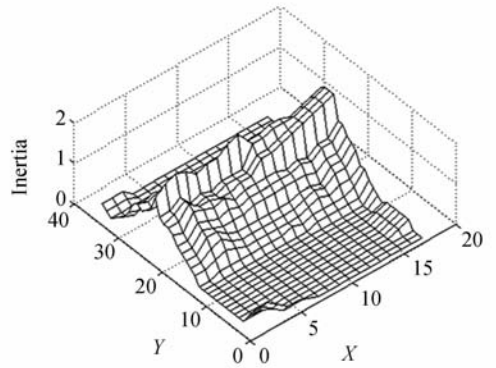
### 4.3 基于纹理结构的特征分析

焊盘金面的刻痕、划伤缺陷(图 6)不仅引起颜色变化,而且会导致纹理结构的改变。针对 FPC 金面的结构特征,本文提出采用 GLCM 的



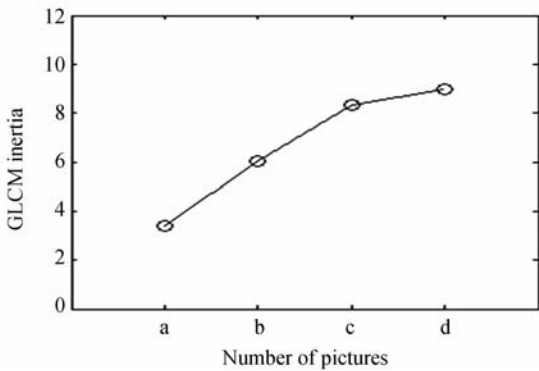
(d) 砂纸表面图

(d) Sandpaper



(b). 划伤缺陷 1 熵量化效果图

(b) Inertial image for scratch 1

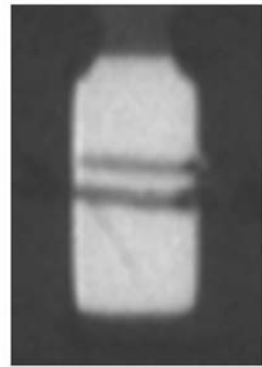


(e) 各方向灰度共生矩阵对比度评估

(e) Estimation of GLCM inertia in different directions

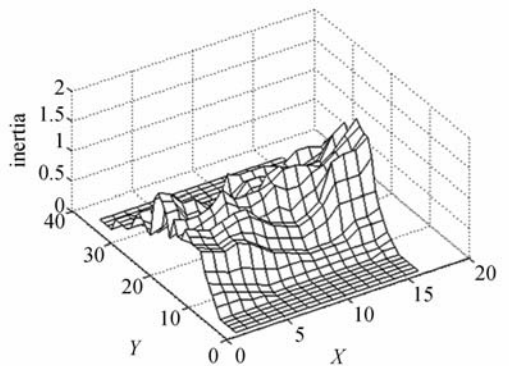
图 6 方向图与其灰度共生矩阵对比度评估

Fig. 6 GLCM inertia on line-patterned images



(c) 划伤缺陷 2

(c) Scratch 2

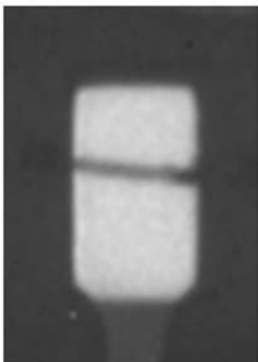


(d) 划伤缺陷 2 熵量化效果

(d) Inertial image for scratch 2

图 7 划伤缺陷的熵量化效果图

Fig. 7 GLCM inertia on scratch



(a) 划伤缺陷 1

(a) Scratch 1

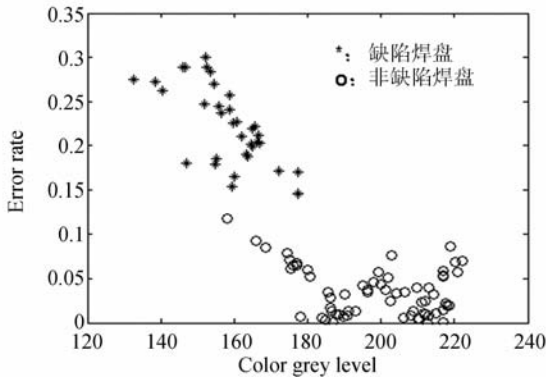
从图 7 的 3D 效果图可以看出: 划伤区域的 GLCM 对比度值明显比非划伤区域对比度值高。因此, 采用最小 GLCM 的对比度值能够有效地对 FPC 纹理结构缺陷进行识别。

## 5 基于神经网络的缺陷检测

### 5.1 特征分析

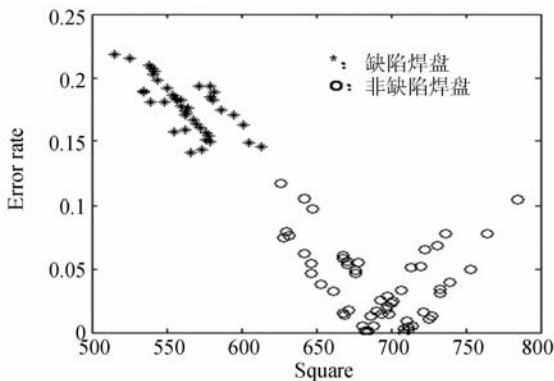
本实验随机选取了一批样品 516 个焊盘,其中无缺陷焊盘样本 345 个,缺陷焊盘 171 个,缺陷类型包含颜色特征缺陷、面积缺陷、颜色纹理缺陷、结构纹理特征缺陷等 4 类。各个特征的分布如图 8 所示:

从图 8 中的特征分布可以看出:好、坏焊盘在 4 种类型特征分布上具有明显的分界线,容易区分缺陷焊盘与无缺陷焊盘,具有代表性与良好的分辨能力。因此,可通过有效利用这 4 类特征并建立人工智能系统来认识 FPC 焊盘缺陷。



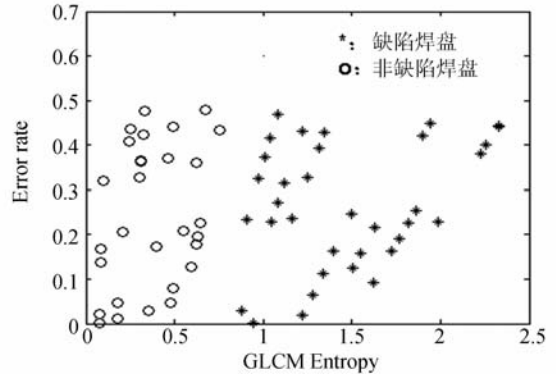
(a)颜色特征分布

(a)Distribution of color character



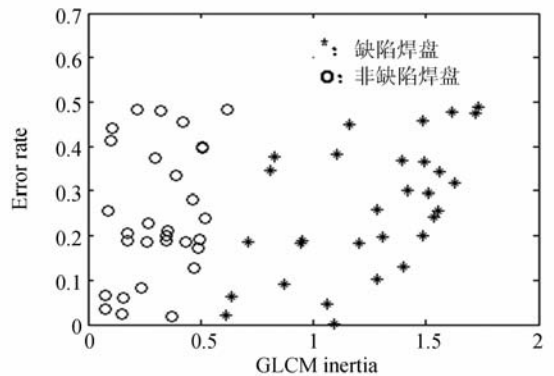
(b)面积特征分布

(b)Distribution of square character



(c)纹理颜色特征分布

(c)Distribution of colorific texture



(d)纹理结构特征分布

(d)Distribution of texture structure

图 8 特征分布图

Fig. 8 Distributions of different characters

### 5.2 神经网络的建立

神经网络具有自组织性、自学习性以及自适应性等优点,已成功应用于模式识别领域<sup>[11-13]</sup>。在实际的检测系统开发中,结合企业要求提出了:1.检测系统可对缺陷进行分类;2.检测效率必须达到生产线上的要求;3.操作简便、避免过多参数设置。根据企业需求与检测目标的特点,建立了一种基于神经网络的 FPC 焊盘金面检测系统。通过对金面颜色、面积、纹理颜色、纹理结构特征进行量化、提取,将其作为神经网络的输入。

如图 9 所示,文中采用了具有 3 层结构的 BP 神经网络。其中隐层传递函数为 S 型函数。神经网络每层参数描述如下:

建立神经网络时,由于量化后特征单位各不相同,必须对各特征进行归一化处理:

$$u_i = (z_i - \bar{z}) / S, \quad (7)$$

式中  $u_i$  是归一化的特征, $z_i$  是归一化前的特征, $\bar{z}$

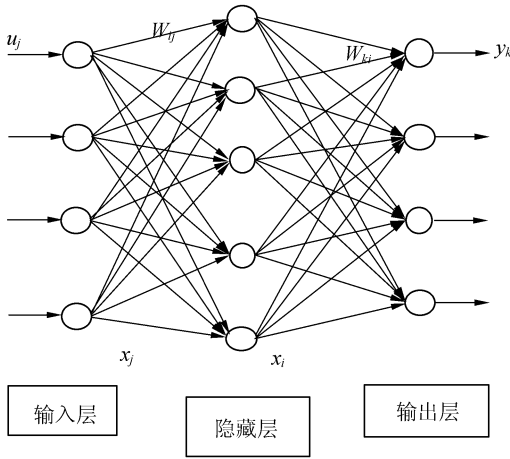


图 9 BP 神经网络的结构

Fig. 9 Structure of BP neural network

是 \$z\_i\$ 的平均值, \$S\$ 是 \$z\_i\$ 的方差。

\$u\_j\$ 为特征值的输入, 其中 \$j=1, 2, \dots, p\$, 其中有 4 个特征值作为神经网络的输入, 所以 \$p=4\$。隐含层的输入和输出分别为:

$$I_{mi} = \sum_j W_{ij} u_j, \quad (8)$$

$$x_i = 1 / (1 + \exp(-I_{mi})), \quad (9)$$

式中 \$W\_{ij}\$ 为连接输入第 \$i\$ 个节点与隐藏层第 \$j\$ 个节点的权值参数; 输出结果:

$$y_k = \sum_i W_{ki} x_i, \quad (10)$$

式中 \$W\_{ki}\$ 为连接输出层与隐藏层的权值函数。\$k=1, 2, \dots, 4\$。\$y\_k\$ 为神经网络的输出。

神经网络的输出误差 \$E\_m\$, 系统平均误差分别定义为:

$$E_m = \frac{1}{2} \sum_k (y_{dk} - y_k)^2, \quad (11)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M E_m. \quad (12)$$

式中: \$m\$ 表示样本编号; \$M\$ 为学习样品数。\$y\_{dk}\$ 是神经网络输出层第 \$k\$ 个节点的期望输出。为了实现缺陷分类, 缺陷类型与检测数据关系的定义如表 1 所示。

表 1 神经网络期望输出

Tab. 1 Desired output values of neural network

输出	无缺陷	颜色缺陷	面积缺陷	纹理颜色缺陷	纹理结构缺陷
\$y_{d_1}\$	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1
\$y_{d_2}\$	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
\$y_{d_3}\$	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1
\$y_{d_4}\$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8

在学习过程中, 如果输出层输出与期望输出的系统误差较大, 则转入反向传播, 系统不断对权值参数进行调整, 直至使系统误差最小。训练函数采用具有速度快, 占用内存小、无需设置步长等优点的 trainrp 算法。该算子不但能保证学习速度, 而且不需要过多的参数设定, 从而提高了系统的易用性, 很适用于实际生产。

### 5.3 实验结果

自动光学检测 (Automatic Optical Inspection, AOI) 系统 (如图 10 所示) 的性能可以通过以下指标进行评定<sup>[14]</sup>: (1) 准确率: 即系统给出准确结果的比率; (2) 误判率: 即系统将无缺陷的焊盘判断为缺陷焊盘的比率; (3) 漏检率: 即系统将缺陷的焊盘判为无缺陷焊盘的比率。在本实验中, 选取了 516 个 FPC 焊盘为实验样本, 其中取 258 个焊盘为训练样品 (含 86 个缺陷样品), 取 258 个用于检测 (含 85 个缺陷样品), 检测样品中有 85 个缺陷样品, 检测结果如表 2 所示, 检测结果分析如表 3 所示。

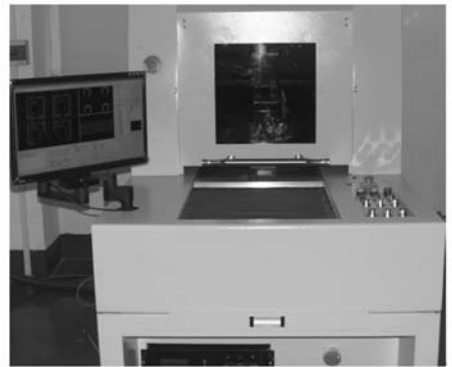


图 10 AOI 设备

Fig. 10 AOI system

表 2 检测结果

Tab. 2 Inspecting results

测试焊盘样品数	缺陷焊盘识别数	误检数	漏检数	准确率	错判率	漏判率
258	99	14	0	94.6%	5.4%	0%

表 3 缺陷分析

Tab. 3 Defection analysis

缺陷类型	缺陷数	错判数	漏判数	正确率	错判率	漏判率
颜色缺陷	18	1	0	94.5%	5.5%	0%
面积缺陷	20	2	0	90%	10%	0%
纹理颜色 缺陷	27	5	0	81.5%	18.5%	0%
纹理结构 缺陷	34	6	0	82.4%	17.6%	0%

从实验结果表 2 可以得出结论:通过采用本文提出的检测算法,所有的缺陷都能够检测到,不存在漏检的情况,正确率为 94.6%;错判数量为 14,错判率为 5.4%;缺陷类型分辨的准确率不够高,但是对实际生产影响不大;50 个检测目标所花费的时间为 300 ms,满足生产线实时检测的要求(Intel 双核 CPU 处理器 2.53 GHz,2 G 的内存)。

### 参考文献:

- [1] AYOUB G. Real-time SPC with AOI [J]. *Surface Mount Technology Magazine*, 2001,15(6):36-38.
- [2] WANG Q X, LI D, ZHANG W J. Detecting defects in golden surfaces of flexible printed circuits using optimal gabor filters[C]. *Intelligent Information Technology Application*, 2008, IITA'08. *Second International Symposium on Volume 1*, Dec. 2008:321-325.
- [3] CHEN CH H, WANG C C, LIN CH Y, et al.. Realization of defect automatic inspection system for flexible printed circuit (FPC)[C]. *Proceedings of the 35th International MATADOR Conference*, 2007:225-228.
- [4] TSAI D M, LIN B T. Defect detection of gold-plated surfaces on PCBs using entropy measures[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002,20(6):420-428.
- [5] KAPUR J N, SAHOO P K, WONG A K C. A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1980,3(2):223-237.
- [6] ABUTALEB A S. Automatic thresholding of gray-

## 6 结 论

本文基于图像采集系统,通过采用最大熵值法与 GLCM 分别对焊盘的颜色、面积、纹理特征进行数学量化,基于这些特征,建立了 BP 神经网络,并应用于 FPC 焊盘缺陷的检测。实验证明,该检测系统能够有效地对 FPC 焊盘的颜色、面积、纹理类型的缺陷做有效识别。其中准确率达到 94.6%;检测效率(50 个检测目标花费 300 ms 的时间)亦满足实际生产的检测要求。目前,该检测系统已经成功地运用于生产线,提高了工人的检测效率与正确率,大大减轻了工人的劳动强度。下一步的工作主要集中在进一步提高该检测系统的正确率和提高该系统的灵活性与通用性上。本文的检测目标都是规则形状的焊盘,例如圆、方焊盘等,下一步将针对不规则的焊盘缺陷识别进行深入研究。

- level picture using two-dimensional entropies [J]. *Pattern Recognition*, 1989,47(1):22-32.
- [7] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I. Textural features for image classification [J]. *IEEE Trans. SMC*, 1973,3:610-621.
- [8] WALKER R F, JACKWAY P T, LONGSTAFF D. Genetic algorithm optimization of adaptive multi-scale GLCM features [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2003,17(1):17-39.
- [9] DESOKY A H, HALL S A. Entropy measures for texture analysis based on Hadamard transform [J]. *Proceedings of the IEEE Southeastcon Conference*, 1990(2):467-470.
- [10] DAWSON B R P, PARSONS A J. Texture measures for the identification and monitoring of urban derelict land [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994,15(6):1259-1271.
- [11] 马立,于瀛洁,程维明,等. BP 神经网络补偿并联机器人定位误差 [J]. *光学 精密工程*, 2008,16(5):878-883.
- MA L, YU Y J, CHENG W M, et al.. Positioning error compensation for a parallel robot based on BP neural networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):878-883. (in Chinese)

- [12] 王自强,李银妹,楼立人,等. BP神经网络用于光镊力的非线性修正[J]. 光学精密工程,2008,16(1):6-10.  
WANG Z Q, LI Y M, LOU L R, *et al.*. Application of BP neural network to nonlinearity correction of optical tweezer force [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):6-10. (in Chinese)
- [13] 沈毓武,王志乾,刘畅,等. BP神经网络在多位置捷联寻北系统中的应用[J]. 光学精密工程,2009,17

(18):1890-1895.

SHEN CH W, WANG ZH Q, LIU CH, *et al.*. Application of BP neural network to multi-position strap-down north seeking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8):1890-1895. (in Chinese)

- [14] LOH H H, LU M S. Printed circuit board inspection using image analysis [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999,35:4262432.

#### 作者简介:



黄杰贤(1982—),男,广东梅县人,博士研究生,2005年于沈阳航空工业学院获得学士学位,2008年于广东工业大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: huangjiexian@126.com



叶峰(1972—),男,广东高州人,副教授,分别于1993年、1996年、2003年在华南理工大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事机器视觉及智能控制方面的研究。E-mail: mefengye@scut.edu.cn



张舞杰(1970—),男,湖南常德人,博士后,助理研究员,2004年于中南大学获得硕士学位,2007年于华南理工大学获得博士学位,现为华南理工大学自动化科学与工程学院博士后,主要从事机器视觉及自动控制方面的研究。E-mail: zwjllhht@scut.edu.cn

#### 导师简介:



李迪(1965—),女,山东青岛人,教授,博士生导师,1985年于南京航空航天大学获得学士学位,1988年于南京航空学院获得硕士学位,1993年于华南理工大学获得博士学位,现为华南理工大学机械与汽车学院机械电子工程研究所所长,主要从事嵌入式系统、自动控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: itdili@scut.edu.cn

#### ● 下期预告

## 胶囊内窥镜无线遥测定位的校正法

郭旭东<sup>1</sup>,严荣国<sup>1</sup>,颜国正<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 医疗器械与食品学院,上海 200093;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

在采用交流励磁定位法无线跟踪胶囊内窥镜的研究中,为了进一步提高定位精度,减小系统误差,提出了改进的神经网络定位校正新方法。首先设计了适应于胶囊内窥镜定位校正的神经网络结构,然后采用 Levenberg-Marquart 算法结合贝叶斯正则化方法改进校正网络,抑制校正网络的过拟合。通过定位实验平台,建立了定位目标的跟踪位置与实际位置的样本对照数据表,并应用校正网络对定位数据进行校正。定位校正实验表明,改进的神经网络校正法可进一步减小定位误差,校正后的  $X, Y, Z, \alpha, \beta$  分量的平均误差分别减小至 8.7, 10.1, 7.3 mm 和 0.086, 0.081 rad。与基本 BP 算法相比,采用 Levenberg-Marquart 贝叶斯正则化的改进算法有效提高了定位校正网络的泛化能力和收敛精度。