

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107464

## 一种电致发光电路板故障检测方法研究\*

叶慧娟<sup>1</sup> 李洪科<sup>2</sup> 方磊<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学兵器工程学院 武汉 430033; 2. 海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

**摘要:** 为了实现电路板故障检测智能化,设计了一种电致发光电路板故障检测系统,介绍了系统构成,提出了一种电路板故障检测方法。在图像预处理模块中对原始图像进行灰度增强,并使用方法实现原始图像的预定位。对以ASCII码形式保存的PCB文件的代码进行了深入的剖析,使用MATLAB软件读取PCB文件数据,将其保存在特定结构体中,并利用绘图函数绘制出模板图像。利用彩色图像分割方法提取出电路板预定位图像中感兴趣的部分,再将软件绘制的模板图像与预定位的原始图像进行配准,达到了较为理想的结果。并通过对发光电路板故障检测定位的实验说明了方法的有效性。实验结果表明该方法对电路板的损害较小,而且检测有效,操作比较快速,周期短,易于工程实现。

**关键词:** 电路板;故障检测;图像识别;电致发光

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## A fault detection method for electroluminescent circuit board

Ye Huijuan<sup>1</sup> Li Hongke<sup>2</sup> Fang Lei<sup>1</sup>

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to realize the intelligentization of circuit board fault detection, an electroluminescent circuit board fault detection system was designed, its structure was introduced, and a circuit board fault detection method was proposed. In the image preprocessing module, the original image is enhanced by gray scale, and the predetermined bits of the original image are realized by using the method. The code of PCB file saved in the form of ASCII code is deeply analyzed, and the PCB file data is read by MATLAB software, saved in a specific structure, and the template image is drawn by drawing function. Using color image segmentation method to extract the interested part of the circuit board pre-position image, and then the template image drawn by software is registered with the original image of pre-position, and a more ideal result is achieved. Experiments on luminescent circuit board fault detection and location show the effectiveness of the method. The experimental results show that the method has less damage to the circuit board, and is effective in detection, fast operation, short cycle and easy to implement in engineering.

**Keywords:** circuit board; fault detection; image recognition; electroluminescence

## 0 引 言

现代电子设备在功能上越来越先进,同时构造和规模也越来越复杂,测试和维修也越来越困难,因此研究电子设备的可测试性、可维修性及故障诊断,对保证电子设备保持和发挥高的效能、大幅度降低电子设备的维修保障费用具有重要的意义<sup>[1-5]</sup>。

电致发光(electroluminescence, EL)是一种直接将电能转换为光能的现象。利用该原理制作电致发光电路板故

障检测器,应用于电路板故障检测中,是一种新的思路。从电路板故障检测方式来看,业界的故障检测方法大体上可以分为接触式和非接触式<sup>[6-11]</sup>。尤其针对于小批量、多品种元件的电路板,以往多采用万用表、示波器或测试针床的在线测试技术,均通过被测设备的输入、输出端口进行操作,对这样的复杂系统,存在测试难度大、周期长的问题<sup>[12-17]</sup>。另外,专用针床和测试仪器成本高,测试有可能损坏电路中的元件。

以电致发光电路板为检测对象,设计了一套基于图像

收稿日期:2021-08-02

\* 基金项目:中国博士后基金(2016M603008)项目资助

识别的电致发光电路板故障检测系统,实现了电路板故障的自动检测。该方法应结构简单,工艺性好,性价比高,可精确显示电路板信号工作状态。下面对整个方法的实施和原理描述如下。

## 1 电致发光电路板故障检测系统设计方案

首先,设计一套电致发光电路板故障检测系统。综合运用了数字图像处理、模式识别、传感器等技术,可快速实现电路板故障检测。该系统包括3个模块:图像采集模块、运动控制模块和图像处理模块。系统的主要工作流程如图1所示。

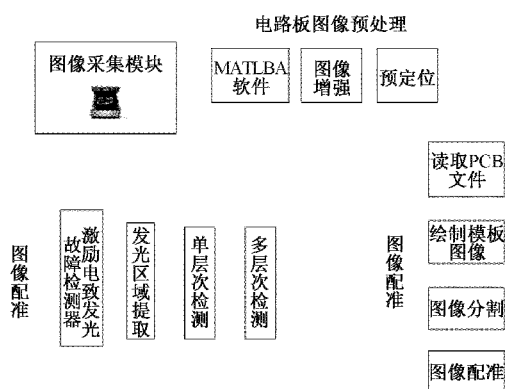


图1 故障检测系统工作流程

如图1所示,首先利用研制的电致发光电路板故障检测器提取发光区域电路板。然后图像采集模块采集被测电路板的图像。现有视觉传感器产品分为CMOS和CCD两种<sup>[3-7]</sup>,本文采用了爱普生扫描仪(V850 Pro)作为系统的图像采集单元,其最大分辨率为12 800 dpi×12 800 dpi,扫描范围为216 mm×297 mm,扫描元件采用的是CCD,能满足PCB高精度成像的要求。采集图像传输到计算机,计算机对其进行增强和预定位预处理,读取电路板PCB文件并与电路板图像进行登记,绘制模板图像。最后,利用彩色图像分割方法提取相关发光区域,并对模板图像进行匹配,找到相应的元素或导线,读取设计数据,为故障检测奠定基础。

系统由硬件和软件构成。硬件主要设计了一种电致发光电路板故障检测器。电致发光电路板故障检测器结构如图2所示。

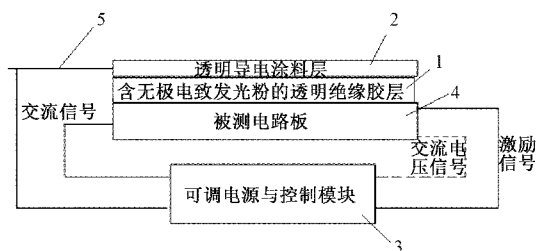


图2 电致发光电路板故障检测器示意图

它包括含无机电致发光粉的透明绝缘胶层(标号1)、

透明导电涂料层(2)、可调电源与控制模块(3),其中,所述透明导电涂料层的底部粘接含无机电致发光粉的透明绝缘胶层,可调电源与控制模块的接地端用于连接被测电路板(4)的信号地,可调电源与控制模块的激励信号输出端用于连接被测电路板的激励信号输入端,可调电源与控制模块的第一电源输出端用于连接被测电路板的电源信号输入端,所述含无机电致发光粉的透明绝缘胶层用于粘接在被测电路板表面,所述可调电源与控制模块的第二电源信号输出端通过电极连接透明导电涂料层,所述透明导电涂料层能与被测电路板之间形成受控交流电场(5)。

以上即该电致发光电路板故障检测系统的设计方案。下面阐述系统工作流程。

## 2 电路板故障检测流程

### 2.1 原始电路板图像预处理方法

在电致发光电路板故障检测流程中,首先用扫描仪对电路板拍照,称其为电路板PCB原始图像,再对原始图像形成的光学图像进行预处理。

由于在图像采集过程中,有可能受到光照条件变化、各种电子干扰、采集现场环境变动和图像信号存储传输时的各种波动影响,造成采集到的PCB图像存在各种噪声和失真。为了在后续的图像分析和识别中达到较好的检测效果,在进入PCB故障识别环节前,需要对图像进行增强。

PCB图像一般呈墨绿色或蓝色,其颜色较暗,其对比度较弱。为了突出图像中感兴趣的部分,必须通过增加图像对比度的方法来改善图像效果。本文采取加权平均法对图像进行灰度化。

电路板图像定位是电路板图像预处理的关键步骤,是对电路板图像进行故障检测与识别的前提条件。电路板图像定位的基本过程主要包括:首先对电路板灰度图像进行边缘检测,再通过霍夫线检测找到电路板图像边界。最后根据标准电路板图像与待测电路板图像边界的位置关系,采用透视变换算法对采集的图像去除背景并进行平移、旋转等处理,以达到和标准PCB图像匹配的目的。

本系统利用霍夫线检测对PCB边缘检测图像进行线检测,得到4个边界线。以标准PCB图像为基准,采用透视变换的算法对倾斜的待测电路板图像进行旋转校正并定位。结果如图3所示。图3(a)为原图像,图3(b)为对原图像进行检测、定位后的图像。

### 2.2 电致发光故障检测方法

如图2所示,电致发光故障检测方法步骤如下。

1)将含发光粉的透明绝缘胶均匀涂覆在被测电路板表面,并在常温下固化,形成含无机电致发光粉的透明绝缘胶层。

2)在含无机电致发光粉的透明绝缘胶层上均匀涂覆透明导电涂料,并在透明导电涂料内埋入第一电极,固化后形成透明导电涂料层。

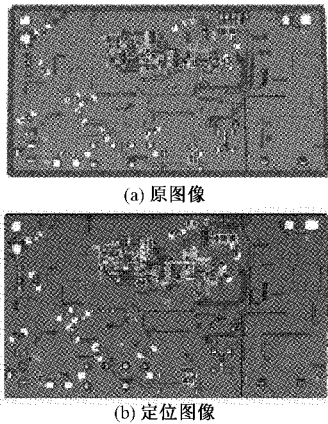


图 3 图像定位图

3) 通过可调电源与控制模块向透明导电涂料层的电极施加一路交流电压信号,通过可调电源与控制模块向被测电路板的电源输入端口一施加另一路交流电压信号,上述一路交流电压信号和另一路交流电压信号的电压之和大于电致发光电压阈值,此时透明导电涂料层和被测电路板的电源支路之间形成受控交流电场,该受控交流电场使透明导电涂料层相应的区域发光。

4) 通过可调电源与控制模块的激励信号输出端向被测电路板的激励信号输入端输送满足被测电路板工作要求的交变激励信号,同时,通过可调电源与控制模块向透明导电涂料层输送与上述交变激励信号相位相反的交流信号,该交流信号与上述交变激励信号的电压之和大于电致发光电压阈值,此时透明导电涂料层和被测电路板之间形成受控交流电场,该受控交流电场使透明导电涂料层相应的区域发光,将透明导电涂料层此时发光区域形成的图像与被测电路板设计图纸整体进行对比,如果此时发光区域形成的图像与被测电路板设计图纸整体一致,则说明被测电路板的受测信号支路工作正常,此时,通过外接电源给被测电路板提供正常工作电源使其正常工作。

如果此时发光区域形成的图像与被测电路板设计图纸整体不一致,则说明被测电路板的受测信号支路工作不正常。

以上即电致发光电路板故障检测方法步骤。可不损害电路板的情况下,有效判别被测电路板工作不正常的受测信号支路。

### 2.3 电路板图像配准流程

实际的电路板均对应着一个电路板文件即 PCB 文件。PCB 文件中含有元件和网络等的电气特性、网络属性以及基本的物理信息等,例如焊盘和导线的尺寸、形状、坐标等。本文通过导入待测电路板以 ASCII 码形式保存的 PCB 文件,对其进行解析,通过 MATLAB 绘制子图像框图。然后将子图像框图和原始图像进行定位。精确定位后,由子图像框图与原始图像中元件位置基本重合这一特点,利用已知的各元件坐标提取出元件的子图像从而达到图像分割的目的。

#### 1) PCB 文件剖析

PCB 文件中每一行代码都有特定的含义,通过 RECORD 标识符来定义一段代码,表示的是线段(Track)还是焊盘(Pad)或者是其他实体。例如 PCB 文件中若包含有 RECORD=Component,则此段代码定义的是元件。以 ASCII 码形式保存的 PCB 文件中包含的主要实体信息有:圆弧、直线、焊盘、组合图形等<sup>[13]</sup>。

下面以 PCB 文件中 Component(元件标号)在 PCB 文件中的相关定义为例对 PCB 文件中关键代码进行说明。如表 1 所示。RECORD=Component 表明了该行代码形容的是元件。LAYER=TOP 代表了此元件在电路板的顶层。ID 号是读取和保存 PCB 文件信息的关键语句,在电路板上面的所有元件都利用 ID 号为索引保存在 PCB 文件中的,在元件标号定义部分仅仅是对元件进行粗略的定义,元件有多少个焊盘、线段、圆弧,其尺寸、大小等都利用 ID 号在 PCB 文件后半部分的 Track、Pad、Arc 定义部分给出了详细的信息。

表 1 PCB 文件中 Component 的定义

代码	含义	说明
RECORD=Component	标记元件类	由此标记说明代码段包含的是元件
LAYER=TOP	元件属于顶层	还有 Bottom(底)层
PATTERN=0805	标记元件封装模型	元件的封装样式
ID=0	在 PCB 文件中的 ID 序号	不同的元件有不同的 ID 号
ROTATION=180.000	元件旋转角度	角度值一般为 90 的整数倍

#### 2) 读取 PCB 文件

通过上面分析可知,在 ASCII 码 PCB 文件中,用 COMPONENT 和 NET 定义了电路板上的元件和网络两大类,用 Pad、Track 和 Arc 分别定义了焊盘、线段和圆弧 3 个小类,这 3 个小类分别从属于元件或者网络。

如一段代码中若含有关键字“Net”,则此行代码形容的实体(焊盘、圆弧等)是从属于网络;若包含“Component”

关键字,则此行代码形容的实体从属于元件。而实体是从属于哪个元件或者哪个网络,则是依据代码中的关键字“ID=”进行确认的。这样,3 个小类和网络与元件便通过 ID 号建立了对应关系。

数据保存形式说明如下。

在分析 PCB 文件的基础上,本文采用在 MATLAB 平台下使用结构体保存数据的方法对以 ASCII 码保存的

PCB文件进行读取。首先定义了 Component 和 Net 两个结构体,并分别在这两个结构体中嵌套了 Pad、Arc 和 Track 等结构体。下面以 Component 结构体为例,详细说明结构体的定义情况(Net 结构体与 Component 类似),如图 4 所示。

```

struct Component
{
    int ID           %ID
    int x           %
    int y           %
    CString name    %
    int i_text      %
    int i_pad       %
    int i_track     %
    int i_arc       %
    CString layer   %
    struct Pad      %Pad
    struct Track    %Track
    struct Arc      %Arc
}

```

图 4 Component 结构体定义

如图 4 所示, ID 用来存储读取到的序列号;  $x$  和  $y$  表示元件中心的位置坐标; name 表示元件名;  $i\_pad$  表示此元件含有多少焊盘( $i\_text$ 、 $i\_track$  以及  $i\_arc$  等与此类似); layer 表示该元件在 PCB 板哪一层。由图 4 可知,在 Component 结构体中嵌套了结构体 Track、Pad 及 Arc,这些嵌套在 Component 中的结构体包含了绘制图形所需的全部信息。

其次在 MATLAB 平台下通过逐行读取以 ASCII 码保存的 PCB 文件代码段的方法,获取 PCB 文件中包含的电路板信息。

再在 MATLAB 平台下通过逐个读取保存在结构体中的数据(例如直线的起点坐标、终点坐标以及线宽等)并依据不同绘制规则,绘制出子图像框图,如图 5 所示。

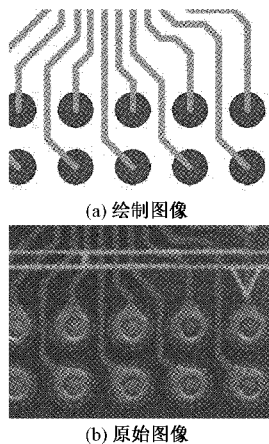


图 5 绘制图形与待测图像对比

图 5(a)为 GDI 绘制的仅包含焊盘和走线的子图像框图,图 5(b)为 PCB 原始图像。从图中可见,绘制的子图像

框图与 PCB 原始图像一致,说明本文采用的方法正确可行。

### 3) 电路板图像分割

彩色图像分割目的是在一幅彩色图像中分割某个指定颜色区域的物体,给定一个具有代表性的彩色样点集,可得到希望分割的颜色的“平均”估计。下面根据彩色图像分割原理,对电路板图像进行分割。

#### (1) 线路的分割

对电路板的线路进行分割。举例说明,如图 6(a)所示,现有电路板的导线绝大部分为铜质导线,其颜色与背景板之间存在较大差异,利用颜色分割的办法可以较为清楚的提取出电路板图片中的导线部分,提取出的导线如图 6(b)所示。

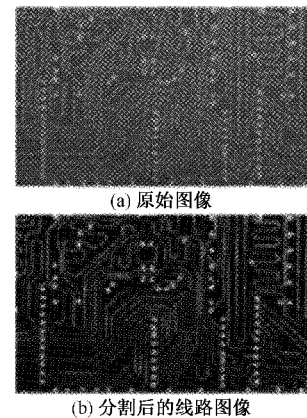


图 6 线路分割

#### (2) 引脚的分割

如图 7(a)所示,现有电路板元件的引脚绝大部分为金属,其银白色外观与背景板之间存在较大差异,利用颜色分割的办法可以较为清楚地提取出电路板图片中的导线部分,提取出的引脚如图 7(b)所示。

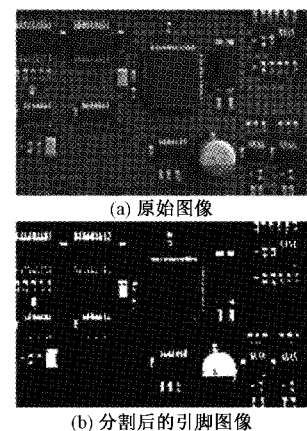


图 7 引脚的分割

### 4) 电路板图像配准方法

由以上电路板图像预定位方法研究可得电路板预定

位原始图像,运用该图像分割的方法来对电路板图像进行配准。如图 8 所示为电路板图像配准。图 8(a)是直接将模板图像覆盖在待测电路板图像上面且未经配准的图像。还需找到模板图像与待测电路板图像的偏移量进行校准。具体做法为在两幅图像中间分别取 3 个对应点,然后分别计算偏移量后再取平均值,作为两幅图像之间的偏移量。然后将模板图像按照偏移量进行偏移,得到配准图像如图 8(b)所示。

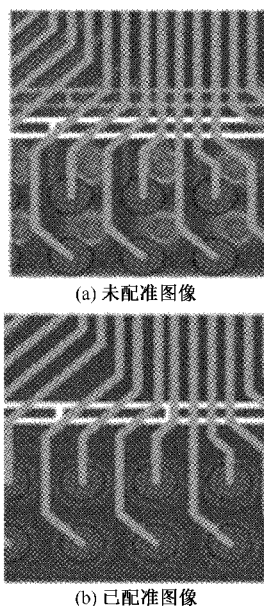


图 8 电路板图像配准图像

图 8(a)是直接将模板图像覆盖在待测电路板图像上面且未经配准的图像。还需找到模板图像与待测电路板图像的偏移量进行校准。具体做法为在两幅图像中间分别取 3 个对应点,然后分别计算偏移量后再取平均值,作为两幅图像之间的偏移量。然后将模板图像按照偏移量进行偏移,得到配准图像如图 8(b)所示。

可见,该方法计算简单、数据处理量少且处理时间短,可提高效率。

### 3 故障检测实验结果分析

在以上电路板图像配准的基础上,利用电致发光电路板的特点,结合经典图像处理技术,可对元件、焊盘和连接线路等方面的故障进行有效检测和定位。

首先,利用电致发光原理提取发光区域,及有损区域;其次,对故障点进行检测和定位。

#### 3.1 发光区域的提取实验

首先对被测电路板进行扫描,采集原始图像。然后对被测电路板输入激励,使电路板通路发光,采集其图像,称为检测图像。然后将两幅图像进行匹配,再利用发光元件或导线所产生的光颜色与电路板图像有着较大差异的特

点,利用彩色图像分割的方法进行发光位置的提取和识别<sup>[12-14]</sup>。提取效果如图 9 所示。图 9(a)为某被测电路板的原始图像,图 9(b)为提取发光元件位置显示图像。由对比图可知,通过利用电致发光原理的该方法,可通过对比图 9(b)与(a)有效定位故障区域。

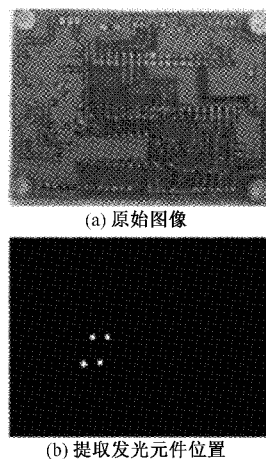


图 9 发光元件位置的提取

由于不同电路板的特性不同,本文针对不同的电路板提出了不同的检测方法。对于元器件分布稀疏、电路层数较少的电路板,提取电路特征,找出发光电路所在的网络,确定故障原因。对于元件线密集或电路层数较多的电路,采用元件引脚提取来定位发光引脚,确定其所属的元件和网络,确定故障原因。

#### 1) 发光焊盘质心的提取

通过对发光区域位置进行提取,可通过求发光区域的质心来确定焊盘位置坐标:首先通过寻找联通区域确定图像中有多少个发光区域,本文采用的是 8 联通的方式进行检测。8 联通是指一个像素,如果和其他像素在上、下、左、右、左上角、左下角、右上角或右下角连接着,则认为他们是联通的;由图 10(a)可看出所取图像由 4 个联通区域,即发光区域。寻找到发光区域后,对其求取质心,得到质心坐标。图 10(b)是对各联通区域进行求取质心并标记后的图像。

求取相应的质心位置坐标后再在模板图像上面进行标记,并可针对性的遍历相应元件结构体中的数据进行匹配,即可得到相对的元件信息。

#### 2) 发光线路位置的提取

若待测区域是线路,由于该线路的发光区域是近似矩形,且由于线路的特点导致无法通过质心坐标来确定其位置。所以本文提出思路,即通过将提取出来的发光线路与绘制出来的模板图像的线路进行图像匹配,从而得出故障线路的信息,如图 11 所示。

从图 11 可以看出,图 11(a)为发光线路的原电路模板图像,图 11(b)为该发光线路提取后的位置示意图,将发光区域和模板图像进行匹配,找出其对应的故障引线和引脚,读取相应数据,即可实现准确的故障定位。

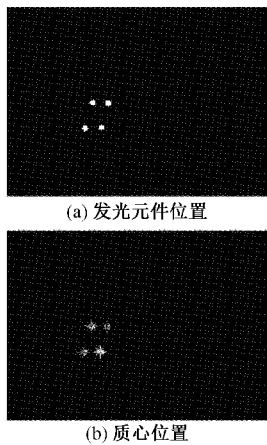


图10 求取发光区域的质心坐标

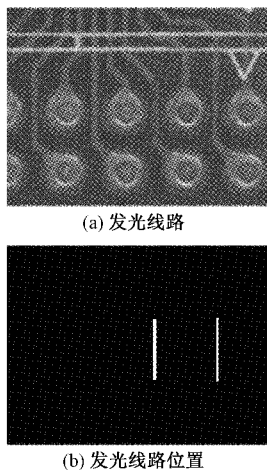


图11 发光线路位置的提取

### 3.2 双层板和多层板的检测实验

作为电路板中介质最为简单、线路最为清晰的种类,双层板的检测较为简单。所以其线路铺设较为稀疏,并且没有导线嵌入板内,由于线路面积相对引脚要大大增加,相对而言配准精度较高,并且易于检测。为提高检测精度,采用了对双层板的线路进行检测。

在实际检测中,可先对双层板的线路进行提取,作为背景板。而后对利用 MATLAB 绘制的模板图像中的线路和焊盘进行绘制。再利用提取发光区域的方法提取出发光线路。将发光线路绘制在只有线路和焊盘模板图像中,如图 12 所示,图中标记的区域即为有损线路。

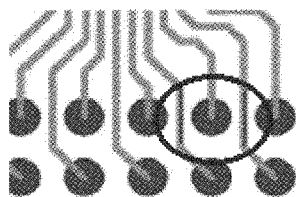


图12 双层板线路检测定位

在线路匹配完毕后,可以从 MATLAB 中对线路进行遍历,找出发光导线所代表的模板导线。在通过对 Net 结构中数据进行读取,从而得到电路板中相关导线的设计信息,用以故障检测。

相对于双层板,多层板的结构相对而言要复杂的多。此外,由于多层板的大部分线路都是嵌入在板内的,所以线路检测无法应用于多层板上。为了解决这个问题,本文提出了以电路板元件引脚为识别对象的检测方法。通过实现元件引脚的定位,判别其所属网络得到相关信息,用以故障检测。具体方案如下:

在元件引脚的提取,并且实现了其质心坐标的计算的基础上,先将待测电路板图像与模板图像进行匹配,然后提取出模板图像中的焊盘图。由于引脚发光受外界干扰较大,故图像会有较大误差,不可直接匹配。故本文采取若发光质心在某一焊盘内部则视为匹配成功的规则。所以需计算待测电路板图像中的发光引脚质心,将其绘入模板图像的焊盘图实现匹配,得到发光引脚对应的焊盘。然后读取相应的 Pad 结构体数据,得到其设计信息,用以故障检测。如图 13 所示,标记处是两个发光质心在某两个焊盘内部,匹配成功,可以用于检测定位。且能够替代传统电路板故障检测中目视判别方法,提高效率。

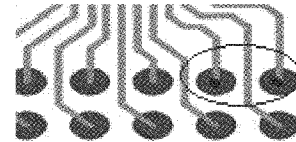


图13 多层板发光引脚检测定位

## 4 结 论

针对目前电路板故障检测逐一排除成百上千的引脚或线路,难度大、周期长等问题,提出了一种电致发光电路板故障检测系统和方法。

首先进行了电致发光电路板故障检测系统的总体设计,对采集到的电路板图像进行了灰度增强,实现了图像预定位,对电路板 PCB 文件的代码进行了分析,对 PCB 文件的数据进行了读取,并利用绘图功能绘制出模板图像。提取电路板预定位图像中的感兴趣部分,将该图像与目标图像进行图像配准,提取出预期故障定位图像中的导线和引脚,将其和模板图像进行匹配,找出对应的故障导线和引脚,读取相应数据,达到准确定位故障的目的。

该电致发光电路板故障检测方法在计算机控制下可实现电路板的故障自动定位,故障可定位在元件级。也可用于系统级关键板件的在线检测。

该法为故障检测提供了一种电路板无物理接触的测试方法。对电路板的损害较小,而且检测比较理想,操作比较快速有效,周期短,易于工程实现。

但在发光区域提取阶段,若需提取的两个区域距离过

近,则两区域之间会难以分开,还需提高图像采集系统分辨率,改进算法,这将是后续研究的方向。

### 参考文献

- [1] 马彩青. 基于图像处理的 PCB 故障检测系统的设计与研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [2] 罗兵,曾歆懿,季秀霞. SMT 质量故障和 AOI 检测方法[J]. 电子质量,2006,(5):35-37.
- [3] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等. 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J]. 电子测量技术,2021,44(2):93-98.
- [4] 张昊,蒋毅. 面向嵌入式机器视觉的图编程式算法开发平台设计[J]. 电子测量技术,2020,43(9):171-176.
- [5] 彭聪,刘彬,周乾. 基于机器视觉和盲源分离的机械故障检测[J]. 上海交通大学学报,2020,54(9):953-960.
- [6] 周晓巍,陈华. 基于机器视觉的电路板故障检测方法[J]. 电子测试,2021(10):40-41.
- [7] 包晓敏,鲁耀文. 基于机器视觉的 PCB 板上元器件检测系统[J]. 无线电工程,2020,50(10):810-818.
- [8] 黄梦涛,连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报,2021,42(10):199-209.
- [9] 张利军,段礼祥,万夫,等. 往复压缩机故障的残差网络诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(5):38-46.
- [10] 孙晓敏,朱晓春,周雯超,等. 基于 Hough 变换实现圆的快速检测方法[J]. 制造业自动化,2018,40(5):115-119.
- [11] 代勤,王延杰,韩广良. 基于改进 Hough 变换和透视变换的透视图像矫正[J]. 液晶与显示,2012,27(4):552-556.
- [12] 鲁昌华,徐胜海,刘春. 数字图像处理技术在 PCB 板检测中的应用[J]. 仪器仪表学报,2001(S2):426-429.
- [13] 范小涛,夏雨人. 一种基于图像处理的 PCB 检测算法研究[J]. 计算机工程与应用,2004(13):91-92,211.
- [14] 乔闹生. 印制电路板缺陷图像边缘检测[J]. 光子学报,2016,45(4):123-129.
- [15] 熊峰,潘雪,刘颖,等. 自动气象站线缆故障测试仪的研究与设计[J]. 国外电子测量技术,2021,40(1):111-116.
- [16] 何翔. 光伏组件电致发光缺陷检测仪检测软件研究与开发[J]. 计量与测试技术,2018,45(12):33-37.
- [17] 吕昂,陈怡,方晋甬,等. 基于红外热成像的电路板载器件故障检测[J]. 激光与红外,2018,48(5):579-584.

### 作者简介

叶慧娟,工学硕士,副研究员,主要研究方向为武器装备维修和检测技术等。

E-mail:yehuijuan@126.com