

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902696

热电池装配缺陷的灰度峰值坐标比对算法*

赵涛^{1,2} 张思祥¹ 徐文超¹ 王哲¹ 赵子豪¹ 周围¹

(1. 河北工业大学 机械工程学院 天津 300131; 2. 天津理工大学中环信息学院 机械工程系 天津 300380)

摘要:针对热电池常见的装配缺陷,提出一种基于热电池电堆区域灰度峰值坐标比对的缺陷检测算法。通过模板匹配、仿射变换、灰度矫正、图像放大等预处理算法提取热电池电堆,分析热电池个数错误、漏装负极、漏装集流片、负极与集流片次序放反、整体倒装5种缺陷时,灰度直方图波峰波谷个数、波峰波谷坐标距离等特征与标准电池的区别。使用该算法对400个检测样本进行实验验证,检测结果正确率达到95.5%,结果表明,该算法在热电池的批量无损检测中有较高的实用价值。

关键词:热电池;模板匹配;峰值坐标;无损检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on defects detecting method in thermal battery based on a comparison with coordinates of the peaks in gray histogram

Zhao Tao^{1,2} Zhang Sixiang¹ Xu Wenchao¹ Wang Zhe¹ Zhao Zihao¹ Zhou Wei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Zhonghuan Information College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China)

Abstract: A method based on a comparison with the coordinates of the peaks in gray scale was proposed to detect the assembly defects of thermal battery. The stack of thermal battery was extracted by template matching. Then image preprocessing methods such as affine transformation, gamma correction and image pyramid were used to improve the contrast of the gray scale. Five defects included the deficiency of monomer thermal battery, the missing of negative electrode, the missing of current collector, wrong assembly order and the overall flip-chip of thermal battery were analyzed. Characteristics in defective battery such as the number of peaks and valleys in gray histogram, distances between the peak and valley were compared with corresponding ones in standard battery. Verified by 400 test images, the experimental results showed that the proposed method possesses an accuracy of 95.5% and proved that this method can quickly and efficiently detect the defects in thermal battery.

Keywords: thermal battery; template matching; coordinates of the peaks; nondestructive testing

0 引言

热电池又叫熔盐电池,贮存时电解质为不导电的固态熔盐,电解质融化前电池处于惰性状态^[1],不会出现自放电的现象,可长时间贮存。热电池自带有激活装置,通过引燃其内部的加热药剂使电池温度迅速上升至熔盐熔点,使电解质熔融成为离子导体而导电。热电池激活后的电导率是一般水溶液电解质电导率的10倍以上,具有大电流放电的优点^[2],因此,广泛应用在导弹、核武器、鱼

雷等高新技术军用武器系统中。

图1(a)所示为热电池外形图,图1(b)所示为热电池X射线图像。热电池的核心部分是由负极(0.2 mm)、电解质(0.3 mm)、正极(0.2 mm)、加热药剂(0.5 mm)、集流片(0.1 mm)循环放置组成的电堆,如图1(b)红色框线位置,其中,把每一组负极、电解质、正极、加热药剂称为单体电池,每两个单体电池之间通过集流片隔开,目的是阻挡加热药剂对负极的瞬间热冲击,对电子导体有集流作用。

热电池电堆中单体电池和集流片的标准装配顺序如

收稿日期: 2019-10-23 Received Date: 2019-10-23

* 基金项目:“十三五”装备预研共用技术(41421070102)资助项目

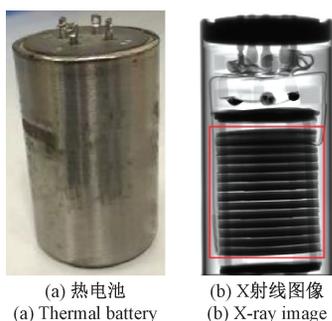


图 1 热电池电堆结构
Fig. 1 Stack structure of thermal battery

图 2(a) 所示, 装配过程中由于操作人员的失误, 可能会出现漏装集流片、漏装负极、负极和集流片放反的次序错误、单体电池整体倒装等装配缺陷如图 2(b) ~ (e) 所示。这些缺陷都会引起热电池发生故障, 导致热电池输出电压不正常或内部短路等问题。每一种型号热电池包含的单体电池个数都是固定的, 单体电池的个数错误如图 2(f) 所示, 也会导致电池输出电压有误且不稳定, 最终导致电池失效。

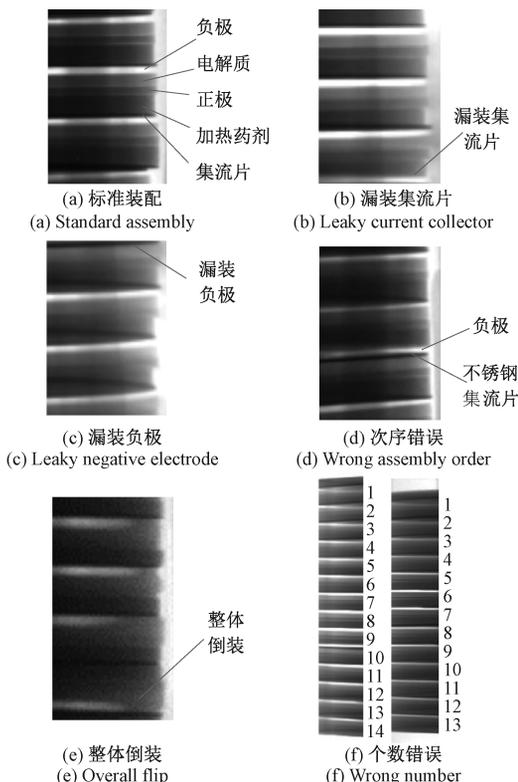


图 2 热电池 5 种装配缺陷
Fig. 2 Five assembly defects of thermal battery

应用数字图像处理技术对纹理特征进行识别已经有很多成果。孙泉文^[3]利用纹理特征和 Hu 不变矩对滤光片缺陷进行识别, 对点状和线状划痕类缺陷有较好效果。

王清涛等^[4]应用改进的灰度共生矩阵识别木材种类, 对不同纹理分布规律可以进行有效识别。邹明明等^[5]利用改进的模板匹配算法有效的识别了不同轮廓的相似字符。张思祥等^[6]综合以上几种算法的优点, 对单体热电池缺陷进行了有效识别, 但对于整个热电池的识别, 识别效率较低。陈兆学等^[7]利用灰度直方图呈现多个波峰、波谷的特点, 选取多个波峰点用作 K-means 聚类算法的初始聚类中心, 高效的分割出了脑白质、脑灰质、脑脊液等组织, 并讨论了滑窗像素宽度对波峰波谷检测精度的影响。

本文根据热电池 X 射线影像的特点, 即电堆部分横向灰度基本不变, 纵向灰度随着单体电池和集流片循环放置呈周期性的波动, 其中, 波峰位置为负极, 波谷位置为集流片, 提出了基于灰度直方图比对和峰值坐标比对的缺陷识别和检测算法并应用于热电池检测, 实验表明, 该算法能够高效准确的对周期性变化的同一纹理分布规律中的细微缺失和次序错误进行有效识别。

1 热电池装配缺陷检测算法流程

热电池装配缺陷检测算法流程如图 3 所示。利用模板匹配法提取待检测热电池电堆区域, 通过角点检测计算出电堆与竖直轴的夹角, 利用仿射变换旋转矫正将倾斜的电堆旋转到正确位置, 对于灰度值接近的图像, 还需要通过灰度值 Gamma 校正和拉普拉斯金字塔放大来突出纹理变化特征。利用灰度峰值坐标比对算法判别热电池是否有缺陷, 如有缺陷, 输出缺陷位置和缺陷类型, 如无缺陷, 输出正确电池。

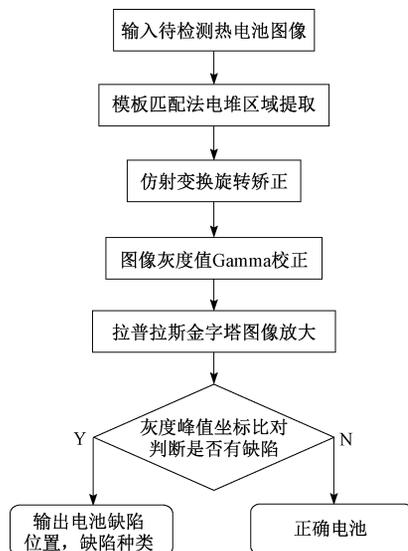


图 3 热电池装配缺陷检测算法流程
Fig. 3 Flowchart of defect detection algorithm on thermal battery assembly

1.1 模板匹配法 ROI 区域提取

本文分析的5种热电池装配缺陷错误,均出现在热电池电堆位置,因此,需要先进行ROI区域提取,将热电池的电堆部分提取出来。常用的模板匹配算法^[8]有方差匹配法、归一化方差匹配法、相关性匹配法、归一化相关性匹配法、相关系数匹配法、归一化相关系数匹配法6种,通过实验可知,只有方差匹配法、归一化方差匹配法能够将电堆区域完整的提取出来,由于归一化的方法可以降低因模板和图片之间光照不同引起的匹配误差^[9],最终选择归一化平方差匹配法,算法过程如式(1)所示。

$$R_{sq_diff_normed} = \frac{\sum_{x',y'} (T(x',y') - I(x+x',y+y'))^2}{\sqrt{\sum_{x',y'} T(x',y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I(x+x',y+y')^2}} \quad (1)$$

式中: T 表示模板图像,根据电堆与热电池影像的比例从标准电池中选取,大小为(344×426); I 是通过X射线仪扫描得到热电池待匹配图像(1 000×1 000); R 表示输出结果,完全匹配结果为0。

1.2 仿射变换旋转矫正

如果电堆倾斜严重,为了降低后续灰度峰值坐标提取的误差,需要对电堆进行旋转矫正^[10]。先利用角点检测法提取第一个单体电池左上角点坐标 (x_1, y_1) 和最后一个单体电池左下角点坐标 (x_2, y_2) ,利用仿射变换以 (x_1, y_1) 为旋转中心,旋转角度 θ 由式(2)得到。

$$\theta = \arcsin \frac{|x_2 - x_1|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (2)$$

1.3 图像灰度值 Gamma 校正

热电池X射线图像由X射线仪扫描得到,图像的质量受到X射线仪焦点参数设定、被测电池与X射线源的距离^[11-12]、不同型号热电池的高度等因素影响。由于热电池电堆部分只有负极(白色)颜色较浅,其余部分颜色较深,图像整体偏暗。为了提高图像对比度,扩展图像的高亮部分^[13],压缩暗调部分,使后续直方图的特征更明显,对电堆图像进行Gamma校正,图像处理过程如式(3)所示。

$$V_{out} = A \cdot V_{in}^\gamma \quad (3)$$

式中: A 为常数; $0 < \gamma < 1$ 需要根据后续得到的灰度直方图效果进行调整,初取 $\gamma = 0.8$ 。

1.4 拉普拉斯金字塔图像放大

单体电池的厚度通常在1.5~2 mm,为了提高后续扫描的灰度直方图中波峰波谷位置区分度,方便峰值坐标比对计算,应用拉普拉斯金字塔算法^[14]对电堆图像进行放大。根据热电池型号、单体热电池个数不同,选择不同的放大倍数,对于本次实验型号热电池,放大倍数为2倍。

2 装配缺陷的灰度峰值坐标比对算法

2.1 灰度直方图比对进行缺陷定位

经过预处理后,热电池电堆轮廓如图4(a)和(c)所示,其中,实验用热电池电堆中单体电池个数为13,1~13为单体电池编号。用 $F(x, y, z)$ 表示灰度图像 I 所对应的像素灰度三维曲面, (x, y) 是灰度图像 I 的像素坐标, z 表示灰度图像 I 在 (x, y) 像素坐标点的灰度值,若图像 I 大小为 $M \times N$,则有 $1 \leq x \leq M, 1 \leq y \leq N, 0 \leq z \leq 255$ 。

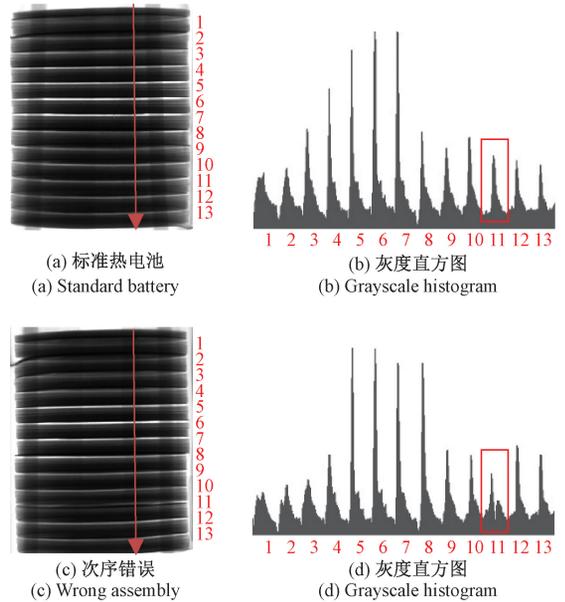


图4 灰度直方图比对

Fig. 4 Comparison of grayscale histogram

为了提取有效特征,对灰度图像 I 固定 x 坐标进行灰度扫描(取 $x = kM, 0 < k < 1, k$ 值由实验得到,本文取 $k = 0.6$)。扫描曲线 $F(x, y, z) | x = kM$ 的横坐标轴为像素坐标 y ,纵坐标轴为灰度值 z ,图4(b)和(d)为扫描得到的灰度直方图。依图4可知,扫描曲线波峰为每一个单体热电池中负极所在的位置,波谷为每一个单体电池中集流片所在的位置。将波峰和波谷的横坐标分别存入数组 $f[i] = \max[i]$ 和 $g[i] = \min[i]$ 中, $1 \leq i \leq n, n$ 为热电池中单体电池的个数。

从图4(b)可以看出,对于每一个单体电池,从负极开始到集流片灰度值逐渐递减,由于在X射线影像的拍摄时,图像中间位置的X射线辐射强度最大,图像最清晰,反映到灰度直方图上即中间部分波峰和波谷的灰度差距最大。对比图4(b)和(d)可以看出,图4(b)每一个单体电池负极到集流片(波峰到波谷)的灰度走向基本没有变化,图4(b)由于电堆中的第11个单体电池出现

负极和集流片放反的次序错误, 灰度从波峰迅速下降到波谷, 出现从波峰到波谷的灰度突变, 可以初步判断第 11 个单体电池有装配缺陷。对于其他几种装配缺陷, 灰度直方图也有明显特征。

2.2 灰度峰值坐标分析

为了简化分析模型, 以像素坐标 y 为横坐标, 灰度值 z 为纵坐标, 波峰波谷间用直线连接, 绘制灰度扫描曲线如图 5(a)~(e) 所示。

由灰度扫描曲线可以看出, 标准装配, 相邻的波峰之间、相邻的波谷之间距离变化不大, 比较均匀, 并且波峰的个数等于波谷的个数等于单体电池的个数。如果波峰个数与波谷个数相等且不等于单体电池个数, 电池有可能出现单体电池个数错误。漏装集流片的电池会少一个

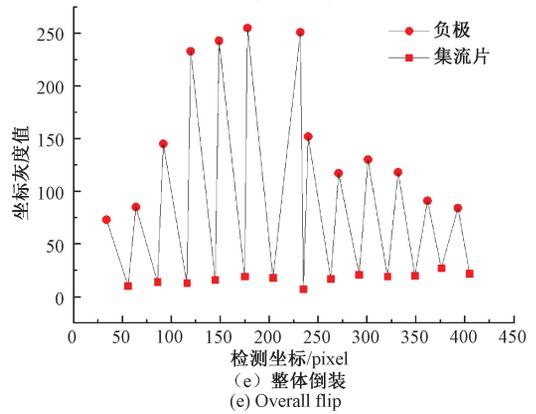
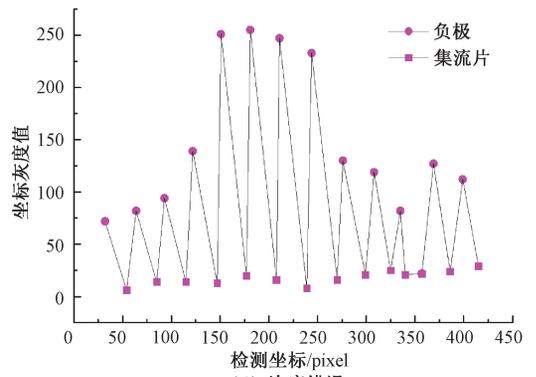


图 5 简化热电池灰度扫描曲线

Fig. 5 Simplified gray scanning curve of thermal battery

波谷, 且出现相邻两波谷距离远大于平均波谷距离情况。漏装负极的电池会出现少一个波峰且相邻两波峰距离远大于平均波峰距离的情况。负极和集流片次序错误当出现在远离中心位置时, 会多一个波谷且出现波谷到波峰的距离远小于平均波谷到波峰距离的情况, 当出现在中心位置, 波峰波谷数量正确, 但出现波谷到波峰的距离远小于平均波谷到波峰距离的情况。整体倒装会出现相邻两波峰距离远大于平均波峰距离且波谷到波峰的距离远小于平均波谷到波峰距离的情况。

2.3 灰度峰值坐标比对进行缺陷识别

计算每两个相邻波峰(负极)之间的像素距离 f_i :

$$f_i = f[i + 1] - f[i] \quad 1 \leq i \leq n - 1 \quad (4)$$

计算每两个相邻波谷(集流片)之间的像素距离 g_i :

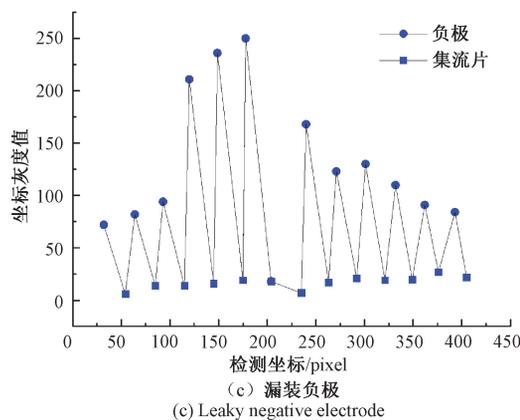
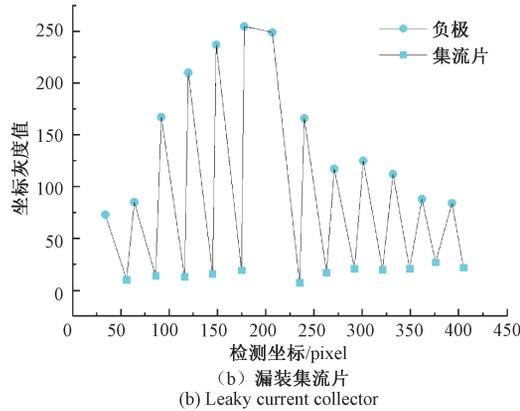
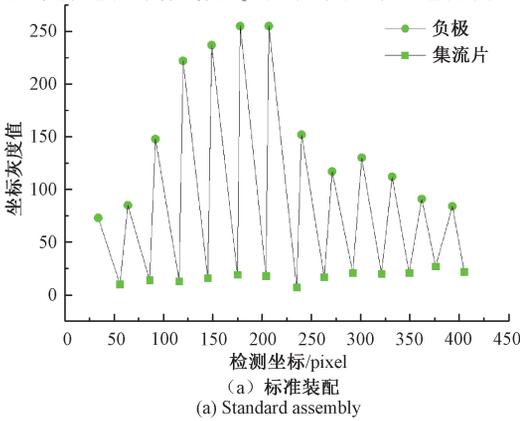
$$g_i = g[i + 1] - g[i] \quad 1 \leq i \leq n - 1 \quad (5)$$

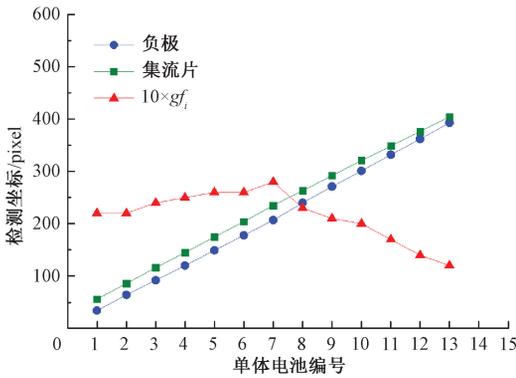
计算每两个相邻波谷(集流片)和波峰(负极)之间的像素距离 gf_i :

$$gf_i = g[i] - f[i] \quad 1 \leq i \leq n \quad (6)$$

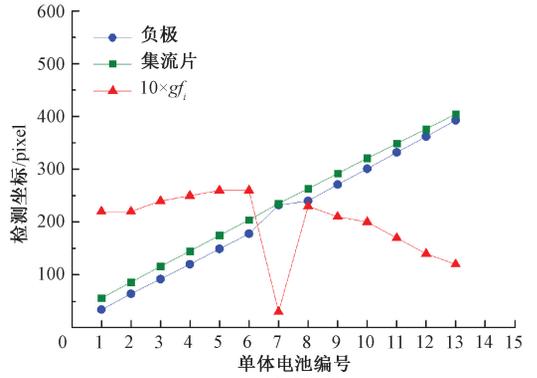
得到像素坐标 y , 像素距离之间的关系如图 6(a)~6(e) 所示, 横坐标为单体电池的编号。

图 6(a)~6(e) 中, 为了能够在同一个坐标系中清晰的表达像素坐标 y , 每两个相邻波谷和波峰之间的像素

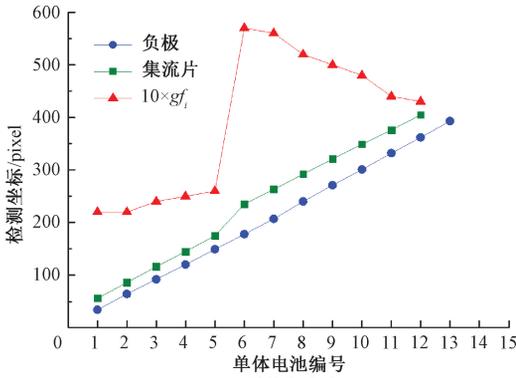




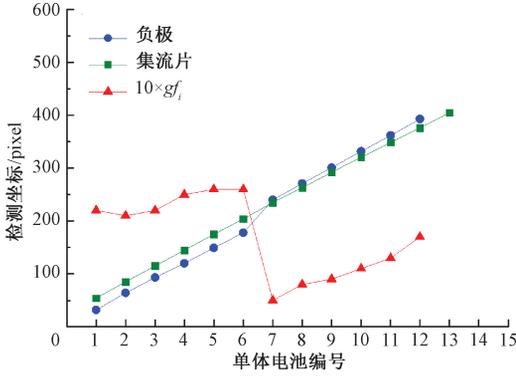
(a) 标准装配
(a) Standard assembly



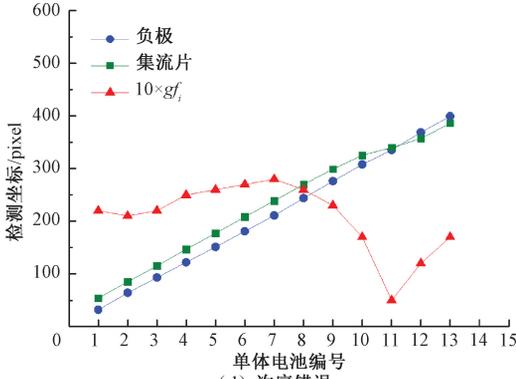
(e) 整体倒装
(e) Overall flip



(b) 漏装集流片
(b) Leaky current collector



(c) 漏装负极
(c) Leaky negative electrode



(d) 次序错误
(d) Wrong assembly order

图6 热电池像素坐标关系

Fig. 6 Pixel coordinates of thermal batteries

距离 gf_i 之间的关系,将 gf_i 数值放大了 10 倍并取绝对值。如图 6(a) 所示,对于标准电池装配,相邻 gf_i 变化不大;如图 6(b) 所示,第 6 个单体电池处漏装集流片,则 gf_6 远大于标准电池平均值;如图 6(c) 所示,第 7 个单体电池处漏装负极,则从 gf_7 开始所有 gf_i 值为负;如图 6(d) 所示,第 11 个单体电池处负极和集流片次序错误, gf_{11} 远小于标准电池平均值且 gf_{11} 以后的值为负;如图 6(e) 所示,第 7 个单体电池处整体倒装, gf_7 远小于标准电池平均值。

3 实验与分析

3.1 由波峰波谷数量关系对缺陷类别进行判断

规律统计实验取 20 张标准热电池 X 射线图像,个数错误、漏装负极、漏装集流片、次序放反、倒装缺陷热电池图片各 4 张(每张缺陷电池只有 1 类缺陷,且缺陷个数只有 1 个),得到实验结果如表 1 所示。

表 1 波峰波谷数量关系判断缺陷类别

Table 1 Judgment the defect category through number of crest and trough

判断要素	波峰个数	波谷个数	两波峰间无波谷数	两波谷间无波峰数	缺陷类别
标准	n	n	0	0	正常
个数	$n - 1$	$n - 1$	0	0	少 1 个单体
漏负极	$n - 1$	n	0	1	少 1 个负极
漏集流	n	$n - 1$	1	0	少 1 个集流片
次序	n	$n + 1$	0	1	1 对放反
倒装	n	n	0	0	无法判断

对于标准热电池,波峰个数等于波谷个数 n ,波峰波谷交替出现;对于少 1 个单体热电池的缺陷,波峰波谷个数相等且等于 $n - 1$,波峰波谷交替出现;对于漏装 1 个负极的缺陷,波峰个数为 $n - 1$,且两波谷间无波峰个数为 1;对于漏装 1 个集流片的缺陷,波谷个数为 $n - 1$,且两波峰间无波谷个数为 1;对于 1 对负极和集流片次序放反的缺陷,波谷个数为 $n + 1$,且两波谷间无波峰个数为 1;对于倒装缺陷,数据与标准电池一致,无法判断。实验检测热电池中单体电池个数为 13 个,则 $n = 13$ 。

3.2 由波峰波谷距离关系对缺陷位置进行判断

定义 S_1 代表标准热电池平均的波峰之间像素距离, S_2 代表标准热电池平均的波谷之间像素距离, S_3 代表标

准热电池平均的波谷和波峰之间像素距离, S_1 、 S_2 、 S_3 分别由实验测得。实验取 20 张标准热电池 X 射线图像,每个热电池图像预处理后,固定电池堆的 x 坐标进行灰度扫描(取 $x = 0.6 M$),共得到 20 组数据取平均值,定义 $f[j][i]$ 为第 j 个热电池的第 i 个单体热电池波峰坐标, $g[j][i]$ 为第 j 个热电池的第 i 个单体热电池波谷坐标,有 $1 \leq j \leq 20, 1 \leq i \leq n$ 。则:

$$S_1 = \sum_{j=1}^{20} \frac{f[j][n] - f[j][1]}{20(n-1)} \quad (7)$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^{20} \frac{g[j][n] - g[j][1]}{20(n-1)} \quad (8)$$

$$S_3 = \sum_{j=1}^{20} \sum_{i=1}^n \frac{g[j][i] - f[j][i]}{20n} \quad (9)$$

表 2 波峰波谷距离关系判断缺陷位置

Table 2 Judgment the defect location through distance of crest and trough

判断要素	波峰距离	波谷距离	波谷到波峰距离	缺陷位置
标准	$(0.8 \sim 1.2) \times S_1$	$(0.8 \sim 1.2) \times S_2$	$(0.7 \sim 1.2) \times S_3$	正常
个数	※	※	※	无法判断
漏负极	$f_i > 1.6 \times S_1$	※	※	i
漏集流	※	$g_i > 1.6 \times S_2$	※	i
次序	※	※	$gf_{i+1} < 0.4 \times S_3$	i
倒装	$f_i > 1.6 \times S_1$	※	$gf_{i+1} < 0.4 \times S_3$	$i + 1$

注:※表示数据没有超过缺陷判断的临界值

通过实验可知,标准电池的波峰距离均在 $(0.8 \sim 1.2) \times S_1$ 范围之内,标准电池的波谷距离均在 $(0.8 \sim 1.2) \times S_2$ 范围之内,标准电池波谷到波峰的距离,均在 $(0.7 \sim 1.2) \times S_3$ 范围之内;对于个数错误缺陷,数据与标准电池一致,无法判断;如果 $f_i > 1.6 \times S_1$,则可知第 i 个单体电池漏装负极;如果 $g_i > 1.6 \times S_2$,则可知第 i 个单体电池漏装集流片;如果 $gf_{i+1} < 0.4 \times S_3$,则可知第 i 个单体电池负极和集流片次序放反;如果同时满足 $f_i > 1.6 \times S_1$ 、 $gf_{i+1} < 0.4 \times S_3$,则可知第 $i + 1$ 个单体电池整体倒装。

3.3 灰度峰值坐标比对算法实验验证

热电池 X 射线图像拍摄采用德国 phoenix 公司生产的 s240D 工业射线仪,其焦点最小可达 $3 \mu\text{m}$,最大电压可达 240 kV,能达到 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的细节分辨能力。图像处理算法、热电池灰度直方图绘制、波峰波谷个数计数、波峰波谷坐标距离计算等均采用 OpenCV 库函数编程实现。采用标准热电池 200 个,5 种缺陷电池各 40 个,综合应用 3.1、3.2 节得到的灰度值波峰波谷数量关系、灰度值波峰波谷距离关系判断依据对总计 400 个热电池样本进行实验验证,得到灰度峰值坐标比对算法检测结果如表 3 所示。从表 3 数据结果可知,峰值坐标比对算法对个数错误、漏装负极、漏装集流片、倒装 4 种缺陷的正确率均能达到 92.5% 以上,对次序放反的误检率较高。

表 3 灰度峰值坐标比对算法检测结果

Table 3 Detection result of the comparison on coordinates of gray-scale peak

	样本个数	成功检测	错检	漏检	误检率/%	正确率/%
标准	200	194	6	0	3	97
个数	40	38	2	0	5	95
漏负极	40	40	0	0	0	100
漏集流	40	37	0	3	7.5	92.5
次序	40	35	2	3	12.5	87.5
倒装	40	38	2	0	5	95
总计	400	382	12	6	4.5	95.5

原因分析,误检率的产生主要和次序放反的位置、X 射线的能量和强度、焦点尺寸等因素有关^[15],X 射线仪在扫描时,热电池中间部位 X 光线垂直入射,辐射强度最高,得到的图像最清晰,如果次序错误出现在热电池中间部位,则判断准确率较高;热电池上下部分 X 光线倾斜入射,辐射强度减弱,并且集流片得到的图像不再是一条直线,而是一个椭圆,会降低波谷坐标提取的准确性,最终降低正确率。

4 结 论

针对热电池常见的 5 种装配错误缺陷,提出了根据纹理变化特征规律,对预处理后的热电池电堆灰度图像,

固定 x 坐标进行灰度扫描,通过得到的波峰波谷数量、波峰波谷坐标距离关系对缺陷进行识别分类的灰度峰值坐标比对算法。实验检测结果表明,提出的算法对于 400 个检测样本的总的正确率能达到 95% 以上,其中,对个数错误、漏装负极、漏装集流片、倒装四种缺陷正确率较高,对于次序放反的缺陷误检率较高。检测单个热电池所需的时间为 1.2 s,相比于文献[6]算法,检测效率提高了 60%。

下一步研究的重点是通过优化灰度扫描曲线 $F(x, y, z) | x = kM, 0 < k < 1$ 中的 k 值来降低 X 射线锥度扫描时热电池上下部分峰值坐标提取的误差来进一步提高检测正确率。

参考文献

- [1] 李翰朋,宣兆龙,李天鹏. 弹载电池应用现状及发展方向[J]. 电源技术,2018,42(11):1761-1763.
LI H P, XUAN ZH L, LI T P. Application situation and development direction of battery in ammunition[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(11): 1761-1763.
- [2] FREITAS G C S, PEIXOTO F C, VIANNA A S. Simulation of a thermal battery using phoenics [J]. Journal of Power Sources, 2008,179(1): 424-429.
- [3] 孙泉文. 基于纹理特征和 Hu 不变矩的 KELM 滤光片缺陷识别研究[J]. 甘肃科学学报,2019,31(5): 17-22.
SUN X W. Study on the Identification of KELM filter defects based on texture characteristics and Hu invariant moment[J]. Journal of Gansu Sciences,2019,31(5): 17-22.
- [4] 王清涛,杨洁. 应用改进的灰度共生矩阵识别木材纹理多重特征值[J]. 西北林学院学报,2019,34(3): 191-195.
WANG Q T, YANG J. Application of improved gray symbiosis matrix to identify the multiple characteristic values of wood texture[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019,34(3):191-195.
- [5] 邹明明,卢迪. 基于改进模板匹配的车牌字符识别算法实现[J]. 国外电子测量技术,2010,29(1): 59-61,80.
ZOU M M, LU D. Recognition algorithm of car license plate characters based on modified template match[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2010, 29(1):59-61,80.
- [6] 张思祥,胡雪迎,竭霞. 单体热电池装配缺陷的图像检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(2): 132-139.
ZHANG S X, HU X Y, JIE X, Research on image

detection method for assembly failure of monomer thermal battery [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2019,33(2):132-139.

- [7] 陈兆学,喻海中,陈浩. 基于灰度直方图多峰值选取的脑组织 MRI 图像 K-means 聚类分割方法研究[J]. 生物医学工程学杂志,2013,30(6):1164-1170.
CHEN ZH X, YU H ZH, CHEN H. Research on K-means clustering segmentation method for MRI brain image based on selecting multi peaks in gray histogram[J]. Journal of Biomedical Engineering,2013,30(6):1164-1170.
- [8] 陈丽芳,刘渊,须文波. 改进的归一互相关法的灰度图像模板匹配方法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(26):181-183.
CHEN L F, LIU Y, XU W B. Improved normalized correlation method of gray image template matching method [J]. Computer Engineering and Applications, 2011,47(26):181-183.
- [9] RODGERS J L, NICEWANDER W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. American Statistician, 1988(42): 59-66.
- [10] 邹北骥,戴玉兰,朱承璋. 具有仿射不变性的视网膜图像配准方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(6):943-950.
ZOU B J, DAI Y L, ZHU CH ZH. Retinal image registration method with affine invariance [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(6):943-950.
- [11] CHANG M, XIAO Y S, CHEN Z Q. Improve spatial resolution by modeling finite focal spot (MFFS) for industrial CT reconstruction [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30641-56.
- [12] SCHMITT R H, BURATTI A. Model-based optimisation of CT imaging parameters for dimensional measurements on multimaterial workpieces [C]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018: 527-530
- [13] 董雪莹,李良荣,黄子强. 夜间拍照图像对比度的 Gamma 灰度校正[J]. 光电子技术,2018,38(3): 195-200.
DONG X Y, LI L R, HUANG Z Q, The gamma grayscale correction of image contrast at night [J]. Optoelectronic Technology, 2018,38(3):195-200.
- [14] 李肖肖,聂仁灿,周冬明. 图像增强的拉普拉斯多尺度医学图像融合算法[J]. 云南大学学报(自然科学版),2019,41(5):908-917
LI X X, NIE R C, ZHOU D M. Laplacian multi-scale medical image fusion algorithm for image enhancement [J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2019,41(5):908-917
- [15] 潘小东,张催,商宏杰. 锥束 CT 成像质量影响因素研

究[J]. 原子核物理评论, 2019,36(2):211-217.

PAN X D, ZHANG C, SHANG H J. Study on influencing factors of cone-beam CT imaging quality [J]. Nuclear Physics Review, 2019,36(2):211-217.

作者简介



赵涛, 2007 年于北京科技大学获得学士学位, 2010 年于北京科技大学获得硕士学位, 现为河北工业大学博士研究生, 天津理工大学中环信息学院副教授, 主要研究方向为计算机图像处理技术。

E-mail:92zhaotao@163.com

Zhao Tao received his B. Sc. degree from University of Science and Technology in 2007, M. Sc. degree from University of Science and Technology in 2010. Now he is a Ph. D. candidate at Hebei University of Technology, associate professor at Zhonghuan Information College, Tianjin University of Technology. His main research interests include computer image processing technology.



张思祥, 1982 年于天津大学获得学士学位, 1993 年于浙江大学获得硕士学位, 1996 年于天津大学获得博士学位, 现为河北工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为机械几何量测量理论与技术、计算机图像处理技术研究。

E-mail:13502063552@163.com

Zhang Sixiang received his B. Sc. degree from Tianjin University in 1982, M. Sc. degree from Zhejiang University in 1993, Ph. D. degree from Tianjin University in 1996. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Hebei University of Technology. His main research interests include theory and technology of mechanical geometric measurement and computer image processing technology.



周围(通信作者) 2004 年于河北工业大学获得学士学位, 2007 年于河北工业大学获得硕士学位, 2010 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为测试计量技术与仪器。

E-mail:zhouwei19800323@163.com

Zhou Wei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2004, M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2007, Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2010. Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor at Hebei University of Technology. His main research interests include measurement technology and instruments.