

基于 X 光图像的锂电池正负极距离检测

米勇, 曾祥进*

武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205

摘要 针对锂电池正负极缺陷造成严重安全事故的问题, 提出一种锂电池正负极距离缺陷检测方法。先获取锂电池的 X 光图像, 通过分水岭算法截取图像中的感兴趣区域, 并对感兴趣区域进行旋转校正。针对锂电池负极直线区域难以分割的问题, 设计水平方向梯度模板提取正极边界, 截取锂电池负极直线部分。利用多尺度视网膜增强算法和扩大差分模板提取负极直线。对提取出的负极直线进行水平投影以获取直线纵坐标, 根据正极梯度和提取的负极直线获取正负极端点坐标, 进而获取锂电池正负极距离。实验结果表明, 所提算法的漏检率低, 运行稳定, 满足工业要求。

关键词 图像处理; 锂电池; X 光图像; 分水岭算法; 多尺度视网膜增强; 梯度投影

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1010001

Detection of Distance Between Positive and Negative Poles of Lithium Batteries Based on X-Ray Images

Mi Yong, Zeng Xiangjin*

School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China

Abstract Aiming at the serious safety accidents caused by the defects of positive and negative electrodes of lithium batteries, a defect detection method for the distance between positive and negative electrodes of lithium batteries is proposed. Firstly, the X-ray image of the lithium battery is obtained, the region of interest in the image is intercepted by the watershed algorithm, and the region of interest is rotated and corrected. Secondly, aiming at the problem that it is difficult to segment the negative linear region of the lithium battery, a horizontal gradient template is designed to extract the positive boundary and intercept the negative linear region of the lithium battery. Then, a multi-scale retinal enhancement algorithm and an extended differential template are used to extract the negative line. Finally, the vertical coordinates of the line are obtained by horizontal projection of the extracted negative line, and the coordinates of the positive and negative pole points are obtained according to the positive gradient and the extracted negative line, so as to obtain the positive and negative distances of the lithium battery. The experimental results show that the proposed algorithm has low missing rate and stable operation and meets the industrial requirements.

Key words image processing; lithium battery; X-ray image; watershed algorithm; multi-scale retina enhancement; gradient projection

1 引言

随着时代的发展, 生态环境的污染问题得到广

泛关注。锂电池作为一种新型能源, 具有污染小、体积小和使用寿命长等特点, 是国内外动力电池发展和应用的一大趋势。电芯是锂电池中最重要的

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-04-22; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61502354)、创业实践项目(20181049002S)、研究生教育创新基金(CX2020200)

通信作者: *1878593139@qq.com

组成部分,其主要由正极片、负极片和隔膜组成,电芯的质量与正负极片间的距离密切相关,正负极片间的距离过大或过小都会造成电芯存在缺陷,进而严重影响电池使用寿命并造成极大的安全隐患^[1]。

在电池电芯的检测方面,传统工业上采用的是抽样检测方式,通过人工的方法进行检测,不仅严重损害工人视力,也会导致检测效率低、误检率高^[2]。目前研究人员对锂电池的自动化检测大多是极片缺陷检测,如对极片压痕、破损、气泡等的检测,而对正负极距离的检测较少。刘骏等^[3]采用差分的方法对锂电池图像进行处理,根据距离因素过滤出负极直线,实现负极的检测;邬灏^[1]利用 Sobel 算子检测负极直线,通过霍夫变换进行直线检测,以获取正负极片间的距离;闫欣等^[4]通过高斯滤波对图像进行平滑,以 Prewitt 算子检测电极图像边缘,并通过形态学操作和 Hough 变换提取负极的起始端点。

由于上述方法均只适用于极片数量较少的锂电池,本文处理的锂电池层级较多,极片之间重叠交错,同时受生成 X 光图像的机器的影响,得到的锂电池 X 光图像整体偏暗。极片层级较多时会产

生遮挡现象,采用以往的方法均不能得到较好的结果。为了提高锂电池正负极片之间距离检测的效率和适用性,本文在获取锂电池 X 光图像的基础上,结合图像处理相关算法,实现了一套锂电池正负极距离测量的自动检测算法。

2 感兴趣区域提取

在工业自动化生产中,一个 X 光机对应多条产线,不同的产线得到的 X 光图像中锂电池的位置也不同,同时受电池型号的影响,同一条产线的锂电池在 X 光图像中的大小也有些许不同。为了方便后续对锂电池进行统一处理,同时也为了避免背景的干扰,在进行检测前需要提取锂电池的感兴趣(ROI)区域。本文采用分水岭算法^[5]分割锂电池区域,分水岭算法就是将图像上的水坝边界提取出来生成连续的分水线,图像也就相应地被分割成了几块连通区域^[6],分水岭算法处理图如图 1 所示,图 1(a)为原图,图 1(b)为对经分水岭算法处理后生成的连通区域进行标记的效果图,图 1(c)为将锂电池区域置为白色生成的锂电池区域掩模图,图 1(d)为使用最大外接矩形截取锂电池区域,并将其统一到电极朝右的位置后的效果。



图 1 分水岭算法处理图。(a)原图;(b)连通区域标记图;(c)锂电池区域掩模图;(d)截取后的锂电池图

Fig. 1 Watershed algorithm processing diagrams. (a) Original image; (b) connected region labeled graph; (c) lithium battery area mask image; (d) lithium battery image after interception

3 锂电池极片间距离检测算法

3.1 距离检测算法流程

本文 X 光锂电池图像主要由锂电池生产厂商提供,主要包含极耳端和非极耳端两种类型的锂电池图像,两类锂电池的算法过程相同。图 2 为原始锂电池图像,其中正负极已在图中标注。图 3 为本文算法流程图。

3.2 负极直线区域分割

本文算法主要检测锂电池正极和负极的距离,

为了避免锂电池图像其他区域的干扰,需要将负极直线区域切割出来。由于负极边界和正极边界都有一定的梯度变化,可以采用梯度信息分割负极区域。传统的边缘检测算法主要有 Sobel、Roberts、Prewitt 和 Canny 等^[7-8]。这些边缘检测算子主要根据灰度图像中相邻区域之间灰度值的变化,采用差分近似数学微分的方法进行边缘检测,在同时期的边缘检测算法中,Sobel 算子被认为是最好的检测模板,它兼顾差分因素和最优的平滑系数^[9]。锂电池的阳极边界梯度变化不显著,具有渐变的特点,

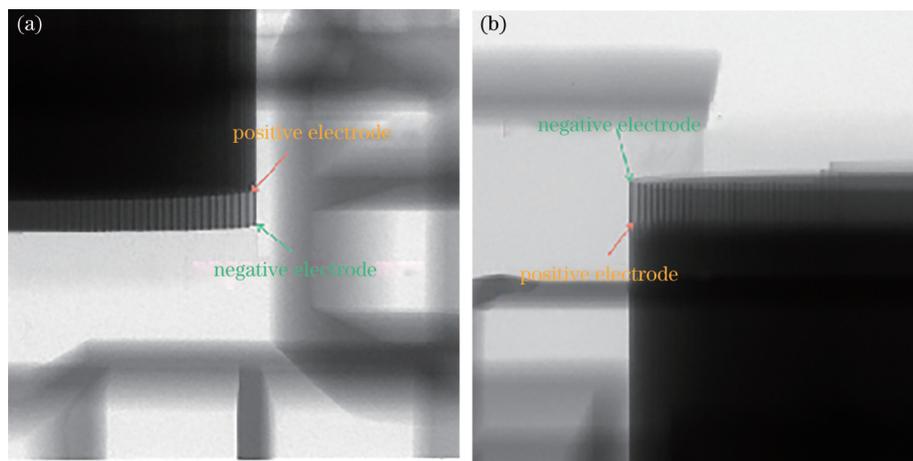


图 2 原始锂电池图像。(a)非极耳端;(b)极耳端

Fig. 2 Images of original lithium battery. (a) Nonpolar terminals; (b) polar terminals

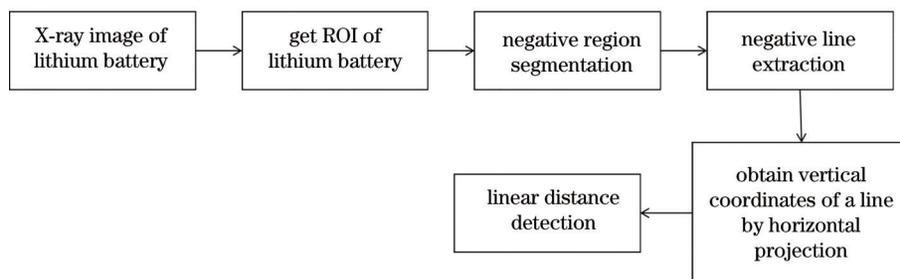


图 3 本文算法流程图

Fig. 3 Flow chart of proposed algorithm

使用传统的边缘检测算法很难将边界提取出来。

受传统边缘检测算法的启发,本文根据锂电池图像特点,提出一种水平方向边缘检测模板。从锂电池图像可以分析出,正极和负极边界位置的左侧图像比右侧图像暗,故模板右侧像素累加和比模板左侧像素累加和要大。根据差分的思想,使用的模板为

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

该模板大小为 3×13 , 将该模板与图像进行卷积运算,提取图像的水平梯度。为了得到更好的边界提取效果,在边缘检测之前,对图像进行伽马变换,以提高边界的对比度。伽马变换是一种非线性变换,将部分灰度区域映射到更宽或更窄的区域以达到增强的效果^[10],其公式为

$$F(x, y) = 255 \left[\frac{f(x, y)}{255} \right]^\gamma \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ 为输入图像的像素值; $F(x, y)$ 为输出图像的像素值; γ 为伽马因子,控制图像增强程

度^[11], $\gamma < 1$ 用于扩展图像低灰度部分, $\gamma > 1$ 用于扩展图像高灰度部分,通过不同的 γ 值,就可以达到增强低灰度或高灰度部分细节的作用。

为了说明利用所提模板进行边缘检测的有效性,采用边缘提取效果较好的 Sobel 算子进行比较。实验结果如图 4 所示,其中椭圆标记的是正极边界区域。采用伽马变换对灰度值进行处理,将伽马因子设置为 0.5。从图 4(b)中能明显看到图像的边界较清晰。经过伽马变换后,采用边缘检测效果较好的 Sobel 边缘检测算法进行边界检测,从图 4(c)可以看到边界检测效果较差,所得到的图像中只有负极端点边界,正极边界几乎检测不出来。图 4(d)为采用本文所提模板进行边界的提取效果图,可以看到效果比较明显,虽然图像经处理后噪声得到了增强,但是阳极边界更清晰。采用二值化、形态学处理后,根据边界位置信息,将正极边界提取出来,同时形成掩模,进而将阴极直线区域分割出来,其效果图如图 5 所示。图 5(b)为根据提取出的阳极边界,将边界右侧设为白色后形成的掩模,图 5(c)为将原图和掩模进行与运算并完成对负极直线区域

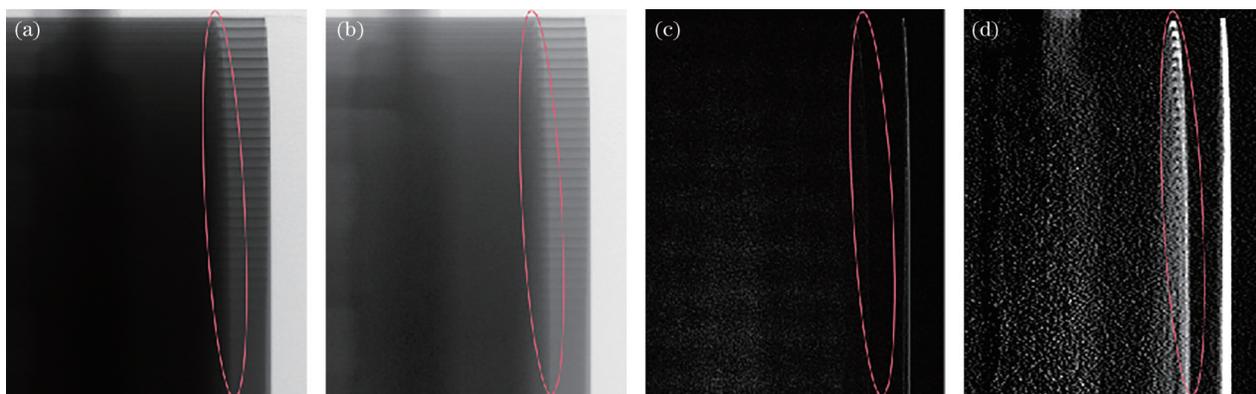


图 4 边界提取效果。(a)原图;(b)伽马变换;(c)Sobel处理效果图;(d)所提算法的处理效果图
Fig. 4 Boundary extraction effect. (a) Original image; (b) Gamma transform; (c) Sobel processing effect; (d) processing effect of proposed algorithm

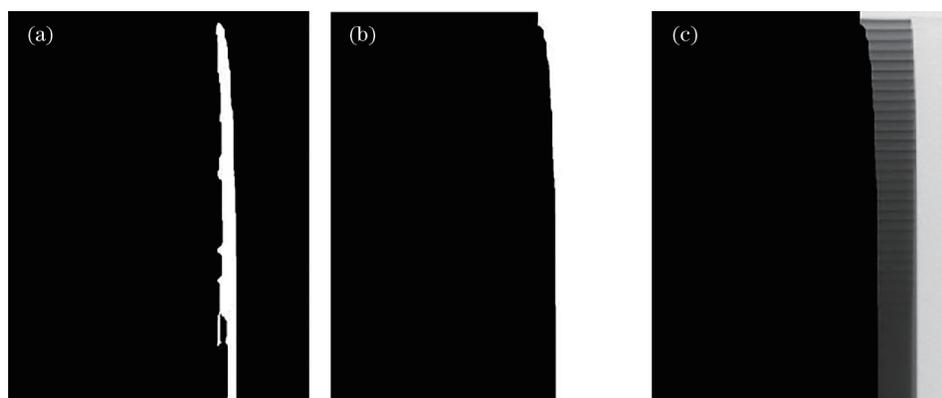


图 5 负极直线区域分割。(a)提取出的阳极边界;(b)阴极掩模;(c)分割出的直线部分
Fig. 5 Negative straight line region segmentation. (a) Extracted anode boundary; (b) cathode mask; (c) divided straight line part

分割的效果图。

3.3 负极直线提取

对阴极区域进行分割后,需要提取阴极直线。由于直线水平,同时直线区域存在梯度变化,故采用边缘检测的方法来对阴极直线进行提取。X光图像的清晰度和对比度都较低^[12],在处理前需要进行图像增强操作,对X光图像进行增强的方法主要有直方图均衡^[13]、自适应直方图均衡^[14](AHE)、多尺度Retinex算法^[15-16](MSR)。为了更好地提取阴极直线,本文采用多尺度Retinex增强算法。

Retinex理论是由Land提出的一种颜色恒常量的计算理论,该理论指出一幅图像可以用目标反射函数和环境亮度函数的乘积表示,其表达式为

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y), \quad (3)$$

式中: $I(x, y)$ 表示机器采集的图像; $R(x, y)$ 为反射分量,代表图像内在的属性信息; $L(x, y)$ 为照射分量,使用Retinex理论进行图像增强的目的是从获取

到的原始图像分量 I 中估计出 L 分量,去除 L 分量后得到 R 分量,该操作去除了光照不均匀的影响^[17]。对式(3)两边取对数可得

$$\lg I(x, y) = \lg R(x, y) + \lg L(x, y). \quad (4)$$

为了得到反射分量 R ,使用高斯滤波和原图进行卷积运算以估算出照射分量 L ,单尺度Retinex可表示为

$$r(x, y) = \lg R(x, y) = \lg I(x, y) - \lg [F(x, y) * I(x, y)], \quad (5)$$

式中: $r(x, y)$ 为取对数后物体原本的色彩;*表示卷积运算; $F(x, y)$ 为高斯滤波器的中心环绕函数; $F(x, y)$ 的表达式为

$$F(x, y) = \lambda \exp \left[\frac{-(x^2 + y^2)}{c^2} \right], \quad (6)$$

式中: c 是高斯环绕尺度常量,控制选取的邻域范围; λ 为归一化常数,将 $F(x, y)$ 对 x 和 y 进行二维积分,需满足 $\iint F(x, y) dx dy = 1$ 。

多尺度Retinex算法是在单尺度的基础上发展

而来,使用多个不同单尺度的 Retinex 进行线性加权,其表达式为

$$r(x, y) = \sum_{i=1}^n k_i \{ \lg I(x, y) - \lg [F_i(x, y) * I(x, y)] \} \quad (7)$$

式中: n 表示通道个数; $\sum_{i=1}^n k_i = 1$, i 表示颜色通道, $i = 1, 2, \dots, n$ 。将采用3种不同单尺度 Retinex 得到的结果进行加权后输出。

本文锂电池层级较多,层与层之间相互叠加,导致越到底部的直线,其梯度变化越不明显,使用传统的边缘检测算法效果较差。受2.4节中正极边

界提取的启发,根据直线水平且直线间的像素值比直线上的像素值大的特点,提出一种扩大差分方法,对竖直方向的边缘进行检测,其模板为

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

该模板大小为 5×5 ,使用该模板与图像进行卷积运算以提取图像竖直方向的梯度。为了说明所提算法的有效性、使用多尺度 Retinex 算法进行图像增强的适用性,采用不同图像增强方法和不同的边缘检测方法进行对比实验,实验结果如图6、图7所示。

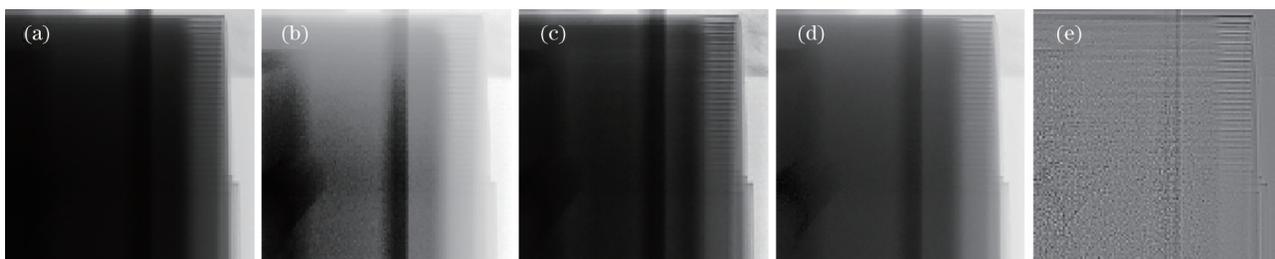


图6 图像增强效果。(a)原图;(b)直方图均衡;(c)自适应直方图均衡;(d)伽马变换;(e)多尺度 Retinex 增强

Fig. 6 Effect of image enhancement. (a) Original image; (b) histogram equalization; (c) adaptive histogram equalization; (d) Gamma transform; (e) multi-scale Retinex enhancement

图6为采用不同方法进行图像增强的结果,包括直方图均衡图、自适应直方图均衡图、伽马变换图和多尺度 Retinex 增强图。图7为图6中不同图像所对应的直线边缘检测图,为了方便对比,采用2.2节中的掩模将直线区域分割出来,并通过掩模生成的矩形框将直线区域截取出来,其中图7(a1)~(e1)为使用 Sobel 算法进行边缘检测的结果;图7(a2)~(e2)为使用 Canny 算法进行边缘检测的结果;图7(a3)~(e3)为使用本文所提的扩大差分算法进行边缘检测的结果。

通过实验对比,可以发现直接在原图上进行直线梯度检测的方法不适用。由图7(a1)、(a2)、(a3)可以看到,使用 Sobel 算法、Canny 算法和本文所提扩大差分算法均不能有效提取出直线,这说明了图像增强的必要性;图6(b)为采用直方图均衡方法的效果图,可以发现直方图均衡方法并不适用于锂电池 X 光图像,直方图均衡是对图像全局进行调整,不能有效提高局部对比度,导致锂电池阴极直线不明显。图7(b1)~(b3)均不显示直线梯度;图6(c)为自适应直方图均衡处理的结果图,虽然图像对比度有所提升,但经过多次重叠底部直线仍然较

为模糊,从直线梯度图[图7(c1)~(c3)]可以看到,其梯度检测结果比原图和直方图均衡有了很大提升,同时扩大差分算法也比 Sobel 和 Canny 的效果好;图6(d)为伽马变换效果,从视觉效果上看,该增强方法效果较好,使正极边界变得清晰,但经过灰度变换后,直线的梯度信息减弱,不利于后续的直线提取,Sobel 和 Canny 边缘检测得到的结果中几乎无梯度信号,本文所提梯度检测器只对图像上部比较明显的直线有较好的检测效果;图6(e)为使用多尺度 Retinex 算法进行图像增强的效果图,将三个尺度设为 $c_1 = 15, c_2 = 80, c_3 = 200$,图7(e1)~(e3)中直线区域的梯度信号较为明显,说明多尺度 Retinex 算法对负极直线的目标区域对比度的增强效果显著。图7(e1)为使用 Sobel 算子进行直线梯度检测的效果,可以看到 Sobel 算子能提取出大部分直线,但当底部直线重叠较多时,其梯度信号变得微弱,甚至提取不出直线。图7(e2)为使用 Canny 算子进行直线梯度检测的结果,Canny 算子对噪声较为敏感,使得梯度图像中噪声过多,难以区分直线和噪声。图7(e3)为使用扩大差分算法进行直线梯度检测的结果,与 Sobel 算子相比,其直线提取更加完

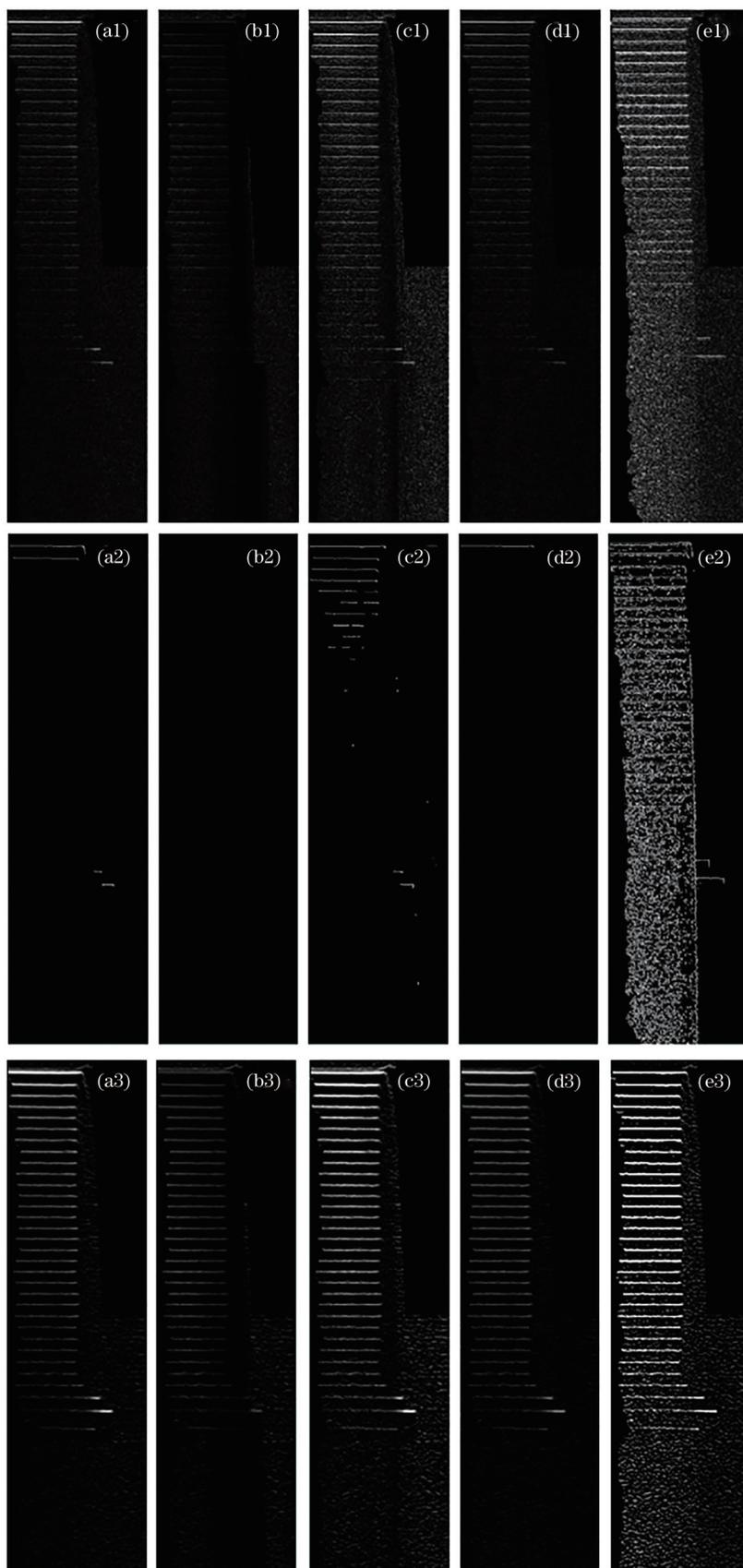


图 7 负极直线提取结果。(a1)~(e1)Sobel算法;(a2)~(e2)Canny算法;(a3)~(e3)扩大差分算法
 Fig. 7 Results of extracted cathode lines. (a1)~(e1) Sobel algorithm; (a2)~(e2) Canny algorithm;
 (a3)~(e3) expanded difference algorithm

整,同时又能很好地抑制噪声。实验结果表明,与传统边缘检测算法相比,本文所使用的多尺度 Retinex 算法和扩大差分算法能充分提取直线,这充分说明了所提算法的有效性。

3.4 距离检测

传统的直线检测算法主要采用霍夫(Hough)变换。霍夫变换早在 1962 就被提出来了,传统的霍夫变换用来检测图像中的线条和曲线,后来广泛应用于检测边缘增强的数字图像中的直线段。

霍夫变换的基本思想是定义图像空间和参数空间之间的映射^[18],实际上是点线变换,在平面直角坐标系中,直线的方程可以表示为 $y = ax + b$,其中 a 为直线的斜率, b 为直线截距。假设两个点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 确定的直线为 $y = a_0x + b_0$ 。如果将 a, b 看作变量, x, y 看作常量,将其转换到参数坐标系中可得两条直线 $L_1(b = -ax_1 + y_1)$ 和 $L_2(b = -ax_2 + y_2)$,这两条直线相交于一点 (a_0, b_0) 。由此可知,在参数空间相交于同一个点的直线,在平面直角坐标系中都有共线的点与之对应,Hough 变换就是通过这一特性来确定连接这些点的直线方程。

本文首先采用 Hough 变换对 2.3 节中提取的直线进行检测,其效果图如图 8 所示,其中图 8(a)为直线梯度图,图 8(b)为使用 Hough 变换得到的结果图。可以看到,使用 Hough 变换进行直线段提取时会出现不稳定的现象,当直线梯度不连续时,使用 Hough 变换很可能无法提取出直线。由于锂电池中直线长度不一,底层直线梯度信息相对较少,经过多次重复实验,Hough 变换均不能较好地检测出全部直线。

由于本文算法是针对锂电池正负极间的距离进行检测,因此只需要测出直线距离即可,为此,提出一种投影法来检测直线端点。图 8(a)中直线近乎水平,对该图中直线进行水平方向投影,逐行对像素值进行累加,直线区域累加后的值较大,非直线区域累加后的值较小,其形成的水平方向投影结果如图 9(a)所示,根据水平投影结果,非直线区域的噪声形成的投影值较小,采用阈值法去掉非直线区域的噪声干扰。图 9(b)为对图 9(a)进行阈值处理后得到的只含直线投影的效果图,通过寻找投影图的局部最大值确定直线投影纵坐标 y ,根据纵坐标 y 在图 8(a)中搜索直线横坐标,这样就能确定锂电池的负极端点坐标。

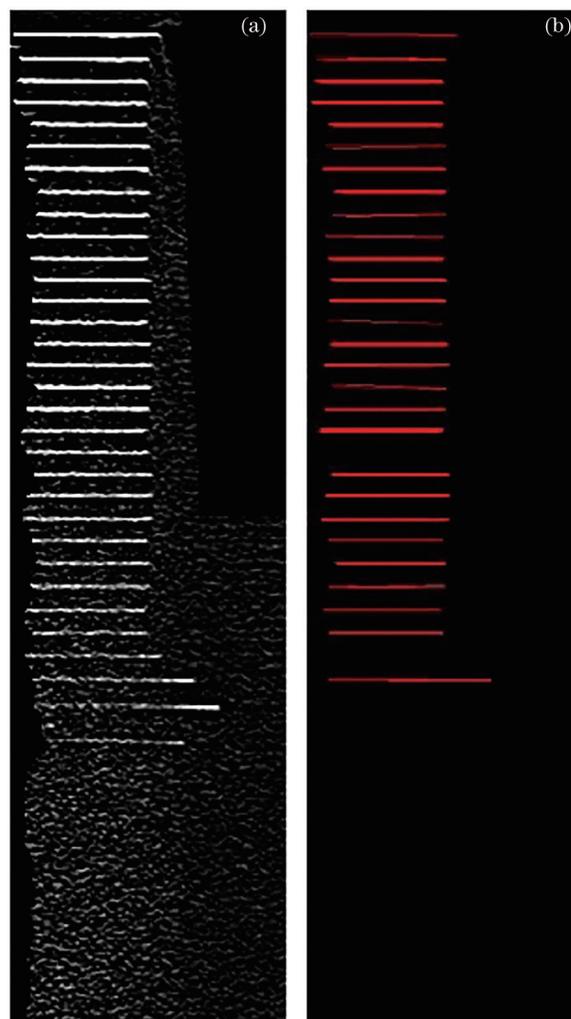


图 8 直线梯度图和 Hough 变换得到的直线检测结果。

(a) 直线梯度图; (b) Hough 变换得到的直线检测结果

Fig. 8 Straight line gradient map and straight line detection result obtained by Hough transform. (a) Straight line gradient map; (b) straight line detection result obtained by Hough transform

锂电池的正极端点位于负极直线之间,正极纵坐标 y 为负极端点的上下两个阴极端点的纵坐标 y 的平均值。3.2 节中已求出正极边界,这样便很容易得出每个正极点的水平坐标 x 。锂电池正负极距离测量由直接求线段长度转变为求点之间的距离,结果如图 10 所示,将获取的负极点和正极点在伽马变换图中标记,同时将正负极之间的水平距离标记在图中。出于安全性考虑,锂电池中的正负极距离必须全部检测出来,存在一条直线未测出则将锂电池判定为漏检,以往的算法只能提取出部分直线,漏检率为 100%。经过多次重复实验,且经锂电池生产厂家多次测试,得到本文算法的漏检率为 2%,平均处理每张图片所需的时间为 1.1 s,且算法

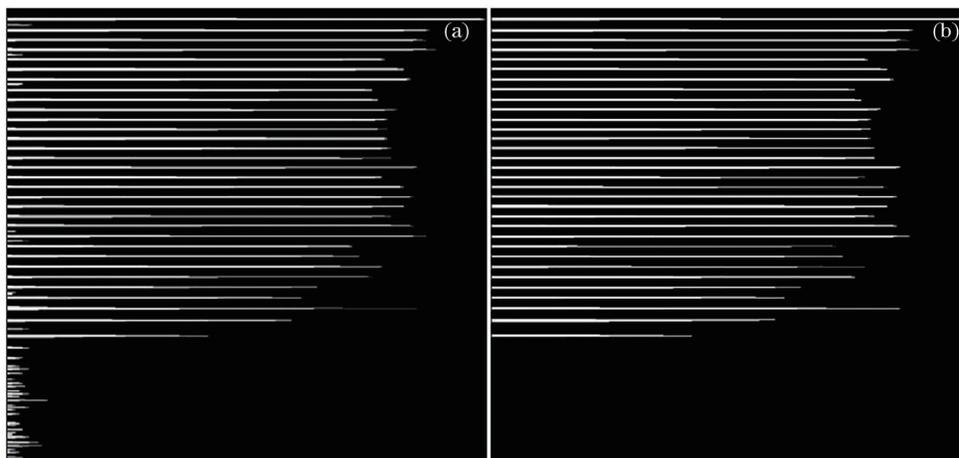


图 9 水平方向投影结果图。(a) 阈值处理前; (b) 阈值处理后

Fig. 9 Horizontal projection results. (a) Before threshold processing; (b) after threshold processing

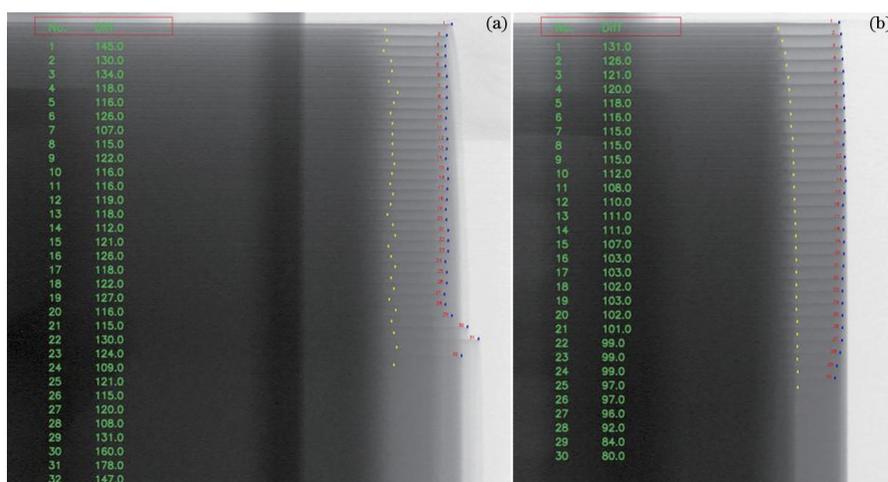


图 10 正负极距离测量结果图。(a) 极耳端; (b) 非极耳端

Fig. 10 Measurement results of distance from positive pole to negative pole. (a) Polar terminals; (b) nonpolar terminals

运行稳定,在该领域达到领先水平。

4 结 论

锂电池正负极距离检测是锂电池生产中不可或缺的部分,极片间的距离过大或过小都会造成电芯质量出现缺陷。采用图像处理技术对锂电池 X 光图像的正负极距离进行检测,采用分水岭算法进行锂电池 ROI 提取,通过伽马变换和所提边缘检测模板提取锂电池正极边界,利用多尺度视网膜增强算法和扩大差分算法提取负极直线,最后根据水平投影法和边界梯度确定正负极端点坐标。实验结果证明所提算法能快速标记正极和负极端点,准确测出锂电池正负极距离。所提图像增强和边缘检测方法可用于模糊图像处理,具有普适性。在 X 光医疗图像处理领域基于所提方法进行病灶目标的

分割和检测是下一步的研究任务。

参 考 文 献

- [1] 郭灏. 基于 X 光图像分析的锂电池正负极片测量系统[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Wu H. Lithium battery positive and negative electrode measurement system based on X-ray image analysis[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [2] 许长路, 李林升, 立济伟. 基于 Gamma 矫正与 LOG 算法融合的锂电池极片缺陷检测方法[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(6): 105-109.
Xu C L, Li L S, Li J W. Lithium battery polar piece defect detection method based on Gamma correction and LOG algorithm fusion[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(6): 105-109.
- [3] 刘骏, 杨雁清. 卷绕锂离子电池的检测方法:

- CN104091977A[P]. 2014-10-08.
- Liu J, Yang Y Q. Detection method of wound lithium ion battery: CN104091977A[P]. 2014-10-08.
- [4] 闫欣, 郝万睿, 许德平, 等. 一种卷绕电池的质量检测方法: CN103925893A[P]. 2014-07-16.
- Yan X, Hao W R, Xu D P, et al. A quality inspection method for wound batteries: CN103925893A [P]. 2014-07-16.
- [5] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 583-598.
- [6] 韩悬, 马银平. 分水岭算法的改进及在图像分割中的应用[J]. 现代信息科技, 2019, 3(24): 17-19.
- Han X, Ma Y P. Improvement of watershed algorithm and its application in image segmentation [J]. Modern Information Technology, 2019, 3(24): 17-19.
- [7] Ansari S, Prabhu S, Kini G N, et al. A survey on conventional edge detection techniques[J]. Journal of Algebra, 2014, 397: 1-17.
- [8] Singh S, Singh R. Comparison of various edge detection techniques[C]//2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), March 11-13, 2015, New Delhi, India. New York: IEEE Press, 2015: 393-396.
- [9] Yang A L, Jiang W W, Chen L. An adaptive edge detection algorithm based on improved canny[M]// Fei M R, Ma S W, Li X, et al. Advanced computational methods in life system modeling and simulation. Communications in computer and information science. Singapore: Springer, 2017, 761: 566-575.
- [10] 朱铮涛, 萧达安. 基于非线性调整的伽马校正图像增强算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(9): 2822-2826, 2866.
- Zhu Z T, Xiao D A. Gamma-corrected image enhancement algorithm based on non-linear adjustment [J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(9): 2822-2826, 2866.
- [11] 杨先凤, 李小兰, 贵红军. 改进的自适应伽马变换图像增强算法仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 241-245.
- Yang X F, Li X L, Gui H J. Image enhancement algorithm simulation based on improved adaptive gamma transformation[J]. Computer Simulation, 2020, 37(5): 241-245.
- [12] 相建凯, 吴萌, 王展, 等. 图像增强在文物 X 光图像中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 063402.
- Xiang J K, Wu M, Wang Z, et al. Application of image enhancement in X-ray photography of cultural relics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 063402.
- [13] 任艳斐. 直方图均衡化在图像处理中的应用[J]. 科技信息, 2007(4): 37-38.
- Ren Y F. The application of histogram equalization in image processing[J]. Science Information, 2007 (4): 37-38.
- [14] 王超, 孙玉秋, 徐石瑶, 等. 自适应直方图均衡化图像增强算法研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(1): 7, 55-59.
- Wang C, Sun Y Q, Xu S Y, et al. Adaptive image enhancement algorithm based on histogram equalization [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(1): 7, 55-59.
- [15] 化春键, 郭金花, 陈莹. 低对比度下手机膜缺陷图像的分割研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201013.
- Hua C J, Guo J H, Chen Y. Image segmentation for mobile phone film defects under low contrast[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201013.
- [16] 林昌, 周海峰, 陈武. 基于双边滤波的高斯金字塔变换 Retinex 图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161019.
- Lin C, Zhou H F, Chen W. Gaussian pyramid transform Retinex image enhancement algorithm based on bilateral filtering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161019.
- [17] 邹沛煜, 张卫东, 史金余, 等. 基于高低频分量融合的水下图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 161010.
- Zou P Y, Zhang W D, Shi J Y, et al. Underwater image enhancement algorithm based on fusion of high and low frequency components[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 161010.
- [18] Mukhopadhyay P, Chaudhuri B B. A survey of Hough Transform[J]. Pattern Recognition, 2015, 48 (3): 993-1010.