

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905917

圆柱型覆膜锂电池圆周面凹坑检测方法研究*

苑玮琦^{1,2}, 郭绍陶^{1,2}

(1. 沈阳工业大学 视觉检测技术研究所 沈阳 110870; 2. 辽宁省机器视觉重点实验室 沈阳 110870)

摘要:圆周面凹坑是圆柱型覆膜锂电池缺陷检测的重要指标之一。圆周面凹坑检测存在如下两个干扰因素,图像沿着周向和轴向亮度不均匀和圆周面存在油污。针对上述干扰,提出了一种基于机器视觉的解决方案。首先,沿着圆周面轴向提取灰度分布曲线;然后,采用自定义的对光照分布和油污不敏感的灰度差分模型计算灰度分布曲线上的突变,并根据圆周面反光特点选择了突变点的提取阈值,从而实现凹坑的检测。在自建图库 SUT-BY 上进行了测试,结果显示所提方法对凹坑检测的拒真率和认假率均为 0%。实际测试结果表明亮度不均匀没有对凹坑提取产生影响,也没有因油污而产生误检。

关键词:灰度差分模型;灰度分布曲线;圆柱型覆膜锂电池;反光特点;凹坑

中图分类号: TP391.41 TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on the detection method of pit on the cylindrical surface of cylindrical coated lithium battery

Yuan Weiqi^{1,2}, Guo Shaotao^{1,2}

(1. Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Key Laboratory of Machine Vision, Liaoning Province, Shenyang 110870, China)

Abstract: The pit on the cylindrical surface is one of the important indicators of cylindrical coated lithium battery circumference surface defect detection. There are two interference factors in the detection of craters on the circumferential surface. The image has uneven brightness along the circumferential and axial directions, and oil contamination on the circumferential surface. To solve these problems, a method for pit defect detection based on machine vision is proposed. Firstly, the gray scale distribution curve is extracted along the axis of the circumference. Then, the gray level difference model is used to extract gray discontinuous points in gray distribution curve, which is not sensitive to light distribution and oil contamination. The extraction threshold of discontinuous points are determined according to the reflective feature of the circumferential surface. In this way, the pit defect detection is achieved. The algorithm is evaluated on the self-built image database SUT-BY. Experimental results show that false rejection rate and false accept rate are both 0 percent. The actual test results indicate the uneven brightness has no influence on pit extraction, and there is no false detection caused by oil pollution.

Keywords: gray level difference model; gray level distribution curve; cylindrical coated lithium battery; reflection feature; pit

0 引言

圆柱型覆膜锂离子电池(圆柱锂电池)历史悠久,市场普及率非常高,其被广泛应用于仪器仪表、交通运输业和医用设备等多个领域。凹坑是圆柱锂电池圆周面的一种表面缺陷,在加工或制造过程中锂电池所受外应力超过材料本身的强度而引起,其实际深度大于

0.2 mm。一个圆柱锂电池可能存在一个或多个凹坑,可能出现在圆周面的任意位置,由于锂电池所受的外力大小不同导致凹坑形状不规则、尺寸不一、深浅不同。凹坑直接影响最终产品的美观和使用性能,是圆柱锂电池缺陷检测的重要指标之一,各个企业均制定了相关的检验标准,因此对圆柱锂电池进行凹坑检测具有重要意义。

目前,圆柱锂电池凹坑主要依靠人工检测,由于人工

检测存在低效率、高误检率和高漏检率等问题,基于机器视觉的检测算法应运而生。从目前掌握的文献来看,针对圆柱锂电池圆周面凹坑检测方法的研究并不多,主要包括:曾祥瑞^[1]提出基于 Sobel 模板的圆柱裸壳电池圆周面凹坑检测算法,结合阈值与形态学操作定位缺陷,该方法只是对缺陷进行了初步的提取,只考虑了灰度变化明显的凹坑区域,对于覆膜电池的凹坑检测分辨能力不够;康川川^[2]提出了基于密度检测方法,基于高斯梯度卷积和灰度特征的凹坑检测方法,对于视觉上不明显较浅的凹坑存在漏检情况,且没有排除油污对缺陷检测的影响;谭文等^[3]利用纵向梯度横向扫描实现对电池外观凹痕的检测,该方法检测的凹痕均为深凹痕,并没有对浅凹痕缺陷加以考虑。

本文对基于机器视觉的表面凹坑检测相关研究进行了文献检索,当前的算法很多是在背景均匀,缺陷与背景具有明显灰度差异的情况下进行的检测,取得了较好的效果。然而当前方法对于本文研究对象具有一定的不适用性,具体表现为:1)当前的方法很多依赖于图像的灰度值^[4-6],在均匀背景中的凹坑比较容易提取,然而当采集到的图像受光照变化和恶劣环境干扰等造成图像背景亮度不均衡时,亮度变化小的凹坑会被背景的亮度所淹没,很难达到满意的分割效果。如贺振东等^[6]提出基于背景差分的钢轨表面缺陷检测算法,首先计算钢轨图像每列的均值作为背景图像,然后将钢轨图像与背景图像相减得到差分图像,最后对差分图像采用自适应阈值分割法,该方法的检测效果取决于所设定阈值的数值大小,过高的阈值分割不出对比度较小的凹坑,过低的阈值会产生大量噪声;2)当前的方法很多依赖于相邻像素的灰度差异^[7-10],对于灰度值远远高于或低于其邻域灰度值的凹坑,具有较好的检测效果,但是无法分割出亮度变化范围小,与背景的亮度对比度低的浅凹坑,且当存在大量噪声时,会降低算法的效果。如 Li 等^[10]提出基于下包络韦伯对比度的热轧圆钢表面凹坑检测方法,首先对图像进行滤波之后计算图像中每列像素的小包络中所有极小值点处的韦伯对比度,然后将其与设定的阈值进行比较,对于较浅的凹坑,其与背景灰度接近,不能保证极小值点处为真正的凹坑,所以对于浅凹坑检测效果不佳;3)当前的方法对弱信号的描述不够充分,对其特征提取的有效性不高,不能同时实现对深浅不一的凹坑的有效检测^[11-12]。如苏俊宏等^[12]对原始图像进行均值滤波得到模板图像,然后对模板图像和被测图像进行相减得到差值图像,最后对差值图像进行边缘检测提取缺陷区域,该方法受分割模板尺寸的影响,单一的模板尺寸无法同时反映出深凹坑和浅凹坑的亮度变化。

综上所述,目前关于圆柱锂电池圆周面凹坑检测

的研究很少,尤其是对于光照不均匀和反光不均匀情况下,背景亮度不均衡,对比度低的浅凹坑的研究还处于空缺状态,现有方法在实际应用中准确率仍然与实际需求存在一定差距。本文针对该问题,提出一种基于灰度差分模型的检测方案,对于光照不均匀、反射不均及油污等情况具有较好的鲁棒性,有效提升了凹坑检测效果。

1 凹坑成像原理

为了保证拍摄到圆周面上任意位置处的凹坑,本文采用滚动式的传送平台。图像采集的主要装置包括 XIME 公司 USB3.0 接口面阵相机和白色背光源,相机安装在滚轮传送平台上方,图像采集装置如图 1 所示。采集装置的工作方式是锂电池在滚轮传送平台上运动,到达指定位置时,通过光电传感器、可编程逻辑控制器和编码器配合提供拍照的触发信号,从而完成所需图像采集的工作。

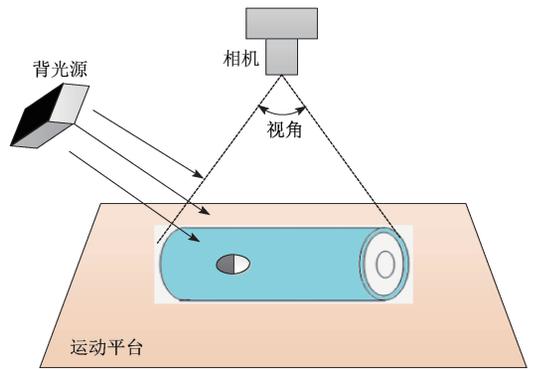


图1 图像采集装置结构

Fig.1 The image capture device

凹坑成像原理如图 2 所示。为了突出凹坑,应尽量使凹坑处留下阴影。当光源垂直照射时,光线能够照射到整个凹坑,几乎没有阴影;当背光源辐射方向与圆柱锂电池成一定角度时,如图 2 中角 θ ,凹坑远离光源的区域因光线反射,在图像上表现为亮白色,而靠近光源的区域因光线较少而形成阴影,在图像上表现为灰黑色。可见, θ 的大小决定了凹坑处阴影和亮白色区域的大小。 θ 越大,凹坑处阴影和亮白色区域越不明显; θ 越小,凹坑处阴影和亮白色区域越明显,但是图像整体亮度较差。本文通过对自建图库进行打光实验得出,当 $\theta > 40^\circ$ 时,无法突出较浅的凹坑,当 $\theta < 30^\circ$ 时,图像整体较暗,不利于后续处理。综合考虑,本文设定 $\theta = 35^\circ$,即背光源与水平面呈 35° 夹角。无缺陷圆柱锂电池如图 3 所示,有凹坑的圆柱锂电池如图 4 所示。

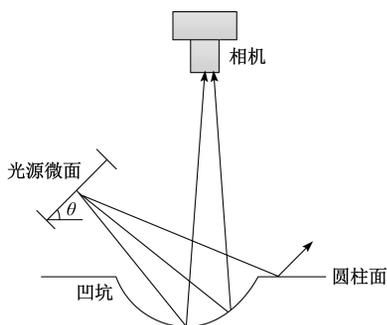


图2 凹坑成像原理

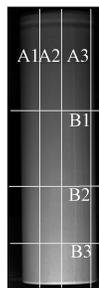
Fig.2 Diagram of pit imaging



图3 圆柱锂电池
Fig.3 Cylindrical lithium battery

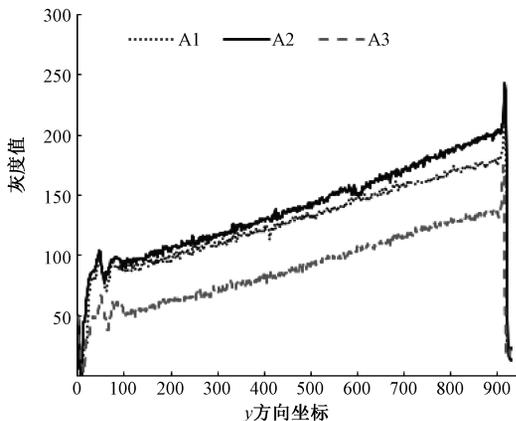


图4 有凹坑的圆柱锂电池
Fig.4 Cylindrical lithium battery with pit



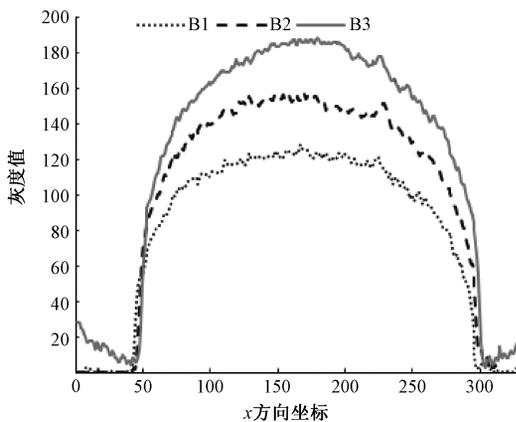
(a) 灰度分布曲线选取

(a) Gray distribution curve selection diagram



(b) 轴向灰度分布曲线

(b) Axial gray scale distribution curves



(c) 周向灰度分布曲线

(c) Circumferential gray scale distribution curves

图5 圆周面灰度分布曲线

Fig.5 Gray level distribution curves of circumference surface

2 圆周面及凹坑特征分析

2.1 圆周面灰度分布特征分析

图5(a)所示为带有凹坑的圆柱锂电池图像,沿锂电池轴向画有3条纵线:A1、A2和A3,周向画有3条横线B1、B2和B3,其中A2和B2穿过凹坑。图5(b)所示为锂电池轴向的灰度分布曲线,由于光照不均匀性,曲线从左往右呈现上升趋势,说明图像从上至下越来越亮,由于圆周面本身不光滑,对照射光线反射不均匀而使相邻像素之间的灰度值存在不同幅度的波动,曲线左端两处尖峰的位置是圆周面顶端凹槽处,曲线右端的尖峰是电池底部的白色下边缘。凹坑处的曲线的波动幅度略大于邻域的波动幅度。图5(c)所示为锂电池周向灰度分布曲线,可见,图像中间区域较两侧更亮,且相邻像素之间的灰度值由于圆周面反射不均匀存在不同幅度的波动,凹坑处的曲线的波动幅度非常小。综上可知,由于光照不均匀和圆周面反射不均,使得圆周面灰度分布不均匀,背景亮度不一致。

2.2 凹坑形态特征分析

从凹坑在图像上的表现形态上看,凹坑形状有椭圆形、斜条形和扇形等,如图6(a)~(d)中白色实线矩形框

所标注。凹坑由比较密集的较暗斑块和较亮斑块组成,二者之间有一条模糊的过渡边界线。暗斑与亮斑形状近似对称,面积近似相等。本文研究的凹坑主要分为如下4类:大尺寸深凹坑、大尺寸浅凹坑、小尺寸深凹坑和小尺寸浅凹坑。凹坑宽度大于电池宽度1/3的称为大尺寸凹坑,如图6(a)和(b)所示;宽度小于电池宽度1/3的称为小尺寸凹坑,如图6(c)和(d)所示。深凹坑有明显凹陷的地方,轮廓比较清晰,缺陷内部与邻域存在人眼可见

的差异,如图 6(a)和(c)所示。浅凹坑凹陷程度小,边缘不清晰,与邻域存在轻微差异,人眼难以辨别,如图 6(b)和(d)所示。

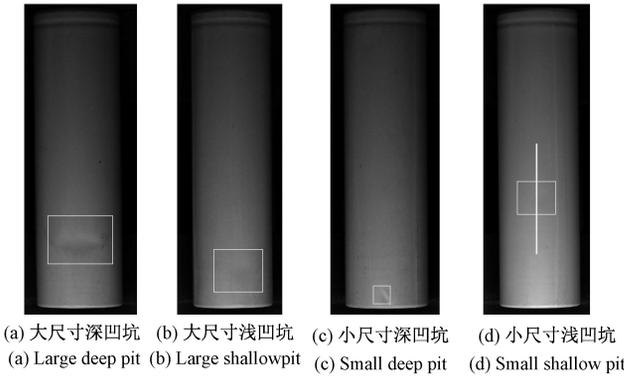


图 6 圆柱锂电池凹坑种类图例

Fig.6 Different types of pit on cylindrical lithium battery

2.3 凹坑灰度特征分析

鉴于浅凹坑是检测难点,故以浅凹坑为例进行分析。图 7 所示为图 6(d)白色虚线列灰度分布曲线。可见,浅凹坑与周围邻域的对比度低;浅凹坑区域内的灰度值由于反光和阴影呈先上升后下降再上升的变化趋势;亮斑纹理灰度值比其周围正常圆周面的灰度值高,暗斑纹理灰度值比其周围正常圆周面的灰度值略低,近乎相等;浅凹坑内相邻像素之间的灰度值有轻微幅度的波动,与正常圆周面的波动幅度相近。

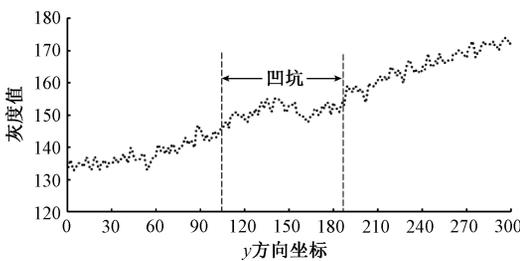


图 7 浅凹坑灰度分布曲线

Fig.7 Gray scale distribution curves of shallow pit

2.4 油污特征分析

由于工业生产现场粉尘和人为疏忽等原因引入油污等异物,会对检测产生干扰。油污是灰尘之类的外物粘在电池覆膜上,位置不固定,单个或成片分布,呈黑灰色块状,尺寸不一,普遍较窄,深油污的密度较为集中,浅油污内部呈棉絮状,如图 8 所示。其灰度分布曲线波形陡峭,在一定区域范围内,油污灰度值低于背景灰度值,该特征近似于凹坑暗斑纹理灰度特征。

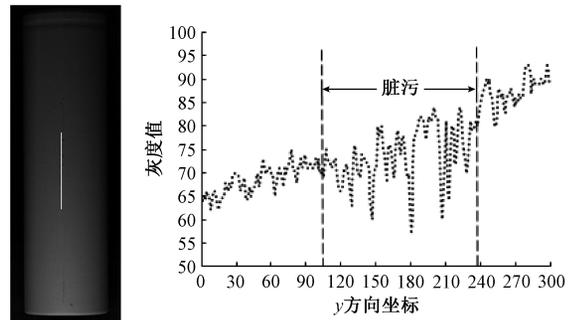


图 8 油污样本及灰度分布曲线

Fig.8 Gray level distribution curve of oil contamination

2.5 凹坑检测思想

对图库中凹坑、无缺陷区域和油污的绝对灰度分布范围进行了统计,如图 9 所示。其中,凹坑、无缺陷区域、油污的灰度分布范围分别为 82~181、80~212 和 22~112(灰阶)。可见,它们的灰度分布范围互相交叠,灰度值相差很小,说明凹坑灰度处于背景中明亮部分和灰暗部分灰度之间,无法通过传统的灰度阈值提取凹坑及剔除油污。

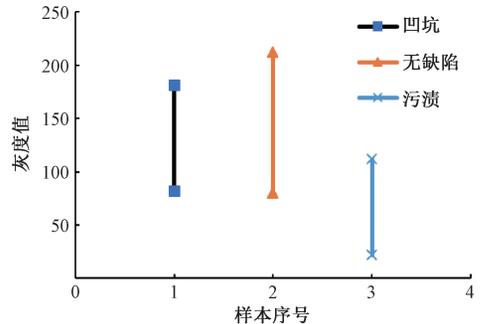


图 9 凹坑、无缺陷区域及油污灰度分布

Fig.9 Gray level distribution of pits, clear regions and oil contamination

通过研究图像灰度分布曲线波动规律发现,由于圆周面反射不均匀导致灰度分布曲线上存在不同幅度的波动,排除电池凹槽和底部边缘区域,凹坑区域对应的灰度分布曲线的波动普遍大于正常的无缺陷区域之间的波动幅度。图 10 所示样本 1~4 分别为图 6(a)~(d)中凹坑反光区域内的像素之和与阴影区域内像素之和的差值;样本 5~8 分别为图 6(a)~(d)中无缺陷圆周面上随机 2 个区域内像素之和的差值。由图 10 可见,在一定的范围内,凹坑与背景具备一定的灰度差,因此考虑根据圆周面反光特点提取凹坑像素。

由图 8 可知,油污与其邻域之间的灰度值也存在较大幅度的波动。通过观察发现,油污对应的曲线表现出的波形特征与凹坑不同,油污对应的曲线比较陡峭,轮廓普遍呈尖棱状,凹坑对应的曲线比较平缓,轮廓普遍呈圆

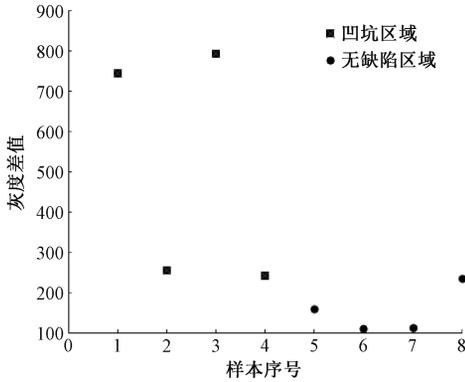


图10 凹坑区域内部及无缺陷区域灰度差

Fig.10 Gray difference of pits and clear regions

弧状,如图11所示。可见,油污的曲线弯曲程度更大。

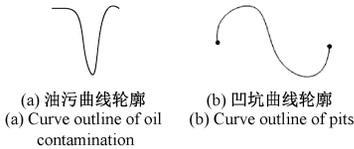


图11 油污和凹坑曲线轮廓

Fig.11 Curve outlines of oil contamination and pit

任意选取40个油污对应的曲线,40个凹坑对应的曲线,计算曲线上某个点的斜率,统计结果如图12所示。凹坑内曲线上点的斜率范围为-8~10,油污内曲线上点的斜率范围为7~10。可见,凹坑内曲线上点的斜率普遍小于油污,因此考虑通过灰度分布曲线的波形特征来排除油污。

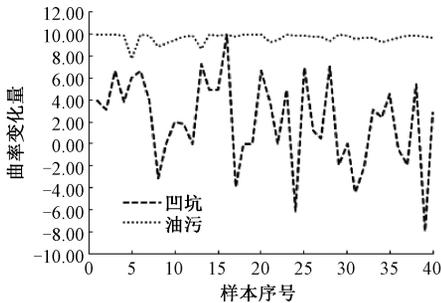


图12 凹坑和油污斜率

Fig.12 Slope value of pit and oil contamination

3 模型与理论

3.1 灰度差分的定义

用函数 $G(u, v)$ 表示每列的灰度分布曲线函数, (u, v) 表示像素位置, $v \in \{0, 1, \dots, m-1\}$, 其中 m 表示曲线数据的长度, u 为数据所处图像列, u 为常数。将一条灰

度分布曲线平均分成 k 段, 每段包含 n 个数据, n 为常数。考虑到图片亮度不均衡导致背景会有许多小的波动, 有的甚至会覆盖了浅凹坑的灰度变化, 若直接求相邻点的灰度差, 会导致浅凹坑的灰度差与背景的相近, 不仅会影响检测效果, 还会造成不必要的计算量, 所以, 本文采用隔段相减的方法以增大灰度差范围。灰度差分计算公式为:

$$S(k) = \sum_{i=2kn+1}^{n(2k+1)} G(u, v_i) \quad (1)$$

$$D(k) = S(k+1) - S(k) \quad (2)$$

式中: $S(k)$ 代表第 k 段灰度分布曲线中所有灰度值的和; $D(k)$ 为灰度差分函数, 代表两个曲线之间灰度值和的差值, 其中, $k \in \{0, 1, 2, \dots, p\}$, $p \leq \frac{m-n}{2n} - 1$ 。

根据光源照射方向, 凹坑内求得的 $D(k)$ 应为负数, 且其灰度差分的绝对值应为最大值, 根据式(3)、(4)求得满足该条件的灰度差分。

$$D'(k) = k \mid [D(k) < 0] \quad (3)$$

$$D_{\max}(k) = k \mid \max_{k=0,1,2,\dots,p} [\mid D'(k) \mid] \quad (4)$$

式中: $D'(k)$ 代表获得的为负数的灰度差分集合; $D_{\max}(k)$ 代表灰度差分绝对值中的最大值。对获得的 $D_{\max}(k)$ 按照式(5)进行阈值判断, 排除圆周面本身反射不均带来的波动, 从而获得凹坑所有的候选像素。

$$P(k) \in \begin{cases} \text{可能是凹坑,} & D_{\max}(k) > T_g \\ \text{非凹坑,} & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P(k)$ 表示图片的灰度分布曲线上可以作为备选凹坑像素点的第 k 段曲线的像素集合; T_g 为灰度差分阈值, 其值将通过实验获得。

获得 k 值后, 通过式(6)、(7)得到候选像素在灰度分布曲线中的起始位置和终止位置, 则在此区间内的像素即为凹坑候选像素。为了后续剔除油污的操作, 对像素的个数进行了一定的增加。

$$r_s = 2 \times n \times k + 5 \quad (6)$$

$$r_e = 2n \times (k + 2) \quad (7)$$

式中: r_s 代表凹坑的起始位置; r_e 代表凹坑的终止位置, 曲线上 $[r_s, r_e]$ 区间的像素集合设为 U , 即为凹坑候选像素集合。

3.2 曲率变化量的定义

本文定义曲率变化量来量化2.5节所述的波形特征, 用以区分凹坑和油污内曲线的弯曲程度。

曲线的弯曲程度在连续空间通常用曲率来评价^[13], 曲线 C 上某点的曲率为该点切线方向角对弧长的转动率。曲线弯曲程度越大, 该点的曲率越大; 反之, 曲线弯曲程度越小, 该点的曲率越小。对于任意曲线, 如图13所示, 设从点 M 到点 N 的弧长为 Δs , 切线的变化角度为 $\Delta \alpha$, 则 M 点处的曲率计算公式如式(8)所示。

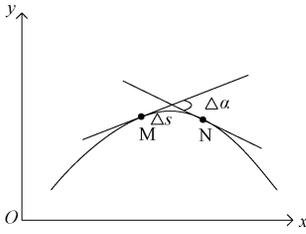


图 13 曲率定义

Fig.13 Definition of curvature

$$\kappa(M) = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta\alpha}{\Delta s} \right| = \left| \frac{d\alpha}{ds} \right| \quad (8)$$

灰度分布曲线函数为离散函数,若直接通过差分算子将曲率计算公式转换过来,曲线上细小的波动会给计算带来影响,不能很好地反应局部曲线形状。因此用余弦值作为曲线上某点的离散曲率值^[14-16]。

如图 14 所示,点 $P_{i-q}(v_{i-q}, G(u, v_{i-q}))$ 、点 $P_i(v_i, G(u, v_i))$ 和点 $P_{i+q}(v_{i+q}, G(u, v_{i+q}))$ 为某一系列灰度分布曲线上(u 为常数)的 3 个像素点,在当前点 P_i 处定义两个矢量:

$$\mathbf{a}_{iq} = (v_i - v_{i-q}, G(u, v_i) - G(u, v_{i-q})) \quad (9)$$

$$\mathbf{b}_{iq} = (v_i - v_{i+q}, G(u, v_i) - G(u, v_{i+q})) \quad (10)$$

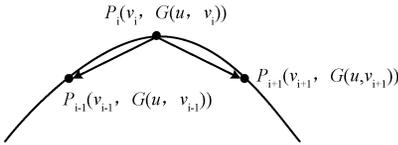


图 14 离散曲率值计算

Fig.14 Calculation of discrete curvature

式中: $i=0, 1, \dots, m-1$; q 代表以点 P_i 为中心的邻域窗口大小, $q \geq 1$, 邻域窗口为 $[i-q, i], [i, i+q]$, 则当前点 P_i 的离散曲率值为:

$$c_{iq} = \cos\zeta(s) = \frac{\mathbf{a}_{iq} \cdot \mathbf{b}_{iq}}{|\mathbf{a}_{iq}| |\mathbf{b}_{iq}|} \quad (11)$$

式中: $\zeta(s)$ 为矢量 \mathbf{a}_{ib} 和 \mathbf{b}_{ib} 之间的夹角; c_{iq} 为矢量 \mathbf{a}_{ib} 和 \mathbf{b}_{ib} 之间的夹角 $\zeta(s)$ 的余弦值, $-1 \leq c_{iq} \leq 1$ 。曲线弯曲程度越大, $\zeta(s)$ 值越小, c_{iq} 值越大;反之,曲线弯曲程度越小, $\zeta(s)$ 值越大, c_{iq} 值越小。用点 P_i 的曲率作为邻域窗口内有限点集的曲率估计。

通过观察得到,凹坑和油污区域内曲线在最小值点处弯曲程度差异性最大,故用最小值点处的离散曲率值来判断曲线的弯曲程度,由此定义曲线 C 上的曲率变化量 K_C 。

$$K_C = t \times c_{\min q} = \frac{\mathbf{a}_{\min q} \cdot \mathbf{b}_{\min q}}{|\mathbf{a}_{\min q}| |\mathbf{b}_{\min q}|} \quad (12)$$

式中: $c_{\min q}$ 为曲线最小值点的曲率; $\mathbf{a}_{\min q}$ 和 $\mathbf{b}_{\min q}$ 为在最小值点处定义的两个矢量,为了使 K_C 更具有普适性,定义调整系数 t , t 为常数。

4 基于灰度差分模型检测凹坑

本文凹坑检测方法具体流程如图 15 所示。

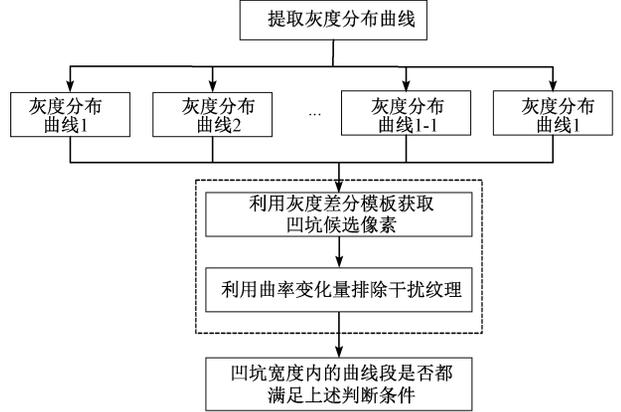


图 15 凹坑检测算法流程

Fig.15 Detection process of pit

4.1 预处理

通过观察图库发现,圆柱锂电池条形码处没有凹坑,为了避免条形码对检测的干扰,首选通过 Otsu 算法^[17]和灰度形态学闭操作^[18]相结合的方法将圆周面上的条形码区域分割出来,并对该区域赋予正常圆周面灰度值。

4.2 提取灰度分布曲线

图像坐标系定义:原点位于图像左上角,横坐标 u 代表所在列数,纵坐标 v 代表所在行数,正 u 轴向右延伸,正 v 轴向下延伸。

通过观察图库发现,凹坑位于锂电池圆周面凹槽下方区域,鉴于圆周面图像两边暗,不利于检测,底部边缘亮白色条纹同样不利于检测,故截取了图 16 白色实线矩形框所示的有效检测区域。有效检测区域大小为 781×176 pixel。通过统计凹坑尺寸发现,最小的凹坑宽度为 15 pixel,故本文沿竖直方向提取了 35 条灰度分布曲线,每条曲线之间间隔 5 pixel。

4.3 对每一条灰度分布曲线进行凹坑检测

1) 利用 3.1 节定义的灰度差分方法在检测区域获取由凹坑的候选像素集合 U 组成的曲线。为了能完整的检测出所有凹坑候选像素并保证其连续性,以便进行后续的特征筛选工作,式(2)中的 n 值应小于所有凹坑高度中最小值的 $1/2$,通过观察图库发现,凹坑高度(凹坑区域内曲线的宽度)最小值为 14 pixel,所以 $n=5$ 。

2) 利用曲率变化量 K_C 对 1) 所得的凹坑候选像素进



图16 检测区域定义

Fig.16 Detection area definition

行筛选,剔除油污。首先,在凹坑候选像素集合 U 中找到最小值点及其最小值。鉴于部分凹坑尺寸过大,集合 U 可能没有完全包含其所有像素,会造成图 17 所示的提取的曲线不完整现象,从而找到虚假最小值点 r'_{\min} ,故在 r'_{\min} 右侧通过逐点比较的方法找到真正最小值点 r_{\min} 及其最小值 G_{\min} 。

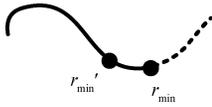


图17 寻找最小值点

Fig.17 Searching the minimum point

然后,根据式(9)、(10)以 r_{\min} 为基准点定义两个矢量,式中的变量 q 决定了邻域窗口的大小,尺度较长的窗口能较好地抑制噪声,但不能保留较小的细节,尺度较短的窗口不能有效地抑制噪声的影响,容易对曲线分析造成干扰。综合考虑噪声和小尺寸凹坑的高度,本文 $q = 3$,即分别在 r_{\min} 左侧和右侧相隔 3 个像素找到点 r_1 和 r_2 及其对应的灰度值 G_1 和 G_2 ,如图 18 所示。根据式(12)计算出候选曲线的 K_c 值,式中的 $t = 10$;最后,根据式(13)判断集合 U 中的像素是否属于真正的凹坑。

$$U \in \begin{cases} \text{是凹坑, } K_c \leq T_c \\ \text{非凹坑, 其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_c 为曲率变化量阈值,其值将通过实验获得。

4.4 对所有灰度分布曲线进行最终判断

对判断为有凹坑的曲线标记为 1,为了进一步排除油污,通过统计图库中凹坑的宽度发现,最小的凹坑宽度为 15 pixel,最大的凹坑宽度为 40 pixel,由此定义若有大于等于 3 条且小于 9 条相邻曲线都被标记为 1,则认为该

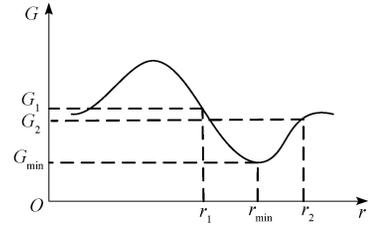


图18 曲率变化量计算

Fig.18 Calculation of curvature changing value

区域为凹坑。根据式(6)和(7)确定凹坑位置。最后,将非凹坑区域的值置为 0,以二值化的图像形式得到检测结果,其中白色部分为凹坑。

5 参数选择、实验与分析

5.1 实验图库的建立方法

本文自行建立了一个 18650 覆膜锂电池圆周面图像数据库,称作 SUT-BY 图库,图库中图像的采集基于真实生产现场环境。图像库中包含 3 种不同颜色(绿色、蓝色和灰色)的 18650 锂电池,为了保证圆周面凹坑的完整度和清晰度,本系统对每个电池等角度 60° 拍摄 6 张图片,每张图片分辨率为 940×330 。采集的图例如图 3 和 4 所示。为了更好地测试算法效果,本文将 SUT-BY 图库分为 2 个子图库进行测试:有凹坑图库 SUT-BY-1 和无凹坑图库 SUT-BY-2,图库说明如表 1 所示。

表1 实验图库

Table 1 Experiment gallery

图库类型	锂电池个数	图片张数
SUT-BY-1	107	642
SUT-BY-2	488	2 928

5.2 算法评价指标和测试环境

为了验证不同参数下本文方法的检测效果,定义了如下评价指标:

$$FRR = \frac{NFR}{NLA} \times 100\% \quad (14)$$

$$FAR = \frac{NFA}{NIA} \times 100\% \quad (15)$$

式中: FRR 为拒真率(false rejection rate, FRR),即有凹坑的锂电池被误检为无凹坑锂电池的比率; FAR 为认假率(false accept rate, FAR),即正常无凹坑锂电池被误检为有凹坑锂电池的比率; NFR 为错误拒绝合法成员的次数(number of false rejections, NFR); NLA 为合法成员尝试的次数(number of legal member attempts, NLA); NFA 为错误接受非法成员的次数(number of false accepts,

NFA); *NIA* 为非法成员尝试次数 (number of illegal member attempts, *NIA*)。对于有凹坑图库 SUT-BY-1, 同一个电池的 6 张图片中有一张检测为有凹坑即为检测成功; 对于无凹坑图库 SUT-BY-2, 同一个电池的 6 张图片中有一张检测为有凹坑视为发生了一次“认假”。

测试本文算法实验的软件平台为 Visual Studio C++ 2010, 所使用的计算机处理器型号为 Intel i7-4790, 4 核, 主频为 3.60 GHz, 内存为 8 GB, 操作系统为 Windows 7 64 bit 旗舰版 Service Pack 1。

5.3 算法关键参数的确定

1) 灰度差分阈值 T_g 的确定

灰度差分阈值的大小将决定凹坑候选像素搜索结果的准确性, 其选取准则为将疑似的凹坑区域内像素被包含在候选像素集合内而不遗漏。当 T_g 较大时, 会造成凹坑的漏检; 反之, 当 T_g 较小时, 会使检测结果中出现过多的误判情况, 增加后续检测的负担。为了检测 T_g 取不同值时对凹坑检测的影响, 在图库 SUT-BY-1 中选取 107 组有凹坑电池, 图 19 所示为 T_g 不同取值时 *FRR* 的分布曲线。为将真实的凹坑区域内曲线像素被包含在候选像素集合内而不遗漏, 则 *FRR* 必须为 0。由图可知, 当 $T_g \leq 28$ 时, *FRR* 始终为 0, 当 $T_g > 28$ 时, *FRR* 从 0 逐渐增加, 所以, 当灰度差阈值取为 28 时满足在无漏检的情况下误检最少, 因此最终确定 $T_g = 28$ 。

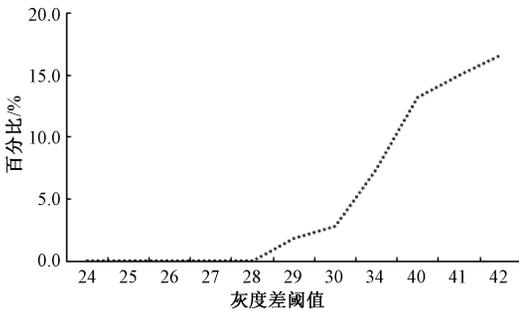


图 19 灰度差分阈值与 *FRR* 分布关系曲线

Fig.19 Distribution relationship curve of *FRR* vs. gray difference threshold

2) 曲率变化量阈值 T_c 的确定

曲率变化量阈值 T_c 决定了排除油污的能力, 在前文确定的灰度差分阈值 T_g 下, 本文算法对图库 SUT-BY-1 的 107 组带有凹坑的电池和图库 SUT-BY-2 的 488 组无凹坑电池进行测试, 图 20 所示为不同 T_c 取值下的 *FRR* 和 *FAR* 分布曲线。可见 *FRR* 随着 T_c 的增加而减小, *FAR* 随着 T_c 的增加而增大, 当 $T_c \geq 4.8$ 时 *FRR* 取值均为 0, $T_c \leq 4.8$ 时 *FAR* 取值均为 0, 因此, 确定 T_c 取值为 4.8, 最终检测结果, 拒真率 $FRR = 0\%$, 认假率 $FAR = 0\%$ 。

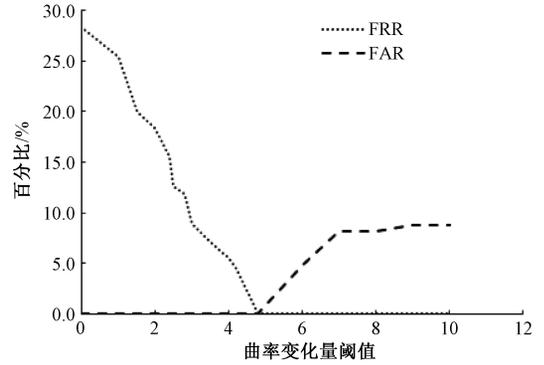


图 20 曲率变化量阈值与 *FRR*、*FAR* 分布关系曲线

Fig.20 Distribution relationship curve of *FRR* and *FAR* vs. curvature changing threshold

需要说明, 本文所确定的参数 T_g 和 T_c 的数值及检测结果是基于生产现场环境下采集的图像数据库。图库中的凹坑区域在一定的范围内, 对应的灰度分布曲线的波动普遍大于正常区域之间的轻微波动幅度; 油污灰度值明显低于背景灰度值, 油污对应的灰度分布曲线表现出的波形特征与凹坑不同。当环境发生变化时, 可通过重复本文的方法对其具体数值进行重新确定, 以便于算法能够在所处环境下达到最佳效果。

5.4 与其他算法对比实验及分析

为了验证本文方法效果, 将本文方法与其他表面凹坑检测方法对自建图像数据库 SUT-BY 中图像进行了对比试验, 并进行了分析。实验过程中, 所有参数都是在保证 $FRR = 0$ 的前提下通过实验获得, 本文算法选择的灰度差分阈值 $T_g = 28$, 曲率变化量阈值 $T_c = 4.8$ 。文献[4]的阈值控制因子取为 0.2, 文献[7]的模板大小取为 50×50 , 文献[11]的模板大小取为 56×56 。实验结果如图 21 所示, 从第 1 列图像到第 7 列图像依次为原始带凹坑图像、凹坑有效检测区域图像、文献[4]方法分割效果图、文献[11]方法分割效果图、文献[7]方法分割效果、Otsu 方法分割效果图以及本文方法效果图。

1) 圆柱锂电池覆膜颜色的影响

图 21(a1)、(b1)、(c1) 所示分别为绿色、蓝色和灰色覆膜颜色的 18650 锂电池, 由于不同颜色的覆膜吸收和反射波长的范围不同, 导致不同颜色的覆膜图像中凹坑与背景的对比如不同, 灰色锂电池图像中的凹坑与背景有更高的对比如, 绿色和蓝色锂电池图像中的凹坑与背景的对比如较低。对于灰色锂电池, 其他文献方法都可以较好的检测出凹坑的暗斑区域, 但是对于绿色和蓝色锂电池, 文献[4]和[7]方法的受限于模板大小, 产生了欠分割现象, 如图 21(a3)、(b3)、(a5)、(b5) 所示; 由于本文的方法是在灰度分布曲线上找到满足条件的像素, 从而分割出凹坑, 所以能比较完整的分割出凹坑, 受

覆膜颜色的影响较小,如图 21(a7)~(c7)所示。对于图 21(a1)呈斜条形的凹坑,由于凹坑右侧区域对应的灰度分布曲线不能同时穿过反光和阴影区域,导致灰度差分不满足条件,所以本文方法分割出的凹坑区域较真实凹坑丢失了少量信息,如图 21(a7)所示。

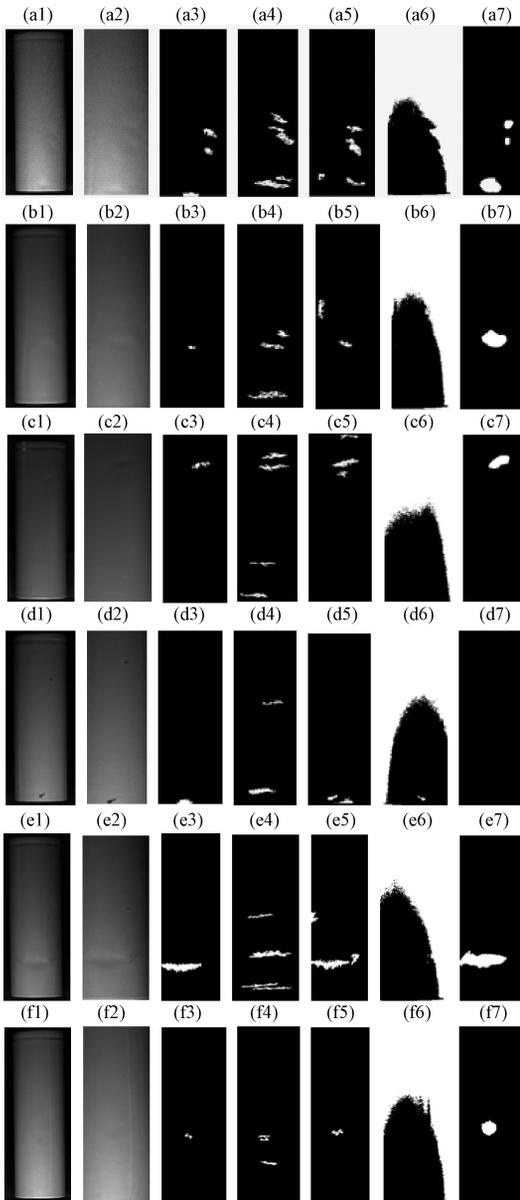


图 21 分割效果对比

Fig.21 The comparison chart of segmentation

2) 光照不均匀和反射不均的影响

图 21 中所有图像均受光照不均匀和圆周面对照射光线反射不均的影响,导致背景亮度不均衡,会产生较浅的阴影,而且图 21(a1)、(b1)左侧有一条纵向亮色条纹,与邻域存在明显灰度差,由于文献[7]和[11]方

法受限于局部特性,分割出了非凹坑区域,如图 21(a5)~(f5)和 21(a4)~(f4)所示;传统的图像分割算法(如 Otsu)受光照不均匀和反射不均的影响,难以检测出凹坑,如图 21 第 6 列所示;本文的方法是沿轴向计算一定区域内的灰度差,选取的阈值高于灰度分布曲线上轻微幅度的波动,所以能够消除光照不均匀和反射不均的影响。

3) 油污的影响

图 21(d1)所示含有较深的油污,其灰度值很低,会将凹坑覆盖,给检测造成干扰,出现了误检情况,如图 21(d3)~(d6)所示。由于本文提出了更具有针对性的灰度分布曲线波形特征,所以能够有效区分凹坑与油污的差异,给出了零信息图,如图 21(d7)所示,说明油污对本文检测方法影响很小。

4) 凹坑深度的影响

图 21(e1)、(f1)分别含有深凹坑和浅凹坑,对于浅凹坑,文献[4]、[7]和[11]的方法虽然能分割出凹坑的位置,但是受限于模板大小,只能分割出凹坑局部区域,丢失了许多信息;本文方法能够反应出浅凹坑亮度变化小的特点,所以能够将不同深度的凹坑准确地、完整地分割出来,如图 21(e7)、(f7)所示。

实验表明,其他方法由于受限于局部特性和模板大小,没有充分考虑凹坑和油污的特征,导致其检测效果不佳。本文方法定义了可以真实描述凹坑和油污特征的灰度差分模型,能够比较完整地分割出不同深度不同尺寸的凹坑,得到了更好的分割效果。

6 结 论

本文在分析圆柱型覆膜锂电池圆周面图像特征、凹坑特征和油污特征的基础上,提出了基于灰度差分模型的凹坑检测方法,在自建图像数据库进行了算法效果验证,得出以下结论:

1) 本文方法能够解决光照不均匀、圆周面反射不均匀对凹坑检测的影响;

2) 本文方法能有效区分凹坑和油污的波形特征;

3) 本文方法不仅对圆柱型覆膜锂电池凹坑检测的应用具有一定实际应用价值,还可以广泛应用于光照不均匀和反射不均匀的情况下,目标与背景灰度差异较小的微弱信号的检测问题,具有普适性。

参考文献

[1] 曾祥瑞. 电池表面缺陷视觉检测算法的研究与实践[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.

- ZENG X R. Research and implementation of visual detection algorithm for battery surface defects [D]. Shenyang: Shenyang university of technology, 2018.
- [2] 康熙川. 圆柱形锂电池圆周面缺陷在线检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- KANG ZH CH. Research on on-line detection method of cylindrical lithium battery surface defects[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [3] 谭文, 文青, 段峰, 等. 基于 HV&VHS 的圆柱形电池曲表面缺陷视觉检测[J]. 控制工程, 2019, 26(1): 17-22.
- TAN W, WEN Q, DUAN F, et al. Research on online surface defect inspection of HV&VHS-based batteries[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(1): 17-22.
- [4] 蒋财运, 刘羽, 韦树烽. 基于 GPU 的金属工件表面缺陷检测算法的研究[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(3): 271-274.
- JIANG C Y, LIU Y, WEI SH F. Research on metal work piece surface defects detection algorithm based on GPU[J]. Computer Applications and Software, 2015, 32(3): 271-274.
- [5] 陈文达, 白瑞林, 吉峰, 等. 基于机器视觉的轴承防尘盖表面缺陷检测[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(6): 250-254.
- CHEN W D, BAI R L, JI F, et al. Bearing shield surface defect detection based on machine vision[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(6): 250-254.
- [6] 贺振东, 王耀南, 刘洁, 等. 基于背景差分的高铁钢轨表面缺陷图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 640-649.
- HE ZH D, WANG Y N, LIU J, et al. Background differencing-based high-speed rail surface defect image segmentation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 640-649.
- [7] 孙雪晨, 姜肖楠, 傅瑶, 等. 基于机器视觉的凸轮轴表面缺陷检测系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1647-1653.
- SUN X CH, JIANG X N, FU Y, et al. Surface defect detection system for camshaft based on computer vision[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(6): 1647-1653.
- [8] 刘青, 张晓晖, 黄军勤. 基于机器视觉的钢球表面缺陷快速提取算法[J]. 激光杂志, 2014, 35(9): 58-61.
- LIU Q, ZHANG X H, HUANG J Q. The rapid extracting algorithm for steel ball surface defect based on machine vision[J]. Laser Journal, 2014, 35(9): 58-61.
- [9] 李晓舟, 于化东, 于占江, 等. 微小尺寸零件表面缺陷光学检测方法[J]. 兵工学报, 2011, 32(7): 872-877.
- LI X ZH, YU H D, YU ZH J, et al. Optical inspection method for surface defects of micro-component[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(7): 872-877.
- [10] LI W B, LU C H, ZHANG J C. A lower envelope Weber contrast detection algorithm for steel bar surface pit defects[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 45(1): 654-659.
- [11] 陈昊, 张奔, 黎明, 等. 基于图像光流的轴承滚子表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 198-206.
- ZHEN H, ZHANG B, LI M, et al. Surface defect detection of bearing roller based on image optical flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 198-206.
- [12] 苏俊宏, 刘胜利. 圆柱型高精零件表面缺陷检测及形貌分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(04): 154-158.
- SU J H, LIU SH L. Measure system of surface flaw and morphology analysis of cylindrical high precision parts[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 150-154.
- [13] 童莉, 平西建, 李磊. 一种基于自适应模糊线段的离散曲率估计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(5): 589-594.
- TONG L, PING X J, LI L. Discrete curvature estimation based on adaptive fuzzy segments [J]. Journal of Computer-aided design & Computer Graphics, 2007, 19(5): 589-594.
- [14] ROSENFELD A, JOHNSTON E. Angle detection on digital curves [J]. IEEE Transactions on Computers, 1973, 22(9): 875-878.
- [15] 桑海峰, 赵云, 苑玮琦, 等. 基于人手自然张开的多生物特征识别[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2549-2556.
- SANG H F, ZHAO Y, YUAN W Q, et al. Multi-biological features recognition based on natural open of hand[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(11): 2549-2556.
- [16] 郭娟娟, 钟宝江. U 弦长曲率: 一种离散曲率计算方法[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(8): 683-691.
- GUO J J, ZHONG B J. U-chord curvature: A computational method of discrete curvature[J]. PR&AI,

2014,27(8): 683-691.

- [17] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J].IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,1979,9(1):62-66.
- [18] 苑玮琦,朱立军,张波.基于波形学与支持向量机的虹膜坑洞纹理检测[J].仪器仪表学报,2017,38(3):664-671.
- YUAN W Q, ZHU L J, ZHANG B. Iris crypt texture detection based on morphology and SVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3):664-671.

作者简介



苑玮琦,1982年于湖南大学获得学士学位,1988年和1997年于东北大学分别获得硕士学位和博士学位,现为沈阳工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为机器视觉检测和生物特征识别。

Email: yuan60@126.com

Yuan Weiqi received his B. Sc. degree from Hunan University

in 1982, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Northeastern University in 1988 and 1997, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Shenyang University of Technology. His main research interests include machine vision detection and biometric identification.



郭绍陶(通信作者),2011年于大连理工大学城市学院获得学士学位,2014年于沈阳工业大学获得硕士学位,现为沈阳工业大学视觉检测技术研究所博士研究生,主要研究方向为机器视觉检测和生物特征识别。

Email: 381592719@qq.com

Guo Shaotao (Corresponding author) received her B. Sc. degree from City Institute, Dalian University of Technology in 2011, and received her M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2014. She is currently a Ph. D. candidate in the Computer Vision Group at Shenyang University of Technology. Her main research interests include machine vision detection and biometric identification.