

冷冲压阀片表面压痕精确检测方法

郭凤霞**, 乌云*, 李滨, 戚俊

中国科学院合肥物质科学研究院应用技术研究所, 安徽 合肥 230088

摘要 亮光构件表面缺陷引起的微小形状突变能够通过反射条纹的畸变凸显,因此反射条纹技术可应用于反光物体的表面质量检测。提出了一种基于反射条纹图像的冷冲压阀片表面压痕机器视觉检测方法,通过该方法提取阀片的条纹图像信息,并进行缺陷特征的自动识别。采用滤波去噪和多尺度 Retinex 算法等系列预处理方法提高图像质量,通过条纹中心线、子窗口像素和及投影向量等特征参量的选择降低计算的复杂度,增加计算系统的稳健性。实验结果表明:基于反射条纹图像的阀片表面压痕检测方法具有高精度、高效率等特点,实现了阀片表面细微压痕的有效识别,识别精度可达 0.1 mm,检测效率(单张检测目标耗时 2 s)可以满足阀片生产线的实际在线检测需求。

关键词 机器视觉; 表面压痕; 反射条纹图像; 冷冲压阀片

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815013

Accurate Detection Method for Surface Indentation of Cold Stamping Valve

Guo Fengxia**, Wu Yun*, Li Bin, Qi Jun

Institute of Applied Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract The slight sudden changes in the surface of metal object can be highlighted by the distortion of reflection stripes. Therefore, the reflection stripe technique can be applied in the surface inspection of reflective objects. We propose a machine vision detection method for the surface indentation of cold stamping valves based on reflection stripe image. Along the way, stripe image information of cold stamping valves is extracted, and defect features are recognized automatically. A series of preprocessing methods, such as noise filtration and multi-scale Retinex algorithms, are adopted to improve the image quality. Characteristic parameters, such as fringe-centerlines, sum of pixels, and projection vectors in child windows, are selected to reduce the computation complexity and improve the robustness of the computing system. The experimental results show that this detection method for the surface indentation of cold stamping valves based on reflection stripe image has high accuracy and high efficiency. This method can achieve effective identification of subtle indentation on the surface of cold stamping valves to an accuracy of 0.1 mm, and detection time efficiency (one valve takes 2 seconds) meets the online detection demand for the cold stamping valve production line.

Key words machine vision; surface indentation; reflection stripe image; cold stamping valve

OCIS codes 100.2000; 120.4630; 150.3040

1 引 言

在自动金属冲压制件生产过程中,原料缺陷、模具损伤等各种客观因素的存在,会导致产品出现漏冲、压痕、划伤、毛刺等缺陷,严重影响其使用性能及使用寿命,因此冲压产品缺陷检测是工业生产中非

常重要的一个环节。目前,国内冲压产品的缺陷检测和评价还主要依靠人工完成,检测效率和稳定性等都制约了冲压件制造业的发展。而基于机器视觉的缺陷检测技术作为一种新型的非接触无损检测技术,具有精度高、实效性强、柔性好、自动化和智能化水平高等优点,逐渐得到了广泛研究和应用^[1-4]。

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-03-21; 录用日期: 2018-03-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11504383)

* E-mail: wuyun@rntek.cas.cn; ** E-mail: guofengxia@126.com

视觉表面检测技术作为机器视觉检测技术的重要分支,是目前国际上无损检测领域的一个热门研究方向,国外学者已经在视觉表面检测技术领域展开了大量研究^[5-6]。为满足工业制造业对自由曲面的测量需求,德国学者首先提出了反射测量技术。在过去的几十年中,反射测量技术已经广泛应用于金属镜面、喷漆表面等表面缺陷的检测^[7-8]。受限于计算机技术水平及相关软硬件的水平,我国与国外发达国家的视觉表面检测技术相比还相对落后,但经过最近几十年的发展,已经取得不错的成果^[9-13]。

阀片是压缩机中最为关键的一个组件,在吸、排气过程中,阀片因反复地与缸体、阀板或升程限位器高速撞击而受交变应力作用,是易损坏且故障率最高的部件。阀片工作性能的优劣对压缩机的可靠性与经济性起着决定性作用,尤其是其表面的压痕,在交变应力的作用、高速、高频作用下会成为裂纹源。因此,实现阀片表面压痕的精确检测对产品的质量至关重要。阀片由冷冲压而成,其表面特征较为复杂,分布着多个孔径大小不一的圆形、椭圆形及其他形状的孔洞,这为阀片表面压痕的特征提取及判断带来了较大干扰。

针对各种冷冲压阀片复杂表面压痕的快速在线检测需求,本课题组对该类金属薄片表面压痕的检测方法进行了研究,提出了一种基于反射条纹图像的表面压痕机器视觉检测方法。通过该方法提取阀片表面的特征值,并进行缺陷特征的自动识别,解决了传统人工检测效率低、稳定性差等问题,为提高阀片生产线自动化提供了算法基础。

2 条纹图像信息的提取

2.1 光源设计

经过测试发现,在常用的环形光、同轴光等的光照下,光源和阀片需设置特定的相对角度,采集的图像才能显现阀片表面较大的压痕信息,且压痕特征并不十分明显(如图1所示),难以凸显阀片表面较为细微的压痕特征。计算机条纹技术对表面缺陷引起的微小形状突变非常敏感,非常适合于金属等亮光构件的表面检测^[13]。该技术因设备结构简单、准确度高及检测速度快等优点而在镜面检测、精密测量等方面得到了普遍应用^[9-12]。

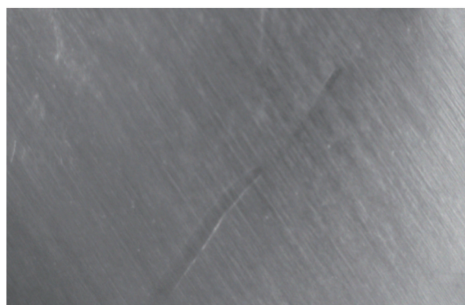


图1 普通光源下阀片表面压痕的采集结果

Fig. 1 Acquisition result of valve surface indentation at normal lighting

利用条纹光的反射原理搭建了如图2(a)所示的反射条纹图像光源系统。发光二极管(LED)光源透过黑白相间的条纹塑片产生条纹光,并投射到阀片表面,CCD通过阀片表面的反射采集条纹图像。阀片表面的压痕将通过条纹的畸变显现出来,如图2(b)所示。

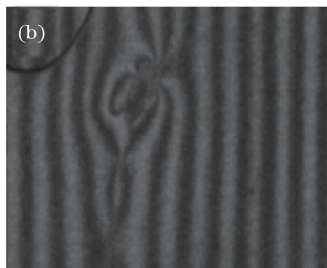
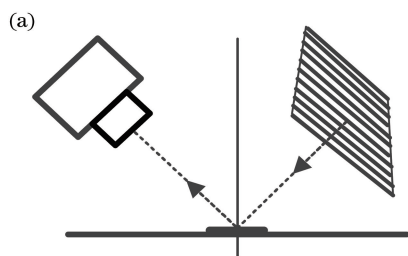


图2 (a)反射条纹检测装置示意图;(b)条纹畸变图

Fig. 2 (a) Schematic drawing of reflection stripe detection device; (b) diagram of distortion stripes

2.2 图像条纹中心的提取

图像条纹中心的提取工作主要包括图像的预处理与条纹中心线的提取。其中,图像预处理包括滤波去噪、图像增强、前景提取等。

2.2.1 图像预处理

1) 滤波去噪

在实际的工业现场中,由于受冲压现场的粉尘、

油渍、振动等影响,采集到的条纹图像会不可避免地带有各种类型的噪声,这些噪声必然会影响阀片压痕的识别精度。因此,采用合适的图像降噪算法对图像进行预处理,可以更好地保留有效点的信息。

根据条纹图像的特点以及突出条纹边缘的需求,经过系列测试,本研究采用中值滤波方法对条纹图像的噪声进行平滑处理,可以完好地保存图像的

细节信息。图 3 展示了中值滤波的去噪结果。可以看出:滤波后,条纹边缘轮廓得到了平滑,减少了杂

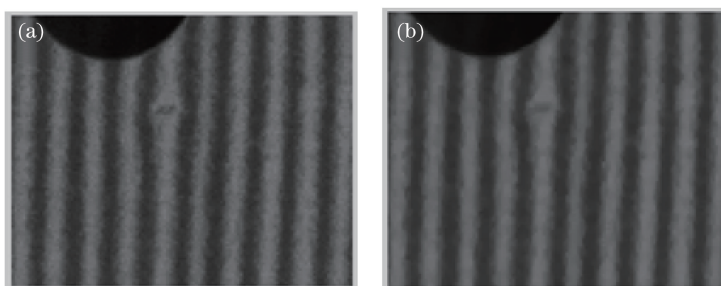


图 3 (a)原灰度图像;(b)中值滤波图像

Fig. 3 (a) Original gray image; (b) median filtered image

2) 暗部区域条纹细节增强

针对因拍摄角度产生的条纹图像亮度不均、对比度不足、暗部区域条纹难以分辨等问题,采用多尺度 Retinex 算法^[14-15]对条纹图像进行暗部区域细节提升。根据美国物理学家 Land 提出的 Retinex 理论^[16],图像可以表示为入射分量和反射分量:

$$I(x, y) = E(x, y)R(x, y), \quad (1)$$

其中的反射分量对应于图像的实际面貌,而入射分量对应于干扰部分。Retinex 算法就是通过图像亮度间的比较来估算出入射分量并降低其质量,最终获得图像的反射分量,消除光照不均的影响,实现图像增强。鉴于单尺度 Retinex 算法^[17]在细节增强和色彩保真取得平衡问题上的局限性,Jobson 等^[14]提出了在不同尺度增强过的图像基础上的线性加权

点;阀片边缘部分可能产生的高光反射点的影响也得以缓解。

求和的多尺度 Retinex 算法:

$$R(x, y) = \sum_{k=1}^N W_k \times \{ \lg I(x, y) - \lg [I(x, y) * F_k(x, y)] \}, \quad (2)$$

式中:高斯函数 $F_k(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)$,

即中心/环绕函数,其标准差 σ 称为 Retinex 的尺度参数; N 为具不同标准差 σ 的高斯函数的数量; W_k 为对应于各种尺度 k 的权值,并且满足 $\sum_{k=1}^N W_k = 1$; $*$ 表示卷积运算。

多尺度 Retinex 算法处理前后的对比结果如图 4 所示,处理之后的图像亮度较之前的明显提高,尤其是暗部区域条纹得到显著增强,为后续处理提供了优良的条纹图像。

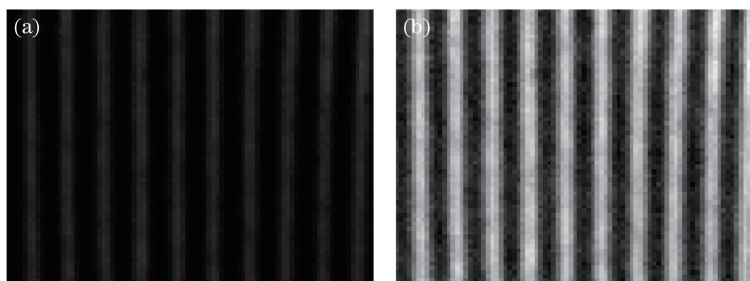


图 4 (a)原图;(b)暗部区域细节增强结果

Fig. 4 (a) Original image; (b) shadow detail enhancement result

3) K 均值聚类的条纹前景分割

实验用冷冲压阀片的表面特征较为复杂,除了具有特定复杂形状的舌簧部分,还冲有多个孔径大小不一的圆形、椭圆形及其他形状的孔洞,阀片外形轮廓也不是简单的矩形,包含了各种样式的角点,以上因素都为阀片表面压痕的特征提取及判断带来干扰。为准确提取阀片表面的条纹信息,以判断阀片表面的压痕情况,需要将带有条纹的阀片区域和无

条纹的背景部分分离。

采用 K 均值聚类算法^[18-19]将每幅阀片图像划分为背景、阀片的亮条纹以及暗条纹三个区域,剥离出阀片区域反射的条纹前景部分,结果如图 5 所示。

K 均值聚类算法由于具有简洁和高效的特性而在聚类算法中广泛使用,其基本思想是^[13]:随机选择 K 个初始聚类中心,将每个样本分配到最近的聚类中心所属的集合之中,并通过迭代的方法逐次

更新各聚类中心的值,直至各个样本与所在类均值的误差平方和达到最小,从而得到最好的聚类结果。基于 K 均值聚类算法对阀片反射条纹区域前景提取的步骤如下:

Step 1: 分别将 C_{back} 、 C_{bright} 及 C_{dark} 设定为阀片背景、亮条纹以及暗条纹三个类的初始聚类中心,并将最大循环次数作为迭代中止条件。

Step 2: 分别计算各像素点灰度 $f(x, y)$ 到三类聚类中心的距离

$$\begin{cases} D_{\text{back}} = |f(x, y) - C_{\text{back}}| \\ D_{\text{bright}} = |f(x, y) - C_{\text{bright}}| \\ D_{\text{dark}} = |f(x, y) - C_{\text{dark}}| \end{cases} \quad (3)$$

Step 3: 进行迭代,并更新聚类中心。将到背景聚类中心的距离小于到另外两个聚类中心的距离的

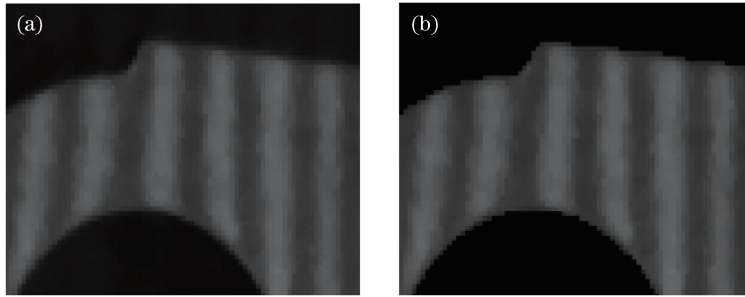


图 5 阀片前景分割结果。(a)分割前;(b)分割后

Fig. 5 Result of valve foreground segmentation. (a) Before segmentation; (b) after segmentation

2.2.2 条纹中心的提取

条纹中心的提取是条纹图像处理的关键环节,其提取精度直接影响到后期的压痕判定精度。根据光的直线传播原理,阀片表面接收到的光为明暗相间的条纹分布。但由于光的衍射作用,阀片表面的明暗条纹交界处并不是跃变的,而是渐变的(从图 5 可以清晰地看出),其截面光强近似服从高斯分布。研究中涉及的条纹为法线方向变化不大的直线条纹,适合采用拟合法提取条纹中心。即对条纹截面光强进行基于最小二乘法的二次曲线拟合,然后求其极值点,即得到条纹中心的像素位置。

图 6 是阀片条纹图像某行的灰度变化图,其和二次曲线变化模型较为一致。另一方面,由曲线拟合理论可知,二次曲线也是便于实现最小二乘拟合的一种模型,因此拟采用二次曲线对条纹截面光强进行拟合。令 $df(x)/dx=0$,可得二次曲线的极值点位于 $x=-b/(2a)$,即条纹中心位置。二次曲线的表达式为

$$f(x) = ax^2 + bx + c. \quad (5)$$

在实际的条纹提取过程中采用逐行提取条纹中

像素点分配到背景区域聚类中心,并求解该类中对应灰度分量的均值,设定为下一次迭代的背景聚类中心 C'_{back} ;亮条纹和暗条纹聚类中心的迭代同理,计算公式为

$$\begin{cases} C'_{\text{back}} = \text{Avg} \left[\sum_{D_{\text{back}} < D_{\text{bright}} \ \& \ D_{\text{back}} < D_{\text{dark}}} f(x, y) \right] \\ C'_{\text{bright}} = \text{Avg} \left[\sum_{D_{\text{bright}} < D_{\text{back}} \ \& \ D_{\text{bright}} < D_{\text{dark}}} f(x, y) \right] \\ C'_{\text{dark}} = \text{Avg} \left[\sum_{D_{\text{dark}} < D_{\text{bright}} \ \& \ D_{\text{dark}} < D_{\text{back}}} f(x, y) \right] \end{cases} \quad (4)$$

Step 4: 反复执行 Step 2 和 Step 3,直至满足中止条件,即迭代次数大于设定的最大迭代次数,或者迭代更新后,聚类中心变化量小于收敛误差,分类结束。

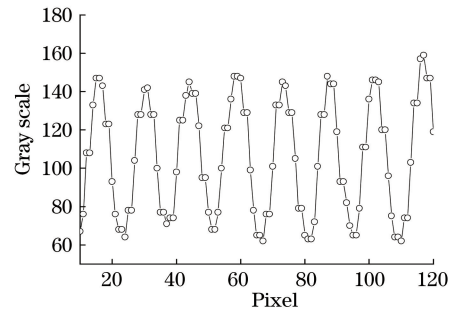


图 6 条纹图像行灰度变化图

Fig. 6 Graph of gray variation in a line on the stripe image 心的方法,从上至下逐行扫描经预处理后的条纹灰度图像,对每一行中各个白色条纹区域灰度值最大的点及其附近几个连续的点进行二次曲线拟合,并求得各曲线峰值的相应位置,该位置即为条纹中心位置,直到扫描完整幅条纹图像,得到的结果如图 7 所示。灰度图像(图 7(a))中条纹的畸变非常清晰地显现了阀片上的一个极其细微的压痕,通过上述条纹中心的提取方法得到了如图 7(b)所示的条纹中心提取结果。图 7(c)、(d)为图 7(a)、(b)的放大图。以上结果表明,使用该方法得到的条纹中心图像很好地保留了反射

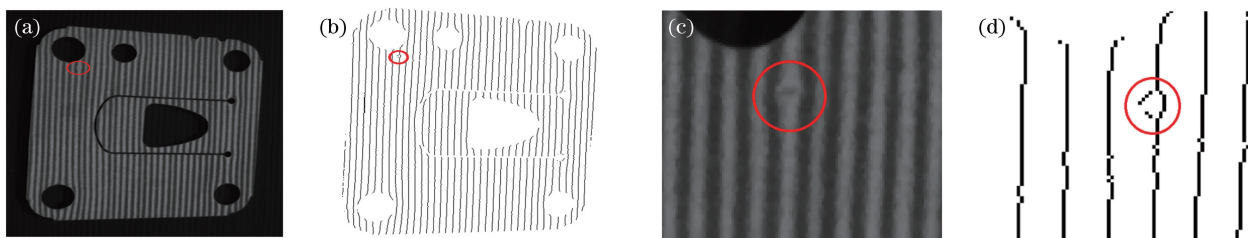


图 7 条纹中心线提取结果。(a)条纹灰度图像(红色圈内为压痕);(b)条纹中心线图像(红色圈内为压痕);
(c)放大的条纹灰度图像(红色圈内为压痕);(d)放大条纹中心线图像(红色圈内为压痕)

Fig. 7 Extraction results of fringe-centerlines. (a) Image of gray stripe (the indentation is inside the red circle);
(b) image of fringe-centerlines (the indentation is inside the red circle); (c) enlarged image of gray stripe
(the indentation is inside the red circle); (d) enlarged image of fringe-centerlines (the indentation is inside the red circle)

条纹的有效信息,为下一步基于条纹中心线进行阀片表面压痕的识别提供了前提条件。

3 阀片压痕检测算法

基于上述各种方法对冷冲压阀片条纹图像进行初步处理,下面重点是采取一定的算法对条纹中心

线的提取结果进行分析,并给出阀片压痕存在与否的判定依据,标注出其具体位置。采用基于条纹图像的阀片压痕检测(DKSD)算法综合条纹间距判断、背景影响去除、子窗口矩阵像素总和及投影向量差分平方和的融合算法等 4 个步骤逐行筛选阀片表面压痕检测点,详细的算法流程如图 8 所示。

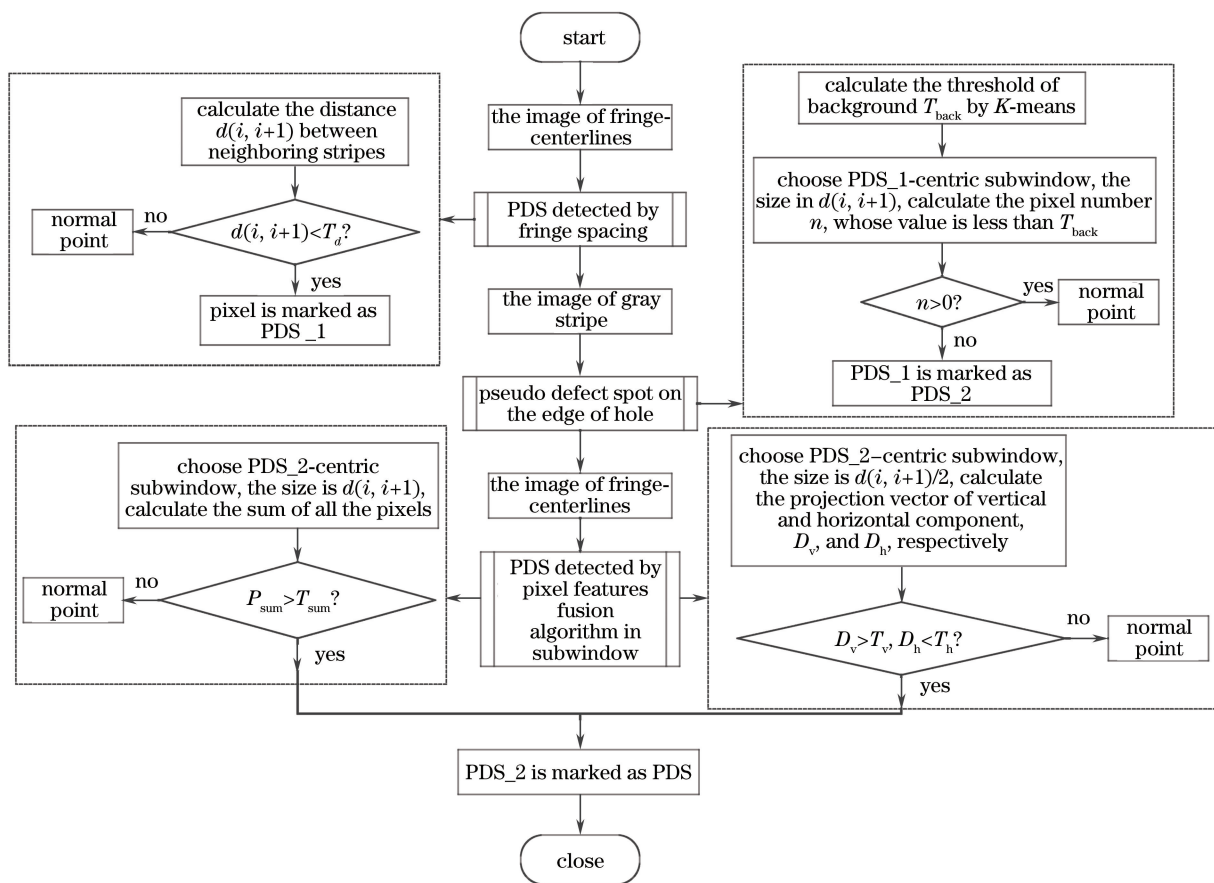


图 8 基于条纹图像的阀片压痕检测算法(DKSD)流程图

Fig. 8 Detection algorithm flow chart of valve indentation based on stripe image

在 DKSD 算法流程图中,PDS 指的是可能的瑕疵点。4 个关键步骤的具体处理过程说明如下。

1) 从上至下逐行扫描条纹中心线图像,计算图像中相邻条纹像素点之间的距离,即条纹间距

$d(i, i+1)$, 其中 i 指一行中的第 i 条纹, 计算一行中 $d(i, i+1)$ 的均值 v 及标准差 SD , 则 $v-SD$ 即为条纹间距阈值 T_d ; 将条纹间距逐个与阈值进行比较, 若满足 $d(i, i+1) < T_d$, 则该相邻条纹上的像素点标记为可能的压痕瑕疵点 PDS_1 。

2) 在条纹灰度图像中, 采用 K 均值聚类算法对图像中的背景区域进行检测, 确定背景区域判断阈值。以步骤 1) 中判定的可能瑕疵点 PDS_1 为中心, 在灰度图像中取条纹间距均值大小的子窗口, 分析子窗口内是否含有像素值小于背景阈值的像素点; 若包含, 则可能压痕瑕疵点 PDS_1 属于阀片中孔洞周边条纹形变区域, 判定为正常点; 否则继续判定为阀片表面的可能压痕瑕疵点 PDS_2 。

3) 以步骤 2) 中判定的可能瑕疵点 PDS_2 为中心, 在条纹中心线图像中取条纹间距均值大小的矩形子窗口, 计算子窗口内像素值总和 P_{sum} 。若 P_{sum} 大于条纹间距均值, 即阈值 T_{sum} , 则说明该区域条纹可能发生了由压痕引起的形变, PDS_2 点仍有可能为压痕瑕疵点; 否则判定为正常点。

4) 为排除由噪声[如图 9(a)所示]以及孔洞周

边外缘条纹形变[如图 9(b)所示]引起的误判, 进一步融合子窗口投影向量的差分平方和进行阀片表面压痕瑕疵点判断。具体步骤如下: 同样以步骤 2) 中判定的可能瑕疵点 PDS_2 为中心, 在条纹中心线图像中取 $1/2$ 条纹间距均值大小的矩形子窗口, 将子窗口分别向垂直和水平方向进行投影求和, 得一维投影向量 P_v 和 P_h :

$$\begin{cases} P_v = \sum_{i=1}^d f(i, j)/d \\ P_h = \sum_{j=1}^d f(i, j)/d \end{cases}, \quad (6)$$

式中: d 为所取子窗口大小。然后分别求取二者的差分平方和 D_v, D_h , 并根据所取矩形子窗口的大小确定投影向量差分平方和的阈值 T_v 和 T_h 。若 $D_v > T_v$, 且 $D_h < T_h$, 并同时满足步骤 3) 中 $P_{sum} > T_{sum}$, 则将该可能瑕疵点 PDS_2 最终确定为压痕瑕疵点 PDS , 并在条纹灰度图像及中心线图像中进行标记。显然, 投影操作能够很好地实现条纹中心线图像中压痕瑕疵微弱特征的增强, 在此基础上进行瑕疵区分也可以提高精确度。



图 9 (a) 条纹中心线图像中的噪声点(红点标注)和(b)孔洞周边条纹形变

Fig. 9 (a) Noise point (annotated by a red point) and (b) distortion stripe around the hole in the image of the fringe-centerlines

4 实验结果与分析

为验证上述算法的有效性, 实验选取了 6 种模板各 100 张, 共 600 张阀片样品, 进行自动在线测试。每种模板含有不同数量的各种典型压痕瑕疵点的阀片样品及合格阀片样品。算法的性能可以通过以下关键指标进行评定: 1) 准确率, 系统给出准确结果的比率; 2) 误判率, 系统将无缺陷的阀片判断为缺陷阀片的比率; 3) 漏检率, 系统将缺陷阀片判为无缺陷阀片的比率。基于以上关键指标的阀片测试结果如表 1 所示, 第 1 列为测试阀片的模板类型, 第 2 列为每种阀片模板中缺陷阀片的个数, 第 3 列为缺陷阀片的识别个数, 第 4 列为误检个数, 第 5 列为漏检个数, 第 6 列为准确率, 第 7 列为误检率, 第 8 列为漏检率。本次测试结果准确率均在 95% 以上, 且对于较为细小的压痕也具有较好的适应性, 给出

了准确的检测结果, 如图 10 所示, 列出了部分测试阀片样品图像及压痕瑕疵点的标注结果。

图像采集系统的设计需要综合考虑条纹产生的原理及压痕检测的精密程度, 使达到一定检测需求的细微压痕可以在条纹图像中显现, 并基于文中算法进行很好的识别。由于图像采集系统的硬件限制(关键是条纹间隙的设计), 过于细小的压痕的反射条纹难以产生明显的畸变, 所提算法亦无法提取压痕缺陷特征进行识别, 而漏检的原因在于压痕非常细小, 在该部位的反射条纹几乎没有畸变[如图 11(a)所示]。经过大量测试可知, 所提算法的压痕检测精确度可达 0.1 mm, 存在误检率的原因在于阀片表面的脏污、灰尘等会使条纹图像灰度发生变化[如图 11(b)所示], 条纹提取结果和压痕残缺非常相似, 从而误判为压痕瑕疵点, 降低了阀片缺陷检测的准确率。因此, 在构建检测系统装置时需要加盖防护

表 1 冷冲压阀片测试结果
Table 1 Experimental results of the cold stamping valve

Template of the test valve	Number of the indentation valve	Number of identification of valve with indentation	Number of the false detection	Number of the missing detection	Accuracy rate / %	False rate / %	Missing rate / %
1	60	59	1	2	97	2.5	3.3
2	50	52	3	1	96	6	2
3	40	41	2	1	97	3.3	2.5
4	40	40	2	2	96	3.3	5
5	60	61	3	2	95	7.5	3.3
6	50	49	2	3	95	4	6

罩,创造清洁无尘的环境能够较好地减小算法的误判率。本算法的另一明显优势在于只针对条纹提取中心线上的点进行压痕瑕疵点判断,大大降低了计算量。经测试可知,单张阀片缺陷检测的最高平均耗时为2 s,可满足实际阀片冲压生产线自动在线检测速度的要求。

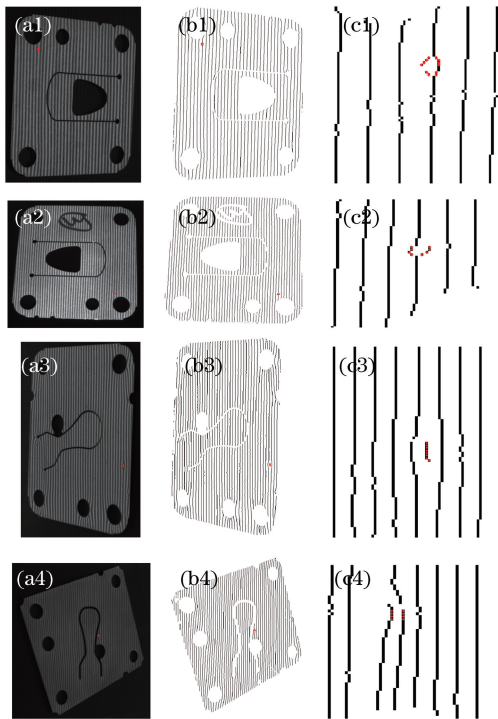


图 10 阀片表面压的痕检测结果(红点标注压痕疵点)。
Fig. 10 Test results of indentation on valve surface (the indentation annotated by the red dot).
(a) Gray image; (b) image of fringe-centerlines;
(c) enlarged image of fringe-centerlines

5 结 论

针对冷冲压阀片生产企业对各种具有复杂表面特征阀片表面细小压痕的快速在线检测需求,根据

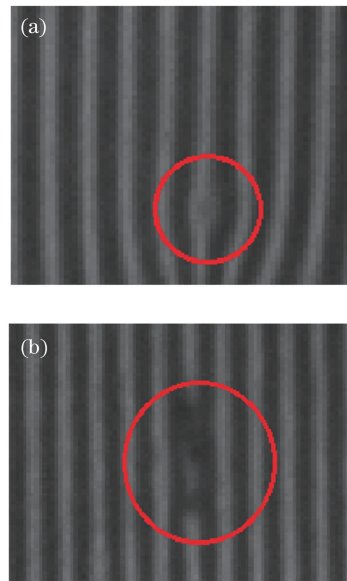


图 11 阀片表面(a)细微压痕条纹图像和(b)脏污条纹图像
Fig. 11 Fringe images of valve with
(a) tiny indentation and (b) smudginess

反射条纹对金属冲压件表面缺陷引起的微小形状突变比较敏感的特性,提出了一种基于反射条纹图像的阀片表面压痕线上机器视觉检测方法。该方法基于条纹图像采集系统得到的能够凸显阀片表面极其细微压痕特征的阀片条纹图像,通过系列预处理和特征选择降低计算的复杂度,增加计算系统的稳健性,融合条纹间距、子窗口像素特征及投影特征等方法,提取阀片表面特征并实现缺陷的自动识别。实验结果证明,该检测算法能够有效对阀片表面的细微压痕缺陷进行有效识别,识别精度达到0.1 mm,准确率达到95%以上,检测效率(单张检测目标耗时2 s)亦可满足实际阀片生产的检测需求。目前,基于该算法已构建了阀片生产线的自动检测系统,该系统已经成功测试并投入运行,在减轻阀片检测工人工作强度的同时大大提高了阀片的检测效率和准确率。

参 考 文 献

- [1] Li W B, Lu C H, Zhang J C. A lower envelope Weber contrast detection algorithm for steel bar surface pit defects[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 654-659.
- [2] Kang X J, Yang P P, Jing J F. Fabric defects detection based on characteristic value of window weighted covariance matrix[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(8): 885-891.
康雪娟, 杨盼盼, 景军锋. 窗口加权协方差矩阵特征值检测织物瑕疵[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 885-891.
- [3] Yuan T, Zhang F, Tao X P, *et al.* Test of optical mirror surface using fringe reflection system [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(9): 0912004.
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 条纹反射法检测光学反射镜面形[J]. 光子学报, 2015, 44(9): 0912004.
- [4] Yang D T, Huang J X, Gong C L, *et al.* Flexible printed circuit solder's detection based on texture feature [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(2): 400-402.
杨冬涛, 黄杰贤, 龚昌来, 等. 基于纹理特征的挠性印制电路板焊盘缺陷检测[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(2): 400-402.
- [5] Su J C, Tarng Y S. Automated visual inspection for surface appearance defects of varistors using an adaptive neuro-fuzzy inference system [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(7/8): 789-802.
- [6] Tolba A S, Khan H A, Raafat H M. Automated visual inspection of flat surface products using feature fusion [C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology(ISSPIT), 2009: 11107350.
- [7] Su P, Parks R E, Wang L R, *et al.* Software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test[J]. Applied Optics, 2010, 49(23): 4404-4412.
- [8] Su P, Khreishi M A H, Su T Q, *et al.* Aspheric and freeform surfaces metrology with software configurable optical test system: a computerized reverse Hartmann test [J]. Optical Engineering, 2013, 53(3): 031305.
- [9] Zhao W C, Fan B, Wu F, *et al.* Experimental analysis of reflector test based on phase measuring deflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112002.
赵文川, 范斌, 伍凡, 等. 基于 PMD 的反射镜面检测实验分析[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112002.
- [10] Wang H R, Li B, Wang Z F, *et al.* Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112007.
王华荣, 李彬, 王志峰, 等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面形测量 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112007.
- [11] Li W S, Huke P, Burke J, *et al.* Measuring deformations with deflectometry [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9203: 92030F.
- [12] Ji Y, Zhang X J, Yuan T, *et al.* Deflectometry measurement system for smart mobile devices [J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 267-279.
冀翼, 张学军, 袁婷, 等. 用于智能移动设备的条纹反射法检测系统 [J]. 中国光学, 2017, 10(2): 267-279.
- [13] Zhang Y B, Tang J, Yang D G. Detection of defects on a shining-metal surface using reflective fringe pattern [J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(s1): 100-102.
张于北, 唐佳, 杨党纲. 对某金属件反光表面缺陷的反射条纹检测 [J]. 计测技术, 2013, 33(s1): 100-102.
- [14] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- [15] Liu X H, Chen Z B. Fusion of infrared and visible images based on multi-scale directional guided filter and convolutional sparse representation [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1110004.
刘先红, 陈志斌. 基于多尺度方向引导滤波和卷积稀疏表示的红外与可见光图像融合 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1110004.
- [16] Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- [17] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [18] Macqueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations [C] // Proceedings of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. 1967, 1(14): 281-297.
- [19] Huang Z X. Extensions to the K-means algorithm for clustering large data sets with categorical values [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(3): 283-304.