

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.07.023

基于机器视觉的板式换热器板片 微裂纹检测方法研究^{*}

张鑫鹏¹, 魏立峰^{1*}, 苑玮琦², 丁志博²

(1. 沈阳化工大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110142;

2. 沈阳工业大学 视觉检测技术研究所, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:针对板式换热器板片微裂纹人工检测出错率高, 渗透检测实时性低等问题, 对板片图像采集、微裂纹形态、区域分割、边缘提取与特征量化等方面进行了研究, 提出了一种基于机器视觉的微裂纹检测方法。通过阈值算法, 分割出了可能存在微裂纹的感兴趣区域; 采用 Canny 算子在感兴趣区域内进行了微裂纹的粗提取, 计算了每个粗提取结果的空间位置特征和局部灰度特征, 根据定义的特征约束条件对各个粗提取结果进行了筛选, 从而获取到了真正的微裂纹; 利用工厂采集到的图像对检测方法进行了测试。研究表明: 该方法能够满足无漏检和低误检的工业要求, 并且具有较好的实时性, 对板式换热器板片微裂纹的自动化检测具有一定的实际应用价值。

关键词:机器视觉; 换热器板片; 微裂纹; 缺陷检测; 边缘检测; 特征提取

中图分类号: TH878; TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)07-0856-05

Microcrack detection method for plate heat exchanger based on machine vision

ZHANG Xin-peng¹, WEI Li-feng¹, YUAN Wei-qi², DING Zhi-bo²

(1. College of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problems of high detection error rate and low real-time penetrate detection of micro-cracks in plate heat exchanger plates, the image acquisition, micro-crack morphology, region segmentation, edge extraction and feature quantization were studied. A micro-crack detection method was based on machine vision. The region of interest where microcracks may exist was segmented by the threshold algorithm. The Canny operator was used to extract the microcracks in the region of interest, and the spatial position features and local gray features of each rough extraction result were calculated. According to the defined features, the constraints were used to screen the results of each rough extraction to obtain true microcracks. The detection method was tested by the image collected by the factory. The results indicate that the method can meet the industrial requirements of no-leakage detection and low false detection, and has real-time performance. It has certain practical application value for the automatic detection of micro-cracked on the plate heat exchanger plate.

Key words: machine vision; heat exchanger plate; microcrack; defect detection; edge detection; feature extraction

收稿日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271365)

作者简介: 张鑫鹏(1994-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 主要从事工业机器视觉检测技术方面的研究。E-mail: 517229767@qq.com

通信联系人: 魏立峰, 男, 博士, 教授。E-mail: weilifeng62@sina.com

0 引言

随着现代工业技术的迅速发展,板式换热器已经得到广泛的应用^[1-2]。板式换热器板片(又称作波纹板)是板式换热器的核心部件,在冲压生产过程中可能会产生非穿透性的表面微裂纹^[3],这些裂纹虽然并没有真正的裂开,但是会使板式换热器在使用过程中出现泄漏,从而影响工业生产安全。

目前,板式换热器板片微裂纹的检测主要采用人工目测法和渗透检测法。人工目测方法效率低且易造成漏检;渗透检测法^[4]对于穿透性裂纹的检测具有较好的效果,但是对于非穿透性的表面微裂纹的检测效果不佳,且检测成本较高。近些年基于机器视觉的裂纹检测方法得到了发展^[5-8],在2017年苑玮琦等^[9]采用机器视觉的方法对板式换热器板片的质量检测进行了研究,但文中仅针对规则的波纹区进行了检测,并未提及对不规则的非波纹区的检测,而在实际生产中非波纹区比波纹区更易产生微裂纹缺陷。

综上所述,本文以板式换热器板片为研究对象提出一种基于机器视觉的微裂纹检测方法。首先笔者分析板片的结构特点和微裂纹的特征,采用Canny算子进行候选区域提取,然后由空间特征和局部灰度特征制定约束条件,最后根据约束条件挑选出真正的缺陷区域,从而完成微裂纹的检测。

1 板片结构及缺陷特征分析

板式换热器板片图像如图1所示^[10]。

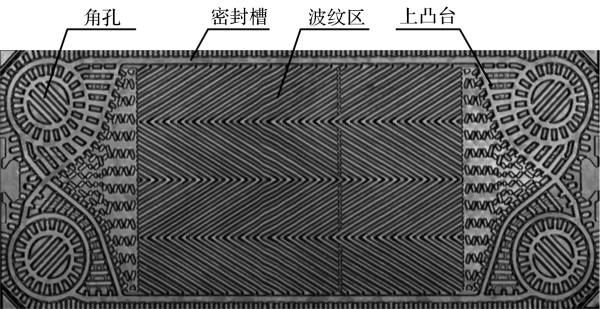


图1 板式换热器板片图像

图1中展示了板式换热器板片的主要区域和结构组成,包括:角孔、波纹区、密封槽和上凸台。其中,上凸台和波纹区的波纹是板式换热器板片在冲压过程中形成的凸起结构。

凸起结构的垂直截面示意图如图2所示^[11]。

图2中,斜面与顶面的交界处是会出现微裂纹的位置,并且微裂纹是围绕着顶面结构成条状结构存

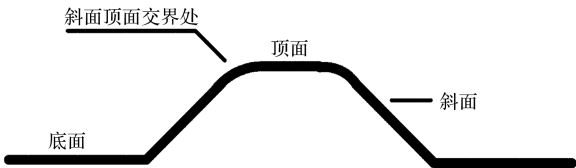
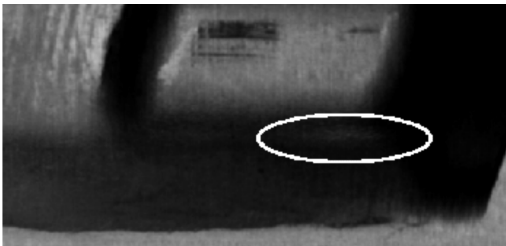


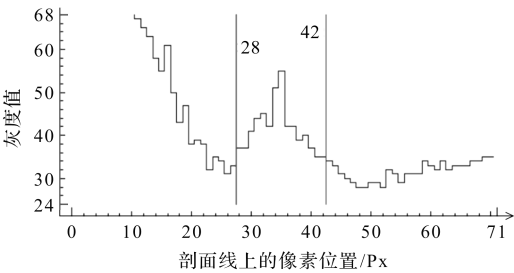
图2 凸起结构垂直截面示意图

在的。
板式换热器板片结构的复杂性使得微裂纹在特征表现上具有一定的差异性。

微裂纹缺陷图例及剖面灰度分布曲线如图3所示。



(a) 微裂纹缺陷



(b) 剖面灰度分布曲线

图3 微裂纹缺陷图例及剖面灰度分布曲线

在图3(a)中采用椭圆框对微裂纹进行了标注,图3(b)中的竖直线标识微裂纹的上、下边界,横坐标差值表示微裂纹的像素宽度。

由图3可知,缺陷的剖面灰度分布曲线形状类似于正态分布,适合采用高斯模板匹配^[12]的方法进行检测。然而,由于缺陷线宽和对比度的差异,需要采用多尺度高斯模板匹配的方法进行检测。这种多尺度高斯模板匹配的方法将使得计算量翻倍,影响算法的实时性。

基于边缘检测的方法可以忽略线宽带来的影响,不需要引入多个检测尺度,从而简化算法的复杂度,增加检测的实时性。因此,本文采用边缘检测的方法进行候选缺陷的提取,以避免由于多尺度操作带来的效率问题。

2 微裂纹检测算法

综合第1节的分析可知,板式换热器板片的结构

复杂,且各结构灰度分布不均匀,给微裂纹缺陷的检测造成一定的难度。然而,微裂纹缺陷的存在位置是和特定的结构有关的,若能首先分割出特定结构所在的区域,然后在分割出的区域内进行缺陷的粗提取,最后通过特征约束筛选可实现缺陷的精确检测。

根据上述思路,笔者制定了微裂纹缺陷的检测方案:(1)板式换热器板片图像预处理;(2)候选缺陷的提取;(3)通过特征约束提取真正的缺陷。

具体实现步骤如下所述。

2.1 板式换热器板片图像预处理

根据先验知识可知,微裂纹缺陷出现在顶面和底面之间的斜面上,且靠近上凸台,即图 2 所示的斜面与顶面的交界处。斜面区域由于光的反射作用,形成了较暗的区域,后续将这部分区域称为“暗区域”。

在获取暗区域之前,首先将板片分割成 3 部分,以便于采用并行运算的方式加快处理速度。通过观察可知暗区域和其他部分在灰度上具有较为明显的区别,因此可通过阈值分割的方法获取暗区域。

其原理如下式所示:

$$f_{(x)} = \begin{cases} 1 & T_1 \leq x \leq T_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_1 — 阈值下限; T_2 — 阈值上限。

阈值分割的结果中可能存在一些孤立的噪声点,因此在分割后根据面积进行一次挑选,得到最终的暗区域。

由于微裂纹缺陷存在于暗区域内且靠近顶面,分割出顶面是有必要的。笔者首先将暗区域取补集得到顶面的候选区域,然后根据面积挑选出期望的顶面。

2.2 候选缺陷提取

据第 1 节得出的结论,本文采用边缘检测的方法进行微裂纹的粗提取。常用的边缘检测算子有很多,其中 Canny 算子^[13-14]是基于二阶导数的边缘检测算子,能够在抑制噪声的同时检测出比较完整的边缘。由于工业环境的影响,图像中的噪声无法避免,并且微裂纹的边缘强弱不一,考虑到 Canny 算子对噪声的相对不敏感性以及对弱边缘检测的优越性,本文采用 Canny 算子进行候选缺陷的提取。

为了避免由于结构原因引入过多的虚假边缘,笔者将 Canny 边缘检测限定在图像预处理得到的暗区域范围内。将暗区域图像与原始图像进行乘积运算,即可得到 Canny 算子的待处理图像。

Canny 边缘检测的结果存在一定的虚假边缘,采用长度信息去除由于噪声引起的虚假边缘,得到最终

的候选微裂纹边缘。

2.3 特征约束

经过上节的处理,已经获到了微裂纹缺陷的候选边缘。本节提出了一种基于特征约束的方法进行微裂纹缺陷的精确提取。具体地,笔者采用了空间位置特征和局部灰度特征进行筛选。

2.3.1 空间位置特征约束

根据板式换热器板片机械结构和冲压受力可知,微裂纹出现在顶面附近,且平行于顶面,即垂直于斜面。因此,可以根据候选边缘与顶面的距离和候选边缘相对于斜面的方向分别制定距离约束条件 P1 和方向约束条件 P2。

(1) 距离约束

约束条件 P1: $D_{\text{distance}} < T_{\text{distance}}$,其中: D_{distance} — 候选边缘到顶面的距离; T_{distance} — 距离阈值。

由于候选边缘具有多个像素点组成, D_{distance} 用候选边缘质心到顶面的最小距离表示,计算方法如下式所示:

$$D_{\text{distance}} = \min \{ \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}, (x_i, y_i) \in T \} \quad (2)$$

式中: T — 顶面边界区域; $(\bar{x}, \bar{y})$ — 候选边缘的质心:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{(x,y) \in T_e} x \\ \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{(x,y) \in T_e} y \end{cases} \quad (3)$$

式中: m — 候选边缘的像素个数; T_e — 候选边缘像素集合。

(2) 方向约束

约束条件 P2: $D_{\text{direction}} < T_{\text{direction}}$,其中: $D_{\text{direction}}$ — 候选边缘与斜面的夹角; $T_{\text{direction}}$ — 夹角阈值。

$D_{\text{direction}}$ 是一个相对的角度,需要求得斜面的绝对方向和候选边缘的绝对方向,候选边缘和斜面方向的求解公式为^[15]:

$$\theta = 0.5 \arctan \left(\frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (4)$$

$$M_{ij} = \sum_{(r,c) \in R} (r_0 - r)^i (c_0 - c)^j \quad (5)$$

式中: r_0, c_0 — 待计算区域 R 的质心。

根据公式(4)对候选边缘和候选边缘所处的斜面分别求得角度 θ_1 和 θ_2 ,则 $D_{\text{direction}}$ 可以表示为:

$$D_{\text{direction}} = \begin{cases} \text{abs}(\theta_1 - \theta_2), & \text{abs}(\theta_1 - \theta_2) < \pi/2 \\ \pi - \text{abs}(\theta_1 - \theta_2), & \text{abs}(\theta_1 - \theta_2) \geq \pi/2 \end{cases} \quad (6)$$

本研究根据约束规则 P1 和 P2 对粗提取结果进行

约束处理。

2.3.2 局部灰度特征约束

由于空间位置特征并不能完全将微裂纹和误检分割开,本研究制定了基于局部灰度特征的约束条件进行剩余误检的剔除。

二阶微分在一定程度上反映了灰度的波动情况,因此可根据局部二阶微分绝对值的均值制定约束条件 P3。同时在微裂纹处进行局部阈值分割时,会分割出较为完整的连通区域,而非微裂纹处则是随机分布的区域。因此本文采用 Otsu^[16] 阈值后得到的最大连通域的面积($A_{\max}$) 制定约束条件 P4。根据约束规则 P3 和 P4 对 2.3.1 节的结果进行约束处理。

约束条件 P3: $M_{\text{laplace}} > T_{\text{laplace}}$,其中: M_{laplace} — 局部二阶微分绝对值的均值; T_{laplace} — 阈值。

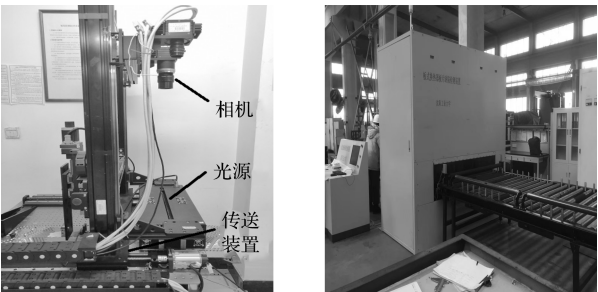
约束条件 P4: $A_{\max} > T_{\text{area}}$,其中: T_{area} — 面积阈值。

3 实验与结果分析

3.1 实验数据获取

板式换热器板片微裂纹检测的硬件系统由传送装置、光源、镜头和相机等部分构成。

图像采集系统如图 4 所示。



(a) 实验室硬件平台 (b) 工业现场硬件平台

图 4 图像采集系统

图 4(a)为实验室图像采集平台,图 4(b)为工业现场图像采集平台。

本研究采用 DALSA 公司的 16K 分辨率的线阵相机和运动控制器进行板式换热器板片图像的采集。为保证 50 μm 的检测精度,将视野范围调节至 700 mm。目前工厂需要检测的板片最大宽度为 610 mm,因此 700 mm 的视野范围可以满足检测的需求。本文使用的图像数据均由工业现场的设备采集得到。

3.2 算法评价指标

为了量化算法的性能,笔者定义了误检率 (flase detection rate, FDR) 和漏检率 (leak detection rate, LDR),分别为:

$$FDR = \frac{FP + FN}{TP + FP + TN + FN} \times 100\%$$
 (7)

$$LDR = \frac{FN}{TP + FN} \times 100\%$$
 (8)

式中: TP — 真阳性 (True Positive); FP — 假阳性 (False Positive); TN — 真阴性 (True Negative); FN — 假阴性 (False Negative)。

本文定义缺陷区域为阳性,正常区域为阴性, FP 表示将正常区域识别为了缺陷区域, FN 表示将缺陷区域识别为了正常区域。在模式识别理论中有两种基本的评价指标,一个是错误率最小化,另一个是平均风险最小化。错误率最小化是使 $FP + FN$ 最小化;而平均风险最小化是考虑到了 FP 与 FN 在实际中产生的危害程度可能不同,对 FP 和 FN 施加不同的权重以达到降低风险的目的。

在进行板式换热器板片微裂纹的检测时,显然 FP 与 FN 造成的危害是不同的。为了避免由于缺陷检测不全而造成使用中的安全隐患,本文采用在保证 $LDR = 0 (FN = 0)$ 时,比较 FDR 的方法进行算法的对比评级。

3.3 结果分析

为了验证算法的准确性与实时性,本研究对工厂采集的图像进行了测试,并与第 1 节所提出的基于多尺度高斯模板匹配的方法进行了对比。

实验采用的硬件环境是 32 G 运行内存,Intel i7 - 7700HQ CPU,2.8 GHz 主频的处理器;软件环境为 64 位 Windows10 操作系统以及 VS2012 编程工具;测试对象是长度为 1 000 mm,宽度为 405 mm 的 P10B 型号板片。

基于不同方法的实验结果如表 1 所示。

表 1 基于不同方法的实验结果

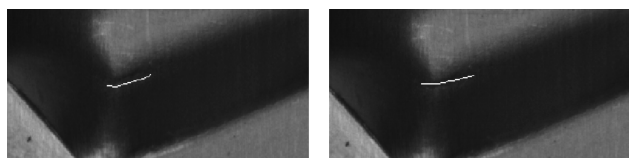
检测指标	基于 Canny 的检测方法	基于多尺度高斯模板匹配的方法
检测位置	微裂纹边缘	微裂纹中心
真正缺陷数量/个	25	25
候选缺陷数量/个	793	1 241
$FDR/(%)$	1.26	2.82
$LDR/(%)$	0	0
检测时间/s	58.5	156.3

由表 1 可以看出,基于 Canny 的方法在保证漏检率为 0 的情况下,具有较低的误检率和较高的实时性,证明了该算法的优越性,对板式换热器板片微裂纹的检测具有实际的应用价值。相对于基于 Canny 的检测方法,基于多尺度高斯模板匹配的方法计算时间长,误检率略高,这是由多个尺度检测引起的。基于多尺度高斯模板匹配的优势在于检测到的是微裂纹缺陷的中

心位置,而 Canny 的方法检测到的是缺陷的一个或者多个边缘,在定位上多尺度高斯模板匹配检测具有更高的精度。

然而,目前对于板式换热器板片微裂纹的检测只是进行存在性的判断,而不是进行精确的定位和测量,所以用漏检率和误检率来衡量准确性更有意义。因此在综合考虑准确性与实时性的情况下基于 Canny 的算法具有一定的优势。

不同方法最终检测效果图如图 5 所示。



(a) 基于多尺度高斯匹配

(b) 基于 Canny 边缘检测

图 5 不同方法最终检测效果图

4 结束语

板式换热器板片的微裂纹检测是其质量检测的重要组成部分,为了实现工业的自动化检测,笔者设计了基于机器视觉的微裂纹检测方法。

实验结果表明:本文提出的基于机器视觉检测方法,对于尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 405\text{ mm}$ 的换热器板片,能够在 1 min 内完成检测,检测精度可以达到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。在保证零漏检的基础上,检测准确率为 98.74% 。

本文所提出的检测方法对降低工业检测成本、提高生产的效益具有一定的意义。

参考文献 (References):

- [1] 杨 刚,冯翰翔,汪向磊,等. 板式换热器的研究进展[J]. 化学工程与装备,2019(5):240-241,74.
- [2] 孙通通. 换热器的研究现状及应用进展[J]. 现代制造技术与装备,2019(6):164-165.
- [3] 陶晓钢. 浅析板式换热器板片在压制中出现的问题[J]. 广州化工,2015,43(19):141-142,173.
- [4] 陈映余. 无损检测技术在压力容器检测中的应用研究[J].

中国设备工程,2019(13):89-90.

- [5] 杨先凤,赵 玲,杜晶晶. 改进中值滤波和形态学的油管裂纹检测算法[J]. 计算机仿真,2018,35(12):81-85,180.
- [6] 王清晨,景军锋. 采用机器视觉的金属表面横向裂纹检测[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(11):71-77.
- [7] 蒲富鹏,赵 军,安 喆. 基于机器视觉的车轮裂纹识别与提取[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(8):2113-2122.
- [8] MOKHTARI S, WU L, YUN H B. Statistical Selection and Interpretation of Imagery Features for Computer Vision-Based Pavement Crack-Detection Systems[J]. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, 2017, 31(5): 04017054.
- [9] 苑玮琦,付倜悦. 基于 Halcon 的板式换热器板片质量检测技术研究[J]. 微型机与应用,2017,36(19):81-83,86.
- [10] 于改革,陈永东,李 雪,等. 印刷电路板式换热器传热与流动研究进展[J]. 流体机械,2017,45(12):73-79.
- [11] 于改革,姚志燕,陈永东,等. 印刷电路板式换热器板片结构强度设计[J]. 压力容器,2018,35(12):42-46,33.
- [12] 苑玮琦,李绍丽,李德健,等. 基于子区域变尺度高斯拟合的木材表面缺陷识别[J]. 仪器仪表学报,2016,37(4):879-886.
- [13] LI Xuan, ZHANG Hong. An improved canny edge detection algorithm[C]. 2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Beijing:IEEE Beijing Section, 2017:275-278.
- [14] GAURAV K, GHANEKAR U. Image steganography based on Canny edge detection, dilation operator and hybrid coding[J]. **Journal of Information Security & Applications**, 2018,41(5):41-51.
- [15] 张法全,王国富,曾庆宁,等. 利用重心原理的图像目标最小外接矩形快速算法[J]. 红外与激光工程,2013,42(5):1382-1387.
- [16] SATAPATHY S C, SRI MADHAVA RAJA, N, RAJINKANTH V, et al. Multi-level image thresholding using Otsu and chaotic bat algorithm[J]. **Neural Computing & Applications**, 2016,29(1):1-23.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

张鑫鹏,魏立峰,苑玮琦,等. 基于机器视觉的板式换热器板片微裂纹检测方法研究[J]. 机电工程,2020,37(7):856-860.

ZHANG Xin-peng, WEI Li-feng, YUAN Wei-qi, et al. Microcrack detection method for plate heat exchanger based on machine vision[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(7):856-860.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>