

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.06.015

基于FPGA的镀层腐蚀形貌特征提取

胡新钟, 蔡昌新*

(长江大学 电子信息学院, 湖北 荆州 434100)

摘要: 为应对快速识别大气环境下早期镀层腐蚀形貌特征的实际需求, 开发了便携式形貌特征识别装置。通过硬件描述语言设计, 在现场可编程逻辑门阵列(FPGA)内分别引入了中值滤波方法, 抑制腐蚀形貌图像中存在的干扰脉冲和点状噪声; 引入了直方图均衡方法, 增强图像对比度; 引入了最大类间方差阈值法(OTSU), 对增强后的图像进行阈值分割, 获取腐蚀图像的二值化特征。最终, 较为完整地提取出腐蚀形貌特征。结果表明: 所研究方法与人标注的腐蚀区域相似度能够达到0.8441, 同时通过FPGA极大地缩短了算法运行时间, 处理速度满足便携式形貌特征识别装置的实时性需求。

关键词: 现场可编程逻辑门阵列; 腐蚀形貌; 特征提取; 图像分割; 大气腐蚀

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A

Feature extraction of corrosion morphology of coating based on FPGA

Hu Xinzhong, Cai Changxin*

(School of Electronic Information, Yangtze University, Jingzhou 434100, China)

Abstract: In order to meet the practical needs of rapid identification of corrosion morphology of the early coating in atmospheric environment, a portable equipment was developed. Through the design of hardware description language, the median filtering method was introduced in the field programmable gate array (FPGA) to suppress the interference pulses and punctate noise presented in the corrosion morphology image; the histogram equalization method was introduced to enhance image contrast; the maximum interclass variance threshold method (OTSU) was introduced to segment the enhanced image and obtain the binarization features of the corrosion image. In the end, the corrosion morphology features were extracted more completely. The results shows that the similarity of the proposed method to the artificially marked corrosion area can reach 0.8441, and the algorithm running time is greatly shortened by FPGA, and the processing speed meets the real-time requirements of portable morphological feature recognition device.

Keywords: field programmable gate array; corrosion morphology; feature extraction; image segmentation; atmospheric corrosion

在腐蚀科学与技术中, 镀层的腐蚀形貌图像真实地再现了材料在特定介质中的腐蚀形貌特征^[1-7], 从表面腐蚀形貌图像中提取形貌特征参数, 对腐蚀

形貌进行量化描述, 对深入研究腐蚀规律具有重要的意义^[8-14]。韩夏冰等^[15]根据计算出的图像特征值来定量判断大气腐蚀早期腐蚀程度, 邹志等^[16]利

收稿日期: 2022-08-05

修回日期: 2022-08-23

作者简介: 胡新钟(1998—), 男, 硕士研究生, email: 1149275412@qq.com

*通信作者: 蔡昌新(1974—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为智能仪器设计、油气田测控技术, email: 59682035@qq.com

用颜色空间统计信息分析,对合金钢盐雾腐蚀样件的腐蚀纹理特征进行提取,张新新等^[17]通过神经网络的方法,建立起腐蚀形貌图像与电化学信息之间的相关性,周静等^[18]通过图像二值化和形态学处理提取腐蚀形貌边界特征,但是这些方法都建立在通过图像处理软件对采集图像进行图像分析的基础上,算法复杂,难以应用在对实时性有需求的生产环境中。现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)技术是常用的图像处理方法。由于其具有灵活性高、通用性强与开发周期短等优点,特别适合实时处理图像信号,提高图像处理效率^[19-20],此外FPGA平台还具备资源占用率小、轻量化和功耗低等特点,因此,本论文基于FPGA技术,研究了镀层腐蚀形貌特征的提取方法。

1 针对腐蚀图像的彩色模型空间分析

应用较为广泛的彩色模型空间主要有3种:RGB彩色空间、HSV彩色空间和YCbCr彩色空间。RGB彩色空间的3个分量分别代表 R (红)、 G (绿)、 B (蓝)3种颜色分量;HSV彩色空间的3个分量分别代表 H (色调)、 S (饱和度)、 V (亮度),YCbCr彩色空间的3个分量分别代表 Y (灰度)、 Cb (蓝色色度分量)、 Cr (红色色度分量)。通常情况下,图像采集设备采集的数字图像为RGB图像,可通过公式转换,将RGB图像转换到HSV彩色空间和YCbCr彩色空间。其中 R 、 G 、 B 分量与 H 、 S 、 V 分量的转换关系见公式(1),当 $R=G=B$ 时, $S=0$ 。 R 、 G 、 B 分量与 Y 、 Cb 、 Cr 分量的转换关系见公式(2)。

$$\left\{ \begin{array}{l} H = \cos^{-1} \left\{ \frac{[(R-G)+(R-B)]}{2\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(R-G)}} \right\} \\ S = 1 - \frac{3[\min(R, G, B)]}{R+G+B} \\ V = \frac{1}{3}(R+G+B) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ Cb = -0.1687R - 0.3313G + 0.5B + 128 \\ Cr = 0.5R - 0.4187G - 0.0813B + 128 \end{array} \right. \quad (2)$$

由于采集到的彩色图像不能直接用于腐蚀形貌特征的提取,因此人们选择将灰度图像(彩色空间分量)作为腐蚀图像的分析对象。例如文献[14]对采集图像进行灰度化处理,文献[16]系统地分析了不同彩色空间分量的统计特征,并结合 Cb 分量、 V 分量和 S 分量对腐蚀图像进行识别,文献[17]利用 R 、 G 、 B 分量作为训练神经网络的原始数据。灰度图像共有256个灰度级,图像中每个像素点对应的灰度值都介于0~255之间。其中,0代表黑色,255代表白色,1~254分别代表黑色到白色之间的过渡色(灰色)。本文算法针对早期腐蚀行为发生的情形, α -FeOOH(橙黄色)和 γ -FeOOH(橙红色)是早期腐蚀行为发生的主要产物,由此导致外层锈层偏黄色,内层偏红褐色,在 Cr 分量灰度图像上可定性描述为腐蚀发生区域灰度值偏大,而未被腐蚀区域灰度值较低,二者差异明显,可用于阈值分割。因此在本文中采用灰度图像(Cr 分量)作为镀层腐蚀图像的分析对象。

2 基于FPGA的镀层腐蚀形貌特征提取方法

本文所提出的基于FPGA的镀层腐蚀形貌特征提取方法操作如下:首先利用公式(2)进行彩色空间转换,获取 Cr 分量灰度图像,然后对灰度图像进行图像增强预处理,包括利用 5×5 窗口进行中值滤波,直方图均衡化。利用最大类间方差阈值法(OTSU)对增强后的图像进行阈值分割,得到二值化图像,二值化图像只有纯黑和纯白两种灰度,使镀层表面腐蚀图像中的颜色分为腐蚀区域(目标点像素灰度值为1)与未被腐蚀区域(背景点像素灰度值为0),从而提取出镀层腐蚀形貌特征。总体硬件架构如图1所示。

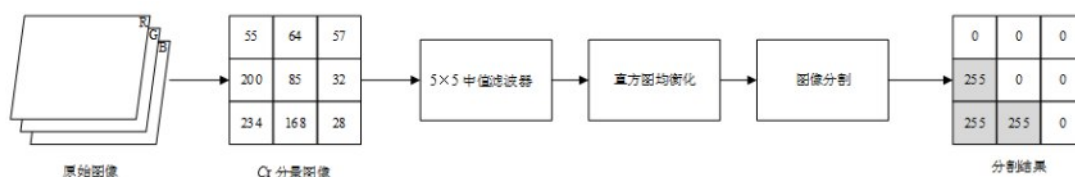


图1 基于FPGA的镀层腐蚀形貌特征提取方法硬件架构

Fig.1 Hardware architecture of FPGA-based feature extraction method for coating corrosion morphology

2.1 彩色空间转换的电路设计

由于采集的腐蚀图像为RGB彩色图像,因此获取腐蚀图像的Cr分量灰度图像需要进行彩色空间转换。电路设计在FPGA中实现,而公式(2)中系数均为小数,不方便直接计算,因此需要将浮点数放大一定的倍数参与计算。其放大的倍数,需要考虑准确性和资源占用率。放大倍数太小,会使图像失真;放大倍数太大,占用资源多,同时会增加运算延时。因而选择将公式(2)中的系数同乘 2^8 倍得到近似的整数,再与输入值进行乘法和加法运算,当运算结束后将输出值缩小 2^8 倍,获得转换结果。该过程需要消耗9个乘法器、3个加法器和3个寄存器,通过3级流水线设计,在R、G、B分量并行输入后的第3个时

钟周期更新Y、Cb、Cr分量的输出值。

2.2 基于FPGA的图像去噪方法

2.2.1 5×5 窗口的生成

如图2所示,实现 5×5 窗口,需要对图像的前4行数据进行缓存,常规方法是通过双口RAM寄存前4行像素数据,但此方法需要4组读写控制信号来控制RAM寄存,增加了代码的复杂度,因此改用已固化的移位寄存器IP核,通过输入使能信号来判别何时输入数据为有效数据即可,将输入数据位宽设置为像素数据位宽,数据深度设置为图像的行像素数。当第5行像素数据到来时,移位寄存器同步输出前4行像素数据。

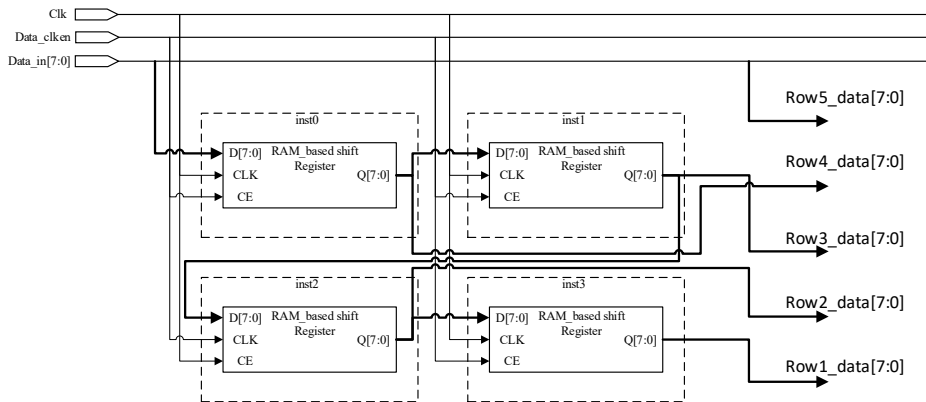


图2 5×5 窗口的生成

Fig.2 Generation of 5×5 windows

2.2.2 中值滤波算法的硬件电路设计

中值滤波是非线性滤波器中统计排序滤波的一种,不仅能够抑制腐蚀形貌图像中存在的干扰脉冲和点状噪声,还能增加图像的清晰程度。以 5×5 窗口为例,其算法原理可以简述为:首先对窗口内的每一行数据分别计算次最大值、中间值和次最小值,这样就得到3组数据,分别为次最大值组、中值组和次最小值组。然后对次最大值组和次最小值组数据进行排序,得出次最大值组中的最小值、次最小值组中的最大值,与中值组一起构成7个像素数据。对该7个像素数据进行排序获取中值,即可得到 5×5 窗口内的中值像素数据。根据算法原理,搭建如图3所示的中值滤波模块。

2.3 基于FPGA的图像增强方法

2.3.1 直方图均衡化算法的原理

考虑早期腐蚀行为发生时,部分实验对象存在

腐蚀区域在Cr分量图像中表征不够明显的情形,为防止遗漏细小腐蚀区域,采用直方图均衡化算法增强图像对比度。直方图均衡化是指通过某种灰度映射关系使原图像转换为每一灰度级上都分布尽可能相同像素数的输出图像,使图像具有较高的对比度和较大的动态范围。对于一幅灰度值在0~255之间,且灰度级为离散的图像,该映射关系可表示为:

$$D_B = f(D_A) = \frac{D_{\max}}{A_0} \sum_{i=0}^{D_A} H(i) \quad (3)$$

其中: D_B 为映射后的灰度级; D_A 为映射前的灰度级; D_{\max} 为最大灰度值即255; A_0 为图像的像素个数, $H(i)$ 为第*i*级灰度的像素个数。

2.3.2 直方图均衡化算法的硬件电路设计

观察式(3)可知 $\sum_{i=0}^{D_A} H(i)$ 为累积直方图统计,因此实现直方图均衡化可分为以下步骤:

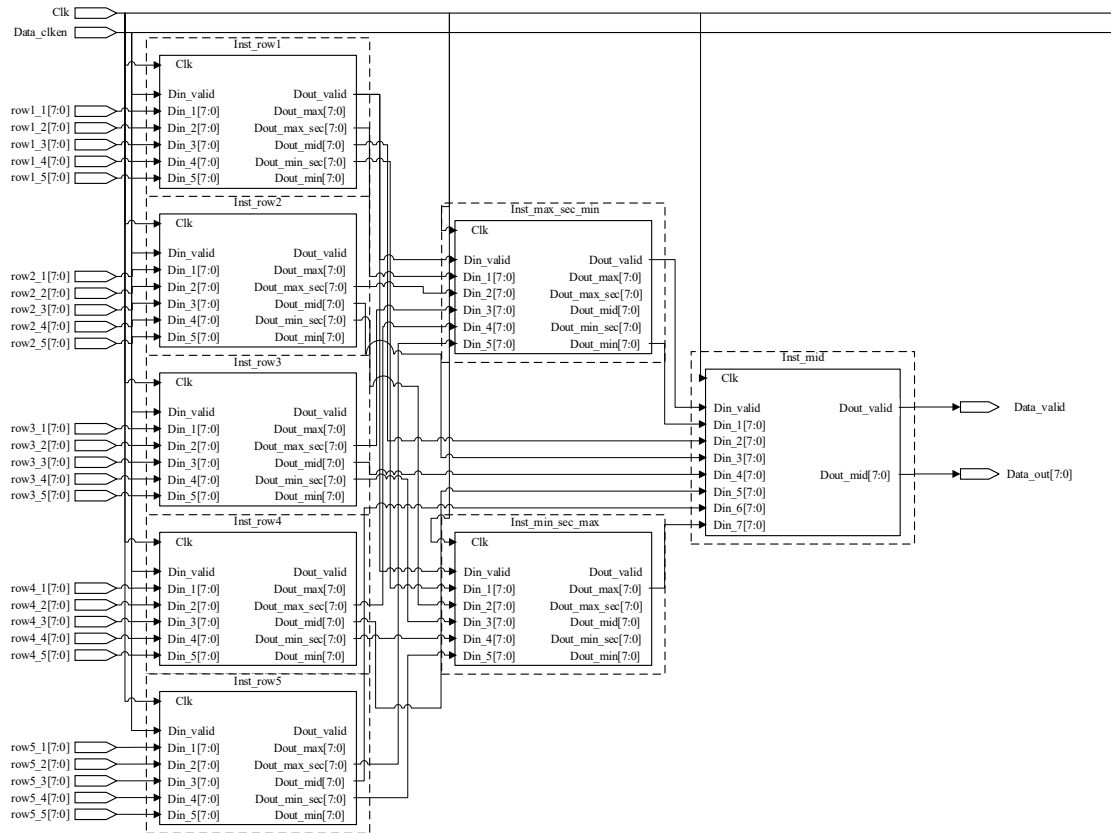


图3 中值滤波模块

Fig.3 Median filtering module

(1)在统计模块中计算一幅图像的直方图统计以及累积直方图统计;

(2)根据式(3)公式,取出RAM中存储的累积直方图数据,传入计算模块,得到映射后的灰度级,并将其存入另一RAM中;

(3)将原图像灰度级作为RAM地址,取出映射之后的灰度级,即可得到直方图均衡化之后的结果。

统计模块采用深度为256的双口RAM来统计每个灰度值的像素点个数,具体操作是将每个像素点的灰度值作为RAM其中一个端口的读地址,读取RAM单元中的数值,该数值即为已统计的灰度级的像素点个数,同时为了减少操作的次数以及避免出现对同一地址进行读写操作的情况,统计相邻像素点灰度值相同的个数,再将RAM中的读出数值与计数值相加,接着将更新后的值从另一个端口写入同一地址,计算模块只需要采用1个乘法器和1个除法器即可实现,将得到的结果存入RAM中,实现类似于查找表的功能,当原始图像数据“流入”RAM时,即可得到增强后的图像。

2.3 基于FPGA的阈值分割方法

2.3.1 OTSU算法的原理

利用OTSU方法对增强后的图像进行阈值分割,完成对腐蚀区域的分割,提取其腐蚀形貌特征。OTSU算法通过计算背景与目标灰度之间的类间方差来分割背景与目标物,比较每个灰度级所对应的类间方差值,则类间方差最大值对应的灰度值即为分割阈值。假设一幅像素数为 n 的图像共有 L 个灰度级, r_k 为第 k 级灰度级, n_k 为图像中出现 r_k 灰度级的像素数, $w(d_0)$ 表示背景 d_0 出现的概率, $w(d_1)$ 表示目标 d_1 出现的概率, $u(d_0)$ 和 $u(d_1)$ 分别为 d_0 和 d_1 的灰度均值。则 $w(d_0)$ 、 $w(d_1)$ 、 $u(d_0)$ 和 $u(d_1)$ 的计算公式为:

$$w(d_0) = \sum_{k=0}^{T-1} P(r_k), w(d_1) = \sum_{k=T}^{L-1} P(r_k) \quad (4)$$

$$u(d_0) = \frac{\sum_{k=0}^{T-1} k \times P(r_k)}{\sum_{k=0}^{T-1} P(r_k)}, u(d_1) = \frac{\sum_{k=T}^{L-1} k \times P(r_k)}{\sum_{k=T}^{L-1} P(r_k)} \quad (5)$$

其中: $P(r_k) = \frac{n_k}{n}$, 由此可推算出类间方差 s^2 的计算公式为:

$$s^2 = \left(\sum_{k=0}^T n_k \right) \left(\sum_{k=T}^{L-1} n_k \right) \left[\frac{\sum_{k=0}^T (k \times n_k)}{\sum_{k=0}^T n_k} - \frac{\sum_{k=T}^{L-1} (k \times n_k)}{\sum_{k=T}^{L-1} n_k} \right]^2 \quad (6)$$

使得类间方差 s^2 最大的 k 值即为 OTSU 算法的最佳阈值 k 。

2.3.2 OTSU 算法的硬件电路设计

观察式(6), 可知 $\sum_{k=0}^T n_k$ 为累积直方图统计, $\sum_{k=T}^{L-1} n_k$ 可由 $\sum_{k=0}^{L-1} n_k - \sum_{k=0}^T n_k$ 计算得出; $\sum_{k=0}^T (k \times n_k)$ 为累积灰度统计, 同理 $\sum_{k=T}^{L-1} (k \times n_k)$ 可由 $\sum_{k=0}^{L-1} (k \times n_k) - \sum_{k=0}^T (k \times n_k)$ 计算得出。通过上述分析, 计算类间方差可分为两个步骤来进行电路设计:

(1) 在统计模块中先对一幅图像进行直方图统计与灰度统计, 然后计算累积直方图数据与累积灰度数据;

(2) 依次将累积直方图与累积灰度统计中的数据传入计算模块计算类间方差。

统计模块的设计思想与直方图均衡化中统计模块的设计思想类似, 计算模块则如图4所示, 需采用2个除法器与3个乘法器来实现, 其中 Abs(Sub)_inst1 模块为自定义模块, 用于求解两输入值之差的绝对值, 保证参与计算的值为非负数。对 Mult_inst3 模块输出值即类间方差值延时一拍, 通过寄存器缓存与当前输出值进行比较, 由于类间方差输出类似于波峰的形状, 因此当满足当前输出值大于前一输出值时, 使计数器值加1, 遍历完整个灰度级, 所得到的计数器值即为峰值, 也即为分割阈值。

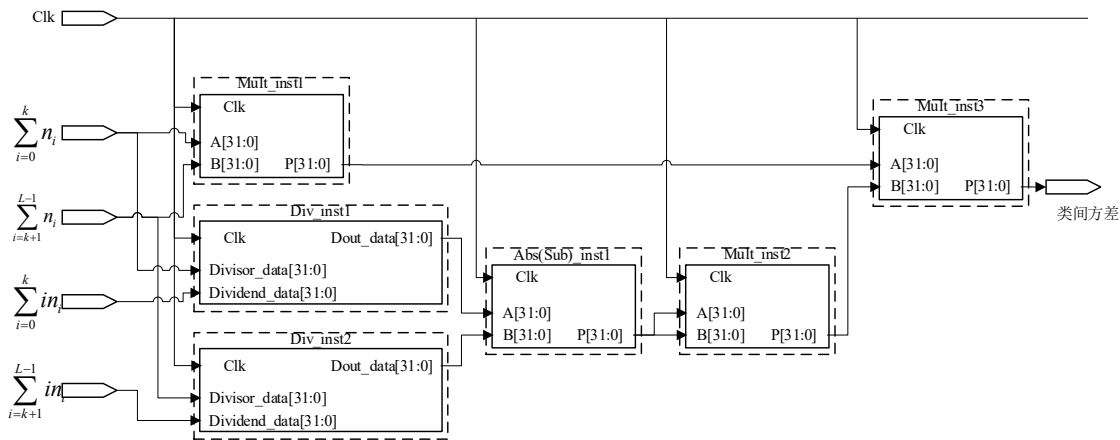


图4 计算模块

Fig.4 Computing module

3 仿真和实验

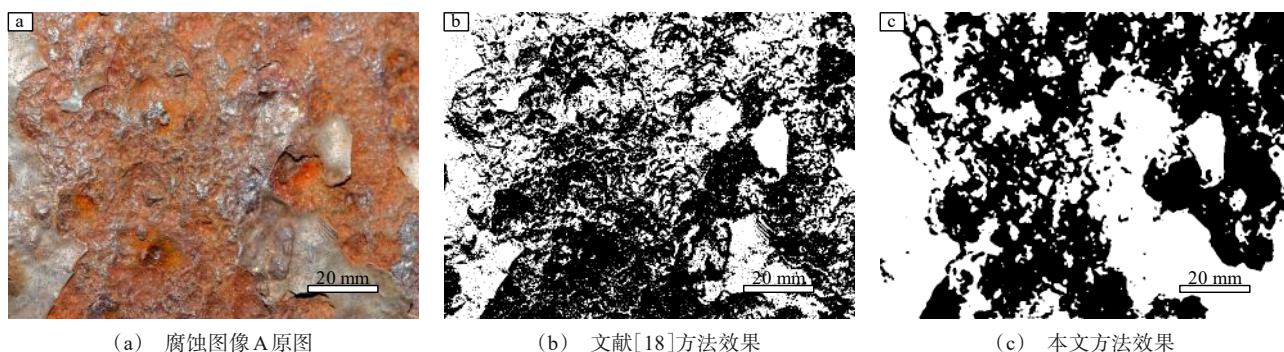
以 Pixabay 网站提供的镀层腐蚀图像为实验对象, 在操作系统是 Windows10, 配置是 AMD Ryzen5-5600 GCPU、3.9 GHz、32.0 GB 内存的计算机中通过 Matlab2018a 软件平台与 Vivado2020 软件平台验证本方法的精度与实时性。

3.1 主观评价

采用本文方法与文献[18]方法对不同镀层腐蚀图像进行腐蚀形貌特征提取效果对比, 其中文献[18]方法为基于图像处理的化学镀镍-磷合金镀层腐蚀形貌特征提取, 具体实验方法即通过一重小波

重构进行原始图像预处理, 然后进行图像二值化与形态学处理。需要说明的是其方法侧重点在于对图像分割的结果进行腐蚀形貌的边缘特征提取, 为保持与本文研究内容的一致性, 仅对比图像分割效果。

根据图5、6可知, 文献[18]方法对灰度图像进行处理, 图像亮度会对图像分割效果产生较大影响, 当腐蚀图像的亮度灰度值差异不明显时, 对处理后的图像进行二值化则会产生偏差, 导致腐蚀区域定位不准; 本方法图像分割效果更好, 能够精准定位到腐蚀区域。



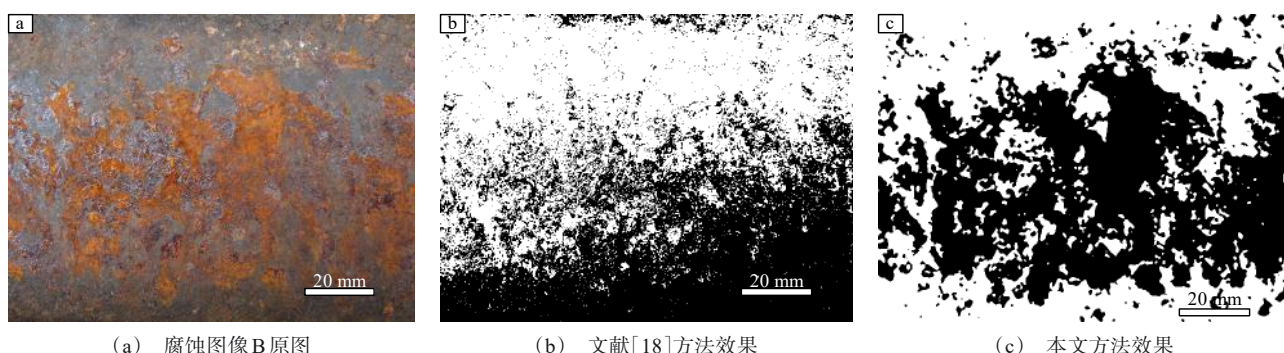
(a) 腐蚀图像A原图

(b) 文献[18]方法效果

(c) 本文方法效果

图5 腐蚀图像A的分割效果对比

Fig.5 Comparison of segmentation effects of corrosion image A



(a) 腐蚀图像B原图

(b) 文献[18]方法效果

(c) 本文方法效果

图6 腐蚀图像B的分割效果对比

Fig.6 Comparison of segmentation effects of corrosion image B

3.2 客观评价

通过结构相似性(SSIM)指标和峰值信噪比(PSNR)指标来衡量腐蚀形貌特征提取效果,SSIM通过对比两幅图像的亮度、对比度和结构来衡量图片的失真程度,取值范围介于0~1之间,结构相似性值越高,图像的失真程度越低。PSNR指达到噪音比率的顶点信号,原本用来衡量影像经过压缩再还原出来的图像的失真程度,也可以用来描述两幅图像之间的相似程度。峰值信噪比越大,图像的失真程度越低。本文通过图像处理软件对腐蚀图像的腐蚀区域进行人工标记,将算法处理后的分割图像与人工标记的图像进行比对,对比效果如表1所示。

根据表1可知,对图5和图6经过形貌特征提取之后,本文方法指标均优于文献[18]方法,在结构相似性方面本文方法相较于另一种方法提升6.02倍,在峰值信噪比方面相较于另一种方法提升4.13倍,原因是本方法采用了基于FPGA的中值滤波算法能够有效去除点状噪声,基于FPGA的直方图均衡化

方法能够增强图像对比度,突显腐蚀区域形貌特征,基于FPGA的OTSU算法能够计算出分割效果更好的阈值,在不影响分割效果的同时保留图像中的细节,实验证明:本方法的图像分割效果更好,提取出来的腐蚀形貌特征更为精准。

表1 图5与图6的指标效果对比

Tab.1 Comparison of the indicator effects in Fig. 5 and Fig. 6

评价指标		结构相似性	峰值信噪比
图5	本文方法	0.8441	16.8029
	文献[18]方法	0.1568	3.7618
图6	本文方法	0.8301	16.3421
	文献[18]方法	0.0826	2.6961

3.3 实时性评价

通过计算机测试本文方法在图像处理软件与FPGA仿真平台上的运行时间以及文献[18]方法在图像处理软件上的运行时间,结果如表2所示。

根据表2可知,本文方法与文献[18]方法在图像处理软件上仿真时间差异并不明显,其处理速度

均能维持1 s处理2到3帧图像,未能达到便携式装置的开发需求,而在FPGA仿真平台,本文方法运行时间却得到大幅度降低,1 s能够处理约613帧图片,超过图像的采集速率和显示设备的刷新频率,满足开发需求,同时由于FPGA仿真平台运行时间只与图像大小有关,当图5与图6的图像大小一致时,运行时间相同,图像处理的稳定性得到提升,实验证明:基于FPGA的镀层腐蚀形貌特征提取方法,能够做到图像的实时采集、实时处理以及实时显示,达到开发需求。

表2 运行时间对比

Tab.2 Comparison of runtime

运行时间/ms			
图5	Matlab2018a	文献[18]方法	438.000
		本文方法	534.000
	FPGA	本文方法	1.629
图6	Matlab2018a	文献[18]方法	395.000
		本文方法	522.000
	FPGA	本文方法	1.629

4 结语

(1)研究基于FPGA的镀层腐蚀形貌特征提取方法,通过结构相似性与峰值信噪比指标,验证所研究方法的有效性与实时性,为研发便携式实时识别镀层腐蚀形貌特征设备提供方法;

(2)由于本文算法针对大气环境下镀层早期腐蚀行为发生的情形,并未考虑不同的腐蚀环境情形,为此今后需要进一步研究;

(3)在本文算法的基础上,能够通过直接计算二值化图像中腐蚀区域的像素点个数,精确得到腐蚀区域的面积,为研究腐蚀程度的评定方法提供参考。

参考文献

- [1] 委福祥,曲彦平,苑玮琦. 镀层腐蚀形貌图像颜色特征的提取与分析[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 477-478.
- [2] 李黎,郭志飞,张建强,等. 烘干温度对热镀锌层钝化膜形貌及耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(6): 25-28.
- [3] Xia D H, Song S Z, Qin Z B, et al. Review-electrochemical probes and sensors designed for time-dependent atmospheric corrosion monitoring: fundamentals, progress, and challenges[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167: 037513.

- [4] 王波,赵东宏,许晓东. 超声波辅助锌-锰系磷化处理对45钢法兰形貌与耐腐蚀性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(7): 7-11.
- [5] 刘毅超,钟显康,扈俊颖. 湿气环境中抗硫钢的元素硫腐蚀特征及腐蚀机理[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 369-377.
- [6] 高平. 钎铁硼化学镀Ni-Mo-P镀层的形貌和耐腐蚀性能[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(4): 30-34.
- [7] 宋学鑫,黄松鹏,汪川,等. 碳钢在红沿河海洋工业大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1355-1365.
- [8] 王守琰,高志明,宋诗哲. 实海试样腐蚀形貌图像特征提取及分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(zl): 461-463.
- [9] 张玮,梁成浩,郑润芬. 铝镁合金孔蚀形貌图像增强与分割方法研究[J]. 材料保护, 2003, 36(7): 16-18.
- [10] 陶蕾,宋诗哲,张晓云,等. 铝合金大气腐蚀现场暴露试样的图像分析[J]. 科学通报, 2008, 53(23): 2856-2859.
- [11] 刘俊琪. 基于图像处理的铝塑包装材料边缘检测[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 154-158.
- [12] Zhu Y, Wang L X, Behnamian Y, et al. Metal pitting corrosion characterized by scanning acoustic microscopy and binary image processing[J]. Corrosion Science, 2020, 170: 108685.
- [13] 陈晗彬,刘祚时. 基于改进型PCNN图像分割技术的金属表面检测[J]. 制造业自动化, 2021, 43(4): 43-46.
- [14] 朱做涛,穆志韬,苏维国,等. 基于图像处理技术的铝合金腐蚀等级评定方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 383-386.
- [15] 韩夏冰,高志明,党丽华,等. Q235钢在模拟大气环境中早期腐蚀图像小波包分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(3): 211-215.
- [16] 邹志,马骊群,樊秋芹,等. 基于颜色空间统计分析原理的金属盐雾腐蚀特征识别[J]. 计测技术, 2016, 36(6): 16-21.
- [17] 张新新,高志明,胡文彬等. Q235钢在薄液膜下腐蚀行为与图像信息的相关性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(5): 444-450.
- [18] 周静,龙小宏. 基于图像处理的化学镀镍-磷合金镀层腐蚀形貌特征提取[J]. 电镀与环保, 2020, 40(2): 16-19.
- [19] 王永杰. 基于FPGA的低照度环境下激光图像增强研究[J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 68-72.
- [20] 刘野,肖剑彪,吴飞,等. 基于FPGA的水平集图像分割算法加速器[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(6): 1525-1532.