

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.06.05

基于颜色空间统计分析原理的 金属盐雾腐蚀特征识别

邹志¹, 马骊群¹, 樊秋芹², 甘晓川¹, 乔磊¹

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 庆安集团有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 采用图像处理技术对加速腐蚀试验得到的高强度合金钢盐雾腐蚀样件分析, 提出了一种基于多色彩空间的特征分析方法。该方法通过对腐蚀图像的 RGB, HSV, YCbCr 等多个色彩空间的各个色彩通道的信息进行统计分析, 得到每个腐蚀图像的主要统计特征参数的分布规律, 根据分布规律找出适合腐蚀特征提取的相关色彩通道。结合腐蚀产生的机理, 对相关色彩通道的信息进行处理, 进而将具有强烈色彩变化的金属材料盐雾腐蚀特征识别出来。通过对多幅合金钢表面盐雾腐蚀样件的彩色图像进行处理, 结果表明利用本文提出的方法进行腐蚀特征识别所得到的腐蚀特征, 相比目视效果更准确, 腐蚀程度可量化, 大大提高了腐蚀判别的准确性。

关键词: 图像处理; 腐蚀特征识别; 颜色空间; 统计特征

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)06-0016-06

Feature Recognition of Metallic Salt Spray Corrosion Based on Color Spaces Statistics Analysis

ZOU Zhi¹, MA Liqun¹, FAN Qiuqin², GAN Xiaochuan¹, QIAO Lei¹

(1. Changcheng Institution of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. Qing'An Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Digital image processing technique is used to analyze the high strength alloy steel corrosion samples acquired from accelerate salt spray corrosion test. A method of analyzing the corrosion feature based on various color spaces is provided. The proper color component is selected to extract the corrosion feature by analyzing various color spaces of corrosion images such as RGB, HSV, YCbCr and their statistics information. Combined with the theory of corrosion generation, the data of color channels are processed and the feature of metal material salt spray corrosion is recognized. Through processing several sample color images of alloy steel, it is proved that the feature extracted by this procedure has better accuracy and the corrosion degree is quantifiable and the precision of discriminating the corrosion is improved.

Key words: image processing; corrosion feature recognition; color space; statistics characteristic

0 引言

金属材料的腐蚀现象是普遍存在的, 腐蚀不仅影响材料的表面形貌还影响材料的使用性能。由于腐蚀条件复杂多样, 不同的金属材料在不同的腐蚀环境下产生的腐蚀特征也不同, 材料的腐蚀与环境 and 材料的抗腐蚀性有关, 其中绝大部分材料的腐蚀程度可通过材料的表面纹理及形貌的改变量来加以识别。传统的腐蚀程度判定方法有称重判定法^[1]和目视判定法。称重判定法是根据样件腐蚀前后重量的改变量来衡量腐蚀程度, 方法简便易行, 但只能得到样件整体的腐蚀

特性, 无法对样件进行局部分析。目视法是基于人眼判别的方法, 根据表面视觉纹理的改变判断材料是否被腐蚀。腐蚀图像包含着大量的腐蚀信息^[2], 从某种意义上来说, 通过图像处理技术评估材料腐蚀比传统电化学方法更加简便快捷^[3]。本文提出一种基于多个颜色空间统计信息分析的方法, 实现了合金钢盐雾腐蚀样件的腐蚀纹理特征的提取。

1 合金钢盐雾腐蚀特征以及腐蚀图像的特点

本文主要针对合金钢表面盐雾腐蚀缺陷进行识别。采用基体材料 4130 合金钢制备。根据 31B-086-2003《钢铁零件镀镍》工艺技术文件执行, 工序流程及特殊要求如下: 有机溶剂除油→装挂→除油→热水洗→水洗→除应力(按需)→装挂→除油→热水洗→水洗→强

收稿日期: 2016-09-23

作者简介: 邹志(1991-), 男, 吉林延吉人, 助理工程师, 研究方向为机器视觉、图像处理、摄影测量。

(弱)腐蚀→水洗→冲击镀镍(按需)→水洗→化学镀镍→水洗→水洗→干燥,膜层尽可能薄一点,表面进行抛光处理。

根据 GJB 150.11A-2009《军用装备实验室环境试验方法第 11 部分:盐雾试验》标准^[4]对合金钢的样件进行腐蚀试验,采用中性盐雾腐蚀连续喷雾,腐蚀加工处理时间为 100 h。得到包含完整腐蚀特征的标准样件。图 1 是典型的合金钢的腐蚀图像。



图 1 典型的合金钢的腐蚀图像

从腐蚀机理的角度对腐蚀特征进行分析:腐蚀溶液先与材料膜层产生化学作用,膜层发生腐蚀破损,直观表现为材料表面变色,变为偏蓝、偏褐的颜色且反射率降低;膜层破损后,基体直接暴露在外界腐蚀环境下,基体发生腐蚀,表面销蚀,出现黑色的腐蚀锈斑;与基体脱离的材质溶于积累在样板表面的腐蚀液中产生橙黄色流痕。从腐蚀图像的纹理上看,图像具有明显的颜色特点和亮度特点:腐蚀不严重的区域,亮度变暗、色彩变黑;腐蚀严重区,亮度的改变已被颜色的改变所覆盖,颜色不仅是简单的变黑,而是具有较高的色彩区分度。因此,可从颜色和亮度两个角度为出发点,通过分析流痕区域与锈斑区域色彩和亮度变化规律,将发生腐蚀的区域识别出来,进而对腐蚀程度进行判别。

2 彩色模型空间的统计特征分析

2.1 彩色模型空间分析

常用的彩色图像模型可以分为两类:包括 HSV 空间, YCbCr 空间等;一类是面向视觉感知的彩色图像模型,一类是面向硬件设备的彩色图像模型,主要是 RGB 彩色空间。HSV 空间的三个分量分别代表饱和度(S)、色调(H)、亮度(V), YCbCr 空间的三个分量分别代表灰度(Y)、蓝色色度分量(Cb)、红色色度分量

(Cr), RGB 彩色空间的三个分量分别代表红(R)、绿(G)、蓝(B)三种颜色分量。

通常对于视觉系统所能得到数字图像是 RGB 空间图像,可通过颜色空间的变化将其转化为各个其它颜色空间如 HSV 空间、YCbCr 空间。RGB 空间到 HSV 空间的变换关系见公式(2), RGB 空间到 YCbCr 空间的变换关系见公式(1)。当 $R=G=B$ 时, $S=0$ 。

$$\begin{cases} Y=0.299R+0.587G+0.114B \\ Cb=-0.1687R-0.3313G+0.5B+128 \\ Cr=0.5R-0.4187G-0.0813B+128 \end{cases} \quad (1)$$

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

2.2 不同色彩空间分量的统计特征分析

常用于评价图像的统计特征参数主要有均值、方差、对比度、偏度、峰度等。

均值(Average)在图像上的直观感受为图像整体的明暗程度,过明或过暗都不利于图像特征的提取。腐蚀图像 $f(x, y)$ 的平均亮度用灰度均值 m 度量。

$$m = \sum_{i=0}^N z_i p(z_i) \quad (3)$$

式中: N 为灰度图像的灰度级; z_i 为腐蚀图像第 i 级灰度值; $p(z_i)$ 为第 i 级灰度值出现的概率。

腐蚀图像 $f(x, y)$ 的对比度采用灰度标准偏差 σ (deviation) 来度量,用以衡量图像的前景目标与背景的区别是否明显,偏差越小,图像特征的对比度越大。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^N (z_i - m)^2 p(z_i)} \quad (4)$$

偏度(Skewness)和峰度(Kurtosis)是描述直方图的“峰”陡缓程度的统计量。偏度是直方图的“峰”左偏或右偏的统计量,反应到图像上描述前景目标与背景孰明孰暗。腐蚀图像 $f(x, y)$ 的偏度用 Sk 三阶矩来度量。

$$Sk = \frac{\sum_{i=0}^N (z_i - m)^3 p(z_i)}{n\sigma^3} \quad (5)$$

峰度是直方图分布形态陡缓的统计量,用来度量数据在中心的聚集程度。反应到图像上,描述前景目标的灰度分布是否均匀,是否适合基于阈值分割的方法提取。正态分布的峰度值为 3。大于 3 数据表现为分布更为集中,比正态分布有更短的尾部,适合用阈值

进行分割；小于3数据表现为不是特别集中，比正态分布有更短的尾部，类似于矩形的分布，不适合用阈值进行分割；峰度值越接近于3，说明数据分布越接近正态分布。腐蚀图像 $f(x, y)$ 的峰度用四阶矩阵来度量。

$$Ku = \frac{\sum_{i=0}^N (z_i - m)^4 p(z_i)}{n\sigma^4} \quad (6)$$

表1为各直方图的统计特征参数。

表1 各颜色模型空间统计特征

颜色空间	统计特征参数			
	均值	偏差	峰度	偏度
R分量	205.80	45.22	2.75	-0.81
G分量	200.62	41.66	3.83	-0.94
B分量	192.80	49.98	3.61	-0.98
H分量	92.14	69.90	1.54	0.29
S分量	47.85	45.71	4.17	1.25
V分量	219.74	36.39	5.14	-1.41
Y分量	188.86	34.74	3.64	-0.90
Cb分量	123.79	18.35	3.14	-0.61
Cr分量	130.84	12.20	4.61	0.96

根据统计特征参数的物理意义及腐蚀样件的特点，要想将特征识别出来需要保证特征均值不能过大或过小，理想值为整体灰度级的1/2；偏差越小越好，即图像具有明显的对比度；另外还要考虑是否便于阈值分割，即峰度值应该不小于3。从表1中可以看出 $YCbCr$ 空间的Cb分量和Cr分量从均值、偏差、峰度考虑均适合作为图像分析的彩色通道选择。

以合金钢表面盐雾腐蚀图像作为分析对象(见图1)，由于流痕区域的腐蚀特征具有显著的橙黄色变化特点，在 RGB 色彩空间内，流痕区域的R分量和G分量占主要部分，映射到 $YCbCr$ 空间中，根据公式(1)得知Cb的分量中R分量和G分量之前的系数同时为负，可同时实现对R分量和G分量的对比度增强，因此可选择Cb分量进行处理。

3 流痕区域识别

流痕区域具有明显的色彩变化，识别流痕的最大问题是如何对图像进行阈值分割。本论文采用的方法如下：首先对Cb分量图像进行图像增强预处理，包括利用 3×3 窗口进行中值滤波，直方图均衡化。利用最大类间方差^[5] 阈值法对增强后的图像进行阈值分割，

得到流痕区域的二值模板，将二值模板与原始图像做“与”运算得到腐蚀的流痕区域。最大类间方差阈值法使分割的“目标”与“背景”具有最大的方差，是具有统计意义的最佳分割。

设 $f(x, y)$ 为图像 $I_{M \times N}$ 的位置处的灰度值，灰度级为 L ，则 $f(x, y) \in [0, L-1]$ 。若灰度级 i 的所有像素个数为 f_i ，则第 i 级灰度出现的概率为

$$p(i) = \frac{f_i}{M \cdot N} \quad (7)$$

式中： $i=0, 1, \dots, L-1$ ，并且 $\sum_{i=0}^{L-1} p(i) = 1$ 。将图像中的像素按灰度级用阈值 t 划分为两类，即背景 C_0 和目标 C_1 ，两者及图像总体的平均灰度值计算公式为

$$\mu_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} i \cdot p(i)}{\sum_{i=0}^{t-1} p(i)} \quad (8)$$

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=t}^{L-1} i \cdot p(i)}{\sum_{i=t}^{L-1} p(i)} \quad (9)$$

图像总体平均灰度值为

$$\mu(t) = \sum_{i=0}^{L-1} i \cdot p(i) \quad (10)$$

最后要判断图像最终“目标”与“背景”的类间方差为

$$\delta^2(k) = \sum_{i=0}^{t-1} p(i) [(\mu_0(t) - \mu(t))]^2 + \sum_{i=t}^{L-1} p(i) [(\mu_1(t) - \mu(t))]^2 \quad (11)$$

计算不同 k 对应的类间方差 $\delta^2(k)$ ， $\delta^2(k)$ 最大时对应的 k 就是最优阈值。

按照上述的处理方法对原始图像图2(a)进行阈值分割，得到仅包含腐蚀流痕特征的图像图2(c)，通过图2(c)可以算出流痕区域在原图图2(a)中所占的面积比。



(a) 原图 (b) 最大类间方差得到流痕区域二 (c) 提取出的腐蚀区域图像

图2 阈值分割过程及结果

4 锈斑区域识别

黑色锈斑中偏黑的部分较多，在 HSV 空间的 V 分量中对比明显，但是直接采用阈值分割会造成“过度分

割”，因此需要对正确分割的“腐蚀黑斑”与“过渡分割”的“伪黑斑”进行区分。腐蚀黑斑与伪黑斑在 RGB 色彩通道中很难判定，但根据腐蚀机理即流痕区域是基底锈斑的腐蚀产物溶于腐蚀液并在样件表面扩散形成的，因此腐蚀黑斑具有“浮于”流痕区域之上，被流痕区域包围的特点。相比伪黑斑，腐蚀黑斑的这一特点在 HSV 色彩空间中 S 通道具有明显的差异。

S 通道反映了图像的饱和度，是一种描述颜色纯净度的属性，单一颜色光的饱和度最高，掺入白光越多，饱和度越低^[6]。饱和度物理意义的表达式为

$$S = \frac{C}{C+W} \quad (12)$$

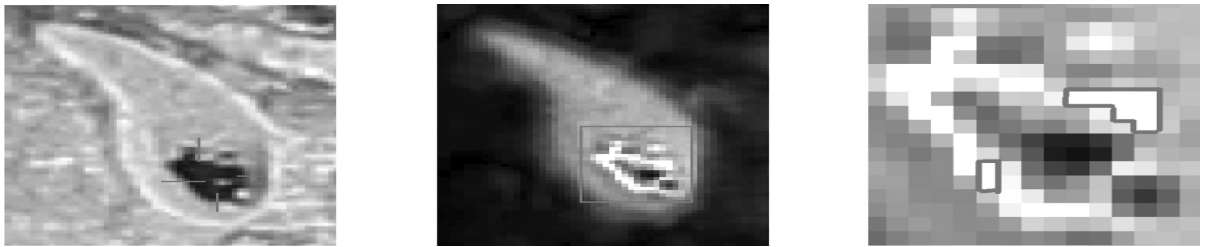
式中：S 为饱和度；C 为单色光强度；W 为白光强度。

饱和度 S 与 RGB 的关系为

$$S = \begin{cases} 0 & R = G = B \\ 1 & R, G, B \text{ 中有一个或两个 } 0 \\ \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} & \text{其他情况} \end{cases} \quad (13)$$

从公式(13)可以看出，当 RGB 三分量相等时(色彩体现为灰色，即灰色图像)饱和度为 0；当 RGB 三分量均不为 0 时，饱和度衡量的是图像最大相对色彩差，最大相对色彩差越大，饱和度越小，反之，饱和度越大(这也可以理解为图像越接近则越靠近灰色，饱和度越低，反之饱和度越高)；当 RGB 三分量中任意一个分量为 0，则饱和度最大为 1，代表当颜色为三原色(红、绿、蓝)之一或为三原色的补色(青、紫、黄)之一时，饱和度为 1。

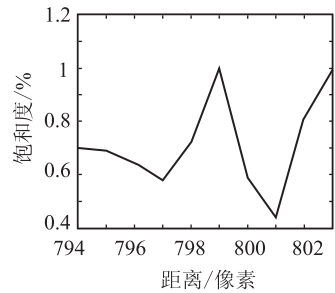
对实际腐蚀图像取腐蚀黑斑和流痕的过渡区进行分析，如图 3 所示，横向纵向任取两条线共 4 条过渡线，从曲线图可以看出，从黑斑过渡到流痕区域都存在一个饱和度峰值点，利用该峰值点作为搜索腐蚀黑斑的初始像素。对初始像素进行 8-邻域区域增长，得到最终的增长结果为去掉“伪黑斑”的全部“黑斑区域”。



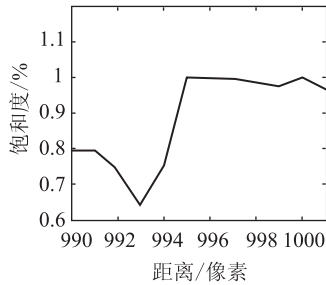
(a) 原始图像

(b) 饱和度图像

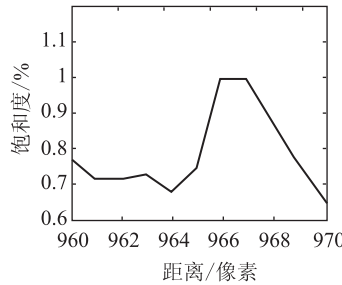
(c) 饱和度放大图像



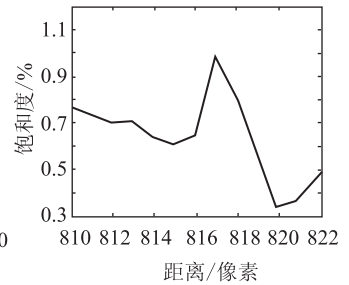
(d) 饱和度曲线1



(e) 饱和度曲线2



(f) 饱和度曲线3



(g) 饱和度曲线4

图 3 黑斑到流痕的过渡区及其饱和度曲线

图 4 是以阈值分割后得到的过度分割图像为基础，利用初始像素进行区域增长得到的腐蚀黑斑，将黑斑二值模板与原图做“与”运算，得到原图像中的“黑斑区域”。

5 实验

对同一盐雾腐蚀条件下的 4 个同等材料的样件进

行试验，利用本文提出的方法识别出腐蚀流痕和腐蚀黑斑，见图 5，分别计算出流痕区域、腐蚀斑点总面积

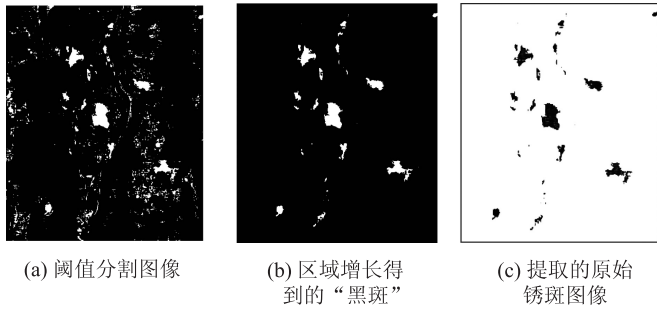
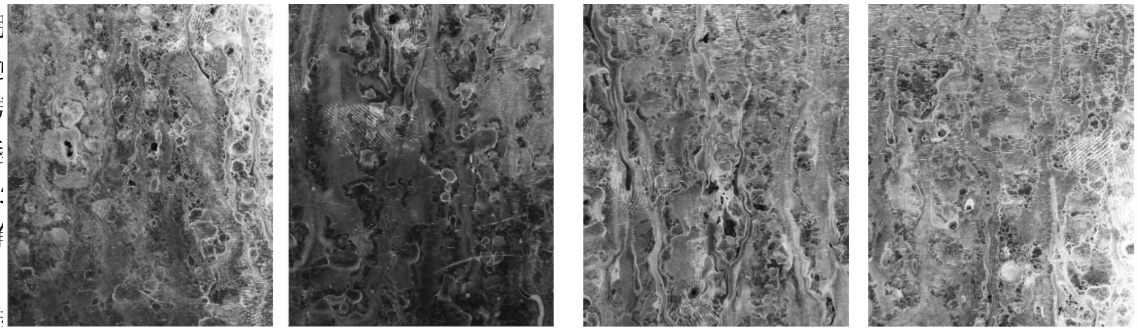


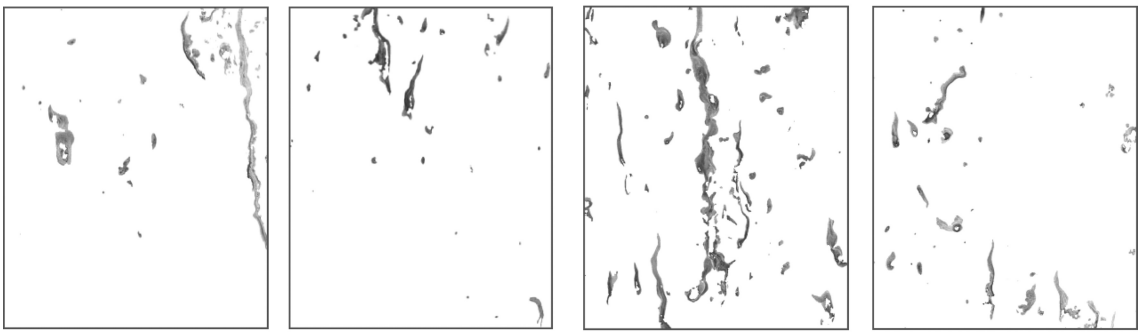
图4 利用初始像素提取腐蚀黑斑

占图像面积比例、腐蚀锈斑周长之和与完整程度等参数。完整度与单位黑斑面积及总周长有关，计算结果见表2。

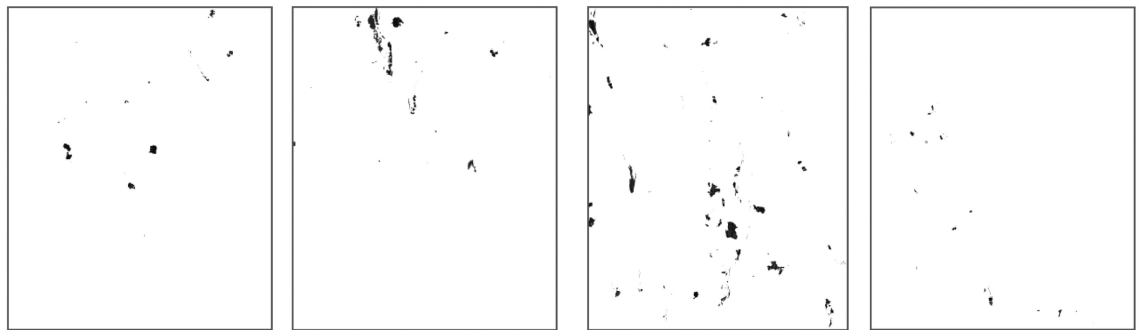
在判...
为当前腐...
估参数，...
代表腐蚀...
从图...
表现为都...
不同。
按照...
度更严重，



(a) 腐蚀样件图像 (b) 腐蚀样件图像 (c) 腐蚀样件图像 (d) 腐蚀样件图像



(e) 流痕区域图像 (f) 流痕区域图像 (g) 流痕区域图像 (h) 流痕区域图像



(i) 黑斑区域图像 (j) 黑斑区域图像 (k) 黑斑区域图像 (l) 黑斑区域图像

图5 腐蚀图像的特征识别结果

好区分。根据表2的计算结果可以看出，按照完整度来判别，其腐蚀程度由强变弱的顺序分别为图5(c)，图5(b)，图5(d)，图5(a)。

表2 4幅合金钢腐蚀图像处理结果

腐蚀图像样本	统计参数				
	流痕区域比例/%	黑斑面积总和 S/%	独立黑斑数量 N/个	黑斑周长之和 L/%	完整度 (S/N)/L ²
a	4.0	0.22	30	0.089	90.1
b	2.0	0.53	60	0.25	14.1
c	8.3	1.21	193	0.49	2.6
d	3.5	0.09	42	0.06	60.4

6 结论

通过以上分析, 本文的结论可总结为以下几点:

1) 4130 合金钢盐雾腐蚀图像具有明显的色彩特征和纹理特征, 通过对不同颜色空间分量的统计特征分析得到最能描述腐蚀特征的分量为 *HSV* 空间的 *S* 和 *V* 分量以及 *YCbCr* 颜色空间的 *Cb* 分量。

2) 针对 4130 合金钢腐蚀图像及类似有明显流痕、明显锈斑类的腐蚀图像, 流痕区域在 *RGB* 颜色模型空间主要体现在 *R* 分量和 *G* 分量, *YCbCr* 颜色空间的 *Cb* 分量可以同时增强图像 *R* 分量和 *G* 分量对图像的影响效果; 对于流痕与锈斑的边界区域, *RGB* 颜色模型主要体现在某一分量存在“骤减”, *HSV* 颜色空间的 *S* 分量可对边界区域进行明显的区分。

3) 为了得到流痕包围的腐蚀黑斑, 通过分析饱和度的变化规律, 提出了一种最大饱和度判别法, 将饱和度最大像素作为“初始像素”。利用区域增长以及相应的迭代算法将流痕包围的腐蚀黑斑提取出来。

4) 利用本文提出的方法对腐蚀图像的各类特征进行分析, 用完整度作为腐蚀程度的判定参数, 其判定结果可直接量化, 相比目视判定更准确。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. *GB/T6461-2002* 金属基体上金属和其他无机覆盖层经腐蚀试验后的试样和试件的评级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [2] 纪刚, 李红梅, 张伦武. 对镀层材料外观腐蚀特征的识别及分析处理[J]. 表面技术, 2001, 30(1): 21.
- [3] 许述剑, 翁永基, 李相怡. 图像分维对腐蚀坑分布特征的表征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(2): 109.
- [4] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. *GJB 150.11A-2009* 军用装备实验室环境试验方法第 11 部分: 盐雾试验[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.
- [5] Otsu N. A threshold selection method from a gray level histogram [J]. *IEEE Trans.* 1979, 9: 62.
- [6] 杨丹, 赵海滨, 龙哲, 等. *MATLAB* 图像处理实力详解[J]. 北京: 清华大学出版社, 2014.

(上接第 15 页)

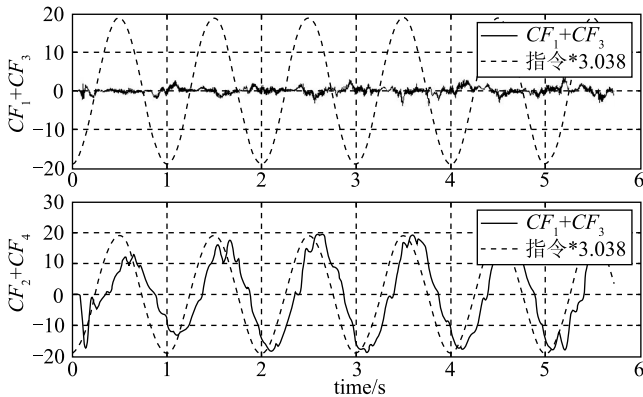


图 5 转台 90°位置, 目标方位 1°, 1 Hz 运动曲线图

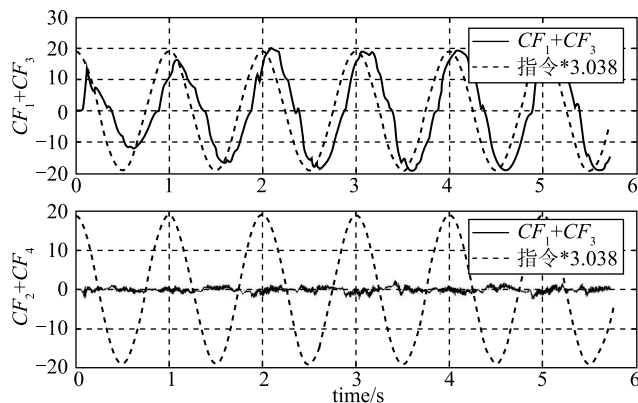


图 6 转台 90°位置, 目标俯仰 1°, 1 Hz 运动曲线图

而目标在俯仰上滞后控制指令约 0.136 s, 相当于俯仰滞后 $360^\circ \times 1 \times 0.136 = 48.9^\circ$ 。

4 结论

通过验证得出, 目标模拟器摆镜的驱动能力不足, 在 1 s 中落后控制指令大约 40° 左右, 因此需要增强目标模拟器的跟踪能力。厂家根据提出的指标对目标模拟器的 *PID* 参数进行了调整, 并更换了驱动电机, 由此使得系统的速度和精准度均有显著的提高, 通过工艺产品动态测试直接取得了弹道仿真的高命中率。

本文通过对产品结构原理和测试方法的分析, 建立了比例导引数学模型, 然后用数学仿真的方法, 完成了对目标模拟器摆镜驱动性能的校准验证, 解决了动态测试专用设备驱动能力校准的技术难题, 从而确保了动态测试设备的正常交付使用。

参考文献

- [1] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 1 版. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [2] 冯炳灿, 孔德仁, 商飞. 反射内存网络在实时测控系统中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2011, 28(1): 60-62.
- [3] 冯旭哲, 罗飞路, 陈建云, 等. 基于反射内存网络实时测试系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(11): 1447-1449.
- [4] 张安民, 徐海, 崔连虎. 导弹半实物仿真实时数据采集系统设计[J]. 计算机仿真, 2011, 19(1): 119-122.