

文章编号: 1000-8055(2008)03-0552-05

不规则裂纹宽度的一种分段评定法

王中宇, 李 萌, 葛乐矣

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,
精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 针对表面裂纹边缘轮廓的不规则特性, 提出了一种分段宽度评定方法. 利用计算机数字图像处理的方法, 在获得表面图像后, 对该图像沿纵向进行分段, 分别对每段的裂纹宽度用 Ferret 算法进行评定. 为了比较不同的分段方法的优劣, 提出有用信息利用率的概念, 从几种分段方法中选一种最优的方法进行分段评定, 最后得出该裂纹宽度的定量评定. 经过实例验证, 用此方法可以定量评定裂纹的宽度, 评定的结果可以为机械结构表面检测提供有效依据, 该方法也可应用于一般不规则图形几何尺寸的定量评定.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 图像处理; Ferret 算法; 定量评定; 表面检测

中图分类号: V231.95

文献标识码: A

A subsection method to evaluate width of irregular crack

WANG Zhong-yu, LI Meng, GE Le-yi

(Key Laboratory of Precision Optomechanics Technology, Ministry of Education,
School of Instrument Science & Optoelectronics Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In consideration of the irregular outline of surface crack, a subsection method for width evaluation was proposed. Based on digital image processing, the surface image was acquired and then was divided into several lengthways subsections, the width of each of which was respectively evaluated by Ferret algorithm. For comparative evaluation of diverse sectioning methods, a conception of useful information ratio was put forward for choosing among them an optimal method, by which the quantitative evaluation of crack width was obtained. Experimental data indicate that by using the method proposed in this paper, the width of surface crack can be quantitatively evaluated. The result can provide effective criterion for mechanism surface inspection, and moreover, this method can also be employed in quantitative evaluation for geometric dimensions of irregular graphics.

Key words: aerospace propulsion system; image processing; Ferret algorithm; quantitative evaluation; surface inspection

在航空航天中使用的很多机械或零件都处于恶劣的工作环境中, 所承载荷大, 一旦出现故障, 会造成巨大的经济损失和社会影响. 航空发动机等高速旋转机械, 经常处于高温高压环境下, 其表面出现的疲劳裂纹直接影响零件的工作性能、使用寿命

和机械结构的可靠性, 需要及时检测^[1]. 除了裂纹长度之外, 裂纹宽度的评定, 对于金属疲劳特性的研究和断裂的预测也有重要的现实意义. 例如, 裂纹张开位移, 指裂纹体受载后, 在裂纹尖端沿垂直裂纹方向的宽度, 是断裂力学中的一种重要指标.

收稿日期: 2007-01-31; 修订日期: 2007-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(50675011)

作者简介: 王中宇(1963), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电测试技术方面的研究, mewan@buaa.edu.cn.

为有效进行裂纹宽度的评定, 国内外学者已经开始用计算机数字图像处理的方法来研究裂纹, 即采集裂纹的数字图像信息, 利用计算机对该图像进行处理和定量评定. 国内相关的报道中, 一般先对裂纹图像进行预处理, 提取裂纹的轮廓信息, 得到将裂纹和背景区分开的二值化的黑白图像, 进而评定, 但这些方法缺乏对裂纹宽度的确切定义^[2-3]. 国外的报道中, 数字图像处理也应用于裂纹等表面缺陷的自动检测^[4-5]. 文献[6]着重对不规则图形的特征描述而缺乏定量评定, 文献[7]提出了裂纹的有效宽度的一种评定方法, 但是需要有一个裂纹的扭转系数参与运算并且假设裂纹是连续的, 因此使用范围有限.

本文基于数字图像处理技术, 着重研究经过处理后的裂纹黑白图像的宽度评定方法. 由于裂纹属于不规则图形, 在定量分析方面采用分段 Ferret 算法, 将裂纹分为几段, 在每段中采用与裂缝边缘相切的两条平行线的最短距离作为该图形宽度, 从而获得所需的裂纹的宽度的定义以及相应的定量评定.

1 数字图像处理中的 Ferret 算法

1.1 Ferret 算法简介^[8]

Ferret 算法是用于确定不规则图形的长、宽等几何尺寸的一种方法. 使用 Ferret 算法时, 首先从不规则图形的边界上任意选取一点, 作为起始点, 经过该点做图形的切线, 作与该切线平行且与图形的另一侧相切的直线, 这两平行线之间的距离定义为 Ferret 距离. 不断改变起始点的位置, 直到 Ferret 距离为最小值时, 将这个最小值定义为该不规则图形的 Ferret 宽度. 与此对照的是, 当 Ferret 距离为最大值时, 将这个最大值定义为该不规则图形的 Ferret 长度. 如图 1 所示, F_1 , F_2 和 F_3 都是不规则图形 X 的 Ferret 距离.

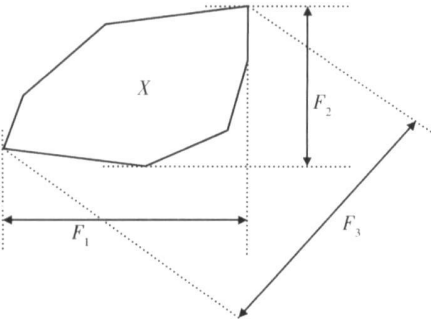


图 1 不规则图形的 Ferret 距离

Fig.1 Ferret distance of irregular graphics

把 Ferret 算法应用在数字图像分析中, 就是将二值化的黑白图像作为目标图像, 把该图像中的不规则图形作为分析对象. 在本文中, 裂纹作为分析对象. 由于经过了预处理、特征提取等处理, 裂纹被标识为白色, 背景为黑色. 定义裂纹图形的 Ferret 宽度为裂纹的宽度, 将与 Ferret 宽度方向垂直的方向, 定义为裂纹的走向. 用 Ferret 算法处理二值图像的示意图如图 2 所示, F 为裂缝的宽度.

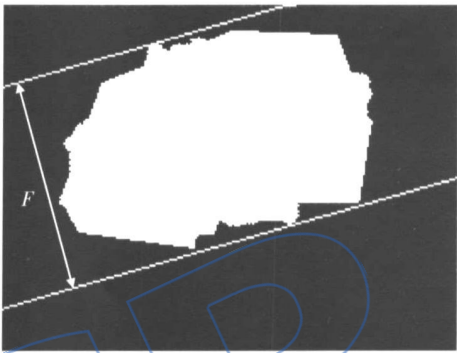


图 2 用 Ferret 算法处理二值图像

Fig.2 Binary image processed by Ferret algorithm

1.2 快速 Ferret 算法^[9]

Ferret 算法的原理很简单, 但是实现过程很复杂, 需要不断地选择起始点, 不断作平行线, 以选出平行线间的极小值. 尤其是对于边界变化频繁的不规则图形, 这种方法使用起来十分繁琐. 由 Ferret 算法的原理可知, 如果能够快速地确定裂纹的走向, 即与 Ferret 宽度方向垂直的方向, 也就能确定 Ferret 宽度的方向, 用两条与裂纹走向平行的平行线去逼近裂纹的边缘, 就可以得到 Ferret 宽度. 快速 Ferret 算法是通过计算图形的最小二阶矩来确定宽度方向以及裂纹走向的方法, 之后求出 Ferret 宽度. 利用快速 Ferret 算法确定裂纹走向的示意图如图 3 所示.

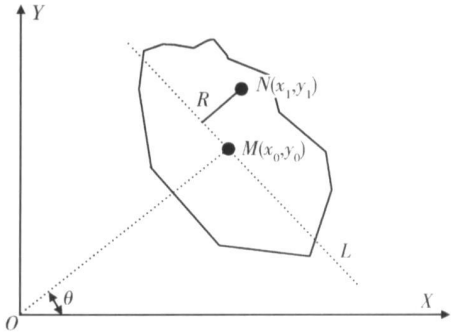


图 3 用快速 Ferret 算法确定裂纹走向

Fig.3 Fast Ferret algorithm used to obtain crack's orientation

首先以图像的横向作为 X 轴纵向作为 Y 轴定义一个坐标系, 计算二值图形的重心 $M(x_0, y_0)$, 通过重心作任意一条直线 L , R 为不规则图形中的任意一点 $N(x_1, y_1)$ 到 L 的垂线. 对于数字图像, 图像中只有黑白两色, 用像素数值表示即 0(黑色)和 255(白色). 由于数字图像是离散的二值图, 经过推导, 当满足最小二阶矩原则的时候有以下公式成立

$$\tan^2 \theta + \frac{I(2, 0) - I(0, 2)}{I(1, 1)} \tan \theta - 1 = 0 \quad (1)$$

其中

$$I(p, q) = \sum i^p j^q b(i, j) \quad (2)$$

其中, θ 代表了不规则图形宽度参考方向与 X 轴的夹角, $b(i, j)$ 表示二值图像的任何一点的像素数值, i, j 为坐标值, 求和号 $\sum$ 代表公式 (2) 要遍及图像中所有的点, p 和 q 可取为 0, 1, 2.

当 θ 满足 (1) 式时, Ferret 宽度方向得到确定, 进而可以得到裂纹的走向进而可以求出 Ferret 宽度. 为了统一, 本文规定从 Y 轴逆时针旋转到裂纹走向的夹角定义为走向的角度, 下同.

2 最佳分段原则

2.1 使用 Ferret 算法时分段评定的必要性

对于图 4 (a) 中的图形, 如果不进行分段, 可以求得其 Ferret 宽度是: 102. 51(像素). 在图 4 (b) 中同一图形被分为两段, 求得两段的 Ferret 宽度分别是: 56. 45(像素)和 71. 49(像素). 显然, 对于该图形而言, 分为两段评定比不分段评定更为合理. 由于该图形有一部分的走向明显地改变, 在不分段的时候直接使用 Ferret 算法, 宽度的评定的结果实际上是被夸大了.

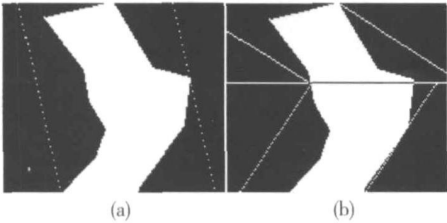


图 4 不分段和分为两段时分别应用 Ferret 算法
Fig. 4 Without division and with division
when using Ferret algorithm

2.2 平均分段方式的局限性

在实际中裂纹图形多为细长型, 需要把图形分为几段, 分别在每段中求出 Ferret 宽度, 把所

有段中的最大宽度作为整个裂纹的宽度评定.

在同一裂纹测量中, 不同的分段方式, 所得出的评定结果是不同的. 按文献[9]中的方法, 把一副图像按纵向尺寸平均分为几段, 针对每段中的裂纹图形进行宽度评定. 由于裂纹边缘轮廓的不规则性, 每段裂纹的边缘变化的剧烈程度不同, 如果采用平均的分段方式, 各段评价的准确程度是不同的. 因此平均分段方式不适合一般情况下裂纹宽度评定.

2.3 最佳分段标准的提出

对于同一裂纹, 采用分段方法的不同, 得到的宽度评定不同, 各自的最大宽度也不同. 例如: 对于图 5 中两种不同的分段方法, 分别将此图像分为两段和三段, 在每段之中运用 Ferret 算法进行宽度评定.

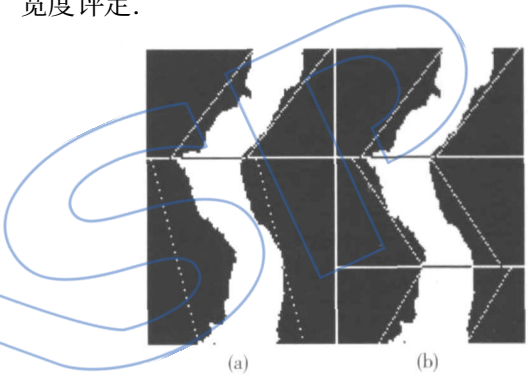


图 5 分为两段和三段时分别应用 Ferret 算法
Fig. 5 Two division methods when
using Ferret algorithm

现在的问题是如果判定哪种分段方式更好, 这涉及到一个评判标准的问题. 本文中采用了数字图像处理的方法进行裂纹宽度评定, 在评定之前, 背景像素数量的多少, 背景尺寸的面积并不影响测量的结果, 相对于裂纹来说, 背景像素被视为无用信息; 而裂纹图形中像素数量的多少, 以及它们的分布形式, 决定了其宽度评定的结果. 因此把裂纹图形轮廓之内的像素定义为有用信息, 将裂纹图形轮廓之外的像素视为无用信息.

在使用 Ferret 算法进行评定时, 把用于标明 Ferret 宽度的两条平行线之间的区域定义为评定区域, 评定区域以外的图像信息不影响评定的结果, 而该区域之内的图像信息决定了评定的结果. 为了确定几种方法中的最佳分段原则, 在此引入有用信息利用率的概念.

有用信息利用率可以定义为: 在某种分段方法中, 评定区域中有用信息占全部信息的比例, 即裂纹轮廓内部的像素数量占评定区域中所有像素

数量的比例. 如果在某种分段方式中, 裂纹轮廓内部像素数量占全部像素数量的比例高, 则此评定方式相对准确, 更确切地反映了裂纹的宽度信息.

还以图 5 为例来说明有用信息利用率的评价原则, 在图 5(a) 中原始图像被分为两段, 在图 5(b) 中原始图像被分为三段, 分别计算每段的有用信息利用率. 计算的结果见表 1 和表 2.

表 1 图 5(a) 的有用信息利用率
Table 1 Useful information ratio of Fig. 5(a)

段号	1	2
面积权重	1 695	4 854
有用信息利用率/ %	84.7	53.2

表 2 图 5(b) 的有用信息利用率
Table 2 Useful information ratio of Fig. 5(b)

段号	1	2	3
面积权重	1 695	1 846	1 459
有用信息利用率/ %	84.7	78.0	78.4

可见, 在每种分段方法中, 分段的数量不同, 每段中的有用信息利用率也不同, 为了将两种分段方法的优劣进行比较, 提出面积权重的概念, 即以每段的评定区域的面积(以像素数量表示)作为该段的面积权重, 计算整个图像有用信息利用率的加权平均值, 作为加权有用信息利用率. 假设某种分段方法的分段个数为 n , 第 i 段($i=1, 2, \dots, n$) 中评定区域的面积为 s_i (以像素数量表示), 该段的有用信息利用率为 r_i , 加权有用信息利用率为 r_t (下文中所有的有用信息利用率均用 r_i 表示, 加权有用信息利用率均用 r_t 表示). 有如下公式

$$r_t = \frac{\sum_{i=1}^n r_i s_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \tag{3}$$

由公式(3)可算出, 图 5(a) 中的分段方法的 r_t 为 61.35%; 在图 5(b) 中分段方法的 r_t 为 80.39%, 相比而言, 图 5(b) 中的 r_t 较大, 按照本文提出的原则, 图 5(b) 中的评定方法较为准确, 在图 5(a) 和图 5(b) 的两种分段方法中, 图 5(b) 中的方法更好.

3 实例验证

3.1 图像预处理

以某裂纹为例, 首先对该裂纹的原始彩色图

像进行预处理, 具体包括对比度调整, 灰度化, 阈值选定和二值化, 目的是将裂纹和背景完全区分开, 以得到能够进行分析的二值化的黑白图像, 其中裂纹轮廓内的区域标识为白, 裂纹轮廓外的区域标识为黑. 预处理的最终结果如图 6(a) 所示, 对该图进行宽度评定.

3.2 宽度评定

如图所示, 将图 6(a) 中以三种分段方式进行分段, 在每种分段方式中按照本文提出的 Ferret 算法标出评定区域. 图 6(b) 中按照原始图像的纵向长度平均分为三段, r_t 为 67.6%, 图 6(c) 中按照原始图像的纵向长度平均分为四段, r_t 为 70.5%, 可见在平均分段时, 分段数量越多 r_t 越大, 评定的结果越好. 相对于图 6(c) 中的分段方法, 图 6(d) 中也是分为四段, 但是不是平均分段, 而是在裂纹走向有较大变化的地方进行分段, 这种方法的 r_t 为 75.0%, 是三种方法中最大的. 三种分段方法下的图像的宽度评定结果见表 3, 表 4 和表 5.

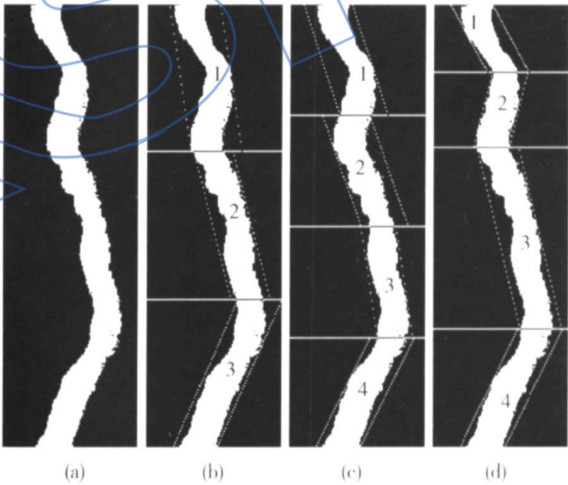


图 6 实际裂纹的 Ferret 宽度评定
Fig. 6 Actual width evaluation using Ferret algorithm

表 3 平均分为三段的宽度评定
Table 3 Width evaluation of three sections

段号	宽度/ (像素)	走向/ (°)	面积 权重	r_i / %	r_t / %
1	38.73	8.88	4 300	56.83	
2	29.24	14.48	3 246	72.27	67.64
3	30.92	- 24.02	3 463	76.70	

可见, 图 6(d) 中的分段方式的“ r_t ”最大, 是最佳的分段方法, 以该种分段方法为基础, 得到的分

析结果见表 5,最大宽度为 31.21(像素) ,把此评定结果作为该条裂纹的宽度评定.

表 4 平均分为四段的宽度评定

Tabel 4 Width evaluation of four sections

段号	宽度/ (像素)	走向/ (°)	面积 权重	$r_i/\%$	$r_i/\%$
1	35.14	18.64	2 952	60.56	70.51
2	34.15	19.77	2 834	65.51	
3	26.72	8.944	2 245	78.25	
4	30.46	- 26.62	2 528	80.88	

表 5 非平均分段情况下的宽度评定

Tabel 5 Width evaluation without average division

段号	宽度/ (像素)	走向/ (°)	面积 权重	$r_i/\%$	$r_i/\%$
1	27.84	29.25	1 447	73.89	74.98
2	26.29	- 14.10	1 472	88.06	
3	31.21	13.79	4 245	67.87	
4	30.81	- 26.12	2 865	79.32	

4 结 论

表面裂纹宽度的定量评定是工程劣化诊断的重要内容. 本文针对裂纹图形的不规则性,提出了一种以数字图像处理为基础,以分段 Ferret 算法为分析方式的裂纹宽度的定量评定方法. 该方法运用了数字图像处理技术,阐述了分段 Ferret 算法的使用方法,对复杂形状的不规则裂纹进行宽度评定. 为判定不同分段方法的优劣,提出了以有效信息利用率为基础的最佳分段标准. 结合实例,证明了该方法适合一般形状的裂纹宽度评定,可以为工程中裂纹的定量化描述提供了依据.

对于同一裂纹图像,采用平均分段的方法时,分段数量越多,有效信息利用率越高,评定也越准确;对于同样分段数量的各种分段方法中,由于裂纹边缘轮廓的不规则性,使得每段裂纹的走向并不一致,每段裂纹的边缘变化的剧烈程度也不同,如果采用平均的分段方式,各段宽度评价的准确程度是不同的,因此平均分段有它的局限性. 最佳

的分段方法应该是在裂纹走向变化较大的位置进行分段,而且分段数量越多越好.

本文的方法主要针对单根裂纹,对于多根裂纹连接在一起的情况,则需要其他方法进行评定.

参考文献:

[1] 邹轶群,侯贵仓,杨峰. 基于数字图像处理的表面裂纹检测算法[J]. 微计算机信息, 2004, 20(4) : 80 81, 105.
ZOU Yiqun, HOU Guicang, YANG Feng. A surface crack inspection algorithm based on digital image processing techniques[J]. Contiol & Automation, 2004, 20(4) : 80 81, 105.

[2] 徐科,孙浩杨,朝霖,等. 形态滤波在中厚板表面裂纹在线检测中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9) : 1008 1011.
XU Ke, SUN Haoyang, CHAO Lin, et al. Application of morphological filtering to orr line detection of surface crack of medium and heavy steel plate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(9) : 1008 1011.

[3] 韩彦芳,施鹏飞. 基于数字图像处理的表面缺损检测技术[J]. 测控技术, 2005, 24(9) : 15 18.
HAN Yanfang, SHI Pengfei. Surface defect detection based on image processing techniques[J]. Measurement & Control Technology, 2005, 24(9) : 15 18.

[4] Stampfl J, Scherer S, Berchthaler M, et al. Determination of the fracture toughness by automatic image processing[J]. International Journal of Fracture, 1996, 78(1) : 35 44.

[5] Duran O, Althoefer K, Seneviratne L D. Automated sewer pipe inspection through image processing[R]. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, DC: May 2002.

[6] Ammouche A, Breyse D, Hornain H, et al. A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement based materials[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 25 35.

[7] Gérard B, Marchand J. Influence of cracking on the diffusion properties of cement based materials. - Part I: Influence of continuous cracks on the steady state regime[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 37 43.

[8] Coster M, Chermant J L. Précis d' analyse d' images[M]. Paris: France, Presses du CNRS, 1985.

[9] 王卫星,段娇. 基于数字图像处理技术的岩石节理宽度测量[J]. 微型机与应用, 2005, 10: 51 68.
WANG Weixing, DU AN Jiao. A method to measure rock crack width based on digital image processing techniques[J]. Microcomputer & Its Application, 2005, 10: 51 68.