

航空发动机内部裂纹自动测量方法研究

李 华¹, 陈 果¹, 陈新波², 王洪民²

LI Hua¹, CHEN Guo¹, CHEN Xinbo², WANG Hongmin²

1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016

2. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266000

1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Qingdao Campus, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao, Shandong 266000, China

LI Hua, CHEN Guo, CHEN Xinbo, et al. Study on automatic measurement method for aero-engine inner damage crack. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(11):233-237.

Abstract: The visual inspection based on an endoscope has played an important role in modern fault diagnosis of aero-engines. An automatic measurement approach to cracks of the aero-engine inner parts is studied in this paper. In this method, the area of the crack needs to be selected, it is subjected to image re-processing, and the pseudo cracks are removed, the crack is measured and calculated. Automatic measurement system has developed based on this method. The automatic measurement system includes crack segmentation, crack identification, and measurement, and it can solve the disadvantages of traditional inspection method, such as, excessive reliance on the inspector's experience, low inspection efficiency, and poor accuracy of measurement. Several experiments are used to verify the effectiveness and practicality of the developed system.

Key words: aero-engine; image processing; crack measurement

摘 要: 基于内窥镜的视觉检测技术在现代航空发动机故障诊断中发挥着重要的作用。针对航空发动机内部部件损伤产生的裂纹,提出了一种裂纹自动测量方法。该方法需要选取裂纹所在区域,对其进行图像预处理,去除图像中的伪裂纹,进行裂纹测量计算。基于该方法,开发了集裂纹分割、裂纹识别、裂纹测量为一体的航空发动机内部损伤裂纹的自动测量系统,解决了孔探裂纹检查中严重依赖工作人员经验、测量结果准确性较差、效率较低等问题。通过多组发动机孔探图像的裂纹测量实验证明了所开发系统的正确有效性和普遍实用性。

关键词: 航空发动机; 图像处理; 裂纹测量

文献标志码: A **中图分类号:** TP182 doi:10.3778/j.issn.1002-8331.1407-0423

1 引言

由于航空发动机燃烧室一直处于高温、高压、高转速的状态下工作,因此极易出现损伤。发动机常见的损伤主要有:裂纹、刻痕、压坑、撕裂、凹痕、烧伤、腐蚀、叶尖卷边^[1]。这些裂纹若不能及早发现会在交变载荷等作用下不断扩展,引发灾难性断裂事故^[2]。一些不易拆卸且检验可达性较差的零部件都使用孔探技术来完成。孔探技术是无损检测技术的重要手段,已普遍应用于航

空发动机的维修^[3]。

基于内窥镜的孔探技术已经成为监测发动机运行状态和诊断其内部表面损伤的有效手段之一。原始的人工检测由于依赖检查员操作正确性和经验,其正确度容易受主观因素影响。随着数字图像处理技术和计算机视觉技术的推广应用,智能型发动机视觉检测技术已成为发动机原位无损检测研究的热点^[4]。孙慧贤等人在对航空发动机篦齿盘均压孔裂纹形成原因和裂纹形态

基金项目: 国家自然科学基金(No.61179057)。

作者简介: 李华,女,硕士,主要研究方向:专家系统、智能诊断、图像处理;陈果,通讯作者,男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:航空发动机智能诊断及专家系统、航空发动机整机振动与转子动力学, E-mail:cgzyx@263.net;陈新波,男,副教授,主要研究方向:航空发动机故障检测、诊断与维修;王洪民,男,高级工程师,主要研究方向:航空发动机故障检测、诊断与维修。

收稿日期: 2014-07-28 **修回日期:** 2015-01-09 **文章编号:** 1002-8331(2016)11-0233-05

CNKI网络优先出版: 2015-03-25, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20150325.1620.014.html>

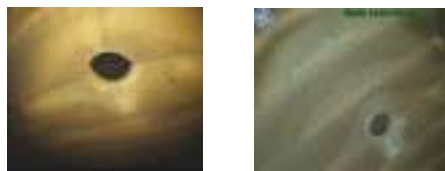
进行分析的基础上,提出一种基于定位识别模型的盘孔表面裂纹检测方法^[5]。李长有等研究了基于孔探技术的发动机叶片损伤检测,依据损伤频谱能量检测并估计发动机叶片的损伤^[6]。罗云林等研究了基于小波变换和立体视觉的发动机内窥检测,利用双目立体视觉技术,对某发动机腔体内表面的腐蚀进行三维重建^[7]。但是,以上研究均以检测为目的,对图像的识别度和损伤的连续性要求不高。周正干等人根据射线实时成像的特点,对航空发动机叶片缺陷的提取技术进行了研究^[8]。李双等以图像获取、预处理、图像分割、裂纹特征提取和故障识别为算法流程,设计了一套转子系统早期裂纹自动检测识别系统^[9]。陈果等人以日本 OLYMPUS 公司的 IV6C6 型可量测内窥镜为硬件基础,运用平行光轴双目立体视觉技术,开发了航空发动机孔探图像分析软件,对发动机内部损伤及裂纹的三维测量及其立体重建技术做了前期研究^[10]。以上研究均融入了损伤提取和测量,由于航空发动机的孔探图像非常复杂,目前所研究的方法均不具有普遍实用性。

本文针对实际军用航空发动机内部损伤的孔探图像,提出了一种基于孔探图像的航空发动机内部损伤裂纹自动测量方法。首先,在孔探图像上选取裂纹所在区域,然后对裂纹进行分割,通过对比裂纹特征参数消除伪裂纹,最后提取裂纹骨架,从而实现对裂纹的测量。在此基础上,设计并开发了裂纹图像分析测量系统,使操作更简洁系统化。

2 图像的获取

某型航空发动机的内部损伤检测采用美国韦林公司的 XLGO 手持便携式孔探仪作为图像获取设备,发现缺陷并拍照得到航空发动机内部损伤图像。最后,通过数据线从孔探仪读取拍摄的缺陷图像或将孔探图像导入软件分析系统。

航空发动机工作在高温、高压、高转速的状态下,燃烧室受到的主要损伤是热损伤,如燃烧室烧裂、烧穿和掉块等^[11]。图 1 为某型航空发动机燃烧室的典型烧蚀图片。



(a)图片1 (b)图片2

图1 燃烧室损伤图片

3 裂纹图像分析系统

图像采集获取后,为了加强目标区域显示效果和精确提取裂纹尺寸,必须对图像进行预处理,消除干扰,突出裂纹信息,为裂纹图像的数值分析打好基础。裂纹图

像分析系统包括裂纹分割、裂纹识别、裂纹测量三个部分,结构图如图 2 所示。

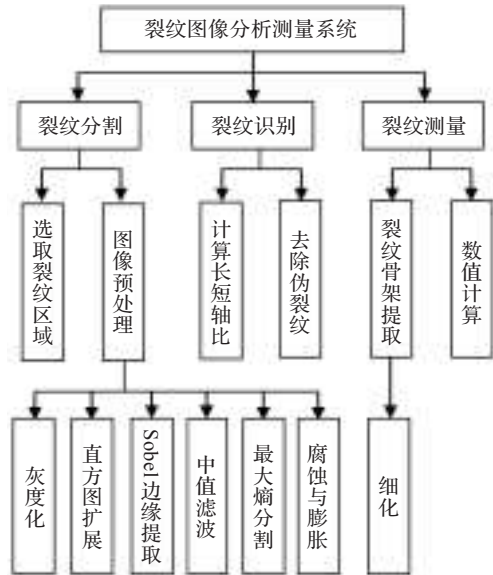


图2 裂纹图像分析测量系统结构图

具体图像分析测量系统基本流程如图 3 所示。首先读取孔探图像,在图像中用矩形框选取待测量裂纹的最佳区域,然后对该矩形区域进行灰度化等一系列图像处理工作,接着根据提取的裂纹特征参数消除伪裂纹,最后提取裂纹骨架。

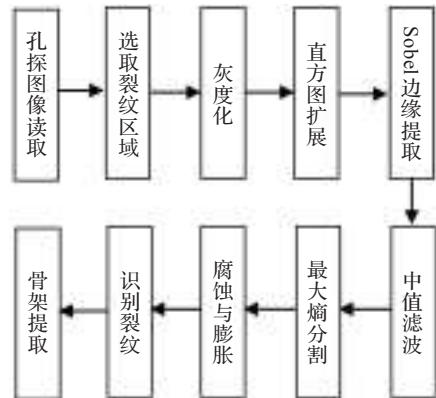


图3 图像分析测量系统基本流程图

4 裂纹分割

4.1 Sobel 边缘提取

图 4 给出了 Sobel 边缘检测算法框图。从图中可以看出对一幅图像进行 Sobel 边缘检测时首先要利用 Sobel 算子计算出水平梯度 G_y 和垂直梯度 G_x ,然后再

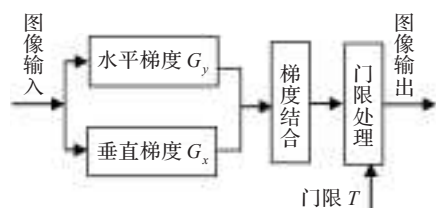


图4 Sobel 边缘检测算法框图

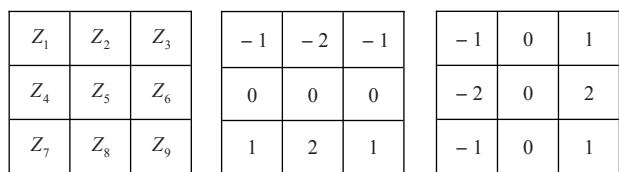
把两个方向的梯度结合起来,最后应用门限处理模块判断图像边缘并输出边缘检测结果^[12]。

对于一幅图像的3×3区域如图5(a)所示,图5(b)和图5(c)分别为本文Sobel算子的x方向(垂直方向)和y方向(水平方向)梯度算子。当采用Sobel算子对图5(a)所示的3×3区域做梯度计算时,可得标记为z₅的像素点x方向梯度和y方向的梯度分量分别为:

$$G_x = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (1)$$

$$G_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad (2)$$

梯度的计算需要G_x、G_y这两个分量按公式f=[G_x²+G_y²]^{1/2}联合使用。



(a)3×3区域 (b)x方向梯度算子 (c)y方向梯度算子

图5 3×3区域图和Sobel算子

该设计在门限处理时,采用基本全局门限:当某像素点(x,y)的梯度值f(x,y)大于或等于设定的门限T时,规定该点的灰度值为255,反之则为0。即

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & f(x,y) \geq T \\ 0, & f(x,y) < T \end{cases} \quad (3)$$

这里T选择图像中最大亮度值和最小亮度值的中间值。

4.2 最大熵分割

最大熵阈值分割法是利用图像的灰度特征来选择一个或多个最佳灰度阈值,将图像中的像素点按照阈值进行分类,从而提取出特定目标的处理方法^[13]。一维最大熵阈值法以目标和背景所含的信息量之和最大作为选择分割阈值的标准。熵是平均信息量的表征,根据信息论,熵的定义为^[14]:

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \lg p(x) dx \quad (4)$$

其中,p(x)为随机变量x的概率密度函数。对于数字图像而言,这个随机变量x是灰度极值、区域灰度和梯度等特征。

一维最大熵阈值分割法就是选择一个阈值,使图像用这个阈值分割出的两部分的一阶灰度统计的信息量最大。

设p_i为灰度级i出现的概率,则p_i=n_i/(N×N),i=1,2,⋯,L。其中,N×N为图像总像素数;n_i为灰度级i对应的像素数;L为图像的灰度级数。

对于数字图像,定义图像灰度直方图中灰度级低于t的像素点构成的目标区域熵为H₁(t);灰度直方图中灰度级高于t的像素点构成背景区域的熵为H₂(t),那么H₁(t)和H₂(t)可计算如下:

$$H_1(t) = - \sum_i (P_i/P_t) \lg(P_i/P_t)$$

$$i = 1, 2, \dots, t, P_t = \sum_{i=1}^t P_i \quad (5)$$

$$H_2(t) = - \sum_i [P_i/(1-P_t)] \lg[P_i/(1-P_t)]$$

$$i = t+1, t+2, \dots, L \quad (6)$$

对图像中每一个灰度级分别求取熵函数H(t)=H₁(t)+H₂(t),将H(t)取得最大值时的H_{max}(t*)作为最大熵,其对应的灰度值t*则为所求的最大熵分割阈值。

4.3 膨胀与腐蚀

在二值图像中,腐蚀和膨胀是最基本的形态学运算,它们互为对偶运算。腐蚀具有收缩图像的作用,膨胀具有扩大图像的作用。

先腐蚀再膨胀,具有平滑功能,能清除裂纹图像某些微小连接、边缘毛刺和孤立点^[15]。先膨胀再腐蚀,具有过滤功能,可填平图像内部的孔洞、小沟和裂缝,使断线相连。本文使用两次膨胀与腐蚀,既可使裂纹图像更加连贯,也可以消除一些孤立点。

5 裂纹识别

由于裂纹背景图像复杂,分割时就会把干扰图像也同样保留下来。因此,通过裂纹的线性特征将干扰图像清除掉,仅仅保留裂纹信息,为下一步的裂纹的分析打下良好的基础。

本文选取的裂纹线性特征为图像的长短轴比。计算包围每个独立区域的最小椭圆的长短轴比,将图像中像素数少的,长短轴比小的图像清除。

椭圆的长轴和短轴计算如图6所示,公式如下^[16]:

$$a = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{1/4} \frac{(\overline{m}_{02})^{3/8}}{(\overline{m}_{20})^{1/8}} \quad (7)$$

$$b = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{1/4} \frac{(\overline{m}_{20})^{3/8}}{(\overline{m}_{02})^{1/8}} \quad (8)$$

其中,m_{uv}=(∑_{x=1}ⁿ∑_{y=1}ⁿf(x,y)(x-x̄)^u(y-ȳ)^v)/m₀₀^γ,γ=(u+v)/2,

m_{uv}是裂纹的u,v阶统计矩。m_{uv}=∑_{(x,y)∈R}(x₀-x)ⁱ(y₀-y)^j。

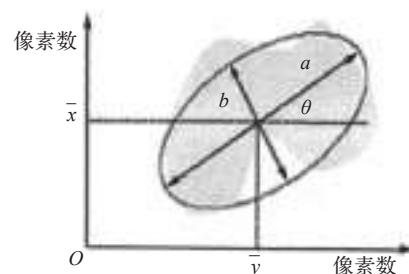


图6 椭圆的长轴和短轴计算示意图

选取3处裂纹区域进行分析,裂纹1、裂纹2、裂纹3

图像识别前后对比图如图7、图8、图9所示。图7(a)中标记了5处裂纹,图8(a)中标记了4处裂纹,图9(a)中标记了3处裂纹。表1、2、3是经过计算得出的裂纹1、2、3的像素数和长短轴比。由像素数和长短轴比可去除伪裂纹,结果如图7(b)、8(b)、9(b)所示。

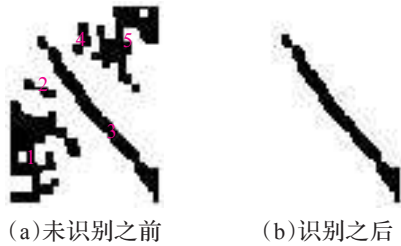


图7 裂纹1图像识别示意图

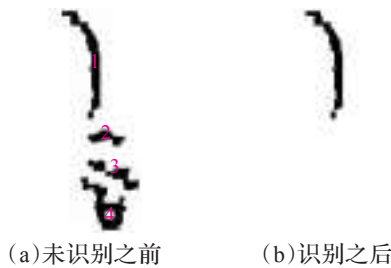


图8 裂纹2图像识别示意图

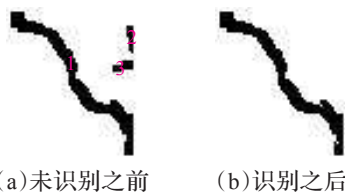


图9 裂纹3图像识别示意图

表1 裂纹1参数表

| 参数 | 裂纹1 | 裂纹2 | 裂纹3 | 裂纹4 | 裂纹5 |
|------|------|------|------|------|------|
| 像素数 | 424 | 37 | 335 | 52 | 357 |
| 长短轴比 | 1.31 | 1.71 | 5.77 | 1.72 | 1.19 |

表2 裂纹2参数表

| 参数 | 裂纹1 | 裂纹2 | 裂纹3 | 裂纹4 |
|------|------|------|------|------|
| 像素数 | 279 | 54 | 124 | 253 |
| 长短轴比 | 4.11 | 1.41 | 1.73 | 0.92 |

表3 裂纹3参数表

| 参数 | 裂纹1 | 裂纹2 | 裂纹3 |
|------|------|------|------|
| 像素数 | 475 | 23 | 33 |
| 长短轴比 | 5.31 | 1.21 | 1.37 |

6 裂纹测量

由于裂纹具有明显的“线条”特征,首先对裂缝做细化操作,得到单像素宽的裂缝骨架曲线^[7]。所谓细化,就是从原图中去掉部分点,但要保持原来的形状,即保持原图的骨架。

对于一幅图像中一个3×3区域如图10所示,对各点标记名称 P_1, P_2, \dots, P_8 ,其中 P_1 位于中心。如果 $P_1=1$ (即黑点),下面四个条件如果同时满足,则删除 P_1 。

| | | |
|-------|-------|-------|
| P_9 | P_2 | P_3 |
| P_8 | P_1 | P_4 |
| P_7 | P_6 | P_5 |

图10 3×3区域

- (1) $2 \leq N(P_1) \leq 6$;
- (2) $Z0(P_1) = 1$;
- (3) $P_2 \times P_8 \times P_6 = 0$;
- (4) $P_4 \times P_8 \times P_6 = 0$ 。

$N(P_1)$ 是 P_1 的非0邻近点的个数, $Z0(P_1)$ 是以 $P_2, P_3, \dots, P_8, P_9$ 为序时,这些点的值从0到1变化的次数。 $P_2 \times P_8 \times P_6 = 0$ 是 P_2, P_8, P_6 都不能为0。

对图像中的每一个点重复这一步骤,直到所有的点都不可删除为止,即完成细化操作。

裂缝的长度实际上就是骨架图像骨干点之间的长度之和。骨化后的图像是一个单像素宽度的连通性好的骨干图像。可以分别求取相邻像素之间长度,然后把所有的相邻像素之间的距离求和即为所得,如下式:

$$l = [(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2]^{1/2} \quad (9)$$

(x_a, y_a) 和 (x_b, y_b) 是相邻骨干点的两个点, l 是两个相邻像素之间的长度。总长度即为所有相邻元素的长度之和。裂纹实际长度 L 即为两个相邻像素之间的长度 l 的叠加,然后乘以每个像素代表的实际长度 M ,表达式如下式:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i M \quad (10)$$

图11(a)所示为在燃烧室损伤图像中选取的裂纹区域,图11(b)为直方图扩展后的裂纹图像,可以看出,经过直方图扩展后裂纹与背景对比更加强烈,突出裂纹特征。图11(c)为Sobel边缘检测后的裂纹图像,裂纹的轮廓已经初步显现。图11(d)为经最大熵分割处理后的裂纹图片,图11(e)为经过膨胀与腐蚀后的裂纹图像,从图中可以看出断裂的裂纹已经被连通。图11(f)和图11(g)分别为去除伪裂纹和细化后的裂纹图片。

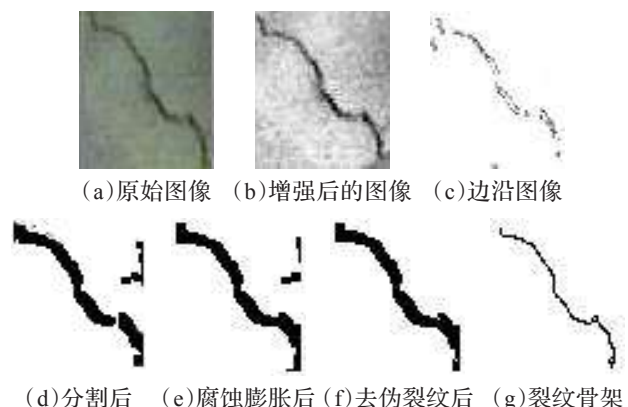


图11 裂纹图像预处理

7 系统开发与实验验证

在裂纹自动测量算法的研究基础上,本系统采用 Microsoft Visual C++6.0 作为开发工具开发了航空发动机内部损伤智能诊断专家系统 AIDES (Aeroengine Internal Damage Intelligent Diagnosis Expert System)。实现对裂纹分割,识别和测量的一体化操作。

现以某型飞机发动机燃烧室火焰筒筒体(环带)裂纹损伤图像为例,进行裂纹分析测量。图 12(a)为第 1 幅裂纹图像分析测量系统界面,经测量可得裂纹长度为 101 mm,与实际尺寸 103.2 mm 是相近的。图 12(b)为第 2 幅裂纹图像的分析测量系统界面。经测量可得裂纹长度为 155 mm,与实际尺寸 153 mm 是接近的。裂纹的检测结果均用蓝色的线标记在原始图像中,由实验可以看出系统检测和测量结果非常准确可靠。



(a) 第 1 幅裂纹图像



(b) 第 2 幅裂纹图像

图 12 裂纹图像分析测量系统界面



(a) 裂纹 1 放大图 (b) 裂纹 2 放大图

图 13 裂纹测量局部方法图

8 结论

本文针对航空发动机内部损伤部件产生的裂纹,提

出了一种裂纹自动测量方法。在此方法基础上,开发了集裂纹分割、裂纹识别、裂纹测量为一体的航空发动机燃烧室裂纹的自动测量系统。该系统有效地解决了孔探裂纹检查严重依赖工作人员经验、测量准确差、效率低等问题。

参考文献:

- [1] 陈果,汤洋.基于孔探图像纹理特征的航空发动机损伤识别方法[J].仪器仪表学报,2008,29(8):1709-1713.
- [2] 闻邦椿.故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] 于辉.孔探技术及其在航空发动机维修中的应用[J].航空制造技术,2005(6):94-99.
- [4] 于辉,左洪福,陈果.基于立体视觉的孔探分析系统及其应用[J].南京航空航天大学学报,2002,34(3):293-297.
- [5] 孙慧贤,张玉华,罗飞路.航空发动机机篦齿盘表面裂纹的视觉检测[J].光学精密工程,2009,17(5):1187-1195.
- [6] 丁鹏,李长有,马齐爽.基于小波的航空发动机叶片孔探损伤检测[J].北京航空航天大学学报,2006,32(12):435-438.
- [7] 罗云林,孟娇茹.基于小波变换和立体视觉的发动机内窥研究[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(4):573-576.
- [8] 周正干,赵胜,安振刚.航空发动机叶片实时成像自动检测技术研究[J].机械工程学报,2005,41(4):180-184.
- [9] 李双,王仲生.基于机器视觉的航空发动机转子裂纹故障识别系统[J].计算机测量控制,2009,17(4):631-639.
- [10] Chen Guo.3D measurement and stereo reconstruction for aeroengine interior damage[J].Chinese Journal of Aeronautics,2004,17(3):149-151.
- [11] 汤洋.基于 Internet 的民航发动机内部损伤评估与维修决策研究[D].南京:南京航空航天大学民航学院,2007.
- [12] Gonzalez R C, Woods R E.数字图像处理[M].3 版.阮秋琦,阮宇智,译.北京:电子工业出版社,2010.
- [13] 周德龙,潘泉,张洪才,等.最大熵阈值处理算法[J].软件学报,2001,12(9):1420-1422.
- [14] Brink A D, Pendock N E. Minimum cross-entropy threshold selection[J].Pattern Recognition,1996,29(1):179-188.
- [15] 孔令富,赵飞,赵逢达.腐蚀膨胀算法在足球机器人视觉系统中的应用[J].计算机工程与应用,2007,43(24):200-203.
- [16] 李大光.磨粒图像计算机识别分析方法研究与实现[D].武汉:武汉理工大学,2005.
- [17] 马鑫,魏鹏旭,岳康.裂缝图像识别与特征参数算法的研究[J].科技资讯,2011(11):47-48.