基于小波变换的孔探图像边缘粗糙度分析

李长有 马齐爽 姚红宇

（北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083） （中国民用航空总局 航空安全技术中心，北京 100028）

摘 要：针对航空发动机内部结构裂纹损伤的孔探图像识别问题，提出一种描述孔探图像边缘曲线粗糙度特征的方法——粗糙度系数法. 该方法利用二进小波变换对边缘曲线在所有可能尺度上进行小波分解，得到尺度系数和小波系数. 对于这些小波分解系数，构造一种对数熵算法来计算尺度系数和小波系数的能量强度. 小波系数与尺度系数的对数熵的比值被定义为粗糙度系数，用粗糙度系数来评估曲线的粗糙程度，粗糙度系数越大，曲线越粗糙. 实验表明以粗糙度系数作为孔探图像边缘曲线的识别特征，能够有效地识别孔探图像中存在的裂纹损伤.

关 键 词：航空发动机；图像处理；小波变换；模式识别

中图分类号：TP 391.41

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)06-0705-04

Analysis of coarseness of edges extracted from borescope images based on wavelet transform

Li Changyou Ma Qishuang

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Yao Hongyu

(Center of Aviation Safety Technology, General Administration of Civil Aviation of China, Beijing 100028, China)

Abstract: To recognize whether there existed crack damages in the inner structure of aircraft engine based on the borescope images, a method (that was called coarseness factor) was presented to describe the coarseness of edge curves extracted from the borescope images. The method first decomposed an edge curve into the scale coefficients and wavelet coefficients using dynastic wavelet transform at all of the possible scales. For the coefficients of the wavelet transform, the logarithm entropy was presented to calculate the respective strength of the scale coefficients and wavelet coefficients. And the ratio of the logarithm entropies of the wavelet coefficients and ones of the scale coefficients was defined as coarseness factor. Using the coarseness factor to estimate the coarseness of a curve, the greater the coarseness factor is, the coarser the curve is. Experiments show that using the coarseness factor as recognition feature of borescope images, the crack damages of borescope images can be recognized successfully.

Key words: aircraft engine; image processing; wavelet transforms; pattern recognition

从直观的角度来看，在航空发动机内部无损伤结构部分对应的图像边缘是光滑的，而损伤部分对应的图像边缘是粗糙的，通过评估孔探图像边缘曲线的粗糙程度，就可以判定孔探图像是否蕴含损伤信息. 因而需要首先对孔探图像的边缘粗糙性进行研究，提取粗糙性特征，用于进一步的损伤识别. 为此目的，本文重点研究孔探图像边缘粗糙性特征的描述和提取方法.

收稿日期：2006-11-01

基金项目：中国民用航空总局航空安全与技术鉴定实验室开放基金资助项目(200603)

作者简介：李长有(1964—)，男，河南武陟人，博士生，lcy8639@sohu.com.

粗糙曲线之所以看上去粗糙，是由于组成曲线的点在局部范围内，在位置和方向上变化剧烈，包含很多的细节. 这样，通过评估包含在图像边缘中细节信息的量就可以判定边缘的粗糙程度. 应用多分辨分析能够将边缘分解为近似和细节部分. 去除细节的近似部分会变得类似于无损伤边缘一样光滑，而细节部分可以被单独评估. 小波变换是一个多分辨分析的有力工具，近几年来在信号分析[1-3]、图像处理[4-5]等方面都可以找到大量的应用. 为了研究方便，本文首先专门绘制一些典型的光滑曲线和粗糙曲线，粗糙曲线是通过修改光滑曲线的局部特性同时保持它们的总体轮廓不变而获得[6]. 以这些曲线为研究对象，应用二进小波变换将这些典型曲线分解为近似和细节部分，提出一种对数熵来评估细节的能量强度，定义一种粗糙度系数来描述细节的相对能量强度.

1 粗糙度系数计算

1.1 二进小波变换

为了直观地观察和比较各尺度下的小波变换，本文应用二进小波变换而不是离散小波变换. 二进小波变换只对尺度因子进行离散而对平移因子仍保持连续，这样，各尺度下的小波变换都能保持与原始信号有相同的长度.

假定尺度函数与小波 $\phi,\psi,\tilde{\phi},\tilde{\psi}$ 由滤波器 h，$g,\tilde{h},\tilde{g}$ 设计，$\bar{h},\bar{g}$ 表示 h,g 的共轭反转，ϕ,ψ 用于信号分解，$\tilde{\phi},\tilde{\psi}$ 用于信号重构. 设原始输入信号为一能量有限的离散采样序列 $a_0[n]$，则总可以将该离散信号模拟化. $a_0[n]$可以写为函数 $f(t)$ 与尺度核 $\phi(t-n)$的加权平均：

$$a_0[n]=\langle f(t),\phi(t-n)\rangle=\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\phi(t-n)\mathrm{d}t \tag{1}$$

对于任何 $j\geqslant 0$，记

$$a_j[n]=\langle f(t),\phi_{2^j}(t-n)\rangle \tag{2}$$

其中 $$\phi_{2^j}(t)=\frac{1}{\sqrt{2^j}}\phi\left(\frac{t}{2^j}\right)$$

对于 $j>0$ 的整数，二进小波系数计算如下：

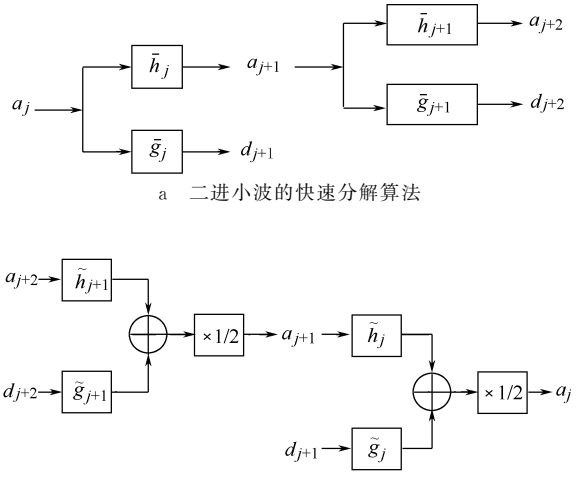
$$d_j[n]=Wf(2^j,n)=\langle f(t),\psi_{2^j}(t-n)\rangle \tag{3}$$

二进小波变换的快速分解和重构算法可以采用滤波器组计算，对于任意的 $j\geqslant 0$，有

$$\left.\begin{aligned}a_{j+1}[n]&=a_j*\bar{h}_j[n]\\ d_{j+1}[n]&=a_j*\bar{g}_j[n]\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

$$a_j=\frac{1}{2}(a_{j+1}*\tilde{h}_j+d_{j+1}*\tilde{g}_j) \tag{5}$$

滤波器组算法的计算过程如图 1 所示. 若输入信号 $a_0[n]$为长度 N 的有限样本值，则最大尺度 2^J 限制为 N，且 $J=\log_2 N$.



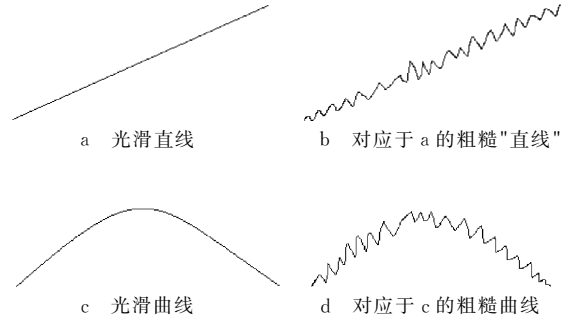
a 二进小波的快速分解算法

b 二进小波的快速重构算法

图 1 二进小波分解重构的滤波器组算法

1.2 样本曲线准备

为了获取粗糙曲线与光滑曲线的差异，找出粗糙曲线特征的有效表达方法，采用对比研究的方法. 为此首先专门绘制一些典型的光滑曲线，如水平直线、垂直线、斜直线、圆弧线和样条曲线等，然后对这些光滑曲线进行修改，使之人为变得粗糙从而得到对应的粗糙曲线. 修改的方法是，只改变光滑曲线的局部特性同时保持它们的总体轮廓不变. 如图 2 所示，给出了两组对应的光滑和粗糙曲线：斜直线和弧线. 这样对应的光滑曲线与粗糙曲线在研究中具有直观的对比性.



a 光滑直线 b 对应于 a 的粗糙"直线"

c 光滑曲线 d 对应于 c 的粗糙曲线

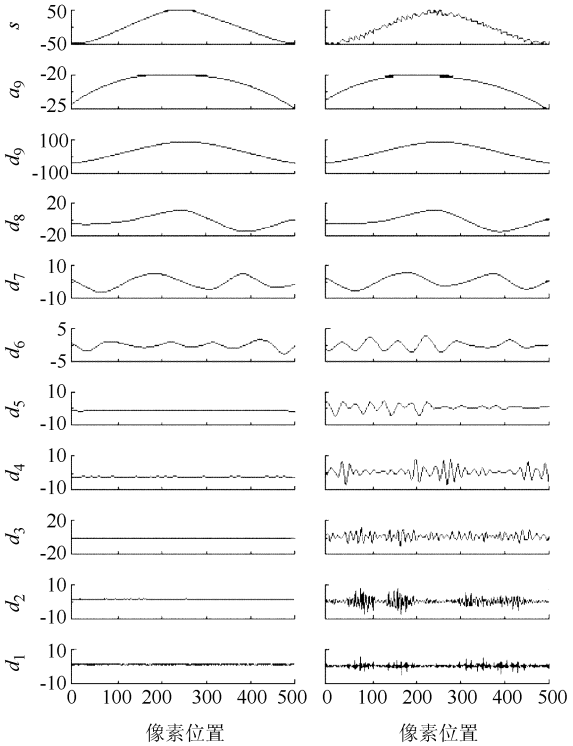
图 2 样本曲线

1.3 样本曲线的二进小波分解

针对样本曲线，选用二次样条小波[7]在各尺度下进行二进小波分解，其中图 2 光滑曲线与粗糙曲线在各尺度下的二进小波分解如图 3 所示. 通过比较粗糙曲线与光滑曲线各尺度小波系数曲线，可以看出：对应最大尺度 a_9 的近似部分非常相似；对于细节部分，靠近最大尺度的小波系数也比较相似，随着尺度逐渐减小差别逐渐增大，如

$d_9 \sim d_6$ 层所示;靠近最小尺度的 $d_1 \sim d_5$ 层,两者差别很大,光滑曲线的小波系数在小尺度下几乎是直线,而粗糙曲线在小尺度下振荡很大.由此得出如下结论:轮廓相同的曲线,它们的小波分解在近似部分几乎是相同的,其差异主要表现在小波分解的小尺度部分.

研究的下一步就是要构造一个计算式,通过计算能够把这种差别量化,而且量化值足够把这种差别明显地表达出来,用这个量化值能够表达不同曲线的粗糙程度.



a　光滑曲线的小波分解　　b　粗糙曲线的小波分解

图 3　信号的小波分解

1.4　粗糙度系数计算

由于小波系数在零值周围上下波动有正有负,首先考虑用细节部分的能量大小来直接表达细节信号的强弱.针对图 3 通过计算可知,尽管粗糙曲线与光滑曲线的小波系数在较小尺度部分差别很大,但这部分能量占细节部分的总能量比例很小,由于光滑和粗糙曲线的总轮廓相同,细节部分的总能量差别不大,直接用细节信号的能量表达不能明显地反映二者的差别.为此将能量取对数,借以压缩能量较大的相似部分,拉大能量较小的差别部分,这种表达方式通常称为对数熵[8].细节部分的对数熵定义如下:

$$E_{\mathrm{d}} = \sum_{j} \sum_{n} \log \mid d_j[n] \mid^2 \qquad (6)$$

其中,$j=1, 2, \cdots, J-1$;$n=0, 1, 2, \cdots, 2^J-1$,$J=\log_2 N$.

经过这样计算的 E_{d},对于图 3 所示两种曲线的小波分解的细节信号有了明显区别,曲线越粗糙,E_{d} 值越大.

由于图 2d 是在保持曲线图 2c 的总体轮廓的基础上改变局部特性而获得,两曲线具有相同的总体轮廓,二者的总体能量相近,因此二者的 E_{d} 具有可比性.当两个曲线的总体尺寸不同,轮廓不同,基本能量差别很大时,仅从 E_{d} 的大小就不再能够判断曲线的粗糙程度.为此必须考虑曲线的近似部分的能量,也就是基本能量的大小,综合比较才能判断曲线的粗糙程度.定义近似部分的对数熵为

$$E_{\mathrm{a}} = \sum_{n} \log \mid a_J[n] \mid^2 \qquad (7)$$

其中,$n=0, 1, 2, \cdots, 2^J-1$,$J=\log_2 N$.

同时定义粗糙度系数为

$$K = \frac{\mid E_{\mathrm{d}} \mid}{\mid E_{\mathrm{a}} \mid} \qquad (8)$$

这样,K 就表达了在曲线中细节部分能量相对近似部分能量的大小,K 值越大,表明曲线中细节能量越大,曲线就越粗糙.

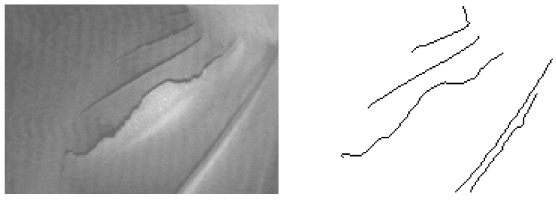
2　实　验

针对图 2 给定的两组对照曲线,首先应用式(4)计算尺度系数和小波系数,对小波分解系数应用式(6)～式(8),计算出 K,其结果是:$K_{\mathrm{a}}=0.0907$;$K_{\mathrm{b}}=2.6869$;$K_{\mathrm{c}}=0.1423$;$K_{\mathrm{d}}=2.5726$.对照图 2 可以看出,曲线越粗糙,K 值越大,粗糙曲线与光滑曲线对应的 K 值具有明显的差异,利用 K 值可以将不同粗糙程度的曲线区别开来.

如图 4 所示,是一幅包含裂纹类损伤信息的孔探图像及其边缘图像.由孔探图像可以看出,中间叶片产生了掉块损伤,形成粗糙的边缘,从对应的边缘图像中可以更明显看出来.

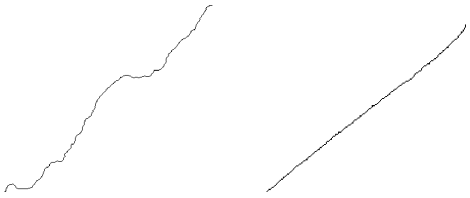
由边缘图像中提取出中间粗糙的曲线和紧邻其上的光滑曲线,如图 5 所示.经计算,这两条实际边缘曲线的 K 值分别为:$K_{\mathrm{a}}=2.6199$;$K_{\mathrm{b}}=1.3954$.

由多幅孔探图像中提取出损伤边缘和无损结



a　原始图像　　b　对应的边缘图像

图 4　包含损伤的孔探图像



a 损伤边缘曲线 b 无损边缘曲线

图5 由图4中提取的两条曲线

构边缘曲线共计10条,其数据长度(像素)及K值如表1所示.由表1数据可知,损伤边缘的K值大于2.2,无损边缘的K值小于1.5,二者数据区域有明显的差异.选取适当的阈值T,例如$T=1.8$,利用式(9)可以将损伤正确地识别出来.

$$\left.\begin{aligned} K > T(\text{损伤}) \\ K < T(\text{无损}) \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

表1 实际边缘曲线的实验结果

曲线序号	数据长度	K值	实际损伤状况
1	340	2.765 1	损伤
2	290	2.240 6	损伤
3	370	2.350 2	损伤
4	298	2.619 9	损伤
5	306	1.247 1	无损
6	106	0.423 2	无损
7	390	1.373 9	无损
8	260	1.212 8	无损
9	286	0.583 5	无损
10	259	0.970 1	无损

3 结 论

应用二进小波变换,对边缘曲线进行多分辨分析,将边缘曲线分解为近似部分和细节部分,通过对各尺度小波系数的比较,可以知道相同轮廓的粗糙曲线与光滑曲线的差异主要表现在几个小尺度的细节上.通过定义对数熵计算近似和细节部分的能量强度,在对数熵的基础上定义的粗糙度系数,可以有效地描述边缘曲线的粗糙程度,粗糙度系数越大,边缘曲线越粗糙.用粗糙度系数作为边缘曲线的粗糙度特征,通过对孔探图像的识别,可以判断航空发动机内部结构是否存在裂纹类损伤.

参考文献(References)

[1] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(3): 617-643

[2] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693

[3] 毛峡,孟庆宇. 基于小波变换和神经网络的脑电信号分类方法[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(10):1140-1144
Mao Xia, Meng Qingyu. Method of EEG signals classification based on wavelet transform and neural networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(10): 1140-1144(in Chinese)

[4] Iano Y, Da Silva F S, Cruz A L M. A fast and efficient hybrid fractal-wavelet image coder[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(1): 98-105

[5] Chappelier V, Guillemot C. Oriented wavelet transform for image compression and de-noising [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(10): 2892-2903

[6] Frinkelstein A, Salesin D H. Multiresolution curves[J]. Computer Graphics, 1994, 28(3):261-268

[7] Mallat S. A wavelet tour of signal processing[M]. Second edition. Beijing: China Machine Press, 2003

[8] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005
Sun Yankui. Wavelet analysis and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)