

三维漏磁场的钢丝绳局部损伤定量分析算法研究

曹印妮¹, 张东来¹, 徐殿国²

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 本文采用均匀密布于钢丝绳圆周上的霍尔传感器阵列, 捕获钢丝绳表面三维的径向漏磁信息, 设计了参数自适应的空间陷波滤波器消除了股波信号, 再将缺陷信号转化为灰度图, 运用二维图像处理的方法进行特征提取和损伤识别。实验结果表明, 该方法可较好地地区分断丝的数量及断丝断口的宽度, 区分局部损伤的周向分布, 如集中断丝和分散断丝。

关键词: 钢丝绳; 局部损伤; 定量检测; 霍尔传感器

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1170-04

Study on Algorithms of Wire Rope Localized Flaw Quantitative Analysis Based on Three-Dimensional Magnetic Flux Leakage

CAO Yin-ni¹, ZHANG Dong-lai¹, XU Dian-guo²

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

2. Electrical Engineering and Automation School, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Three-dimensional radial magnetic flux leakage information around wire rope surface is acquired by Hall sensor array annularly distributed around the rope. An adaptive spatial notch filter is designed to eliminate the strand-waveform noise. Then the filtered signal is normalized and transformed to a gray-scale map. An image recognition algorithm is introduced to extract features from the gray-scale map and distinguish among several typical localized flaws. The results show the method can identify the degree and width of a defect, distinguish the circumferential distribution of defects, e. g. concentrated or dispersive breaks.

Key words: wire rope; localized flaw; quantitative testing; Hall sensor array

1 引言

钢丝绳在矿山、冶金、航运、旅游和建筑等诸多行业得到广泛应用, 在役钢丝绳的破损会危及人身和设备安全, 因此研究钢丝绳无损探伤方法、评估在役钢丝绳的状态具有十分重要的意义。目前电磁法是技术最成熟、应用最广泛的钢丝绳无损检测法, 以主磁通法对截面损失 (Loss of Metallic Area) 的定量检测已基本实现^[1]; 对局部损伤 (Localized Flaw), 现有的探伤设备大多只给出钢丝绳表面周向综合的漏磁信息沿轴向的分布, 通过分析该信号, 如频谱分析^[2], 并结合资深者的经验定性判别损伤。这种基于一维信号的探伤方法丢失了缺陷周向信息, 难以满足局部损伤定量检测的需求。文献[3]和[4]分别采用分布在钢丝绳圆周上的多通道霍尔传感器和磁通门传感器检测损伤, 对缺陷具有一定的周向分辨力, 但损伤的识别和定位通过分析各通道的一维信号并综合各分析结果获得, 未能真正摆脱一维信号的处理方

式。

本文采用均匀密布于钢丝绳周向上的高灵敏度霍尔传感器阵列, 捕获钢丝绳表面轴向、周向和径向三维的漏磁信息, 设计自适应的空间陷波滤波器消除了股波分量, 将滤波后的信号转化为灰度图并引入二维图像识别的算法区分缺陷。实验结果表明, 该方法可较好地地区分断丝数量和断口的宽度, 可分辨损伤的周向分布, 如集中断丝和分散断丝。

2 钢丝绳信号的自适应空间陷波滤波算法

2.1 空间陷波滤波器的设计

本文采用图1所示的电磁检测探头及传感器, 它主要由永磁励磁机构和一对半环形的霍尔传感器阵列组成 (用于直径在 30 ~ 40mm 之间的钢丝绳, 包含 30 个通道的霍尔元件, 霍尔元件置于探头轴向的中心), 用该探头测得的钢丝绳信号如图3(a)和(b)所示。可见原始信号中包含较强的股波, 对缺陷分析不利, 必须将其滤

除^[3]. 常见的滤波法有两种,一种是机械滤波法,即采用间隔为钢丝绳一个股间距的两套传感器,取其差分消除股波,这种方法的传感器结构较复杂,且对不同结构的钢丝绳需调节传感器间距;另一种方法为数字滤波法,通过频谱分析消除股波,本文采用后者.

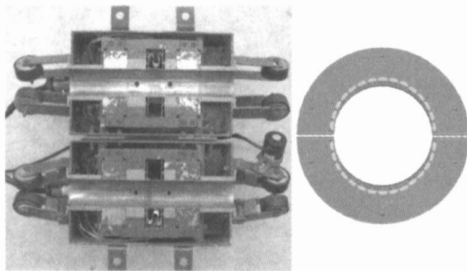


图1 电磁检测探头及环形霍尔传感器阵列

结构一定的钢丝绳,其股波在轴向上表现为频率稳定的正弦波,因此理论上对每个通道的输出进行陷波滤波即可消除股波.设股波在空间上的频率为 f_0 ,采样周期为 T_s ,一个周期的采样点数为 N_p ,根据零极点法设计陷波滤波器 $H(z)$ ^[5,6]:

$$H(z) = \frac{1 - 2\cos \omega_0 z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2\cos \omega_0 z^{-1} + z^{-2}} \quad (1)$$

式中 $\omega_0 = 2\pi f_0 T_s$ 为陷波频点,也即 f_0 对应的数字角频率; $0 < \cos \omega_0 < 1$,决定滤波器陷波带宽,越大,陷波带宽越小.由于钢丝绳采样中存在较多干扰,获取的信号并不能保证频率处处一致,因此不宜取太大.

2.2 滤波参数的自适应搜索算法

由 $T_s = 1/(f_0 \times N_p)$,得 $\omega_0 = 2\pi f_0 T_s = 2\pi/N_p$,可见陷波频点由 N_p 唯一确定.但采样中不同结构的钢丝绳 N_p 差异较大,且相同结构的钢丝绳 N_p 也不能处处保持一致.本文采用如下算法对任意结构钢丝绳自动搜索最佳的 N_p :

(1) 初始化,将股波频率设为固定值 f_c , N_p 赋初值 N_I ;

(2) 令 $T_s = 1/(f_c \times N_p)$,取第 $i(1 \leq i \leq 30)$ 个通道的信号 r_i ,求其频谱 $R_i(f) = \text{abs}(\text{fft}(r_i))$;

(3) 搜索 f_{mi} ,使 $R_i(f_{mi}) = \max(R_i(f))$;

(4) 判断 $\text{abs}(f_{mi} - f_c) < 0.1$ 是否为真,为真则进入步骤(5),否则,当 $f_{mi} > f_c$ 时令 $N_p = N_p - 1$;当 $f_{mi} < f_c$ 时令 $N_p = N_p + 1$,然后跳转至步骤(2),重复步骤(2)~(4);

其中, Δ 为修正量,取较大值时搜索速度快,但不易逼近精确值,很小时易逼近精确值,但搜索速度慢,因此可先采用二分法使 f_{mi} 快速逼近 f_c ,当 $\text{abs}(f_{mi} - f_c) < \Delta$ 时改用固定步长调整 N_p ;本文的实验取固定步长 $\Delta = 0.01$.

(5) 根据 T_s 的最终值对各通道信号 $r_j(j = 1, 2, \dots,$

30),计算 $R_j(f) = \text{abs}(\text{fft}(r_j))$,求 f_{mj} ,使 $R_j(f_{mj}) = \max(R_j(f))$,若 f_{mj} 一致趋于 f_c 则 N_p 得到了较准确的逼近.

设 $f_c = 50\text{Hz}$,取 $N_I = 50$,对一组包含三处断丝的钢丝绳数据进行以上处理,得到各通道信号的频谱如图2所示,可见在钢丝绳结构未知的情况下该算法能准确求出 N_p ,进而获得陷波频点 ω_0 .

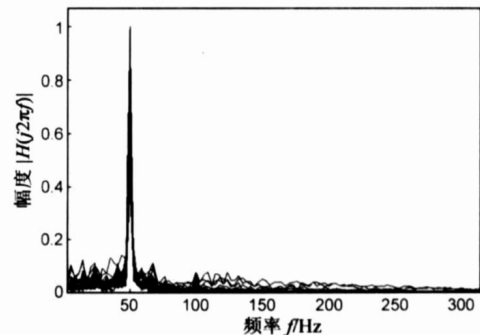


图2 各通道传感器信号的频谱

2.3 空间陷波滤波实验分析

分别取3根集中断丝和3根分散断丝的钢丝绳数据(分别如图3(a)和(b)所示),按上述算法对其各通道的信号进行滤波,当 $\Delta = 0.8$ 时,滤波结果分别如图3(c)和(d)所示.3根分散断丝的钢丝绳数据滤波前后的等高线分别如图4(a)和(b)所示.

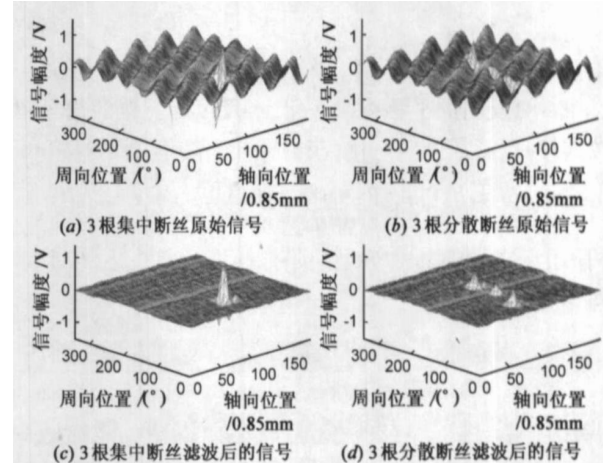


图3 3根集中断丝和分散断丝信号的滤波效果

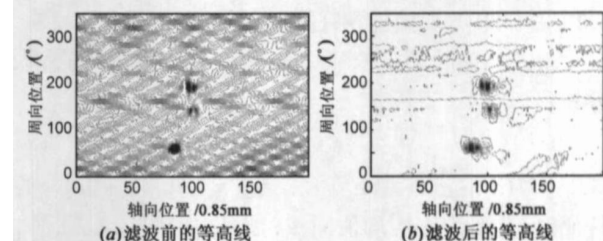


图4 3根分散断丝信号滤波前后的等高线

可见这种自适应的空间陷波滤波算法较好地消除了三维漏磁场中的股波噪声,缺陷信号得到凸显,从滤波后的信号中即可直观地区分集中断丝和分散断丝.

3 缺陷信号的特征提取及缺陷形态分类

将滤波后的钢丝绳信号转化为灰度图,则可借鉴图像处理的方法对其进行特征提取和缺陷形态分类,该方法分三个步骤:缺陷数据的获取及归一化、基于 K-L 变换的特征提取、神经网络训练及缺陷分类。

3.1 缺陷数据的获取及归一化处理

首先制作 6 种典型缺陷标样:断口为小缝隙(gap)的 1 根断丝,断口宽度分别为 3mm 和 12mm 的 1 根断丝,断口为 gap 的 2 根集中断丝和 3 根集中断丝,以及翘丝。对各种缺陷采集多组数据,按第 2 节的算法对每组数据滤波,滤波后的信号用 u 表示。设存在缺陷的区域在信号中占据的最大尺寸不超过 $(2x+1) \times (2y+1)$,则信号的尺寸归一化算法如下:

(1) 搜索 u 的局部极大值坐标 (x_c, y_c) , 其中 x_c 和 y_c 分别为信号轴向和周向的坐标;

(2) 尺度归一化信号 $d = \{u(x, y) | x \in [x_c - x, x_c + x], y \in [y_c - y, y_c + y]\}$;

设 u 的周向坐标范围为 $[0, Y]$, 若 $y_c - y < 0$, 则需先做如下平移:

$$\begin{cases} u(x, y + y - y_c) = u(x, y), 0 \leq y - y_c < y \\ u(x, i - 1) = u(x, Y + y_c - y + i), i = 1, 2, \dots, y - y_c \end{cases} \quad (2)$$

再按(1)、(2)进行归一化,若 $y_c + y > Y$,需做与 $y_c - y < 0$ 时反向的平移再归一化。对尺度归一化的信号 d 按式(3)进行灰度归一化,获得标准缺陷信号 g :

$$g(x, y) = \frac{d(x, y) - \min(d)}{\max(d) - \min(d)} \times 255 \quad (3)$$

利用上述算法对 6 种典型缺陷标样进行归一化,结果如图 5 所示。

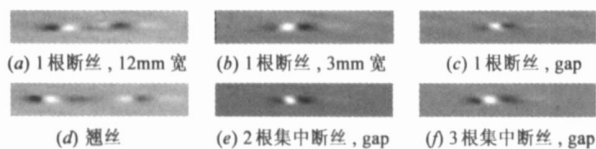


图 5 6 种典型缺陷标样信号的归一化结果

3.2 基于 K-L 变换的特征提取

将归一化的缺陷信号 g 用向量 x 表示,进行如下变换:

$$x = \frac{1}{\sqrt{N}} y \quad (4)$$

式中 y 为 x 的协方差矩阵 $C = E[(x - \mu)(x - \mu)^T]$ 的特征向量, μ 为 x 的均值向量; $\Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N]$, $\Lambda = \text{eig}(C)$; 当 μ 无实际意义时 C 可简化为 $C = E[xx^T]$ 。这样 x 各分量之间的相关性被解除,舍弃特征值极小的特征向量可降低特征空间的维数。

设缺陷信号总数为 N ,各信号特征提取算法如下:

(1) 取归一化的缺陷数据 $x_m \times n$, $C = x_m \times n x_m \times n^T / N$, $m \times 1 = \text{eig}(C)$, $m \times 1$ 按降序排列;

(2) 求整数 k , 使 $\frac{j-1}{m} < \frac{j}{m}$, 保留 $k \times 1$ 作为特征值

向量,每一组数据取相同的 k ;

重复(1)和(2)的过程,获得其他缺陷数据的特征。

用 K-L 变换提取特征的优势在于,保留信号最重要的特征并舍弃了大多数次要特征,对其后的神经网络可降低网络的复杂度、增加网络运算能力。信号中的噪声一般归于较小的特征量,舍弃这些特征会增加网络的泛化能力。本文对每组归一化的数据 g 进行 K-L 变换获得 10 个特征量 10×1 , 对于 3.3 的实验,当 $k = 4$ 时神经网络的识别率最高,而 k 增大时,网络性能反而变差。

3.3 基于 BP 网络的典型缺陷分类

根据 3.2,缺陷数据经 K-L 变换取 4 个特征量作为神经网络的输入,要区分的缺陷有 6 类,且三层的前向网络已能以任意精度逼近任意的非线性函数^[7],因此建立 $4 \times 4 \times 6$ 的 BP 网络,层与层之间的传函均取对数 sigmoid 函数。从每一类缺陷的特征中各抽取 t_1 个作为网络训练样本,剩余的 t_2 个作为检验样本。目标向量采用 0、1 编码,但因对数 sigmoid 函数 $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ 对有限权值不能输出 0 和 1,因此,目标向量中的 0 和 1 分别用 0.1 和 0.9 来代替^[8]。文献[9]采用先采样训练、后完整训练的策略在人脸识别的实验中获得了较高的准确度^[9],因此设计如下算法:

(1) 采样训练,抽取每一类缺陷训练样本中的第一个组成 P_1 ,对网络进行一次训练;

(2) 完整训练,将每一类缺陷其余的训练样本组成 P_2 ,对网络进行二次训练;

(3) 将各类缺陷的检验样本输入网络,检验其性能。

本实验从每一类缺陷样本中取 5 个样本、共 30 个检验样本输入神经网络,结果有一个样本被误判,网络的识别率为 96.7%。将该网络用于钢丝绳损伤的识别,对参加训练的 6 类损伤识别率为 91%。

这一结果表明,以上算法:可以区分数量不同的集中断丝,可以识别断口宽度不同的断丝,可以区分翘丝和断丝;在一定程度上实现了局部损伤的定量识别。

4 结论

相对于传统的一维信号处理方法,本文采用二维

获取的二维漏磁信号方法为局部损伤的定量识别提供了更全面的缺陷信息,采用基于图像处理的损伤识别方法为钢丝绳定量无损检测提供了新的思路.针对钢丝绳信号的特点提出的自适应的空间陷波滤波算法,对不同结构的钢丝绳可自动调节滤波参数,较好地消除股波信号.基于 K-L 变换的特征提取保留了信号最重要的特征,同时舍弃大多数较小的特征,既降低了网络的复杂度,提高了运算的实时性,又提高了神经网络的泛化能力.实践表明,本文的识别算法对文中 6 种典型局部损伤的识别率可达 91%,因此该算法在一定程度上实现了典型局部损伤的定量识别,为更深入的局部损伤定量分析提供了参考.后续的研究应包括缺陷深度的定量分析,以及其他类型的局部损伤如锈蚀、表面磨损等的定量识别.

参考文献:

- [1] The University of Reading. Wire Rope Non-Destructive Testing-Survey of Instrument Manufacturers [R]. London: Health and Safety Executive, Offshore Technology Report-OTO 2000 064, 2000.
- [2] 张东来,徐殿国,王炎. 钢丝绳断丝信号的空间域划分及在小波变换下的频域特征提取[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 59 - 62.
Zhang Dong-lai, Xu Dian-guo, Wang Yan. Demarcation in space domain for local flaw signals of wire ropes and feature extraction in frequency domain based on wavelet transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7): 59 - 62. (in Chinese)
- [3] 杨叔子,康宜华. 钢丝绳断丝定量检测原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1995. 86, 149 - 151.
Yang Shu-zi, Kang Yi-hua. Quantitative Inspection for Broken Wires of Wire Ropes Principle and Technique [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. 86, 149 - 151. (in Chinese)
- [4] 窦毓棠. 高灵敏磁传感器钢丝绳无损探伤仪[P]. 中国专利: ZL94209290. 2, 1995-03-01.
Dou Yu-tang. High Sensitive Magnetic Sensor Wire Rope Tester [P]. Chinese Patent: ZL94209290. 2, 1995-03-01. (in Chinese)
- [5] Chi-Tsong Chen. 数字信号处理频谱计算与滤波器设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2002. 273 - 275.
Chi-Tsong Chen. Digital Signal Processing Spectral Computa-
- tion and Filter Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 273 - 275. (in Chinese)
- [6] T S Ng. Some aspects of an adaptive digital notch filter with constrained poles and zeros [J]. IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing, 1987, 35(2): 158 - 161.
- [7] Robert Hecht-Nielsen. Theory of back propagation neural networks [A]. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks [C]. Washington: IEEE, 1989. 593 - 605.
- [8] Tom M. Mitchell. 机器学习 [M]. 曾华军, 张银奎等译. 北京:机械工业出版社, 2003. 82 - 85.
- [9] 甘俊英, 张有为. 基于 BP 神经网络的图像处理 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(1): 113 - 115.
Gan Jun-ying, Zhang You-wei. Face recognition based on BP neural network [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(1): 113 - 115. (in Chinese)

作者简介:



曹印妮 女, 1979 年生于陕西, 2003 年获哈尔滨工业大学电力电子与电力传动专业硕士学位, 现为哈尔滨工业大学深圳研究生院电力电子与电力传动专业博士研究生. 主要研究方向: 钢丝绳无损检测、信号处理.
E-mail: cyn09876 @163. com



张东来 男, 1973 年 1 月出生于吉林, 2002 年哈尔滨工业大学电气工程学科博士后出站, 现任哈尔滨工业大学深圳研究生院电力电子与电力传动专业教授、博士生导师, 研究领域为: 电力电子与电力传动、无损检测、数字信号处理、网络信息家电、机器人控制. 2000 年和 2006 年分别获黑龙江省教育厅科技进步一等奖, 2001 年获黑龙江省科技进步二等奖, 2003 年深圳市科技进步二等奖.



徐殿国 男, 1960 年 10 月出生, 博士, 教授, 博士生导师, 现任哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院院长, 研究领域为: 伺服电机及驱动控制、电力电子与电力传动、机器人控制、无损检测. 研究成果获国家科技进步三等奖 1 项, 省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 6 项.