

含镍腐蚀噪声的铜-镍合金热交换管涡流检测 信号处理方法

田淑侠^{1,2}, 陈振茂¹

(1. 机械结构强度与振动国家重点实验室(西安交通大学) 西安 710049; 2. 郑州轻工业学院机电工程学院 郑州 450002)

摘要 基于理论分析和实验研究, 提出和验证了一种针对铜镍合金管脱镍腐蚀区域涡流检测信号的自动处理方法。首先, 通过数值分析, 研究了换热管内壁脱镍腐蚀和管内外壁裂纹导致的涡流检测信号的差异, 发现腐蚀噪声与裂纹信号的相位和波形具有不同特点, 但单一信号特征量无法独立判定检测信号中的缺陷信息。基于信号相位和波形特征, 提出了一种基于分段特征相位变换和模式匹配识别的涡流检测裂纹信息判定方法。作为验证实验, 利用实际核电站老化换热管制作了含不同大小人工裂纹和疲劳裂纹的脱镍腐蚀换热管裂纹试件, 进行了涡流检测并对检测信号利用本文方法进行了识别处理。实验结果表明本方法可有效从混合信号中识别和抽取裂纹信息, 可有效用于实际铜镍合金换热管脱镍腐蚀区域的裂纹检测。

关键词: 热交换管 涡流检测 腐蚀噪声 人工裂纹 相位变换

中图分类号: TM154

Data Processing of Corrosion Noise Polluted ECT Signals for Heat Exchanging Tubes of Cu-Ni Alloy

Tian Shuxia^{1,2}, Chen Zhenmao¹

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049 China; 2. Zhengzhou University of Light Industry Zhengzhou 450002 China)

Abstract Based on numerical analyses and experiments, a scheme for automatic processing of eddy current testing (ECT) signals of a Cu-Ni alloy heat exchanging tube including large Ni corrosion noises is proposed and verified in this paper. Through numerical simulation, the features of the Ni corrosion noise are evaluated, and it is found that its major difference with that of crack signal is on the phases and the waveforms characteristics, and it is difficult to identify crack information from the polluted testing signals with conventional signal processing method. Based on this knowledge, a piecewise phase transformation algorithm and a pattern matching technique are proposed to extract the crack information from the noise polluted ECT signals. As validation experiments, test-pieces of tube segments taken from an aged practical heat exchanger are fabricated, and the proposed signal processing method is adopted for the measured ECT signals. The experimental results shown that the proposed signal processing method can identify and extract the crack information effectively from the testing signals with large Ni corrosion noises, and the proposed method is suitable for practical

国家自然科学基金(51277139、11321062、51577139和11502239), 国家磁约束核聚变(2013GB113005)和郑州轻工业学院2014年博士基金(2014BSJJ001)资助项目。

收稿日期 2013-11-13 改稿日期 2014-01-03

application to inspection of aged Cu-Ni alloy tubes.

Keywords: Heat exchanging tube, eddy current testing, corrosion noise, artificial crack, phase transform algorithm

0 引言

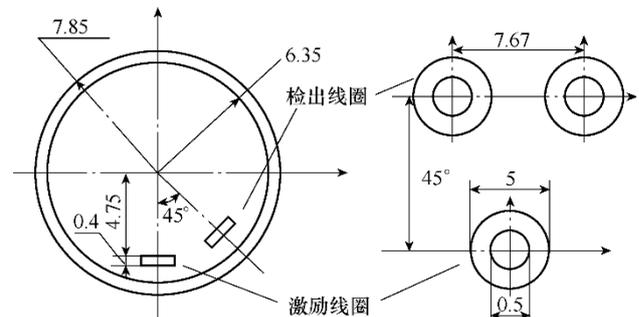
铜镍合金管广泛应用于诸如压水堆核电站加热器等各种热交换器中。为保证换热管安全,需要对其进行涡流检测(Eddy Current Testing, ECT),以防止缺陷贯通导致冷却剂外泄。长期处于热水环境时,铜镍合金换热管内壁的镍元素会融入水中,使管内壁镍元素缺乏而形成腐蚀层。尽管脱镍腐蚀层的厚度一般不大,本身不会对换热管安全造成损害,但对此类管道在役涡流检测信号干扰很大。部分腐蚀噪声信号甚至大大超过许容内面裂纹的涡流检测信号,使常规 ECT 技术无法有效发现裂纹^[1-6],对热交换器甚至核电站的安全造成了威胁。

为解决这一问题,本文就镍腐蚀造成的涡流信号(脱镍噪声)的信号特征进行了数值模拟和实验研究,提出了从混合信号中抽取裂纹信息的信号处理方法。首先,利用退化向量位涡流检测数值模拟程序对裂纹信号和脱镍腐蚀噪声信号进行了数值模拟,对两者的差异进行了详细对比分析。根据噪声信号和裂纹信号的相位和波形特征,提出了利用分段相位优化法分离裂纹信号和基于模式匹配识别裂纹特征信息的信号处理方法。为验证所提方法对实际检测的有效性,本研究利用实际核电站使用过的老化热交换管分别制作了含深度为管壁厚30%、40%和50%的电火花人工裂纹和周向外面疲劳裂纹的直管试件,利用实际涡流检测中广泛使用的 Cecco5 涡流阵列探头进行了检测,对测得信号利用本文所提处理方法进行了信号处理。实验和分析结果表明,本文方法能够从严重脱镍区域的涡流检测信号中有效识别深度超过30%管壁厚度的外面裂纹,可以满足实际检测信号处理需求。

1 基于数值仿真的数据处理方法可行性分析

为表明脱镍腐蚀噪声与裂纹缺陷涡流检测信号的特征,本研究首先对脱镍腐蚀区域和裂纹区域的涡流检测问题进行了建模,采用基于退化向量位(Ar)方法和棱边有限元的涡流检测数值程序对其

涡流检测信号进行了数值计算^[7-9]。本研究组开发的 Ar 法程序已通过标准问题计算等确认了其对涡流检测问题的计算准确度和有效性^[10,11]。针对核电站加热器换热管的涡流检测问题,所提数值计算模型和探头布置如图 1 所示。涡流检测传感器采用由一个励磁线圈和两个差动检出线圈构成的 Cecco5 探头,具体尺寸如图 1 所示。作为数值计算模型,内、外面裂纹用宽度为 0.2mm 的电火花加工刻痕来模拟,而腐蚀区域则由局部电导率较小的内面矩形薄层区域等效。基于显微镜观察腐蚀层深度,数值模拟中矩形区域的厚度设定为 60 μm 。



(a) Cecco5 涡流检测探头结构和尺寸(单位: mm)



(b) 数值计算模型(周向 1/4 管, 矩形镍腐蚀区域, 周轴向切槽)

图 1 换热管涡流检测数值模拟模型和探头布置

Fig.1 The numerical model of the tube and the probe system

为明确脱镍腐蚀区域的电导率特征,首先采用 4 点电位法分别对未经处理的老化换热管和酸洗后的换热管进行了电导率测量。结果发现两者没有明显差别,为此计算中老化母材的电导率仍可取为新铜-镍合金的电导率为 3.3MS/m。

为确定腐蚀区域的电导率,对腐蚀区域具有不同电导率(0, 0.1, 0.5, 1.5, 2.5) MS/m 时的涡流检测信号进行了计算,结果发现只有当电导率在 0.5MS/m 以下时,计算所得腐蚀区域信号才可以和实测信号相比。为此本次计算中腐蚀区域的电导率

均取为 0.5MS/m。

涡流检测实验同时发现管道内部腐蚀噪声比外部腐蚀噪声大得多，可见脱镍腐蚀主要发生在换热管内面。为此，数值计算模型中，矩形腐蚀区域设定为居于换热管内面，而裂纹缺陷考虑内、外面和周向、轴向等各种情况。

为验证以上数值计算模型和计算程序的有效性，本文首先对酸洗后的加工有人工槽的换热管试件进行了数值计算和实验测量，其结果如图 2 所示。其中图 2a 为励磁频率为 20kHz 时 OD40%、OD60%、贯穿裂纹、ID40%和 ID60%裂纹涡流检测信号的数值计算结果，图 2b 为相应实验结果。由于涡流检测仪器的放大和相位调整参数不同，两者不能直接绝对比较，但两者的变化趋势十分相似。考虑到标定因素，可以得出计算模型和计算手段是合理和有效的结论。

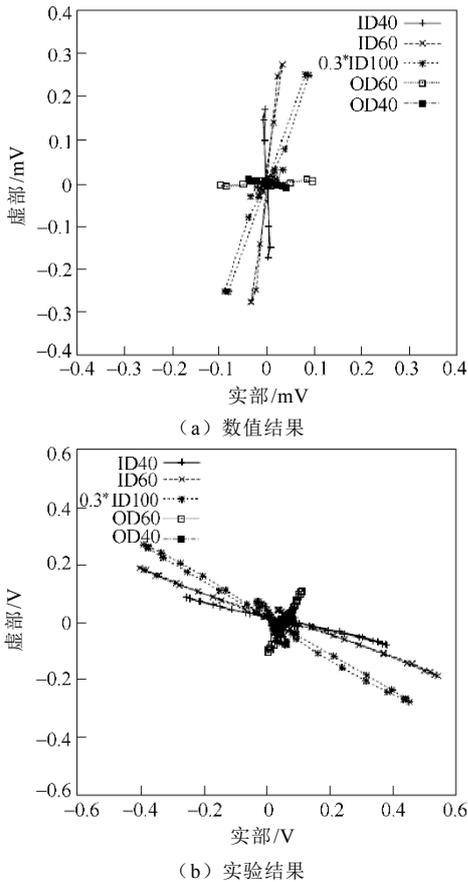


图 2 铜-镍合金管道数值模型和仿真方法有效性验证
Fig.2 Validation of the numerical code for the Cecco5 probe and the Cu-Ni tube

图 3 和图 4 分别是深度为管壁厚 60%，长 5mm 的管道外部周向槽和深度为管厚 60%外部轴向槽在

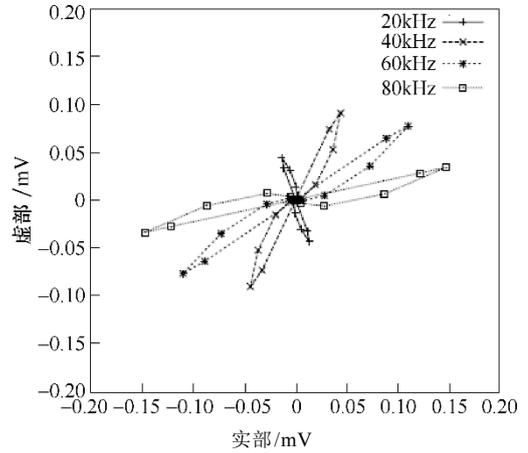


图 3 60%外面周向划痕数值结果 (宽 0.2mm, 长 5mm)

Fig.3 Numerical results for a circumferential OD 60% slit (0.2mm width, 5mm length)

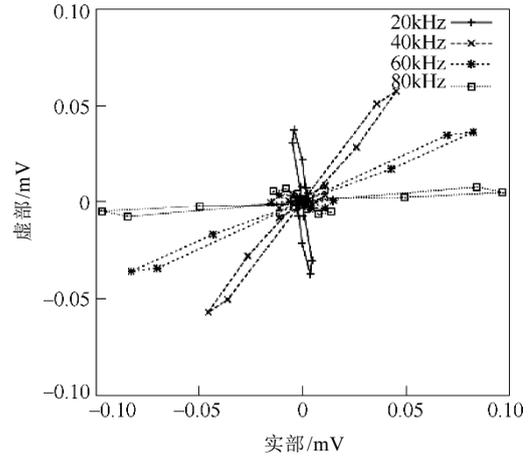


图 4 60%外面轴向划痕数值结果 (宽 0.2mm, 长 5mm)
Fig.4 Numerical results for an axial OD 60% slit (0.2mm width, 5mm length)

20kHz、40kHz、60kHz 和 80kHz 频率下的涡流检测信号计算结果。不难发现不同频率下信号相位变化很大。

图 5 和图 6 分别为 5mm 长、60μm 深和 2.5mm 长、60μm 深的管道内部腐蚀区域导致的涡流检测信号 (腐蚀噪声)，尽管腐蚀噪声信号的幅值约为 60%壁厚管道外部裂纹信号幅值的两倍，但不同频率的相位变化很小，根据腐蚀信号和外部划痕信号相位的不同来分辨两者是可行的。大量数值模拟结果表明，尽管不同腐蚀区域的信号的相位有所不同，但都有上述相似特性。这表明利用相位变换算法可能降低检测信号中的腐蚀噪声。

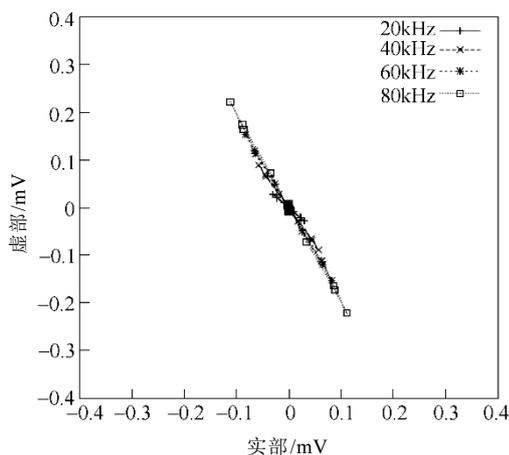


图 5 内部腐蚀区域数值结果 (长 5mm, 深 60µm)
Fig.5 Numerical results for an inner corrosion region (5mm side length, 60µm depth)

比较图 3、图 4 和图 2, 不难发现裂纹的深度和类型同样可导致信号幅值和相位变化, 但同一类型裂纹 (内面或外面) 的相位变化较频率变化导致的相位变化小的多。另外, 虽然内、外面裂纹信号相

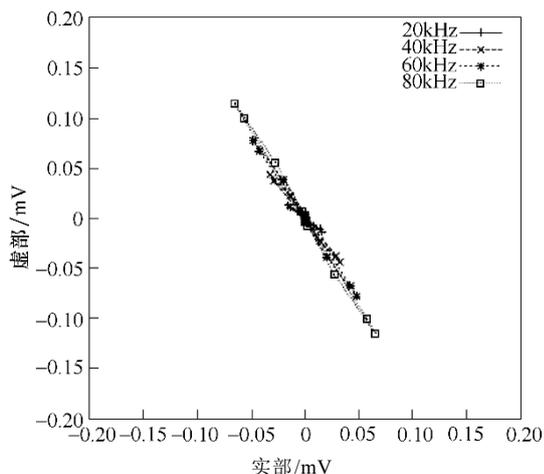


图 6 内部腐蚀区域数值结果 (长 2.5mm, 深 60µm)
Fig.6 Numerical results for an inner corrosion region (2.5mm side length, 60µm depth)

位变化很大, 由于实际应用中主要考虑外面裂纹的检测和识别 (内面裂纹信号比腐蚀噪声大很多, 不存在识别问题), 这种不同类型裂纹导致的大的相位变化不会影响利用相位变换算法进行噪声降低和缺陷识别。

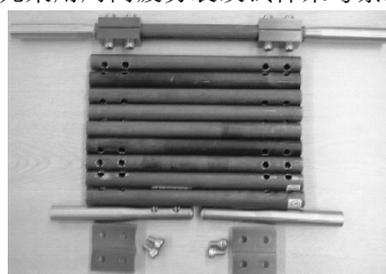
2 数据处理方法的实验验证

2.1 实验准备

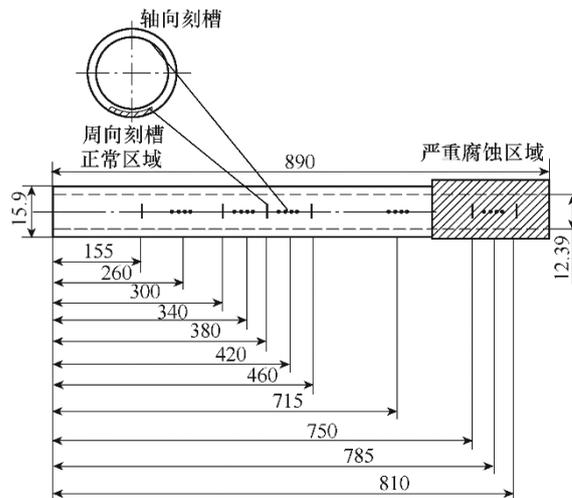
本文使用老化的核电热交换管加工了 10 个管段试件, 如图 7a 所示, 通过电火花加工和旋转疲劳实

验在这些试件中部导入了人工刻槽和人工疲劳裂纹。电火花加工刻槽试件设计参数, 如图 7b 所示, 图中管件的右侧具有严重腐蚀而其他部位进行了洗净处理腐蚀不显著。在管道有腐蚀噪声区域和正常区域都加工了电火花刻槽 (轴向和周向), 两种刻槽在圆周上相距 180° 布置。刻槽深度分别为管壁厚的 30%、40%和 50%。本文将以此试件为例进行涡流检测信号的测量和处理。

为模拟实际情况, 还应考虑管道中的应力腐蚀裂纹和疲劳裂纹。由于铜-镍合金耐应力腐蚀性能较强, 在铜-镍合金管人工加工应力腐蚀裂纹非常困难, 因此本研究采用周向疲劳裂纹试件来考察对实



(a) 包含电火花加工刻痕试件和疲劳试验夹具



(b) 包含电火花加工刻痕试件设计参数 (单位: mm)

图 7 包含电火花加工刻痕试件

Fig.7 The design of the testpiece with EDM notches

际裂纹的适用性。为在管道中心区域加工疲劳裂纹, 首先采用电火花加工导入一个微小周向划痕 (深度小于 0.1mm), 然后将试件固定在旋转疲劳实验机通过旋转弯曲疲劳在此试件中段导入疲劳裂纹。通过选择适当的弯曲载荷和加载周期次数可将疲劳裂纹的深度控制在管道壁厚的 30%左右。本研究成功制作了 5 个导入疲劳裂纹的试件, 其中 4 个的裂纹深度均在壁厚的 30%左右。

对于导入疲劳裂纹和人工刻槽的短管试件, 采

用实际检测中使用的 16 通道 Cecco5 涡流检测探头对各试件进行了涡流检测,并将测得的 ECT 信号通过 A-D 转换器转换为数字量送计算机保存以备后续数字处理。图 8 为探头的第 13 通道(对应周向刻槽的圆周位置)在 60kHz 频率下的涡流检测结果。可看出试件的右侧有幅值大于 50%壁厚外部刻痕信号的腐蚀噪声,从这一噪声信号中很难分辨缺陷的存在。因此,适当的信号处理对腐蚀区域所含裂纹信息的识别必不可少。

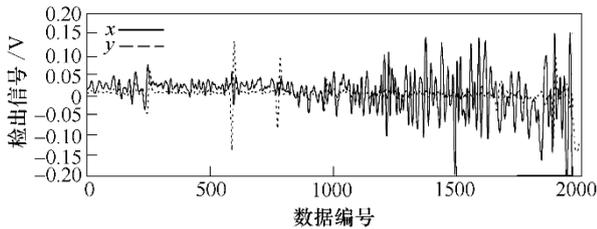


图 8 包含腐蚀噪声的电火花加工刻痕试件涡流检测信号(13 通道, 60kHz, 校准前信号)

Fig.8 A typical signal with large corrosion noise for EDM notch testpiece (channel 13, 60kHz, before calibration)

2.2 涡流检测信号处理方法

针对以上所得涡流检测信号,本文提出了一种信号处理方法^[12-15],以实现严重腐蚀区域的裂纹缺陷识别。具体步骤包括信号自动校正、信号降噪、从复合信号中分离出裂纹信息和从分离信号中提取裂纹特征量。信号自动校正主要通过调整信号的幅值和相位以使周向全周刻槽在每一个涡流检测通道中的输出结果相同;信号降噪主要采用分段多项式滤波消除检测信号中的漂移噪声。而信号分离和裂纹特征量提取较为复杂,需要开发独特的信号处理方法。针对这一问题,本文提出了相位优化裂纹信号分离方法和基于相似度的裂纹特征量抽取方法,具体过程如下。

2.2.1 相位优化法分离裂纹信号

从上节数值计算结果可以看出,涡流检测裂纹信号与腐蚀噪声的相位特性有着较大差异。实验结果也表明尽管腐蚀噪声信号与裂纹信号有着相似的空间变化频率,但腐蚀噪声在某一区域具有多发性特征。在严重腐蚀区域,大量腐蚀噪声信号在较长区域内连续出现。然而与蒸汽发生器管道支持板部位涡流检测信号不同(支持板信号处处几乎一样),不同脱镍腐蚀区域的腐蚀噪声也不同。因此,多频演算方法很难用来实现腐蚀噪声的去除和降低。

为解决这一问题,本文提出了一种新的信号处

理方法。基本思想是寻找一个最佳的相位变换角使得检测噪声信号在 y 轴上最小,也就是将腐蚀噪声信号全部变换到 x 轴上。在严重腐蚀区域,由于信号主要来自腐蚀噪声(噪声的多发性),最佳变换角取决于腐蚀噪声。这种情况下,由于裂纹信号和腐蚀噪声具有不同的相位特性,检测信号在进行相位角变换后裂纹信息就会集中在 y 轴上。同时,考虑到轴向不同部位的不同腐蚀状况,相位角优化处理需在轴向分段进行。

然而,在没有明显腐蚀噪声的信号中,裂纹信号同样会被最小化到 x 轴。为避免这一问题,需提前求出每个信号段的平均变换角。若优化后的相位角与平均值相差较大,那么检测信号中可能仅存在裂纹信息。这种情况下,只要用平均变换角取代优化相位角进行信号变换就可避免裂纹信息在 y 轴上的丢失。

相位优化算法可按如下具体步骤实现:

(1) 抽出经自动校正和降噪后的选定通道信号进行处理。

(2) 将抽出信号分割成 n 段。每一信号段的最优相位变换角可通过计算和比较每个变换角度下的 $\sum_{i=1}^m y_i^2$ 得出(其中 y_i^2 为变换后的 y 信号),或由式

(1) 直接计算。

$$\alpha_i = -\frac{1}{2} \arctan \frac{2 \sum_{k=1}^{m_i} (x_k - \bar{x}_k)(y_k - \bar{y}_k)}{\sum_{k=1}^{m_i} (y_k - \bar{y}_k)^2 - (x_k - \bar{x}_k)^2} \quad i=1,2,L,n \quad (1)$$

式中, m_i 为第 i 段信号的数据点数; x_k, y_k 为第 k 个信号点的 x, y 分量; \bar{x}_k, \bar{y}_k 为其平均值。

(3) 通过公式 $\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^n \alpha_i / n$ 计算各段信号的平均最优相位。

(4) 若 $|\alpha_i - \bar{\alpha}| < \alpha_0$, 利用角 α_i 对第 i 段信号进行相位变换, 否则用角度 $\bar{\alpha}$ 进行变换。这里, α_0 为

在裂纹信号和腐蚀噪声信号相位差的平均值的基础上选定的阈值。针对本文研究对象(管道内表面腐蚀和外圆周裂纹), 其值可在 $\pi/12 \sim \pi/6$ 之间选定。

2.2.2 基于相似度参数的裂纹特征信号提取

通过相位优化处理后, 大部分腐蚀噪声可从变

换后的 y 轴分量上剔除。然而, y 信号中还可能存在幅值大于 30%外部裂纹信号的噪声。传统的基于幅值的信号提取方法可能产生过多误报, 因此还需特殊算法从变换后的 y 信号中提取裂纹信号。

基于相位优化滤波器对大量实验数据进行处理的结果表明: 若裂纹长度不是很大, 不同宽度和方向的裂纹信号相位变换后的 y 分量的波形没有明显差别, 而变换后的噪声信号的 y 分量则与裂纹信号具有明显不同的波形。基于这一发现, 本文提出采用简单相似度参数进行裂纹特征信号提取的模式匹配法^[14,15]。具体处理过程如下:

(1) 实测酸洗部位电火花刻槽试件(无腐蚀噪声部位), 获取标准裂纹信号 $s(x_k)$, $k=1,2,\dots,m$ (m 为数据点的个数)。

(2) 将对象信号 $f(x_k)$, $k=1,2,\dots,n$, 分割为 n/m 段(对象信号总点数为 n), 计算标准裂纹信号与测量对象信号间的相似度(每个信号段的数据点数与标准裂纹信号相同)为

$$\rho(l) = \frac{\sum_{k=1}^m s(x_k) f(x_{k-l})}{\left(\sum_{k=1}^m s(x_k)^2 \sum_{k=1}^m f(x_{k-l})^2 \right)^{1/2}} \quad l=1,2,L, n-m \quad (2)$$

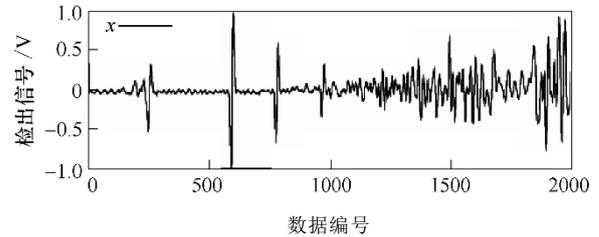
(3) 若 $\rho(l) < \rho_0$, 设 $\rho(l) = 0$ 。通常选取 $0.6 \leq \rho_0 \leq 0.8$ 。

(4) 将最大相似度 $\rho_{\max}^j = \max_{l \in R_j} \rho(l)$ 作为信号段 R_j ($j=1,2,\dots, n/m$) 数据段的相似度。同时, 若第 j 个信号段的信号幅值与 30%外圆周刻槽的信号幅值相比过小(如小于后者的一半), 此信号段 R_j 的相似度即设为 0(检测极限深度设为管壁厚度 30%的外面刻槽)。

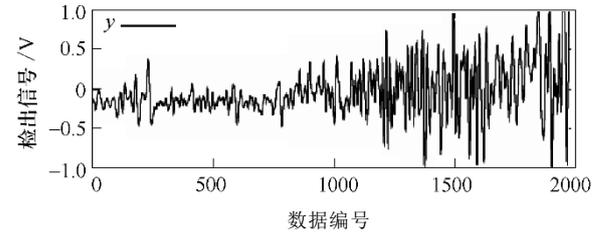
(5) 利用 $\bar{f}(x_k) = f(x_k) \rho_k$ ($k=1,2,L, n$), 获取最终裂纹特征信息结果。

2.3 实验信号处理结果

图 9 所示为经自动校正和降噪处理后的周向刻槽(第 13 通道)的涡流检测信号, 激励频率为 60kHz。由于试件右侧检测信号中包含较大腐蚀噪声, 无法直接获得裂纹信息。通过相位优化算法处理后信号的 y 轴分量如图 10 所示, 可以看出试件右侧的腐蚀噪声被分离且出现裂纹信号特征。



(a) x 分量



(b) y 分量

图 9 校正后的周向划痕信号(60kHz, 第 13 通道)

Fig.9 Signal of circumferential slit after calibration (60kHz, channel 13)

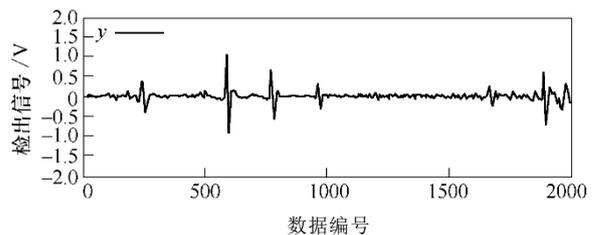
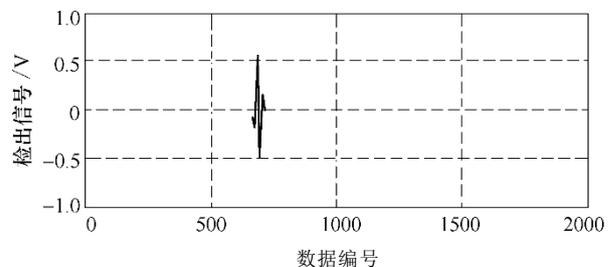


图 10 相位变换后的 y 分量信号
(13 通道, 60kHz, 校准后信号)

Fig.10 The y signal after phase optimization
(channel 13, y signal, 60kHz, after phase optimization)

图 11 为上述信号经裂纹特征提取后的处理结果, 图 11a 为标准裂纹信号, 图 11b 为相似度大于 0.6 的信号, 图 11c 为信号提取滤波器, 图 11d 为最终提取的裂纹特征信号。与图 7 中的预设裂纹信息比较可知所有裂纹均被准确检出。



(a) 标准信号

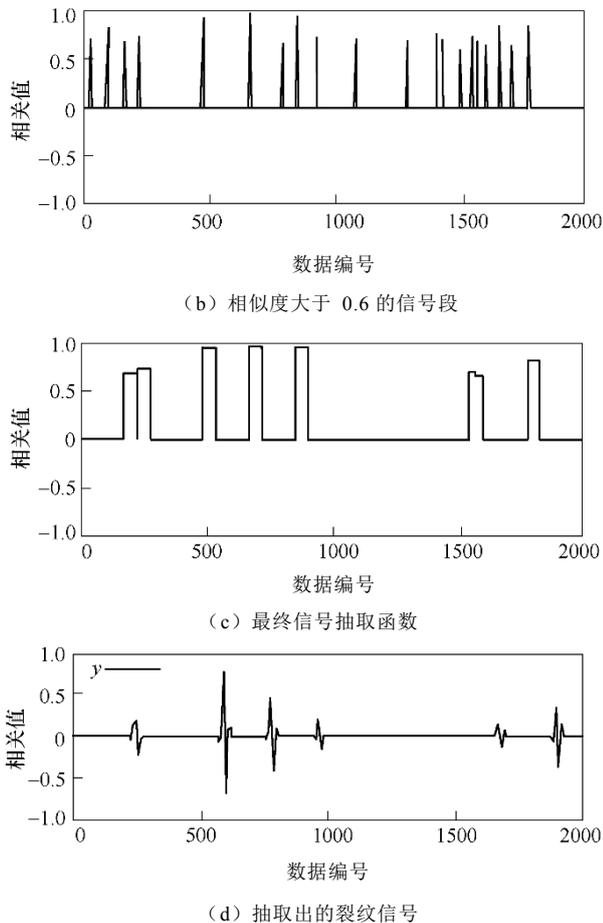
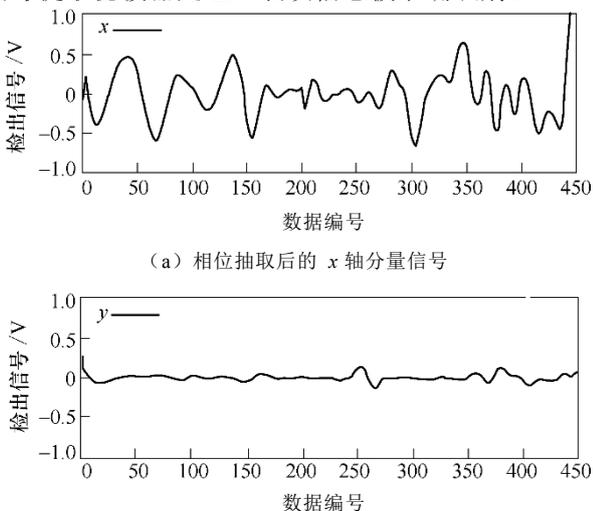


图 11 裂纹信号提取滤波器相关结果

Fig.11 Results related to the crack signal extraction filter

如图 12a、图 12b 所示为包含外面周向疲劳裂纹（深度约为壁厚 25%，长约 10mm）试件的涡流检测信号经过相位优化处理后的 x 轴分量和包含裂纹信息的 y 轴分量的信号；图 12c 为经模式匹配法处理后的裂纹信号。尽管 ECT 信号中包含较大脱镍腐蚀噪声，相位变换后仍能很好识别裂纹，再经信号提取滤波器处理，裂纹信息被准确识别。

图 12 疲劳裂纹试件测量信号数据处理结果
(7 通道, x 、 y 轴分量, 60kHz, 校准后信号)Fig.12 Data processing results for the signal of a fatigue crack testpiece(channel 7, x 、 y signal, 60kHz, after phase optimization)

3 结论

本文基于数值仿真和对包含人工裂纹试件的涡流检测实验，提出了一种从包含脱镍腐蚀噪声的涡流检测信号中识别管壁裂纹的信号处理方法。相位优化算法和模式匹配法可分别用来从掺杂腐蚀噪声的检测信号中分离裂纹信号和最终提取裂纹特征信号。通过处理大量包含较大腐蚀噪声和管壁外面裂纹试件的涡流检测信号，表明了这一方法的有效性。

参考文献

- [1] 陈德智, 邵可然. 管道裂纹涡流检测线圈阻抗信号的快速仿真[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 75-78.
Chen Dezhi, Shao Keran. Rapid simulation of the oil impedance signal eddy current inspection of the tube with a crack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(6): 75-78.
- [2] 杨宾峰, 罗飞路, 张玉华, 等. 飞机多层结构中裂纹的定量检测及分类识别[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 63-67.
Yang Bin Feng, Luo Fei Lu, Zhang Yu Hua, et al. Quantification and classification of cracks in aircraft multi-layered structure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 63-67.
- [3] 杨宾峰, 罗飞路, 曹雄恒, 等. 飞机结构腐蚀检测中的脉冲涡流无损检测技术[J]. 测试技术学报, 2005, 19(1): 27-29.
Yang Bin Feng, Luo Fei Lu, Cao Xiong Heng, et al. The detection of corrosion in aeroplane using pulsed eddy current nondestructive testing technology[J]. Chinese

- Journal of Mechanical Engineering, 2005, 19(1): 27-29.
- [4] 安斯光, 杨仕友, 李桃. 改进的禁忌搜索算法及其在电磁场逆问题中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 30-33.
An Siguang, Yang Shiyu, Li Tao. The application of improved tabu search algorithm in electromagnetic inverse problems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 30-33.
- [5] 刘磊, 安斯光, Lu Junwei, 等. 高维多目标电磁场逆问题计算的改进多重单目标 Pareto 采样算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 9-15.
Liu Lei, An Siguang, Lu Junwei, et al. An improved multiple single objective pareto sampling algorithm applied to many-objective inverse problems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 9-15.
- [6] 耿强, 田淑侠, 黄太回, 等. 基于支持向量机和神经网络法的应力腐蚀裂纹定量重构 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 196-199.
Geng Qiang, Tian Shuxia, Huang Taihui, et al. Reconstruction of stress corrosion crack using neural network and support vector machine techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 196-199.
- [7] Chen Z, Yusa N, Miya K. Enhancements of eddy current testing techniques for quantitative nondestructive testing of key structural components of nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(7): 1651-1656.
- [8] Chen Z, Yusa N, Rebican M, et al. Inversion techniques for eddy current NDE using optimization strategies and a rapid 3D forward simulator[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2004, 20(3): 179-187.
- [9] Chen Z, Rebican M, Miya K, et al. Three dimensional simulation of remote field ECT by using Ar method and a new formula for signal calculation[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2005, 16(1): 35-53.
- [10] Fukutomi H, Takagi T, Tani Junji, et al. Numerical evaluation of ECT impedance signal due to minute cracks[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(2): 2123-2126.
- [11] Kameari A. Calculation of transient 3D eddy current using edge element[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(2): 466-469.
- [12] 胡卫红, 舒泓, 栾宇光. 基于奇异值分解的电能质量信号去噪 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 30-33.
Hu Weihong, Shu Hong, Luan Yuguang. Power quality signals' de-noising method based on singular value decomposition(SVD)[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 30-33.
- [13] 秦代春, 周林, 郭珂, 等. 一种小波神经网络的电能质量信号去噪新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 88-93.
Qin Daichun, Zhou Lin, Guo Ke, et al. A new method of power quality de-noising based on the wavelet neural network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 88-93.
- [14] Tian S, Chen Z, Ueda M, et al. Signal processing schemes for eddy current testing of steam generator tubes of nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 245(3): 78-88.
- [15] Xiang P, Ramakrishnan S, Cai X, et al. Automated analysis of rotating probe multi-frequency eddy current data from steam generator tubes[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2000, 12(3-4): 151-164.
-
- 作者简介: 田淑侠 女, 1984 年生, 博士, 讲师, 研究方向为机械结构无损检测及其信号处理方法。陈振茂 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向主要为 结构无损检测和评价、电磁力相关的电磁机械结构强度和振动问题、大型核电站装备的维护理论和应用等。
- *****