

DOI: 10.11973/wsjc202003015

基于多频涡流信号处理的结构识别方法

陈 姝, 冯美名, 张志义, 廖述圣, 魏文斌

(中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉 430223)

摘要: 提出了一种基于多频涡流信号处理的结构识别方法, 该方法首先采用多频涡流仪获得低频绝对通道信号, 通过旋转变换得到多组信号对, 确定振幅最小的那一对, 接着运用中值滤波技术获得整体信号幅度摆动趋势线, 从而消除信号摆动影响, 凸显结构信号; 然后, 根据结构幅度阈值和最小间距确定结构中心位置及其数量; 最后, 根据弯管和支撑信号特征, 识别并显示这些结构。运用多组来自不同核电站的实测数据进行识别, 结果显示了该方法的有效性。

关键词: 多频; 涡流信号; 旋转变换; 趋势线; 结构识别

中图分类号: TN957.51; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2020)03-0068-04

A method for structure recognition based on multi-frequency eddy current signal processing

CHEN Shu, FENG Meiming, ZHANG Zhiyi, LIAO Shusheng, WEI Wenbin

(China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: In this paper, a method for structure recognition based on multi-frequency eddy current signal processing is put forward, in which low-frequency signals in absolute channel obtained from multi-frequency eddy current instrument are adopted, and several pairs of signals are obtained by revolving transformation, and that pair with least amplitude is determined. The trend of the whole signal is got by median filtering and is used to cancel the sway and stand out the structure signals. And then, the structure centers and their number are determined by the amplitude threshold and the least interval. At last, these structures are recognized and shown based on the characters of bend tubes and supports. The effectiveness of this algorithm is proven by recognition of multiple groups of data from several NPP.

Key words: multi-frequency; eddy current signal; revolving transformation; trend curve; structure recognition

涡流检测是以电磁感应原理为基础的一种常规无损检测方法^[1-2]。检测时, 线圈不需要接触工件, 也无需耦合介质, 检测速度快, 对工件表面或近表面缺陷的检测灵敏度高。金属表面感应涡流的渗透深度随激励频率的变化而变化, 频率高时金属表面涡流密度大, 涡流渗透深度浅; 随着频率的降低, 涡流渗透深度增加, 但表面涡流密度减小。由于涡流检测的这种特性, 在核电设备检测中, 可以利用低激励频率得到的信号检测支撑板和弯管等结构信息, 用高激励频率和低激励频率得到的信号来检测表面缺陷。因此, 涡

流检测在无损检测技术中具有重要的地位。

在蒸汽发生器中, 传热管及其支撑板数量多, 内部液体腐蚀和各种振动对传热管的某些部位, 特别是支撑板与传热管外壁接触处的影响较大。在涡流检测中, 为了有效分析核电设备的缺陷属性, 必须将结构信息全部检测出来, 既不能有虚假结构, 又没有漏掉任何一个结构信息, 这样才有可能更好地确认缺陷的位置和类型, 明确缺陷的危害程度, 避免核电事故。

多频涡流信号检测面临的问题是, 整体信号幅度摆动大, 一些关键部位(如弯管处)的支撑结构信号和弯管信号交叉, 能量高低变化, 结构分布不均匀, 且信号噪声严重。

针对上述问题, 提出了基于多频涡流信号处理的结构识别方法。该算法选取低频通道信号, 运用旋转变换的方式, 找到噪声能量最小的水平分量, 确定水

收稿日期: 2019-11-14

基金项目: 中核集团核动力运行研究所所控资助项目(B170213)

作者简介: 陈 姝(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事无损检测工作

通信作者: 陈 姝, 23512574@qq.com

平分量趋势线, 消除摆动, 再确定结构位置和数量。

1 传热管的结构识别算法和流程

从多频涡流仪获得的信号分为高频、中频和低频信号, 每一频率的信号又分为差分信号和绝对信号, 这些信号可分解为水平分量和垂直分量, 可将其理解为复信号的实部和虚部。因此, 下载的数据阵通常包含很多列信号。把含有最强结构信息的低频绝对通道信号作为确定结构的首选。

假定从涡流仪获得的数据已转换成可运用软件 MATLAB 处理的文本(不妨设为 Data.txt)文件。

首先, 下载数据文件 Data.txt, 显示数据并观察, 确定结构识别区域 IdentifArea 及其长度 Length, 选取低频绝对通道在识别区域 IdentifArea 内的水平分量和垂直分量数据 Data(IdentifArea, i:i+1), 将其记为 Channel, 作为下面处理的核心数据。

其次, 将 Channel 数据点绕坐标中心旋转 $1^\circ \sim 180^\circ$ (这里度数分辨率为 1°), 将其水平分量用矩阵 TotalR 标记, 其维度为 $Length \times 180$, 找出 TotalR 中噪声影响最小的水平分量 TotalR(:, Index)、趋势线 Trend(:, Index) 及其差值 Diff(:, Index), 主要包括: ① 运用中值滤波方法(滤波器长度大于 2 倍的最大支撑结构长度)求出矩阵 TotalR 每一列的趋势线, 并以矩阵 Trend 记之; ② 求出矩阵 Trend 中每列趋势线的纵向距离, 并以向量 R 记之; ③ 求出向量 R 的最小值位置索引 Index; ④ 求得噪声影响最小的水平分量 TotalR(:, Index)、趋势线 Trend(:, Index) 及差值 Diff(:, Index)。

然后, 设置结构信号幅度阈值 Threshold 和最小结构间距阈值 MinInteral, 求出 TotalR(:, Index) 中支撑结构信号的数量 TSPNum 和位置 TSPPosition。① 根据给定的阈值 Threshold, 将 Diff(:, Index) 中大于 Threshold 的分量记为 1, 否则记为 0, 以向量 Constr 记之; ② 找出 Constr 向量中相邻 1 的首尾位置, 从而确定相邻 1 的中心位置, 以向量 IniPosition 记之; ③ 根据最小结构间距 MinInteral, 保留 IniPosition 中间距大于 MinInteral 的分量, 以向量 TSPPosition 记之, 其长度即为 TSPNum。

同样地, 求 TotalR(:, Index) 中弯管的数量 TBNum 和位置 TBPosition, 只需将 Diff(:, Index) 取负号, 利用上述参数 Threshold 和 MinInteral 即可。

最后, 显示支撑板和弯管等结构的个数以及位置信息。

传热管的结构定位和识别流程如图 1 所示。

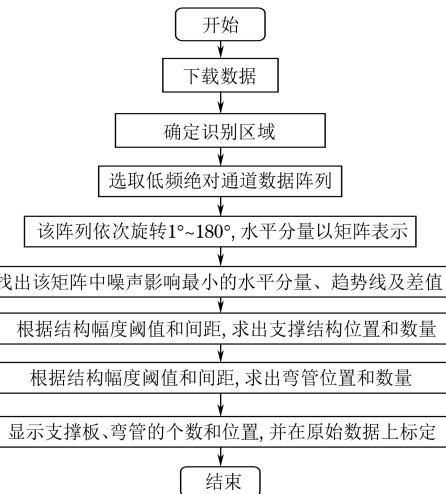


图 1 传热管的结构定位和识别流程

2 传热管的结构识别技术

2.1 信号旋转

每个通道信号包含水平分量和垂直分量, 可以将其理解为复信号的实部和虚部, 假定算法中的矩阵 Channel 由水平分量 X_1 和垂直分量 X_2 构成, 其中 X_1 和 X_2 分别为列向量。设信号的旋转角为 θ , 旋转矩阵表示为 $\text{Rot}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 。一个点 (x_1, x_2) 经过旋转, 得到 (x_1^*, x_2^*) , 可用式(1)表示。

$$\begin{pmatrix} x_1^* \\ x_2^* \end{pmatrix} = \text{Rot}(\theta) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \cos \theta - x_2 \sin \theta \\ x_1 \sin \theta + x_2 \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

由 X_1 和 X_2 构成的 $m \times 2$ 维矩阵 $[X_1 \ X_2]$ 旋转 θ 后, 变为 $[X_1 \cos \theta - X_2 \sin \theta \ X_1 \sin \theta + X_2 \cos \theta]$ 。

可以看出, 信号旋转不是单一的分量变化而是两个分量的联动。由于涡流检测中顺时针方向为正, $[X_1 \ X_2]$ 旋转 θ 变为 $[X_1^* \ X_2^*]$, 则写成

$$[X_1^* \ X_2^*] = [X_1 \ X_2] \cdot \text{Rot}(\theta) \quad (2)$$

信号旋转改变不了结构的相对位置, 但可以改变信号的幅度和噪声能量, 旋转的目的在于从 Channel 旋转得到的矩阵 TotalR 中找到噪声影响最小的水平分量, 以便于结构定位识别, 甚至后续的缺陷提取。

2.2 信号抖动趋势线提取

中值滤波是一种非线性平滑技术, 其是基于排序统计获取位于中间的值而不是平均或加权平均值的方法。例如, 向量 $A = [1, 4, 8, 4, 1, 199, 2, 3, -20]$, 排序后得到的 $P_A = [-20, 1, 1, 2, 3, 4, 4, 8, 199]$, 其中

值为 3, 均值为 22.444 4。显然, 奇异值对均值会产生影响, 而对中值影响不明显。

在该问题中, 低频绝对通道结构信号幅值远大于没有结构的信号幅值, 而且相较整段信号, 结构信号占空比小。只要滤波区间较大, 例如长度取最大结构宽度的 2 倍以上进行中值滤波, 则可以消除结构影响, 获得抖动趋势线, 而且随机噪声仍保留在其中。

2.3 信号长度的纵向距离刻画

每一个旋转了一定角度的水平分量信号, 其抖动趋势线既含有抖动信息又含有噪声信息。要找到抖动幅度和噪声能量最小的那个趋势线, 可以采用趋势线长度的纵向距离刻画。

设第 i 个抖动趋势线为 $\text{Trend}(:, i)$, 其长度的纵向距离定义为

$$S(i) = \sum_{j=1}^{\text{Length}-1} |\text{Trend}(j+1, i) - \text{Trend}(j, i)| \quad (3)$$

2.4 信号最小分量的位置索引

利用给定信号求出最小位置索引的方法很多, 如遗传算法。这里直接引用 MATLAB 软件中的函数 min 进行索引。

2.5 传热管结构定位

在低频绝对通道的多个旋转信号中, 一旦选定了高信噪比的一组信号, 就可以对结构进行定位识别。假定支撑板信号向上, 由于支撑板位置的信号幅度远大于其他位置的, 首先将差值信号 Diff 通过阈值处理, 将可能的支撑板位置和非支撑板位置以 1 和 0 进行分类, 再通过逻辑判断, 找到可能的支撑板首尾位置, 接着通过首尾平均取整, 找到可能的支撑板中心位置, 然后通过最小结构间距排除相邻相同目标被判断成多目标的可能性, 最后得到支撑结构位置向量及个数。低频绝对通道的结构信号中, 弯管信号和支撑板信号方向相反, 因此只需要将上面的 Diff 信号取负, 然后按照支撑板定位识别方法操作即可。

2.6 传热管结构识别技术

运用同一涡流仪探测同一类型的蒸汽发生器(SG)传热管, 传热管支撑板和弯管识别也不难。例如, 对某核电站某型 SG 支撑结构进行识别, 支撑板分布稀疏均匀、数量多、信号方向一致, 弯管信号数量少、与支撑板信号相反, 这些特性都可用于识别判断。

3 运用 SG 传热管涡流数据进行验证

图 2,3 为两个核电站的两根传热管低频绝对通道的水平和垂直分量。可以看出, 两组信号普遍存在

信号摆幅过大, 结构间距不均匀的问题, A 核电站信号噪声更大, B 核电站弯管处的结构信号能量过小。运用这些数据直接进行结构识别的准确率并不高。

图 2 的结构识别算法使用的参数如表 1 所示。

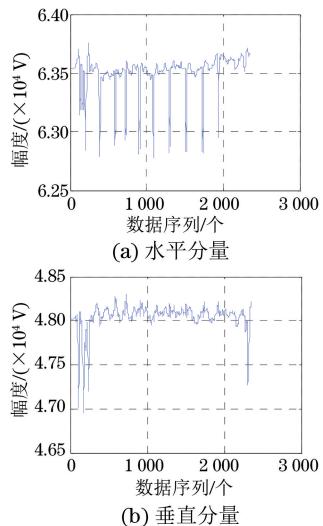


图 2 A 核电站低频绝对通道的水平和垂直分量

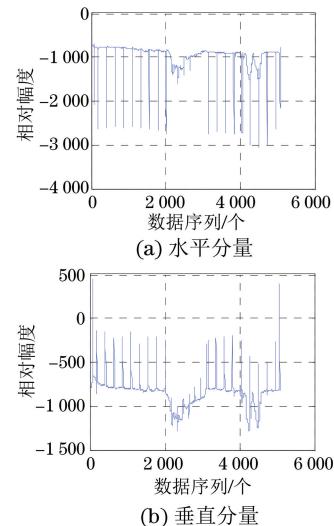


图 3 B 核电站低频绝对通道的水平和垂直分量

表 1 图 2 的结构识别算法使用的参数

属性	数据
中值滤波器长度	50
信号阈值	120
结构最小间距	20

算法处理结果: 有 12 个支撑结构 4 个弯管。支撑结构位置用向量表示为 [132 161 206 389 595 723 908 1 094 1 301 1 515 1 733 1 937], 弯管位置为 [110 177 239 2 315]。

A 核电站 SG 传热管结构定位识别效果如图 4 所示。

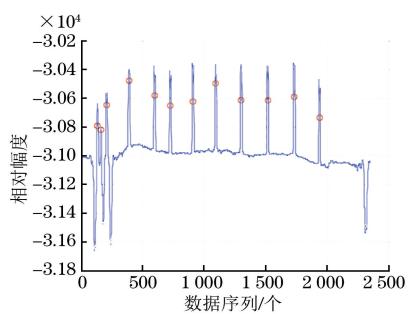


图 4 A 核电站 SG 传热管结构定位识别效果

可以看出,运用该算法不仅可以定位结构位置,而且能识别出弯管和支撑结构的信号。

图 3 的结构识别算法使用的参数如表 2 所示。

表 2 图 3 的结构识别算法使用的参数

属性	参数值
中值滤波器长度	50
信号阈值	60
结构最小间距	40

算法处理结果:弯管信息不明显,支撑结构有 26 个,位置为[77 191 421 651 880 1 108 1 335 1 563 1 789 2 013 2 175 2 333 2 493 2 658 2 815 2 976 3 147 3 373 3 600 3 827 4 053 4 280 4 508 4 738 4 965 5 077]。

B 核电站 SG 传热管的结构识别效果如图 5 所示。

从上面的识别结果可以看出,该算法不仅能抑制噪声,使摆动趋势线最大限度线性化,还能通过消除趋势线找到最小结构的信息。

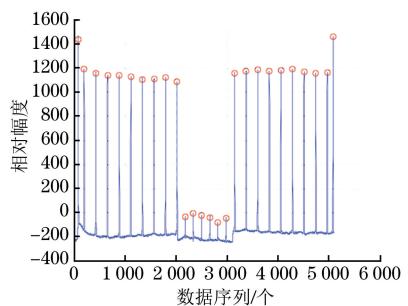


图 5 B 核电站 SG 传热管的结构识别效果

4 结语

针对涡流信号和涡流信号中结构的特点,提出了传热管的结构识别算法。该算法选取低频绝对通道信号,运用旋转变换的方式,找到摆动趋势线纵向距离最短、噪声能量最小的水平分量,然后对其进行中值滤波,寻找摆动趋势线,消除摆动,通过幅度阈值和结构分辨率确定结构位置和数量。运用来自核电站 SG 传热管的数据进行结构识别表明,同一类传热管可采用相同参数进行结构自动识别,对不同类传热管,只要适当调整好参数,该算法仍然有效。只要信号合格,参数调整适当,该算法识别准确率可以达到 100%。

参考文献:

- [1] 徐可北,周俊华. 涡流检测[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 施克仁. 无损检测新技术[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 刘晓蕾. 基于小波分析的超声测厚信号特征提取技术研究[D]. 太原:中北大学,2010.
- [4] 刘祥景,路宏年,张吉堂. 火箭发动机包覆层测厚时间延迟估计算法研究[J]. 无损检测,2007,29(9):526-528.
- [5] AMZIANE A, AMARI M, MOUNIER D, et al. Laser ultrasonics detection of an embedded crack in a composite spherical particle[J]. Ultrasonics, 2012, 52(1):39-46.
- [6] 曾伟,杨先明,王海涛,等. 激光超声技术及其应用[J]. 无损检测,2013,35(12):49-52.
- [7] 刘永强,杨世锡,甘春标. 一种基于激光超声的薄层金属材料厚度检测方法研究[J]. 振动与冲击,2018,37(12):147-152.

(上接第 8 页)

热防护层两界面的位置特征信息,试验结果表明,该方法测量的相对误差在 6.4% 以内,实现了对热防护层的厚度测量。

文中仅对一种热防护层厚度进行了分析提取,未涉及多种材料的测量。从数理思路上看,该检测方法可实现对多种热防护层厚度的测量,进而为工程应用提供一种有效的检测手段,具体验证工作有待进一步的分析与研究。

参考文献:

- [1] 罗婕,路宏年. 火箭发动机包覆层测厚的超声信号处理研究[J]. 压电与声光,2007,29(4):471-474.
- [2] 刘晓蕾,王召巴,陈友兴,等. 小波分析在超声测厚信号