

基于自适应二代小波的涂层下裂纹检测研究*

王 鹏¹, 朱红波², 李东江¹, 秦承鹏¹, 何虎昌²,
江 雄², 蔡 晖¹, 郎 涛²

(1. 西安热工研究院有限公司 西安, 710054)

(2. 四川华能康定水电有限责任公司 成都, 610041)

摘要 基于自适应二代小波变换的过流部件涂层下裂纹检测方法, 将自适应二代小波变换应用于阵列涡流的检测中, 发现阵列涡流检测能够很好地抑制提离效应, 且不受缺陷方向的影响, 自适应二代小波能够有效匹配信号特征, 消除噪声影响, 提高信号质量。实验结果表明, 基于自适应二代小波变换的阵列涡流检测方法能够有效识别水电站过流部件涂层下裂纹故障, 检测精度高, 适应性强, 具有较好的工程应用价值。

关键词 过流部件; 涂层下裂纹; 阵列涡流; 自适应; 二代小波变换

中图分类号 TH878; TG115.28

引 言

在水电领域, 过流部件裂纹和磨损一直是威胁水电设备运行安全的重要因素之一。在汽蚀和泥沙磨损的联合作用下, 过流部件裂纹和磨损会破坏水流对过流部件应有的绕流条件, 影响电机的输出效率。为此, 过流部件常采用超音速火焰喷涂工艺在其表面喷涂碳化钨涂层, 提高其耐磨蚀能力^[1]。

碳化钨涂层可以在一定程度上保护过流部件免受侵蚀, 但对过流部件涂层下的裂纹检测造成很大干扰。过流部件结构复杂, 在制造过程中存在应力集中。碳化钨在喷涂过程中需要喷丸处理, 进一步加剧了应力集中, 这些应力集中经过演变产生了涂层下裂纹。经调研发现, 近年来, 小湾、冷竹关、小天都等近 10 个水电站均发现涂层下过流部件存在基体开裂甚至脱落, 严重危害机组的安全运行。因此, 需要研究一种适用于水电站现场的过流部件涂层下的裂纹检测方法。

涡流检测是基于电磁感应原理进行缺陷识别的无损检测手段^[2-3]。常规的涡流检测具有趋肤效应, 不能有效抑制提离和抖动信号的干扰, 且受裂纹方向的影响, 现场实施效果不佳。阵列涡流(array eddy current testing, 简称 AECT)检测方法将多个小涡流线圈按照一定的规则组成阵列线圈, 密布在敞开或封闭的界面上, 构成特殊的阵列传感器, 克服了常规涡流检测中的缺陷, 实现对检测对象的缺陷识

别。国内外学者对阵列涡流检测技术展开了研究。李运涛等^[4]运用阵列涡流检测奥氏体不锈钢均匀表面缺陷, 发现检测效果优于传统的溶剂去除型着色渗透检测技术。郭永良等^[5]通过对阵列涡流检测裂纹的定量仿真研究, 建立了裂纹长度与波形宽度的关系式, 进行了误差分析。崔厚路^[6]将阵列涡流应用于钢管塔锻造法兰检测中, 且比渗透和磁粉检测效率更高。由于阵列涡流信号存在一些信号干扰, 为此采用自适应二代小波变换来进行信号降噪处理。文献[7]提出一种自适应二代小波变换的构造方法, 可以自适应地匹配信号特征, 提取有用信息, 降低噪声干扰。Shen 等^[8]将自适应二代小波变换应用于轴承信号分析中, 提高故障诊断准确率。张志斌等^[9]将自适应二代小波变换用于振动信号的降噪处理中, 通过实验验证了自适应二代小波的优越性。何伟等^[10]将自适应二代小波变换应用于矿井提升机振动信号的降噪处理中, 获得更高的信噪比。笔者采用自适应二代小波变换来改善阵列涡流信号质量, 提高涂层下裂纹的检测效果。

1 阵列涡流检测技术

阵列涡流检测是涡流检测中的一个重要分支, 根据被测对象的结构进行线圈排布, 构建阵列式涡流探头, 然后按照一定的规律进行激发, 相互之间共同配合, 完成对复杂检测对象高效、灵活的检测。当单个涡流探头检测时, 常常受到检测对象形状及缺

* 中国华能集团有限公司科技资助项目(HNKJ18-H22)

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-11-22

陷方向的影响。阵列涡流检测能很好地避开这些干扰,根据检测对象的形状进行阵列组合,对较小的复杂零件表面、近表面的缺陷都可以较好检测。灵活的组合方式能消除线圈之间的干扰,最大程度地降低干扰信号的影响,有效抑制趋肤效应^[11-12]。

按照激励方式的不同,阵列涡流探头分为点阵列扫描、线阵列扫描和其他方式扫描等。点阵列扫描如图1所示,3个线圈 A_1, A_2, A_3 为品字形排列,它们之间相互作用,相互激发。 A_1 线圈作为激励时, A_2 可以接受涡流信号。 A_2 线圈作为激励时, A_3 可以接受。 A_3 线圈作为激励时, A_1 可以接受。3个线圈相互作用,共同完成检测任务。获取信号后,3组信号独立分析,获取最佳的检测效果^[12]。

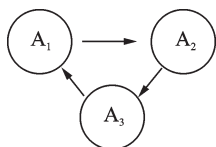


图1 点阵列扫描

Fig.1 Lattice arrangement

线阵列扫描如图2所示。激励线圈和检测线圈各排成一列,交错排布。每个激励线圈进行激励,相邻的检测线圈进行接收。当线圈 A_1 激励时,线圈 B_1 进行接收。当线圈 A_2 激励时,线圈 B_1 和 B_2 进行接收。以此方式进行激励和接收不受裂纹方向的影响,最大程度地相互配合检测,获取最佳的检测效果。

虽然阵列涡流检测能够很好地抑制提高效应,且不受缺陷方向的影响,但在涡流信号中依然存在一定的噪声。因此,需要一定的信号提取方法改善信号质量,提高检测效果^[7]。

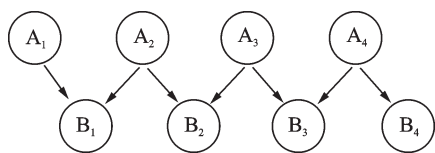


图2 线阵列扫描

Fig.2 Linear array arrangement

2 自适应二代小波变换

二代小波变换是在时频域利用提升方法构造的小波^[13-14]。与一代小波最大不同在于,并不依赖傅里叶变换构造小波基函数,而是利用提升算子改变原有小波滤波器的特性,得到不同性质的双正交小波,具有较强的灵活性。其小波函数的构造与信号不相关,不能自适应匹配信号的局部特征。为此,Gouze等^[15]提出了采用优化方法设计自适应二代小波变换。

2.1 构造自适应二代小波变换

自适应二代小波变换的构造方法:首先,对设备早期故障非常敏感的峭度指标定为评价标准,利用鲁棒性较强的遗传算法设计最佳匹配信号特征的预测器;然后,以重构误差最小为目标函数设计更新器,构造出自适应信号特征的二代小波^[8]。

2.1.1 自适应预测器设计

预测器的目标函数 K_p 定义为

$$K_p = E \{ (d - \bar{d})^4 \} / \sigma^4 \quad (1)$$

其中: \bar{d} 和 σ 分别为细节信号 d 的均值和标准方差; $E \{ \cdot \}$ 为数学期望。

构造匹配信号特征的二代小波问题转化为在约束条件下使目标函数 K_p 最大的优化问题。

$$\begin{cases} p_r = p_{-r+1} \\ \sum_{r=1}^{N/2} p_r = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (r = 1, 2, \dots, N/2) \quad (2)$$

然而,目标函数与预测器系数之间没有直接的联系,且关系复杂。遗传算法具有很强的鲁棒性以及全局、并行搜索等特点。笔者采用遗传算法,以目标函数 K_p 为适应度函数,构造自适应匹配信号特征的预测器。遗传算法流程如下。

1) 预测器编码。随机产生预测器系数 $\{p_2, \dots, p_{N/2}\}$,利用对称性得到 $(p_{-N/2+1}, \dots, p_{-1})$,由约束条件可知

$$p_0 = p_1 = \frac{1}{2} - \sum_{r=2}^{N/2} p_r \quad (3)$$

2) 设定进化代数,产生初始群体。选择算子,使用与个体适应度成正比的概率来选择个体,适应度高的个体更有机会存活下来。同时,强迫当前种群中适应度最高的个体无条件存活下来,避免因概率误差而造成优秀个体的丢失。

3) 确定交叉概率 P_c 与变异概率 P_m ,交叉概率与变异概率直接影响遗传算法的行为和性能,在保证群体多样性的同时,保证算法的收敛性。

4) 交叉算子。根据交叉概率随机选择一对父代染色体 Q_1 与 Q_2 ,交叉后得到子代中一对新的染色体 Q'_1, Q'_2 。

5) 变异算子。根据变异概率随机选择待变异的染色体,它被随机产生的新染色体取代。

6) 当达到进化代数时,进化终止;否则,返回步骤3。

设定初始种群为50,进化代数为100,通过上述遗传算法,可计算出自适应匹配信号特征的预测器系数 $P_{opt} = [p_{-N/2+1}, \dots, p_1, \dots, p_{N/2}]$ 。

2.1.2 自适应更新器设计

重构误差 J_U 表示为

$$J_U = E \{(\hat{s}^{(0)} - s^{(0)})^2\} + E \{(\hat{d}^{(0)} - d^{(0)})^2\} \quad (4)$$

其中： $\hat{s}^{(0)}$ 与 $\hat{d}^{(0)}$ 分别为当细节信号 $d=0$ 时重构信号 \hat{x} 的偶序列样本和奇序列样本。

自适应更新器设计可转化为在约束条件下实现重构误差 J_U 最小化的问题。

$$\begin{cases} u_l = u_{-l+1} \\ \sum_{l=1}^{N/2} u_l = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (l = 1, 2, \dots, \tilde{N}/2) \quad (5)$$

当细节信号 $d=0$ 时,二代小波逆变换过程如图3所示。 $\hat{s}^{(0)}$ 与 $\hat{d}^{(0)}$ 表示为

$$\hat{s}^{(0)} = s \quad (6)$$

$$\hat{d}^{(0)} = P*s \quad (7)$$

其中：“*”为卷积运算。

令 λ 为拉格朗日算子,根据约束条件式(5),将目标函数 J_U 转化为 $J_u(u, \lambda)$

$$J_u(u, \lambda) = E \{(\hat{s}^{(0)} - s^{(0)})^2\} + E \{(\hat{d}^{(0)} - d^{(0)})^2\} + \lambda \left(\frac{1}{4} - \sum_{l=1}^{N/2} u_l \right) \quad (8)$$

求解式(8)可获得系数 $[u_1, u_2, \dots, u_{N/2}]$ 。根据更新器系数的对称性,可获得自适应信号特征的更新器算子 $U_{opt} = [u_{-N/2+1}, \dots, u_1, \dots, u_{N/2}]$ 。

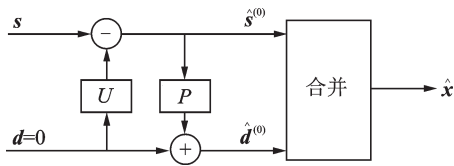


图3 二代小波逆变换

Fig.3 Second generation wavelet inverse transform

2.2 自适应二代小波的分解与重构

自适应二代小波的分解过程分为3个步骤:预测过程、更新过程和标准化过程。设原始信号序列为 x ; c_k 为原始信号第 k 层逼近信号; c_{k+1} 为原始信号第 $k+1$ 层逼近信号; r_{k+1} 为原始信号第 $k+1$ 层细节信号。图4为自适应二代小波的改进冗余分解过程。其中: P_{opt} , U_{opt} 分别为预测器和更新器; s_{k+1} , d_{k+1} 为更新序列; a_{k+1} 和 b_{k+1} 为标准化系数。自适应二代小波的重构过程由3个步骤组成:标准化逆

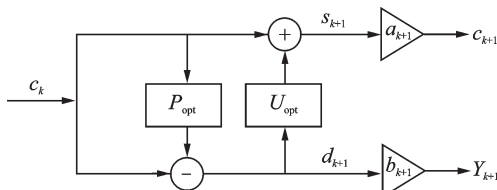


图4 自适应二代小波的改进冗余分解

Fig.4 Improved redundant decomposition of adaptive second generation wavelet

过程、恢复更新过程和恢复预测过程,如图5所示。

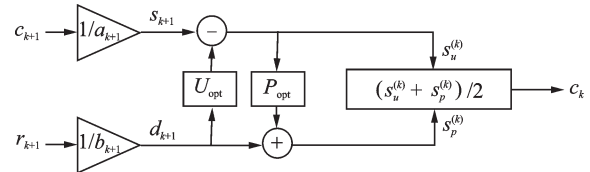


图5 自适应二代小波的重构过程

Fig.5 Reconstruction of adaptive second-generation wavelets

2.3 自适应二代小波降噪原理

自适应二代小波降噪是对分解后的小波系数通过阈值消除噪声,通常分硬阈值法和软阈值法2类。本研究选取软阈值滤波方式。

3 实验研究

为检验阵列涡流检测的有效性,制作专用试件进行裂纹检测。先通过阵列涡流探头获取信号,然后通过自适应二代小波进行信号提取,并与原始信号进行对比。

3.1 阵列涡流检测实验

采用0Cr13Ni4Mo制作标准试件,在试件上加工0.13 mm×0.5 mm×5 mm, 0.15 mm×1 mm×5 mm和0.17 mm×2 mm×5 mm的矩形槽,喷涂厚度为0.7 mm的碳化钨涂层,可以很好地覆盖所有矩形槽。检测对比试件如图6所示。

阵列涡流检测设备如图7所示。检测设备为



图6 检测对比试件

Fig.6 Testing reference block

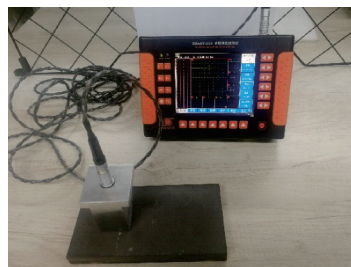


图7 阵列涡流检测设备

Fig.7 Array eddy current testing equipment

SMART-208型多频涡流检测仪,主要参数包括:检测物理通道数8个,检测频率2个,阻抗平面2种,频率检测范围为64 Hz~5 MHz,增益为0~90 dB,高通滤波为0~500 Hz,低通滤波为10 Hz~10 kHz。涡流探头的响应频率为100 Hz~100 kHz,主要用于铁磁性材料的裂纹检测。

将涡流探头放置在试块中间部位,由左向右滑动,依次检测3种不同规格的矩形槽缺陷。

3.2 数据分析

3种步骤下的检测结果非常一致,0.15 mm×1 mm×5 mm,0.17 mm×2 mm×5 mm矩形槽均可明显识别,但0.13 mm×0.5 mm×5 mm的矩形槽响应信号中噪声很大,识别困难,与表面粗糙度有关。随后采用适应二代小波变换提高信号质量。

对于0.13 mm×0.5 mm×5 mm矩形槽阵列涡流检测的原始信号,图8为阻抗实部与数据点关系。图9为阻抗虚部与数据点关系。图10为阻抗图。从图形看出,在涡流检测的原始信号中,无论阻抗实部和阻抗虚部,均存在巨大的干扰信号,导致阻抗图错

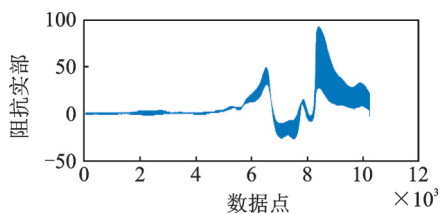


图8 阻抗实部与数据点关系

Fig.8 Relation between impedance real part and data points

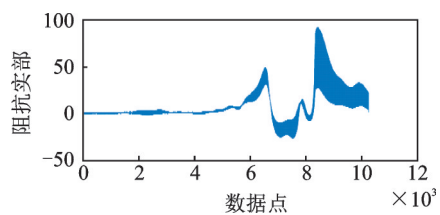


图9 阻抗虚部与数据点关系

Fig.9 Relation between impedance imaginary part and data points

综复杂,难以识别矩形槽缺陷的存在。

采用自适应二代小波变换进行信号滤波,设计自适应匹配涡流检测信号特征的预测器与更新器。经过实验测试,发现预测器系数最佳个数为8,更新器系数最佳个数为4,计算得到的预测器系数为[0.13, -0.094, -0.016, 0.48, 0.48, -0.016, -0.094, 0.13],更新器系数为[0.14, 0.12, 0.12, 0.14]。利用自适应匹配信号特征的预测器与更新器对涡流信号进行一层冗余分解,得到逼近信号和细节信号。设定信号的噪声阈值为信号峰峰值的

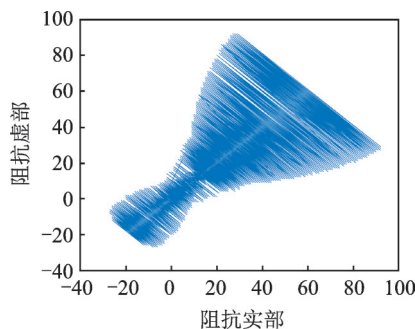


图10 阻抗图

Fig.10 Impedance

6%,该信号中对应的数值为5,当小波系数小于5时,强制置0。随后进行自适应二代小波信号重构,得到消噪后的信号。图11为自适应二代小波滤波后阻抗实部。图12为自适应二代小波滤波后阻抗虚部。由图11,12可见,阻抗实部信号和阻抗虚部信号均得到很大提升,相应的噪声得到了消除。图13所示的自适应二代小波滤波后阻抗能够明显地识别出0.13 mm×0.5 mm×5 mm的矩形槽缺陷。

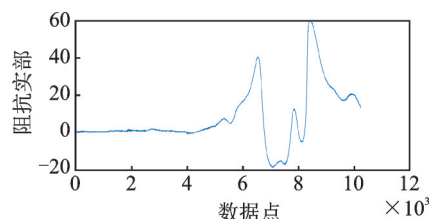


图11 自适应二代小波滤波后阻抗实部

Fig.11 Impedance real part after adaptive second-generation wavelet filtering

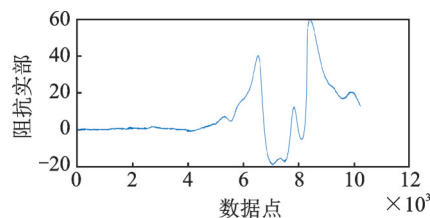


图12 自适应二代小波滤波后阻抗虚部

Fig.12 Impedance imaginary part after adaptive second-generation wavelet filtering

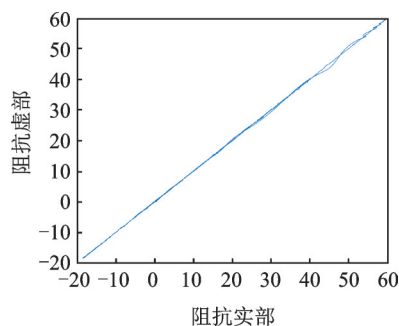


图13 自适应二代小波滤波后阻抗

Fig.13 Impedance after adaptive second-generation wavelet filtering

4 结论

1) 阵列涡流检测能够很好地抑制提高效应,且不受缺陷方向的影响,在水电站现场检测过流部件涂层下裂纹具有良好的普适性。

2) 自适应二代小波能够有效匹配信号特征,消除噪声影响,提高信号质量。

3) 基于自适应二代小波变换阵列涡流信号极大提高诊断效果,能够识别出 $0.13\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 矩形槽缺陷,检测精度高,适应性强,具有较好的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 王铁军, 范学领, 虞烈, 等. 热障涂层强度理论与检测技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2016: 231-233.
- [2] 李勇, 李太江, 李聚涛, 等. HVAF 和 HVOF 喷涂 WC-CoCr 涂层的组织性能对比[J]. 热力发电, 2015, 44(4): 96-99.
LI Yong, LI Taijiang, LI Jutao, et al. Characterization on microstructures and properties of WC-CoCr coating deposited by HVAF and HVOF processes power generation[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(4): 96-99. (in Chinese)
- [3] 夏纪真, 黄建明. 工业无损检测技术(涡流检测)[M]. 广州: 中山大学出版社, 2018: 5-6.
- [4] 李运涛, 宋成, 胡斌, 等. 奥氏体不锈钢均匀表面的阵列涡流检测技术应用[J]. 无损检测, 2018, 40(12): 68-73.
LI Yuntao, SONG Cheng, HU Bin, et al. Application of eddy current array testing technology for uniform surface of austenite stainless steel[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(12): 68-73. (in Chinese)
- [5] 郭永良, 袁丽华, 段怡雄. 阵列涡流检测裂纹的定量仿真研究[J]. 失效分析与预防, 2017, 12(1): 1-6.
GUO Yongliang, YUAN Lihua, DUAN Yixiong. Quantitative simulation of eddy current array test crack [J]. Failure Analysis and Prevention, 2017, 12(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] 崔厚路. 阵列涡流在钢管塔锻造法兰检测中的应用[J]. 无损探伤, 2017, 41(2): 47-48.
CUI Houlu. Application of array eddy current in detecting forging flange of steel tube tower [J]. Nondestructive Testing Technology, 2017, 41(2): 47-48. (in Chinese)
- [7] 焦胜博, 何宇廷, 丁华, 等. 小波变换在飞机结构疲劳裂纹监测信号处理中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 5: 60-63.
JIAO Shengbo, HE Yuting, DING Hua, et al. Application of wavelet transform in signal processing of aircraft metallic structure fatigue crack monitoring [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, 5: 60-63. (in Chinese)
- [8] SHEN Z J, CHEN X F, HE Z J. Hybrid intelligent fault diagnosis based on adaptive lifting wavelet and multi-class support vector machine [C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Berlin: Springer Verlag, 2010: 415-420.
- [9] 张志斌, 郑海起, 唐力伟. 自适应二代小波变换在振动信号降噪中的应用[J]. 机械强度, 2006, 48(S): 48-51.
ZHANG Zhibin, ZHENG Haiqi, TANG Liwei. Vibration signal denoising using adaptive second generation wavelets [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 48(S): 48-51. (in Chinese)
- [10] 何伟, 王义, 李华兴. 自适应冗余第二代小波在信号去噪中的应用[J]. 矿山机械, 2012, 40(2): 39-43.
HE Wei, WANG Yi, LI Huaxing. Application of adaptive redundancy second generation wavelet in signal denoising [J]. Mining Machinery, 2012, 40(2): 39-43. (in Chinese)
- [11] 岳明明, 张卫民, 庞炜涵, 等. 阵列涡流检测缺陷的理论基础和仿真分析[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(2): 150-155.
YUE Mingming, ZHANG Weimin, PANG Weihai, et al. Theoretical basis and simulation analysis of eddy current array to cracks defection [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(2): 150-155. (in Chinese)
- [12] 张卫民, 岳明明, 庞炜涵, 等. 阵列涡流检测技术的研究进展现状分析[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(1): 181-183.
ZHANG Weimin, YUE Mingming, PANG Weihai, et al. Present situation analysis and research progress of eddy current array testing technology [J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(1): 181-183. (in Chinese)
- [13] SWELDENS W. The construction and application of wavelets in numerical analysis [D]. Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 1995.
- [14] SWELDENS W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets [J]. Journal of Mathematical Analysis, 1997, 29(2): 511-546.
- [15] GOUZE A, ANTONINI M, BARLAUD M, et al. Design of signal-adapted multidimensional lifting scheme for lossy coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(12): 1563-1589.



第一作者简介:王鹏,男,1983年3月生,硕士、正高级工程师。主要研究方向为电站金属部件无损检测、锅炉压力容器定期检验。曾发表《汽轮机转子T型叶根-轮槽系统力学分析》(《热力发电》2019年第48卷第2期)等论文。
E-mail: 13072988896@163.com