

# 基于小波包与ICA的无损检测信号分离方法\*

石跃飞, 南新元<sup>†</sup>

(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 无损检测是现役管道检测的重要方法. 为了能有效利用无损检测中的电磁超声与脉冲涡流信号, 本文基于电磁超声与脉冲涡流信号的特性, 利用小波包与ICA结合算法对电磁超声/脉冲涡流复合信号进行了分离, 并与VMD、VMD-ICA和小波包算法分离结果进行了对比. 结果表明: 在电磁超声/脉冲涡流复合信号的分离中, 小波包与ICA结合算法的分离效果更好, 验证了所提算法对复合信号分离的有效性.

**关键词:** 无损检测; 信号分离; 特性分析; 小波包与ICA

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2021.02.28.0002

**中图分类号:** TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2022)02-0236-06

**引文格式:** 石跃飞, 南新元. 基于小波包与ICA的无损检测信号分离方法[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(2): 236-241.

**英文引文格式:** SHI Yuefei, NAN Xinyuan. Research on signal separation technology in nondestructive testing based on wavelet packet and ICA[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(2): 236-241.

## Research on Signal Separation Technology in Nondestructive Testing Based on Wavelet Packet and ICA

SHI Yuefei, NAN Xinyuan

(School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

**Abstract:** Nondestructive testing is an important method of pipeline testing in service. In order to use electromagnetic ultrasound and pulsed eddy current signals effectively in nondestructive testing, based on the characteristics of electromagnetic ultrasound and pulsed eddy current signals, this paper uses wavelet packet and ICA combined algorithm to separate the electromagnetic acoustic transducer/pulse eddy current testing composite signals, and compared with the separation results of VMD, VMD-ICA and wavelet packet algorithms. The results show that the combination of wavelet packet and ICA has a better separation effect in the separation of electromagnetic acoustic transducer/pulse eddy current testing composite signals, which proves the effectiveness of the proposed algorithm in separating composite signals.

**Key words:** nondestructive testing; signal separation; characteristic analysis; wavelet packet and ICA

### 0 引言

管道运输具有成本低、建设周期短、运输量大且稳定等优点, 近年来被广泛应用于资源运输<sup>[1-2]</sup>. 由于管道长期处于高温、高压的运输环境且在持续、高强度的作业下, 其运输物质的冲击、环境与气候的变化、化学腐蚀等都会导致管道内外表面发生裂纹、减薄、破裂等缺陷<sup>[3-5]</sup>. 若不能及时发现并处理这些缺陷, 将会导致资源泄露, 可能留下极大的安全隐患. 因此, 方便快速高效自适应强的无损检测技术是工业中急需的.

压电超声检测技术是目前世界上使用较为成熟的一种无损检技术, 具有检测距离长、精度高、抗干扰能力强等优点<sup>[6]</sup>. 但压电超声检测技术要与被测物体接触并需要涂抹耦合剂, 因此对被测物的表面要求高且检测速度慢. 与此相比, 电磁超声 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) 检测无需耦合剂且与被测试件非接

\* 收稿日期: 2021-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61463047).

作者简介: 石跃飞 (1993-), 男, 硕士生, 从事无损检测技术和信号分离技术的研究, E-mail: 806515223@qq.com.

<sup>†</sup> 通讯作者: 南新元 (1967-), 男, 教授, 主要从事计算机控制技术和现场总线技术的研究, E-mail: nxyxd@sina.com.

触,对试件表面要求低,能在极其恶劣的环境下进行快速工作<sup>[7]</sup>.当缺陷在试件近表面时,采集到的电磁超声回波信号与激励信号难以区分,因而电磁超声检测技术有亚表面盲区现象,主要用于深层缺陷的检测.脉冲涡流(Pulse Eddy Current Testing, PECT)检测技术因趋肤深度的限制,无法检测试件深部的缺陷,但对于近表面的缺陷有较高的检测灵敏度<sup>[8]</sup>.且电磁超声信号本身就含有脉冲涡流信号,因此电磁超声与脉冲涡流复合检测方法具有优势互补、节约成本和效率更高的特点,且检测结果有更好的可信度<sup>[9-10]</sup>.但复合检测的难点在于如何从检出的复合信号中分离出需要的电磁超声信号和脉冲涡流信号.

文献<sup>[11]</sup>设计了一种能在高温环境下检测壁厚的电磁超声/脉冲涡流双探头,该设计降低了噪声的污染,改善了信号处理的方式.刘素贞等<sup>[12]</sup>开发了能同时满足电磁超声和脉冲涡流的复合式探头,以解决复合信号分离问题,但该探头体积庞大、制作成本高、不便于现场检测携带.田明明等<sup>[13]</sup>利用有限元软件开发了电磁超声/脉冲涡流复合信号的数值模拟程序,并用小波分析算法对复合信号进行了分离且用实验进行了验证.根据上述研究,本文依据电磁超声与脉冲涡流信号的原理和特点提出了基于小波包与ICA结合的复合信号分离方法.

## 1 电磁超声/脉冲涡流方法检测模型及原理

电磁超声与脉冲涡流检测方法都是基于电磁感应原理,其复合检测方法的原理和模型如图1所示.即在图1中的激励线圈中施加激励频率为2 MHz的半正弦脉冲电流时,线圈周围会产生强交变磁场,试件在变化的磁场中会引起回路的磁通量发生变化,因而在试件亚表面内会产生感应电流,这些电流会自动闭合且形成漩涡状的形式,该涡流就是脉冲涡流.同时,试件在永磁体产生的静态偏置磁场中亚表面的涡流与静态偏置磁场互相作用会产生平行于试件表面的洛伦兹力,洛伦兹力又会使试件发生振动,试件振动会切断磁力线产生新的涡流,此涡流就是超声涡流<sup>[14]</sup>.

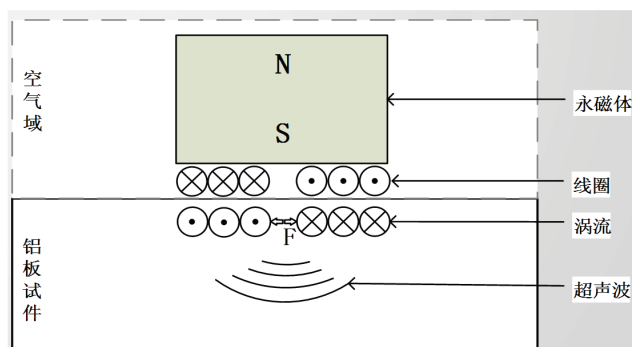


图1 复合信号数值模拟原理图

基于此模型检出的电磁超声涡流、脉冲涡流和复合信号如图2所示.可以看出,超声涡流信号非常微弱,且有凸起的反射回波信号出现;而脉冲涡流信号强度大,形状近似于一条曲线;复合信号的波形主要由脉冲涡流信号决定,超声信号对其无明显变化.基于信号各自的特性,拟采用算法对复合信号进行分离提取以获得所需的超声涡流和脉冲涡流信号.

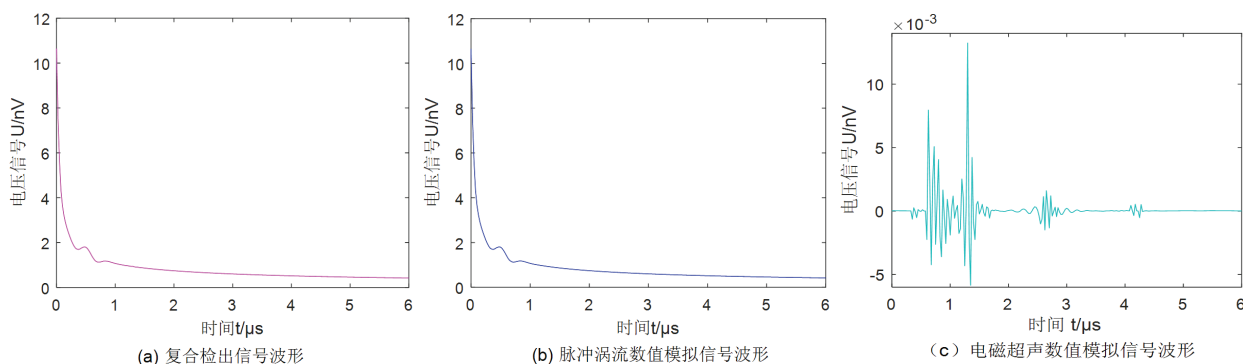


图2 三种模拟信号波形图

## 2 变分模态分解算法的基本原理

变分模态分解算法(Variational Mode Decomposition, VMD)是为有效解决经验模态(Empirical Mode Decomposition, EMD)分解过程中出现模态混叠和虚假分量问题而提出的一种新的完全非递归的信号分解方法,它的本质是多个维纳滤波器组<sup>[15]</sup>.VMD算法能够将复合信号分解成若干个固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),即离散的稀疏子信号.假定分解出的每个模态函数 $u_k$ 有一个中心频率 $\omega(k)$ 和一个有限带宽,对

应的约束条件是每个模态函数之和等于输入信号 $\chi(t)$ , 并且估计出的模态函数带宽之和应最小. 在求解变分模型的迭代过程中,  $\omega(k)$ 和各模态函数的带宽不断更新, 最后达到复合信号的自适应分解. 复合信号在 $K$ 尺度下分解, 利用IMF分量估计带宽和最小值来构造变分问题. 相应的变分约束模型表达式为:

$$\begin{aligned} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} & \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} & \sum_k u_k = \chi(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\delta(t)$ 是单位冲击函数;  $\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_k\}$ 表示每个模态函数;  $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_k\}$ 表示每个模态函数的中心频率;  $*$ 表示卷积.

利用二次惩罚因子确保重构信号的保真度, 再利用拉格朗日乘子确保约束的严格性. 扩展后的拉格朗日表达式为:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^k \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| \chi(t) - \sum_{k=1}^k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), \chi(t) - \sum_{k=1}^k u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ 是二次惩罚因子;  $\lambda$ 表示拉格朗日乘子; 利用乘法算子交替相乘法求解变分问题. 通过交替更新 $\hat{u}_k^{n+1}$ ,  $\hat{\omega}_k^{n+1}$ 和 $\hat{\lambda}_k^{n+1}$ 的值, 求出扩展拉格朗日表达式的鞍点. 为方便计算, 将 $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 和 $\hat{\omega}_k^{n+1}$ 更新公式用傅里叶变换表示为:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \left( \hat{\chi}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right) \frac{1}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

式中:  $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 相当于 $\hat{\chi}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega)$ 的维纳滤波;  $\hat{u}_k(\omega)$ 经傅里叶逆变换后实部是 $u_k(t)$ .

### 3 小波包算法的基本原理

小波分析对信号低频部分进行划分而舍弃所分解信号的高频部分, 造成其不能够精确地分解信号. 小波包分解算法是在小波分析算法上改进的、可以同时信号低频和高频部分进行划分的一种更为精细的信号处理方法. 小波包克服了小波分解中高频段频率分辨率较差和低频段时间分辨率较差的问题, 弥补了小波分析算法的不足<sup>[16]</sup>.

在小波包算法中, 定义函数 $w_n(t)$ 的闭包空间是子空间 $W_j^n$ , 函数 $w_{2n}(t)$ 的闭包空间是 $W_j^{2n}$ . 令 $w_n(t)$ 满足下列双尺度方程:

$$w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) w_n(2t - k) \quad (5)$$

$$w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) w_n(2t - k) \quad (6)$$

式中:  $h(k)$ ,  $g(k)$ 分别是高通滤波器和低通滤波器的系数, 并且 $g(k) = (-1)^k h(1-k)$ , 即这两个系数是正交系数; 函数族 $\{w_n\}$ 是小波包.

小波包分解算法公式如下:

$$\begin{cases} q_l^{j,2n} = \sum_k h_{k-2l} q_k^{j-1,n} \\ q_l^{j,2n+1} = \sum_k g_{k-2l} q_k^{j-1,n} \end{cases} \quad (7)$$

小波包重构算法公式如下:

$$q_l^{j-1,n} = \sum_k \left[ \hat{h}_{l-2k} q_k^{j,2n} + \hat{g}_{l-2k} q_k^{j,2n+1} \right] \quad (8)$$

其中:  $q_l^{j,2n}$ 和 $q_l^{j,2n+1}$ 是逼近函数在尺度 $2^l$ 子空间 $W_j^n$ 和 $W_j^{2n}$ 上的投影.

### 4 ICA算法的基本原理

独立分量分析算法 (Independent Component Analysis, ICA) 是基于信号高阶统计信息的特征提取方法. 它的核心内容是从观测到的单通道信号中分离出互相独立的混合源信号. 假定互相独立的源信号是  $Y(t) = [y_1(t), \dots, y_m(t)]^T$ , 观测的信号是  $H(t) = [h_1(t), \dots, h_n(t)]^T$ , 则  $H(t)$  用  $Y(t)$  表示为:

$$H(t) = AY(t) \tag{9}$$

其中:  $A$  是  $n \times m (n \geq m)$  的未知满秩混合矩阵. 独立分量分析算法是为了在源信号  $Y(t)$  和混合矩阵  $A$  都未知的情况下, 找到一个  $m \times n$  的满秩解混矩阵  $B$ , 使得分离出的独立分量信号  $\hat{y}(t)$  是源信号的近似估计:

$$\hat{y}(t) = BH(t) = BAY(t) \tag{10}$$

### 5 基于VMD-ICA和小波包与ICA的复合信号分离

由于无损检测中检出的复合信号是单通道观测信号, 而ICA算法只适用于超定或正定盲源分离问题, 因此需要用其它分离算法对复合信号进行预处理, 得到虚拟多信号通道, 才能便于利用ICA算法对其进行分离. 将经过VMD和小波包分解的固有模式分量作为ICA算法的输入矩阵, 经解混之后, 得到相互独立的分量矩阵, 从而解决了PECT/EMAT复合检测中信号分离的难点问题. 具体流程如图3所示.

### 6 仿真与结果分析

从前面的分析可以得知, 复合模拟信号中只含有EMAT和PECT两种信号, 因此对复合模拟信号进行VMD分解时, 为保证信号分解的保真度, 取  $\alpha = 2000$ 、 $K = 2$ 、 $\tau = 0.3$ . 分离结果如图4所示.

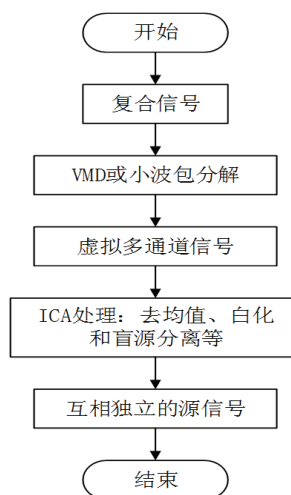


图3 复合信号分离实现流程图

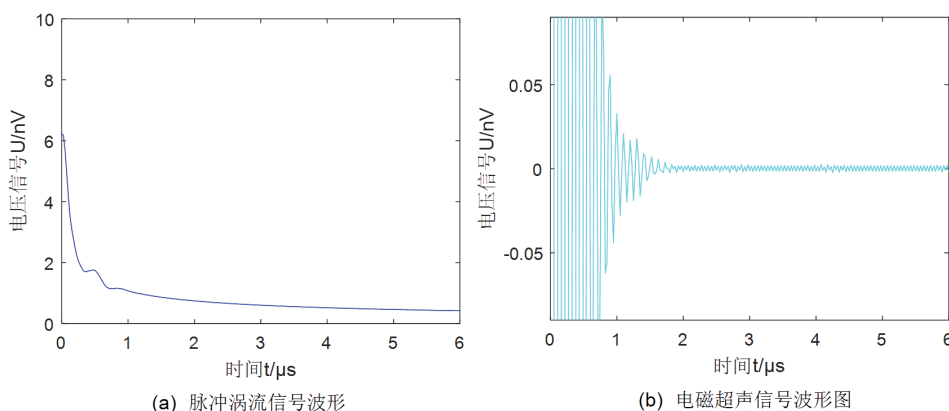


图4 VMD分解的源信号结果波形

从图4中的复合信号分离结果可以看出, 脉冲涡流信号虽与图2中的脉冲涡流源信号波形相似, 但幅值明显偏小些. 超声涡流未见回波信号. 因VMD算法本身就是维纳滤波器组且消噪能力强, 电磁超声信号又比较微弱, 分解过程中边缘效应也存在, 导致信号分解效果不理想, 没有完全分离.

基于VMD分离的结果与分析, 再对复合模拟信号进行VMD-ICA算法分离, 经过分离处理后的信号如图5所示. 从图5波形图中可以看出, VMD-ICA算法分解出的两个图形结果几乎一样, 即看不到电磁超声回波信号, 也看不到脉冲涡流信号波形. 说明此方法不适宜用于该复合信号的分解.

从上面两种算法的分离结果可以看出, VMD和VMD-ICA两种算法都不适用于此复合信号的分解. 根据小波包算法在信号处理方面的特性, 利用小波包算法对复合信号进行分离, 小波基选择db4基函数, 将复合信号的分解层数选择为3, 分离重构后的信号如图6所示. 从图6分离结果可以看出, 脉冲涡流信号的幅值明显偏小, 信号波形也存在一定的偏差; 电磁超声信号的分解结果也存在一定的误差. 但与VMD和VMD-ICA算法分解结果相比, 小波包算法的分解结果较为理想.

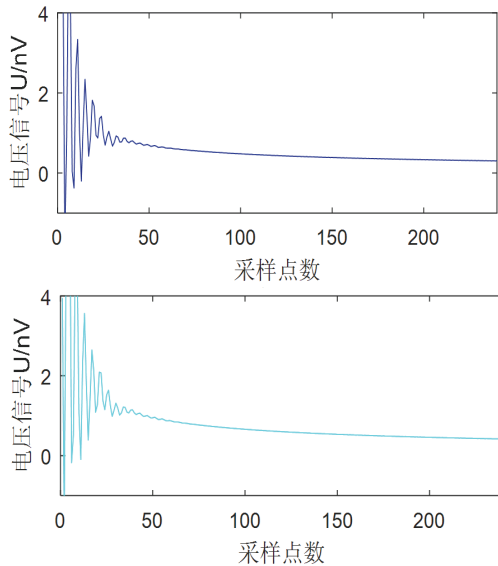


图5 VMD-ICA分解的源信号结果波形

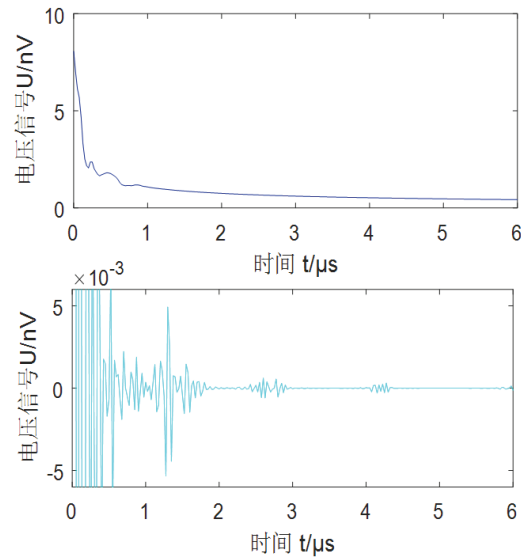


图6 小波包算法分解的独立源信号波形图

根据PECT和EMAT信号各自的特点, 利用小波包与ICA联合的方法对复合信号进行分离. 小波基选择db4基函数, 分解层数选择为2, 然后将分解重构的结果作为ICA算法的输入, 经ICA盲源分离后的两个独立源信号结果如图7所示.

从图7中的结果可以看出, 小波包与ICA联合算法分解出的电磁超声与脉冲涡流信号的波形与图2中相应信号的波形相似, 但幅值不等. 这是因ICA分离算法只能将源信号在某些程度上估计出来, 由于缺乏先验知识, ICA分离算法不能完全实现源信号的估计. 且ICA算法在分离过程中有两个不确定性因素:

- (1) 分解出的源信号各分量次序的不确定性;
- (2) 分解出的源信号各分量幅度的不确定性, 即分离出的信号的幅度与源信号的幅度可能有差异.

尽管ICA算法分离出的信号次序和幅度具有不确定性, 但信号中包含的绝大部分信息都在波形中, 其并不影响源信号的特征识别. 且与VMD算法、VMD-ICA算法和小波包算法相比, 在复合信号的分离中, 小波包与ICA联合算法对此复合信号的分离结果更好.

## 7 结论

笔者首先阐述了PECT和EMAT的产生机理以及VMD、ICA和小波包算法的各自原理, 并分析了PECT、EMAT和复合信号波形的特性. 其次利用VMD、VMD-ICA和小波包、小波包与ICA算法对复合无损检测中的检出信号进行了分离. 观察各自分离后的时域波形图可知, 在PECT/EMAT复合信号中, 小波包与ICA结合算法

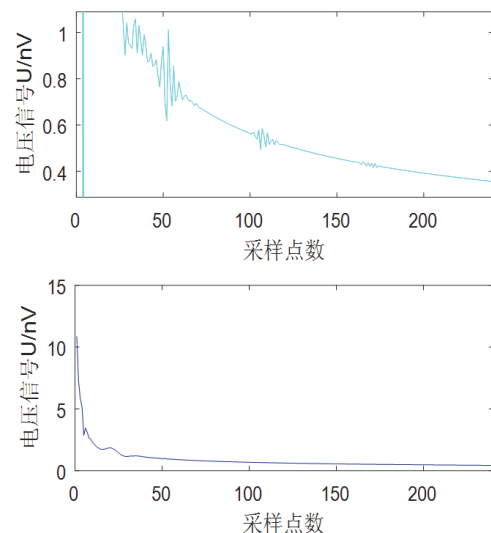


图7 小波包与ICA联合分解的独立源信号波形图

的分离效果更好,验证了所提算法的有效性.

### 参考文献:

- [1] 李秋扬,赵明华,任学军,等.中国油气管道建设现状及发展趋势[J].油气田地面工程,2019,38(S1):14-17.
- [2] 祝恣智,吴超,李秋扬,等.全球油气管道发展现状及未来趋势[J].油气储运,2017,36(4):375-380.
- [3] 臧延旭.管道壁厚测量技术研究进展[J].管道技术与设备,2013,3:20-22.
- [4] 杨理践,马凤铭,高松巍.管道漏磁在线检测系统的研究[J].仪器仪表学报,2004,25(S4):1052-1054.
- [5] 杨理践,王健,高松巍.管道腐蚀超声波在线检测技术[J].中国测试,2014,40(1):88-92.
- [6] 杨金生,邱城,高辉明,等.管道压电超声腐蚀内检测技术研究进展[J].油气储运,2018,37(6):608-612.
- [7] 高会栋.电磁超声技术在焊缝检测中的应用[J].无损检测,2010,32(11):850-853+856.
- [8] 田明明,解社娟,肖盼,等.基于脉冲涡流/电磁超声复合检测方法的复杂缺陷检测[J].无损检测,2016,38(12):9-14.
- [9] 郭伟.一种基于EMAT与PECT机理层复合的无损检测方法研究[D].成都:电子科技大学,2020.
- [10] 孙峥.基于电磁超声与脉冲涡流的管道内检测技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [11] RYOICHI U, TETSUYA U, TOSHIYUKI T. Application of EMAT/EC dual probe to monitoring of wall thinning in high temperature environment[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33: 1317-1327.
- [12] 刘素贞,孟学艳,张闯,等.金属材料缺陷的电磁超声/涡流复合检测技术研究[J].声学技术,2018,37(1):43-50.
- [13] 田明明,解社娟,韩捷,等.基于小波分析的脉冲涡流/电磁超声复合无损检测方法[J].中国机械工程,2019,30(16):1925-1930.
- [14] XIE S J, TIAN M M, XIAO P, et al. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection[J]. NDT and E International, 2017, 86: 153-163.
- [15] LI X H, WAN S K, HUANG X W, et al. Milling chatter detection based on VMD and difference of power spectral entropy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111: 2051-2063.
- [16] 邢家维,金能,林湘宁,等.基于小波包变换的电流互感器饱和识别及有效数据运用策略[J].电工技术学报,2019,34(6):1170-1179.

责任编辑:赵新科

(上接第228页)

- [28] MARCYSIAK A, SZAREK S. Effectiveness of production in soil contain different of heavy metal level[J]. Acta Scientiarum Polonorum-Oeconomia, 2009, 81(6): 1378-1382.
- [29] KHAN S, CAO Q, ZHENG Y M, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2008, 152(3): 686-692.
- [30] 郭朝晖,肖细元,陈同斌,等.湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J].地理学报,2008,63(1):3-11.
- [31] 胡慧玲,玉素甫·艾力,阿布力米提·阿布都卡德尔.乌鲁木齐市安宁渠区蔬菜中重金属的分布特征研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2003,20(3):260-263.
- [32] 周天骧.新疆干旱区土壤、作物和食品中锌的含量与人体健康[J].新疆大学学报(自然科学版),1992,9(4):111-114.
- [33] 任丽娟,柴琳琳,郭昱,等.螯合剂对镉在土壤和紫花苜蓿中积累的影响研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2015,32(3):330-335.
- [34] NAYYAR V K, ARORA C L, KATAKI P K, et al. Management of soil micronutrient deficiencies in the rice-wheat cropping system[J]. Journal of Crop Production, 2008, 4(1): 87-131.
- [35] 李野,赵玉杰,周启星,等.基于土壤-稻米镉传输模型的太湖流域水稻禁产区筛选研究[J].农业环境科学学报,2012,31(1):75-84.
- [36] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [37] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-2833.

责任编辑:张自强