

文章编号: 1006-4710(2015)03-0374-05

脉冲调制涡流检测金属构件亚表面腐蚀缺陷研究

闫贝¹, 李勇^{1,2}, 李达¹, 刘相彪¹, 李一力¹, 陈振茂^{1,2}, 王钧³

(1. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学 核能结构安全检测与完整性评价研究中心, 陕西 西安 710049;

3. 中航飞机股份有限公司 西安制动分公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 亚表面腐蚀缺陷严重影响在役装备关键金属构件的完整性。本文提出一种新型脉冲涡流检测技术,即脉冲调制涡流检测技术,探究该技术在金属构件亚表面腐蚀缺陷检测和评估中的技术优势。首先,基于退化磁矢量法,建立了脉冲调制涡流检测金属构件亚表面腐蚀缺陷的高效有限元仿真模型,仿真分析了脉冲调制涡流检测信号及其特征与金属构件亚表面腐蚀缺陷深度间的关联规律,探究了该技术的优势性。同时,搭建了脉冲调制涡流/脉冲涡流双检测试验系统,通过试验,进一步探究两种技术在金属构件亚表面腐蚀缺陷检测中的优劣,试验结果验证了仿真分析结论。研究表明,对于金属构件亚表面腐蚀缺陷检测,脉冲调制涡流检测技术较脉冲涡流检测技术,具有更高的灵敏度。

关键词: 电磁无损检测; 脉冲调制涡流检测; 亚表面腐蚀缺陷; 有限元仿真; 灵敏度分析

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

Research on pulsed-modulation-based eddy current evaluation of subsurface corrosion in defect metallic structures

YAN Bei¹, LI Yong^{1,2}, LI Da¹, LIU Xiangbiao¹, LI Yili¹, CHEN Zhenmao^{1,2}, WANG Jun³

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Research Centre for Inspection and Evaluation of Nuclear Structural Integrity, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. AVIC Aircraft Co., Ltd, Xi'an Brake Branch, Xi'an 710075, China)

Abstract: Subsurface corrosion defect severely influences the integrity of crucial components of in-service apparatus. In light of this, this paper proposes a new pulsed eddy current technique (PEC), namely pulsed-modulation-based eddy current technique (PMEC), and intensively investigates its advantages regarding inspection and evaluation of subsurface corrosion defect in metallic structures. The correlations of PMEC signals and their features with subsurface corrosion in different depths are firstly analyzed via the finite element analysis based on the numerical PMEC model established using reduced magnetic vector potential method. The advantages of PMEC over PEC are identified via simulations. In parallel, an experimental system implementing PMEC as well as PEC is built up. Through experiments, PMEC and PEC are further compared regarding inspection of subsurface corrosion defect in conductors. The experimental results are found to be in agreement with those from simulations. The results from both simulations and experiments indicate that compared with PEC, PMEC has higher sensitivity to subsurface corrosion defect in metallic structures.

Key words: electromagnetic nondestructive evaluation; pulsed-modulation-based eddy current technique; subsurface corrosion; finite element modeling; sensitivity analysis

收稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477127)。

作者简介: 闫贝,男,硕士生,研究方向为电磁无损检测理论与试验。E-mail: yanbei@stu.xjtu.edu.cn。

通讯作者: 李勇,男,副教授,博士,研究方向为结构完整性和装备安全理论与技术。E-mail: yong.li@mail.xjtu.edu.cn。

由于腐蚀、温差、流动等复杂服役环境,在役装备的关键金属构件中易出现亚表面腐蚀缺陷^[1-4],由于其隐蔽性不易检出,故该类缺陷对结构质量和装备安全危害性极大。为了保障设备安全运行,对在役金属构件亚表面腐蚀缺陷进行无损检测和评估至关重要。

传统脉冲涡流检测技术^[5-7](Pulsed Eddy Current Testing, PEC)通常采用方波电流信号作为激励,可在一次激励下获取金属构件不同深度的完整性信息。

为了解决方波激励信号能量分配问题,本文提出基于脉冲调制波^[8-10]激励的新型脉冲涡流检测技术,即脉冲调制涡流检测技术(Pulse-Modulation-Based Eddy Current Technique, PMEC),该技术继承了传统脉冲涡流检测技术的优势,同时也避免了激励信号直流成分和低频谐波成分占据大部分激励能量的弱点,能够将激励能量有效分配给能有效覆盖金属被测体内部的涡流场所对应的激励谐波成分,可有效改善检测系统的信噪比并提升检测灵敏度。通过本课题组开发的退化磁矢位法(AR法)对脉冲调制涡流检测进行仿真,探究了其在金属构件亚表面腐蚀缺陷检测中的技术优势,并集中在检测灵敏度方面与传统脉冲涡流检测技术进行了对比与讨论。

1 脉冲调制涡流检测有限元仿真

1.1 基于 AR 法的脉冲调制涡流检测有限元仿真模型

针对脉冲调制涡流检测的仿真分析,本文基于退化磁矢位法(AR)^[11],对原有的脉冲涡流检测高效仿真模型^[12-13]进行修改和补充,以建立脉冲调制涡流检测高效有限元计算模型。

在脉冲调制涡流检测有限元分析中,计算区域(如图 1 所示)由导体区域和非导体区域构成,而非导体区域由衰减区域、混合区域和正常区域构成。其中,变形矢量磁位 \mathbf{A}_r 为衰减区域; \mathbf{A}_r 与 \mathbf{A}_s (仅与电流源相关)为混合区域;通常矢量磁位 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_r + \mathbf{A}_s$ 为正常区域;正常区域包含了导体区域。

AR 方法的控制方程如下。

衰减区域和混合区域控制方程为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}_r = 0 \quad (1)$$

仿真使用棱边元,规范条件为 $\phi = 0$,则正常区域和导体区域控制方程为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

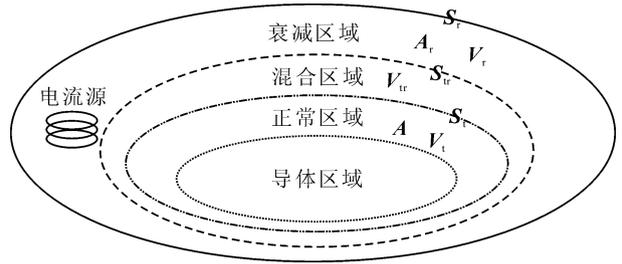


图 1 AR 法计算区域

Fig. 1 The modelling area of AR method

AR 方法的边界条件为式(3)~(4):

$$n \times \mathbf{A} = n \times (\mathbf{A}_r + \mathbf{A}_s) \quad (3)$$

$$n \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = n \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}_r + \mathbf{H}_s \right) \quad (4)$$

采用六面体棱边元方法对上述控制方程(1)、(2)进行离散处理,瞬态问题通过 Crank-Nicholson 直接积分法解决,可得低频电磁场控制方程为:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{A}\} + [\mathbf{C}]\left\{\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right\} = [\mathbf{M}]I(t) \quad (5)$$

式(5)中 $I(t)$ 为暂态激励电流信号, $[\mathbf{K}]$, $[\mathbf{C}]$, $[\mathbf{M}]$ 是全局系数矩阵。由傅立叶变换可知,将不同频率的正弦电流信号叠加可得脉冲调制涡流激励电流信号:

$$I(t) = \sum_{n=0}^N \tilde{F}_n e^{j\omega_n t} \quad (6)$$

式中, ω_n 和 \tilde{F}_n 为暂态激励电流信号谐波成分角频率和幅值。由式(5)~(6)可推导出脉冲调制涡流信号有限元计算公式:

$$B(t) = \sum_{n=1}^N \tilde{F}_n \{\tilde{B}_{n0}\} e^{j\omega_n t} \quad (7)$$

1.2 脉冲调制涡流检测有限元仿真实例

为进一步探究金属构件亚表面腐蚀缺陷的脉冲调制涡流检测,本文结合前述脉冲调制涡流检测有限元仿真模型,建立脉冲调制涡流检测金属构件亚表面腐蚀缺陷有限元仿真模型,如图 2 所示。

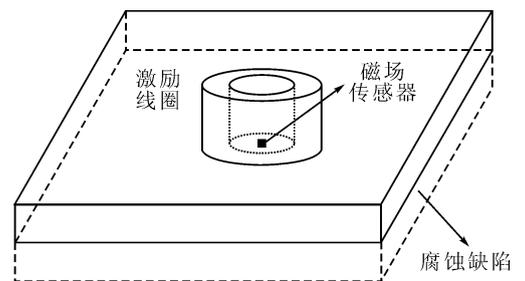


图 2 有限元模型示意图

Fig. 2 The FEM model of PMEC for subsurface corrosion

在该模型中,检测探头由盘式激励线圈和磁场传感器组成,激励线圈内径为 9.07 mm,外径为

11.95 mm, 高为 26.26 mm, 匝数为 1 600, 设计提离为 0.5 mm。磁场传感器放置于激励线圈底部中心位置, 用于拾取暂态磁场信号。被测试件材质为铝, 其电导率为 34 MS/m, 相对磁导率为 1, 无缺陷试件的尺寸为 100 mm×100 mm×5 mm。由于金属构件腐蚀缺陷一般面积较大(远大于检测探头有效覆盖面积), 因此可将其视为金属构件在厚度方向上的减薄。模型中, 设定腐蚀缺陷为下表面缺陷, 缺陷深度为 1~4 mm。

为了比较在金属亚表面腐蚀缺陷检测中两种技术的优劣, 在脉冲调制涡流检测仿真的同时, 对同一检测对象的脉冲涡流检测进行了仿真, 设定两者激励电流信号峰值为 1 A、占空比为 0.5, 脉冲涡流激励电流信号基频 f 与脉冲调制涡流调制波频率 f_m 相同均为 20 Hz, 脉冲调制涡流载波频率 f_c 为 200 Hz, 脉冲调制涡流检测与脉冲涡流检测的激励电流信号如图 3 所示。

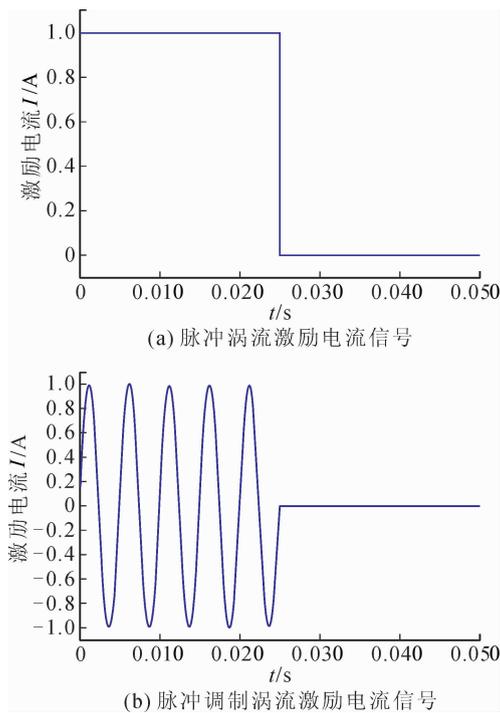


图3 脉冲调制涡流/脉冲涡流激励电流信号
Fig.3 Excitation current of PMEC and PEC

通过仿真, 在获得检测信号之后, 以无缺陷试件信号作为基准, 可得不同深度腐蚀缺陷的脉冲调制涡流/脉冲涡流差分信号, 如图 4 所示。由图 4 可见, 差分信号具有明显的峰值特征, 因此, 对于脉冲涡流差分信号和脉冲调制涡流差分信号, 均提取其差分信号极值作为检测信号特征量。

为了对比脉冲涡流检测与脉冲调制涡流检测对亚表面腐蚀缺陷深度变化的响应灵敏度, 在提取差

分信号极值之后, 采用下式, 对两种检测技术进行灵敏度分析。

$$S_i = \Delta B_i / B_j \quad (8)$$

其中, $i=1, 2, 3, 4$ (不同深度的腐蚀缺陷); ΔB_i 为不同深度腐蚀缺陷脉冲调制涡流/脉冲涡流差分信号极值; B_j 为脉冲调制涡流/脉冲涡流基准信号极值; S_i 体现了不同深度腐蚀缺陷脉冲调制涡流/脉冲涡流差分信号极值相对其基准信号的变化, 即为灵敏度。

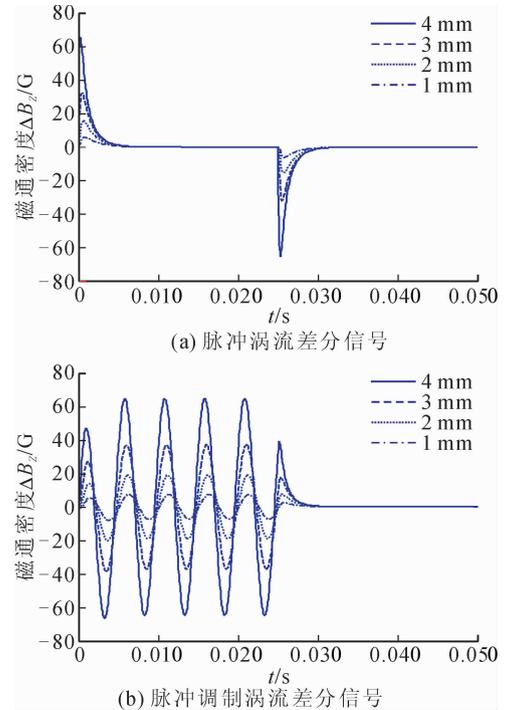


图4 不同腐蚀缺陷的差分信号

Fig.4 Differential signals of subsurface corrosion in different depths

为了研究脉冲涡流基频、脉冲调制涡流调制波频率和载波频率对检测信号及灵敏度的影响, 仿真中, 以上参数可变, 不同参数的灵敏度分析结果, 如图 5 所示。

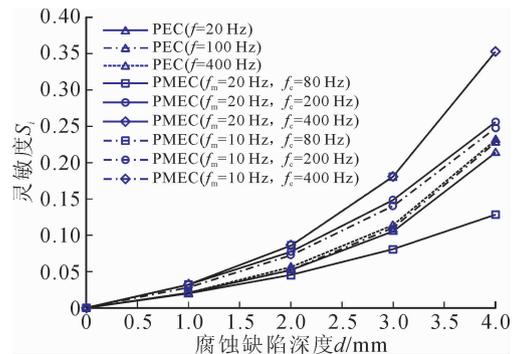


图5 脉冲调制涡流/脉冲涡流对不同深度
的腐蚀缺陷响应灵敏度

Fig.5 Sensitivity of PMEC/PEC differential signals to subsurface corrosion in different depths

由图 5 可见:①在金属构件亚表面腐蚀缺陷深度的评估中,脉冲涡流基频对检测灵敏度影响较小,脉冲调制涡流检测灵敏度主要受其载波频率的影响;②在一定频率范围内,提高脉冲调制涡流载波频率,可有效提升检测灵敏度;③脉冲调制涡流信号具有比脉冲涡流信号更高的检测灵敏度。

2 脉冲调制涡流检测金属亚表面腐蚀缺陷的试验研究

2.1 脉冲调制涡流/脉冲涡流双检测试验系统

为了进一步验证脉冲调制涡流检测技术在金属亚表面腐蚀缺陷检测中的优势,本文进行了相关试验研究。图 6 所示为试验系统框图,该系统可实现脉冲调制涡流检测和脉冲涡流检测。试验系统主要包括检测探头(激励线圈和磁场传感器)、信号发生器(Tektronix AFG3022C)、功率放大器、滤波放大器、高速数据采集卡和计算机。其中,激励线圈的参数为:内径 9.07 mm,外径 11.95 mm,高 26.26 mm,匝数 1600,线径 0.2 mm。在激励线圈底部中心位置放置 TMR 传感器^[14](MultiDimension MMLP57F),用于拾取总磁场垂直于试件表面的分量信号。

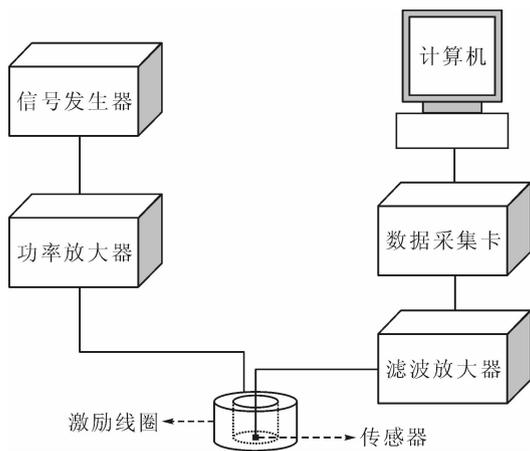


图 6 脉冲调制涡流/脉冲涡流试验系统框图
Fig. 6 Schematic illustration of PMEC/PEC system

信号发生器用以产生脉冲调制涡流/脉冲涡流激励信号,为了有效驱动激励线圈,将幅值为 0.4 V 的激励信号放大 10 倍之后驱动激励线圈工作。磁场传感器输出信号经过截止频率为 30 kHz 的低通滤波后由信号放大器放大 10 倍,然后通过数据采集卡(ADLINK PCI-9812)进行采集和数字化,最后由 LabVIEW 对试验信号进行处理和分析。为了模拟金属构件亚表面腐蚀缺陷,试验中采用如图 7 所示试件:在 500 mm×100 mm×5 mm 的铝板上加工长为 100 mm,宽为 100 mm,深度为 1~4 mm 腐蚀缺陷。

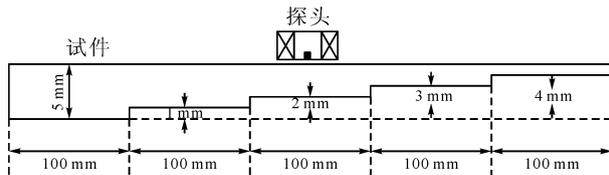


图 7 试验试件
Fig. 7 Experimental sample

2.2 试验结果及分析

以试件无缺陷部位的磁场信号作为基准信号,可得不同深度腐蚀缺陷的 ΔB_i 和 B_j 。由公式(8)可计算得到 S_i ,如图 8 所示,试验结果与仿真结果基本一致。

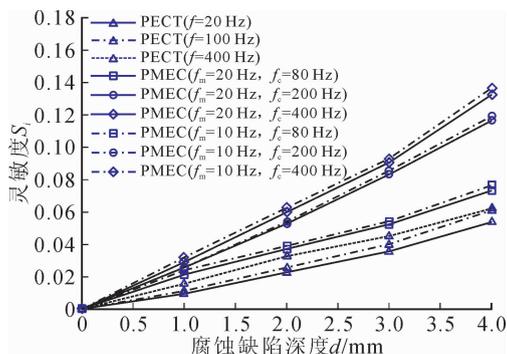


图 8 脉冲调制涡流/脉冲涡流试验信号灵敏度
Fig. 8 Sensitivity of PEC/PMEC differential signals to subsurface corrosion in different depths via experiments

由图 8 可见:1)由于脉冲涡流激励信号基频主要影响其检测信号频宽,因此脉冲涡流检测信号对金属亚表面腐蚀缺陷响应灵敏度受其基频影响较小,同理,脉冲调制涡流检测信号对金属构件亚表面腐蚀缺陷响应灵敏度受其激励信号调制波频率影响较小;2)对于脉冲调制涡流检测信号,其能量主要集中于以载波频率为中心频率的一定频宽范围内,当载波频率升高时,其谐波成分在被测金属构件表层感应的涡流强度提高,涡流场对金属构件亚表面腐蚀缺陷响应增强,因此在一定范围内提高载波频率,脉冲调制涡流检测信号对金属构件亚表面腐蚀缺陷响应更为灵敏;3)在金属构件亚表面腐蚀缺陷检测中,相比脉冲涡流检测信号,脉冲调制涡流检测信号具有更高的检测灵敏度。

3 结论

1) 通过建立的脉冲调制涡流有限元模型,仿真获得金属构件亚表面腐蚀缺陷脉冲调制涡流检测信号,并提出差分信号极值作为信号特征量对亚表面腐蚀缺陷进行评估。研究了脉冲调制涡流调制波频率和载波频率、脉冲涡流基频对检测灵敏度的影响,

进一步探究了脉冲调制涡流检测技术在金属构件亚表面腐蚀缺陷定量评估中的优势。

2) 通过试验,研究了脉冲调制涡流检测技术在金属构件亚表面腐蚀缺陷检测中的技术关键。在检测灵敏度方面,与脉冲涡流检测技术进行了对比,对比结果表明,脉冲调制涡流检测技术在金属构件亚表面腐蚀缺陷检测中具有更高的检测灵敏度,验证了有限元仿真结论的正确性。

参考文献:

- [1] Schmidova E, Svanda P, Vesely D, et al. Testing of pigmented coatings on thermal sensitized stainless steel [J]. *Anti-corrosion Methods and Materials*, 2013, 60: 84-94.
- [2] 闫贝, 李勇, 刘相彪, 等. 基于固态磁场传感器的脉冲涡流检测铁磁性构件腐蚀缺陷 [J]. *无损检测*, 2014, 36(10): 15-18.
Yan Bei, Li Yong, Liu Xiangbiao, et al. Pulsed eddy current inspection of corrosion in magnetic structures using solid-state magnetic field sensors [J]. *Nondestructive Testing*, 2014, 36(10): 15-18.
- [3] 王晓媛, 曾周末, 孙芳, 等. 发动机缸体内腔腐蚀缺陷检测 [J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(8): 147-149, 152.
Wang Xiaoyuan, Zeng Zhoumo, Sun Fang, et al. Detection of corrosion defects on engine cylinder body [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(8): 147-149, 152.
- [4] 齐勇, 刘相彪, 李勇, 等. 基于磁场梯度测量的脉冲涡流检测关键技术研究 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25(8): 1108-1112, 1135.
Qi Yong, Liu Xiangbiao, Li Yong, et al. Pulsed eddy current testing based on gradient magnetic field measurement [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(8): 1108-1112, 1135.
- [5] Li Yong, Chen Zhenmao, Qi Yong. Generalized analytical expressions of liftoff intersection in PEC and a liftoff-intersection-based fast inverse model [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(10): 2931-2934.
- [6] Xie Shejuan, Chen Zhenmao, Chen Hongen, et al. Evaluation of plastic deformation and characterization of electromagnetic properties using pulsed eddy current testing method [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2014, 45: 755-761.
- [7] 高军哲, 潘孟春, 罗飞路, 等. 脉冲涡流检测的谱分析方法与缺陷分类识别 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(28): 154-160.
Gao Junzhe, Pan Mengchun, Luo Feilu, et al. Spectrum analysis and defect classification of pulsed eddy current testing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(28): 154-160.

- [8] Tao R, Zhang N, Wang Y. Analysing and compensating the effects of range and doppler frequency migrations in linear frequency modulation pulse compression radar [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5: 12-22.
- [9] 齐琳, 郭黎利, 姜晓斐. 基于脉冲调制的并行组合扩频通信系统性能研究 [J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(6): 2286-2288, 2296.
Qi Lin, Guo Lili, Jiang Xiaofei. Performance studies of parallel combinatory spread spectrum based on pulse modulation [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(6): 2286-2288, 2296.
- [10] 李英达, 肖立志. 一种脉冲重复间隔复杂调制雷达信号分选方法 [J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(10): 2493-2497.
Li Yingda, Xiao Lizhi. A method of signal sorting for radar signal of pulse repetition interval complex modulated [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(10): 2493-2497.
- [11] 刘相彪, 李勇, 闫贝, 等. 基于脉冲涡流磁场梯度检测的多层金属结构层间腐蚀缺陷成像 [J]. *西安理工大学学报*, 2014, 30(4): 460-464.
Liu Xiangbiao, Li Yong, Yan Bei, et al. Defect imaging technique for interlayer corrosion in stratified conductors based on gradient-magnetic-field-measurement-based PECT [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2014, 30(4): 460-464.
- [12] 刘相彪, 李勇, 陈振茂, 等. 脉冲远场涡流检测 PCA-ICA 联合消噪技术 [J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(1): 69-72.
Liu Xiangbiao, Li Yong, Chen Zhenmao, et al. PCA-ICA integrated technique for noise suppression of pulsed remote field eddy current inspection [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(1): 69-72.
- [13] 齐勇, 李勇, 刘相彪, 等. 基于 GMFM 的脉冲涡流检测亚表面腐蚀缺陷成像技术 [J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2013, 14(5): 63-66, 94.
Qi Yong, Li Yong, Liu Xiangbiao, et al. Research of pulsed eddy current testing for defect imaging based on gradient magnetic field measurement [J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2013, 14(5): 63-66, 94.
- [14] 吕华, 刘明峰, 曹江伟, 等. 隧道磁电阻(TMR)磁传感器的特性与应用 [J]. *磁性材料及器件*, 2012, 43(3): 1-4, 15.
Lü Hua, Liu Mingfeng, Cao Jiangwei, et al. Performance and applications of magnetic sensors based on TMR effect [J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2012, 43(3): 1-4, 15.