

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.001

基于时域和频域信号综合分析的金属探伤研究*

章学铜¹,李安阳¹,陈立晶²,赵 倩²,陈丽婷¹,何 敏¹,尹武良^{2*}

(1. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306; 2. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 电磁涡流检测技术是在当前航空航天、制造等多个领域被广泛应用的一种无损检测技术。为了研究电磁涡流检测技术在金属探伤方面的应用,利用前期设计好的基于现场可编程门阵列(FPGA)的电磁探伤系统,进行了不同长度、深度和材质的缺陷金属板的探测实验,获取了电磁传感器划过缺陷区域的时域信号;通过对采集数据实部和虚部的时域与频域分析,发现了金属裂纹特征与时域和频域信号幅值变化存在着的对应关系。研究结果表明,通过综合分析时频信号和频域信号的特征,该探测装置可以应用于金属内部裂纹的探测,并且能更准确地检测出金属表面及内部的损伤。

关键词: 涡流传感器; 金属探伤; 现场可编程门阵列; 频域分析; 正交解调

中图分类号: TH878; TP2; TM55; TP206^{+.1} **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0253-04

Defect detection for metal plates based on time-domain signal and frequency-domain signal analysis

ZHANG Xue-tong¹, LI An-yang¹, CHEN Li-jing², ZHAO Qian², CHEN Li-ting¹,
HE Min¹, YIN Wu-liang²

(1. School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Electromagnetic eddy current testing technology as a new nondestructive testing technology is widely used in the aerospace, manufacturing and other fields. Aiming at studying electromagnetic eddy current testing technology in the measuring of the flaws of metal system, a detecting flaws of metal system based on field programmable gate array(FPGA) designed early days was used, experiments were conducted on metal plates with flaws of different lengths, depths and material properties, time-domain signal was achieved when electromagnetic sensor across the defective area of the metal plate. By means of analyzing the real part and the imaginary part of the time-domain signal and frequency-domain signal, the relationship between flaws of metal and amplitude change of signal was established. Synthesized the characters of the two signals, the results indicate that both the surface and internal flaws can be detected more precisely with this system.

Key words: eddy current sensor; flaw detection; field programmable gate array (FPGA); frequency-domain analysis; quadrature demodulation

0 引 言

电磁检测是以材料电磁性能变化为判断依据来对材料及构件实施缺陷探测和性能测试的一类检测

方法,其基本原理是以电磁学的理论为基础^[1]。电磁检测主要应用在以下几个方面:电磁涡流检测、磁粉检测、微波检测和漏磁检测。由于电磁涡流检测法有非接触、非侵入等优点,其在金属缺陷测量、工业过程

收稿日期: 2012-10-31

基金项目: 国家自然科学基金国际重大合作资助项目(60910001);教育部博士点基金资助项目(20090032110062);教育部新教师基金资助项目(200800561063)

作者简介: 章学铜(1988-),男,浙江乐清人,主要从事电磁层析成像和电磁测量方法方面的研究。E-mail:362428187@qq.com

通信联系人: 尹武良,男,教授,博士生导师。E-mail:wuliang.yin@gmail.com

成像等在线、实时检测领域应用广泛^[2],所以本研究采用的是电磁涡流检测法。

电磁层析成像(electromagnetic tomography, EMT)是上世纪90年代开始发展起来的一种基于电磁感应原理的过程层析成像技术,也是电磁检测方法的一种成功应用,能同时获取被测物场空间电导率和磁导率的分布信息。

本研究采用的实验装置是基于数字式 EMT 系统^[3],应用差动式电磁传感器,从 FPGA 芯片中产生激励源,并接收涡流传感器的反馈信号进行信号的正交解调;笔者设计信号的激励通路和采集放大滤波环节,通过对金属板上不同深度和长度裂纹进行探测,采集时域数据,并应用 Matlab 对信号进行频域分析。

1 传感器结构和工作原理

该系统中所用的探伤传感器为差动式涡流传感器^[4-5],其实物图如图1所示。该传感器由激励线圈和差分检测线圈构成,检测线圈中一端为主动感应端,另一端为参考端。

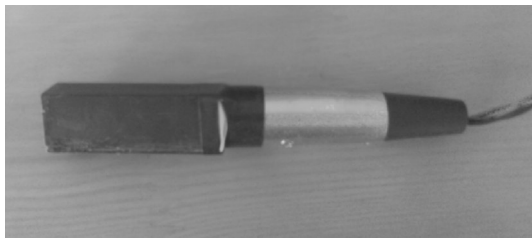


图1 差动式涡流传感器

为保证传感器具有较高的灵敏度,绕制激励线圈与检测线圈的铜质导线在直径上应具有较大的对比度。当激励线圈中流过一定频率的正弦交变电流时,在被测金属试件中产生的感应电流存在与激励线圈电流方向平行的成分,则试件上与该电流方向垂直的裂纹对试件中感应电流的影响可以从传感器检测线圈的感应电动势的变化中反映出来。

差动式涡流传感器测量原理如图2所示。

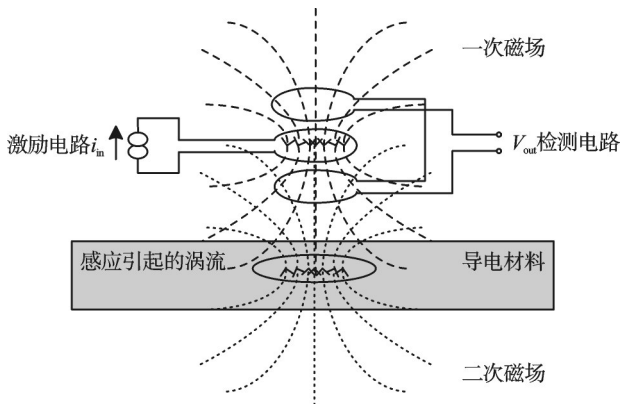


图2 差动式涡流传感器测量原理图

图2中,激励电路通入激励信号后,产生激励主磁场,为一次磁场;而后导电材料上形成涡流磁场,为二次磁场。传感器感应端采用的是差分结构,主动感应端接收一次磁场和二次磁场的感应,参考端主要接收一次磁场的感应。因此,主感应端与参考端检测到信号的差值只是二次磁场对传感器的影响,即为感应涡流磁场对传感器的影响。二次磁场的强度随着金属板裂纹的不同而变化,所以检测到的感应差压信号也会随着裂纹的不同而不同。差压信号经过放大滤波后即可得到与裂纹有关的特征信号。

磁场强度(或涡流密度)随着深度的增加而很快地衰减,且总是集中于导体表面的现象称为趋肤效应。在半无限平面导体内 δ 处,磁场强度和电流密度的幅值均降至表面上对应值的 $1/e$ 倍,即 36.7%。 δ 称为平面电磁场的趋肤深度或渗透深度,其计算公式为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \tag{1}$$

式中: f — 正弦激励信号频率, μ_0 — 真空磁导率, μ — 导体的相对磁导率, σ — 导体的电导率。

根据涡流趋肤深度这一指标,通常可将电涡流传感器按激励电源频率高低分为两大类:高频反射式电涡流传感器和低频透射式电涡流传感器。一般情况下,前者大多应用于非接触式位移变量的检测,而后者大多应用于金属板厚度及裂纹探测。

2 系统结构及实验

2.1 系统结构

该金属板裂纹探测系统实验装置是在数字式电磁层析成像系统的基础上,主要由探伤传感器、FPGA 主板电路、相关调理电路及上位机 VC 处理程序模块等构成,其系统结构图如图3所示。

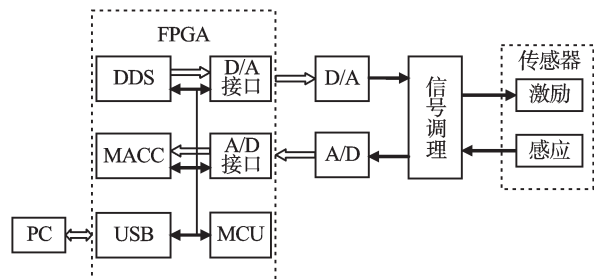


图3 金属板裂纹探测系统结构图

该探测系统以现场可编程门阵列(FPGA)为基础,信号首先由FPGA内部的IP核DDS(Direct Digital Synthesizer)产生所需频率的正余弦数字量信号 $\sin(2\pi f_e t)$ 、 $\cos(2\pi f_e t)$ (f_e 表示激励频率),该信号一方面通过 D/A 转换及放大后作为激励信号输出至前端

板,另一方面在FPGA内部作为数字解调的参考信号。

由AD9754芯片实现的D/A转换电路对数字正弦信号进行数/模转换,转换后的信号经过运算放大电路的放大滤波后加载到激励线圈上,检测线圈得到耦合信号,并经过适当倍数的放大调整返回至FPGA主板的A/D转换输入端,由AD9240进行采样和模数转换,并将转化结果传向FPGA芯片。FPGA内部的8位控制软核PicoBlaze实现了整个系统控制功能,IP核Macc(Multiply Accumulator)负责对信号进行正交解调,得到所需信号的实部和虚部^[6-7]:

$$V_R = \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) A \sin\left(\frac{2\pi i}{N} + \varphi\right) = \frac{N}{2} A \cos(\varphi) \quad (2)$$

$$V_I = \sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) A \sin\left(\frac{2\pi i}{N} + \varphi\right) = \frac{N}{2} A \sin(\varphi) \quad (3)$$

式中: A , φ —检测信号的幅值和相位; V_R , V_I —解调的实部和虚部。

2.2 实验测试

本研究以1 mm厚的钢板为实验样品,人工模拟不同深度及长度的裂纹,对系统进行调试及测试。测试样品的裂纹效果如图4所示。

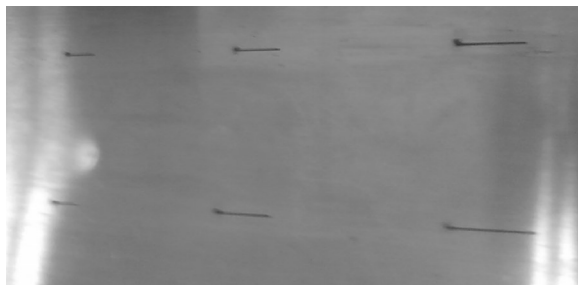


图4 测试样品裂纹

一般而言,激励频率越高,灵敏度越大,趋肤深度越小。在兼顾检测灵敏度及由趋肤深度限定的裂纹检测深度的条件下,本研究选取10 kHz的激励频率,由趋肤深度计算公式(1),选取20 °C下的钢电导率进行计算,可知对钢样品渗透深度约为1 mm左右。由此可见,在上述实验条件下针对测试样品,检测系统能得出便于分析的检测信号。

人为控制传感器分别在实验样品上表面滑动,对等深度、不同长度的裂纹进行测试,记录检测线圈感应电动势的实部及虚部。本研究对获得的数据进行分析,得到的效果(图中坐标无单位)如图5所示。

从图5可知,在时域上看,当传感器经过钢板上深度相同、长度不同的裂纹时,虚部和实部信号呈现类似正弦波的规律变化,从传感器到达裂纹时,信号波形先上升,离开时波形到达负峰值。再对信号进行DFT变换^[8-10],则从图5的幅频特性图上看,信号幅度在20频域采样点内呈似波浪的“山峰”变化。裂纹长

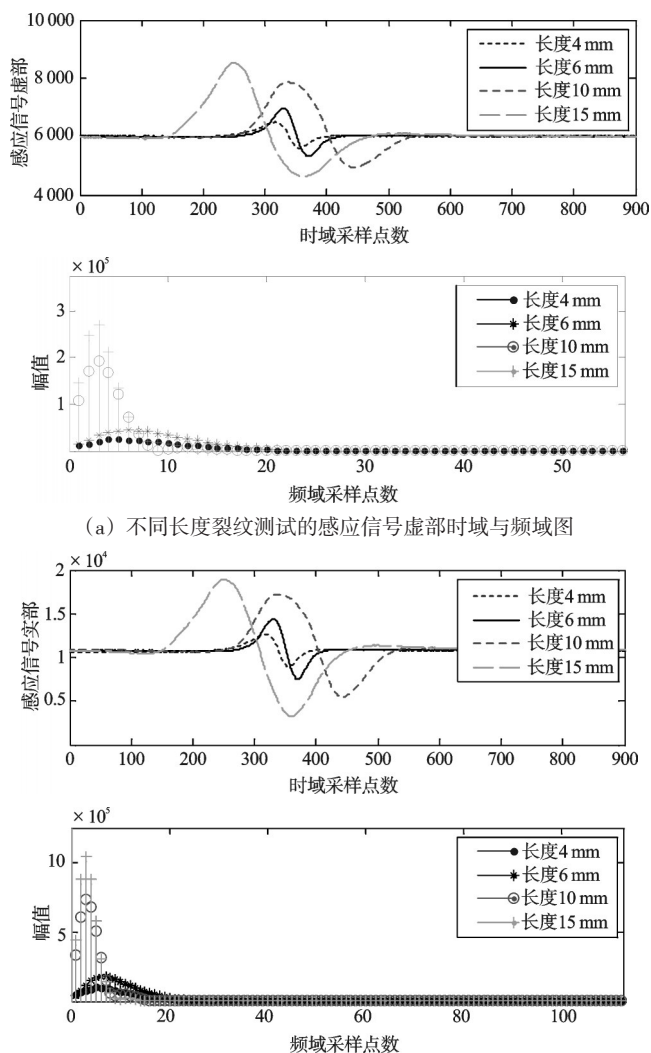


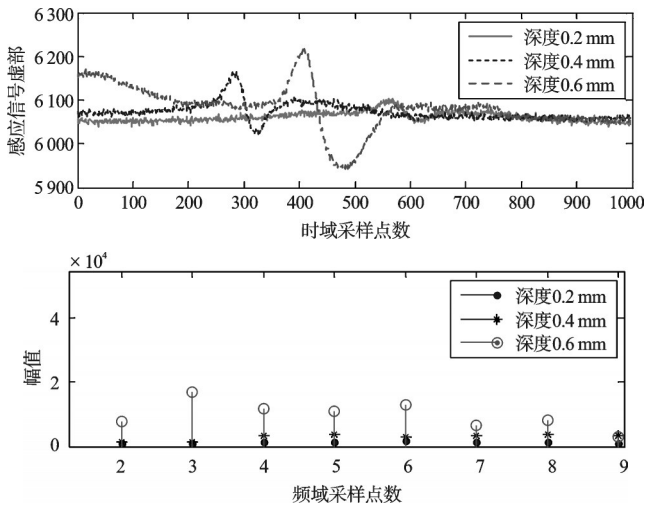
图5 不同长度裂纹测试效果图

度长的波形,相应的幅频特性中幅度值较高,其频带也较窄。而对于裂纹长度窄的波形,相应的幅频特性中,幅度值较低,而其频带也较宽。由此可看出:裂纹的幅频特性在反映裂纹长度差异上具有明显的特征,故这个变化趋势可应用到钢板裂纹长度的检测,通过对其频域幅值的测量,确定钢板裂纹的长度。

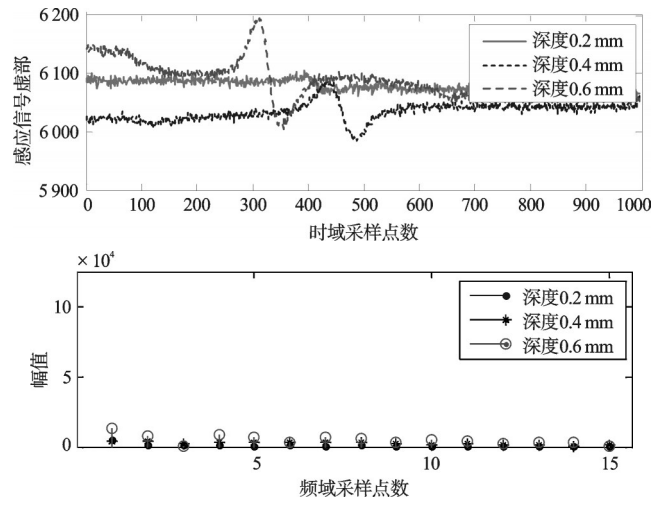
当探测钢板长度相等、深度不同的裂纹时,其测试效果如图6所示。

从图6中可以看出,在钢板裂纹探测的时域图上,当裂纹满足一定的深度,传感器划过裂纹时,检测线圈信号的实部及虚部会出现类似正弦波的波动,波峰与波谷分别与传感器趋近和离开裂纹相对应。并且,当裂纹较浅时,信号幅度较小,传感器的辨别效果减弱;当裂纹较深时,信号幅度较大。

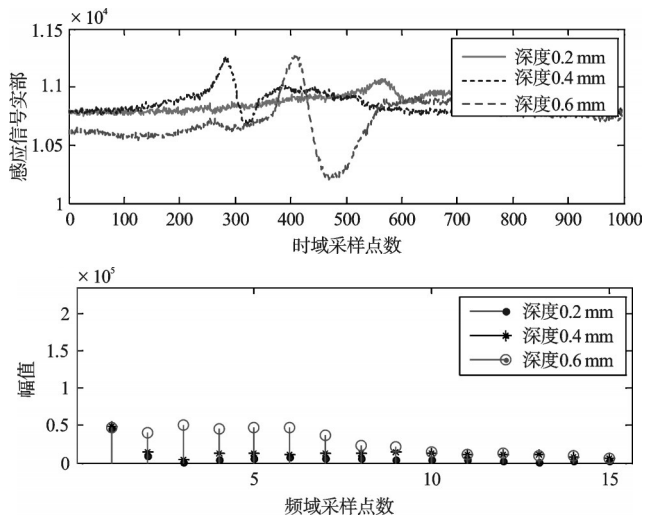
由于信号包含很多杂波,本研究对其变换到频域进行分析,可以发现:深度深的裂纹,其波形各个频率点对应的幅值较大,信号频率也都集中在10频域采样点内;由于实验测试的金属板裂纹深度的差距上明显



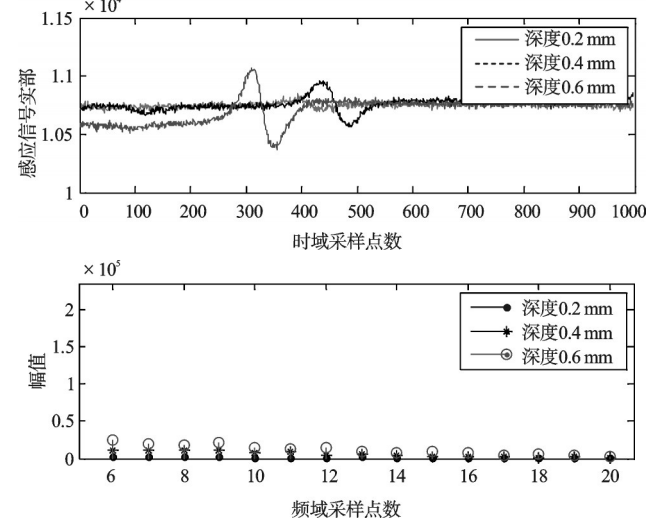
(a) 不同深度裂纹钢板探测感应信号虚部时域与频域图



(a) 钢板样品下表面的探测感应信号虚部时域与频域图



(b) 不同深度裂纹钢板探测感应信号实部时域与频域图



(b) 钢板样品下表面的探测感应信号实部时域与频域图

图6 不同深度裂纹测试效果图

图7 钢板样品下表面进行探测的效果图

性较小,以及金属板裂纹间距较小,得到的幅频特性图效果也不是很明显,但是其在反映裂纹深度上还是有一定的可行性以及进一步探索的价值。

对钢板样品下表面进行探测的效果图如图7所示。

从图7中可以看出,当探测传感器从钢板样品下表面的裂纹划过时,时域图中出现类似正弦的信号波动,波峰与波谷分别与传感器趋近和离开裂纹相对应。并且,当裂纹较浅时,感应信号虚部与实部幅度波动较小,传感器的辨别效果减弱;当裂纹较深时,感应信号虚部与实部幅度波动较大。

在图7的时域图中,实、虚部感应信号幅值虽然与裂纹的深度具有一定的相关性,但采集信号波动较大,实际应用时还有一定的困难。为了探测信号幅频特性,本研究对采集信号进行了DFT(Discrete Fourier Transform)处理。由图7中幅频特性图可看出:深度较大的金属裂纹对应的信号幅值较大,裂纹深度与幅值具有正相关性。

图7说明该探测装置可应用于金属内部裂纹的探测,且幅频特性在反映裂纹深度的效果上优于时域信号。

3 结束语

基于FPGA构架,该电磁擦伤探伤系统采用了差动式涡流传感器,利用正交解调和DFT分别得到时域特性图和幅频特性图;通过对一系列的裂纹样品进行实验,本研究从时域和频域角度对感应信号的实部与虚部进行了分析,发现在反映裂纹损伤情况方面感应信号的幅频特性和时域特性都具有明显的特征性,其中幅频特性具有受噪声影响较小的特征。

由于实验中的传感器是人工手动划动、金属板上裂纹间距较小以及裂纹深度差异的精确性较差,而致使采集数据出现不必要的杂波。为了后面定量获得被测金属中裂纹几何尺寸方面的信息,笔者将在控制的精确性上开展进一步的研究。

(下转第266页)

进行了数值模拟。数值模拟结果为磨粒流加工过程中的工艺参数选择提供了参考依据,为进一步深入研究软性磨粒流湍流形态调控的基本规律和磨粒流特性提供了一种理论工具。

(1) 通过对上述两个模型数值仿真的对比,可知在声压变化模型中的速度、湍动能等主要参数在整个约束流道内不同时刻,其分布有明显的不同,能实现扰动流场增强湍流以提高加工效率的目的。而湍动能较强区块的分布由入口扩散到整个约束流道内,提高了整个约束流道内软性磨粒流的加工效率。

(2) 在仿真中因超声波振动空化对经验公式和其参数进行了调整。根据仿真得到的速度、压力及湍动能等参数,结合它们之间的相互影响,及与空化数 σ 之间的相互联系,与定常流相对比,可证明软性磨粒流结合超声波激振能使软性磨粒流中空化效应大大增强,从而提高了软性磨粒流的加工精度和加工效率。

(3) 对比于定常流,在增加了声场压强变化的模型中,湍动能的分布在约束流道中更加均匀,且减小了定常流中出现加工死角的问题。同时湍动能增强的区域只在耦合了声场压强的约束流道区域内,而在相邻的湍流发生器中并无明显变化。因此可结合软性磨粒流约束流道的设计,在所需强化加工部位引入超声波激振,增强湍流,从而使软性磨粒流加工的方法能适应各种不同的流道,为研究和推广软性磨粒流超精密加工提供了新的方法。

参考文献(References):

- [1] SHIOU F J, CIOU H S. Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(7-8): 721-732.
- [2] GIANPAOLO S, ROBERTO M, GIANMARIA C. A surface

roughness predictive model in deterministic polishing of ground glass moulds[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(1): 1-7.

- [3] 计时鸣,金明生,张 宪,等. 应用于磨具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(8): 2-6.
- [4] 汤 勇,周德明,杨 钢,等. 磨料流光整加工性研究[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2001, 29(9): 17-19.
- [5] 计时鸣,唐 波,谭大鹏. 基于VOF的磨具结构化表面软性磨粒流数值模拟[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(3): 334-339.
- [6] 孙树峰,计时鸣,谭大鹏. 低黏度液-固两相磨粒流湍流调控与结构化表面光整加工技术研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(19): 2349-2353.
- [7] 计时鸣,唐 波,谭大鹏,等. 结构化表面软性磨粒流精密光整加工方法及其磨粒流动力学数值分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(15): 178-184.
- [8] 计时鸣,李 琛,谭大鹏,等. 基于Preston方程的软性磨粒流加工特性研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 48(19): 126-130.
- [9] 王献孚. 空化泡和超空化泡流体理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [10] 王献孚,熊鳌魁. 高等流体力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.
- [11] ANNALAND M V S, DEEN N G, KUIPERS J A M. Multi-level computational fluid dynamics models for the description of particle mixing and granulation in fluidized beds[J]. *Handbook of Powder Technology*, 2007(11): 1071-1107.
- [12] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [13] OWIS F W, NAYFEN A H. Computstions of the compressible multiphase flow over the cavitating high-speed torpedo[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2003, 125(2): 459-468.
- [14] 计时鸣,付有志,谭大鹏. 基于SST湍流模型的两相磨粒流动力学特性研究[J]. *兵工学报*, 2012, 23(11): 126-130.

[编辑:张 翔]

(上接第256页)

参考文献(References):

- [1] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京:科学出版社, 2008: 7-15, 64-66.
- [2] 尹武良. 低频电磁传感检测技术[M]. 北京:科学出版社, 2010: 17-154.
- [3] 陈立晶,王化祥,尹武良. 基于FPGA的金属膜厚检测系统[J]. *测试技术学报*, 2011, 25(4): 323-324.
- [4] YIN W, PEYTON A J. Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors[J]. *NTD & E International*, 2007, 40(1): 43-48.
- [5] YIN W, PEYTON A J. A planar EMT system for the detection of faults on thin metallic plates[J]. *Measurement Sci-*

ence and Technology, 2006, 17(8): 2130-2135.

- [6] 尹武良,王 奔,王化祥. 电磁层析成像中基于半周期采样的数字解调方法[J]. *天津大学学报:自然科学版*, 2011, 44(12): 1119-1123.
- [7] 姜 剑. 宽频EMT的电路和信号处理研究[D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院, 2010: 9-17.
- [8] 杨丽娟,张白桦,叶旭桢. 快速傅里叶变换FFT及其应用[J]. *光电工程*, 2004, 31(Z): 1-7.
- [9] 薛年喜. Matlab在数字信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 111-129.
- [10] 靳 希,杨尔滨,赵 玲. 信号处理原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2008: 35-67.

[编辑:罗向阳]