

文章编号:1000-582X(2012)01-065-05

金属零部件漏装检测的电磁感应方法

张占龙,江 川,张 玺,司瑞琪

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:在工业生产中,产品零部件的漏装普遍存在。它不仅降低产品质量,而且也影响了产品生产率。从电磁感应基本原理出发,提出通过感应监测金属零部件装配过程,对已装配零部件进行计数,实现对零部件装配过程中漏装检测的自动化,达到在线漏装监控的目的。理论分析了利用电涡流感应原理监测金属零部件运动的可行性,并利用 MATLAB 软件进行了仿真计算。在理论分析的基础上,设计了针对金属零部件的传感器、相应的信号处理电路及配套软件,建立在线检测系统并进行了模拟试验。此方法有效地解决了由人为因素造成的零部件漏装等问题,为工厂节约了成本,有效地提高产品的合格率。

关键词:电磁感应;涡流;在线检测;零部件;传感器

中图分类号:TM151

文献标志码:A

Electromagnetic induction method for detecting neglected loading of metal parts

ZHANG Zhan-long, JIANG Chuan, ZHANG Xi, SI Rui-qi

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In industrial production, neglected loading of metal parts is very normal. It not only causes the quality reduction of products, but also affects production rate. Based on the theory of electromagnetic induction, by supervising the assemblage process of metal parts, it is able to count the number of assembled metal parts so that automatic online monitoring of neglected loading can be achieved. The feasibility of using the eddy current method to monitor the motions of metal parts is analyzed theoretically and MATLAB is utilized to simulate. On the basis of theoretical analysis, the specific eddy current type transducer, the appropriate signal-processing circuits and the software are designed. A testing system is established for analog. This method can effectively solve the problem of neglected loading by artificial factors, save the costs of factories, raise the FPY of products.

Key words: electromagnetic induction; eddy current; online monitoring; metal parts; sensor

在金属零部件装配生产中,由于各种各样的原因,会出现零部件漏装的现象,零部件漏装轻则会影响产品性能,重则会导致产品在使用过程中出现故障甚至引起事故。而零件缺失、混料、装配位置、尺

寸、ID 等外形特征由于型号多变,无法用固定安装的传感器检测,很多工厂企业都加强了对零部件进行人工管理和监测,以及采用智能视觉检测方式^[1]。智能视觉检测核心是针对装配过程中的易错点进行

收稿日期:2011-08-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877082);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR10150016)

作者简介:张占龙(1971-),男,重庆大学副教授、博士,主要从事电磁兼容与故障检测、数学仪器设备、计算机测量与控制的研究,(E-mail)zhangzl@cqu.edu.cn。

视频监控,即图像识别漏检方法,但这些方法最终均表现为人工漏检方式,不仅费用高、耗时费力,而且人为因素造成的漏检或误判会大大降低检测识别的准确率,难以满足实时生产的需要。

电磁涡流测量是在材料无损评价和检测中一种重要而广泛使用的方法^[2-5]。其原理是基于电磁感应原理的测量方法,在激励线圈内通入交变电流产生激励磁场,检测线圈以感应方式获得激励磁场与被测区域内导电性或导磁性物质相互作用所形成的场分布。主要表现为对钢铁等电磁特性较强的金属检测,不仅用于材料性能的定量测定,而且也可用于按尺寸、性能或存在的不连续性分选零件,但用于金属零部件的漏检方面,目前尚未有相关报道。

笔者提出一种基于电涡流感应原理的金属零部件在线检测方法。利用电涡流感应原理,将装配工作人员拿取金属零部件的过程转化为电信号,记录装配零件过程及次数,实现对零部件装配过程漏装检测的自动化。采集的电信号可以方便地数字化处理、存储,可以有效地解决由人为因素造成的零部件漏装,为工厂节约人工监测漏装过程中的成本,提高工作效率以及产品的合格率。

2 原理及方法

2.1 漏装检测原理

本方法实现零部件漏装检测的基本原理在装配过程中利用电涡流感应的方法对金属零部件的安装进行计数。通过电涡流传感器^[6-7]将装配工作人员在装配中拿取金属零部件的移动过程转化成为变化电信号,捕捉、识别此变化信号,并根据此信号对每个金属零部件的安装进行计数,在一次装配结束时,将实际装配数量与额定装配数量进行比较,得到是否有金属零部件漏装的判断,达到实时在线检测的目的。

2.2 二次感应原理

本方法实现漏装检测的核心是利用电涡流二次感应原理将金属零部件的定向运动转化成一定的电信号^[4],以此为基础进行分析,如图 1 所示。

根据法拉第电磁感应相关理论^[8-10],当在激励线圈中输入一定频率的正弦波电流时,会在周围空间感应产生以同样频率正弦交变的磁场。若导电金属物体出现在激励线圈产生的磁场中时会在内部产生感应电动势,并在内部形成电涡流。建立近似等效模型进行分析:

设半径为 a ,通入电流为 I 的单匝圆形线圈在空间产生一次磁场,线圈轴线上的磁感应强度为^[8]:

$$B = \frac{\mu_0 I a^2}{2(Z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

假设位于交变磁场轴线处的导体以无数单元短路环的形式产生感应电动势^[8],则穿过单个单元环的磁通量大小可计算为

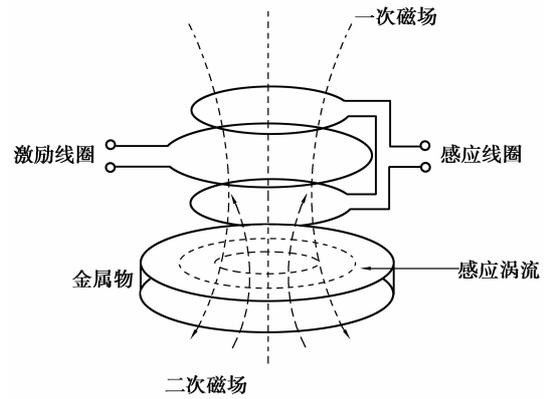


图 1 二次感应原理示意图

$$\Phi = \frac{\mu_0 I a^2 S_r}{2(Z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

则单个单元环的感应电动势大小可计算为

$$de = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{j\omega\mu_r S_r r^2}{2(Z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} I \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)式中, Φ 为一次磁场的磁通量; μ 为介质的磁导率; n_r 、 S_r 为激励线圈的匝数、面积; r 为假设的导体内部单元环半径; I 为通入交流电流强度; ω 为通入交流电流的角频率; Z 为导体到激励线圈的距离。

单元环的感应电流则为

$$dI' = de \cdot G \quad (4)$$

式(4)中,介质电导 $G = \frac{\sigma dr dz}{2\pi r}$, σ 为导体的电导率,单元环的感应电流就是电涡流。由式(4)可知,电涡流感应效应与被测物体的电导率 σ 、磁导率 μ 以及形状大小、线圈的几何参数、线圈中激磁电流角频率 ω 以及线圈与导体间的距离 Z 有关。

假设金属导体材质均匀且各向同性,线圈和金属导体所构成系统的物理性质可由金属导体的电导率 σ 、磁导率 μ 、感应线圈与金属导体表面的距离 Z 、线圈中电流强度 I 和频率 ω 等参数来表达。

由于导体中感应电涡流也是按相同频率交变的,根据楞次定律,其将在空间中产生二次磁场,二次磁场的作用是抵消一次磁场,形成磁场的畸变,如图 1 所示。可用 $de_R = F(\mu, \sigma, Z, I, \omega)$ 函数来表示。

二次磁场在感应线圈中产生的磁感应电动势 de_R ,可用下式表示:

$$de_R = -\frac{\omega^2 \mu^2 n_r n_R S_r S_R I r^3}{8\pi(Z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}(Z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \sigma dr dz \quad (5)$$

式(5)中, n_R 、 S_R 为感应线圈的圈数和面积; Z' 为单元环到感应线圈的距离。当激励、感应线圈和输入电流确定以后,维持激励电流的强度和频率不变,则一次磁场 Φ 将不变,一次磁场在感应线圈中产生的电动势为定值,设为 de_0 ,因此感应线圈在空间中产

生的总电动势为 $de_0 + de_R$,但是只有二次磁场所产生的 de_R 为监测系统需要的有用信号,为了消除一次磁场在感应线圈中产生的 de_0 对有用信号 de_R 的影响,在感应线圈中加一反向的副线圈^[8],主副线圈采用同名端相对连接的串联方式,由此可以抵消大部分一次磁场在感应线圈中产生的电动势,使得二次磁场感应电动势更加清晰明显,从而将 de_R 从总信号中分离出来。

根据式(5)可以看出,如果忽略一次磁场对感应线圈的影响,则 de_R 的出现就唯一对应金属导体在线圈附近的存在,因此完全可以通过测量感应线圈两端的感应电动势变化来判断感应线圈附近有无金属零部件通过。

2.3 多特征值信号识别判定法

将金属零部件的移动过程转化为响应感应电动势的变化后,需要对得到的感应电动势进行分析处理。根据感应信号频率已知的特点,结合本方法针对的具体问题,提出了时域多特征值识别判定法,利用此方法对感应信号进行分析处理。通过构造信号特征值的方法来对感应信号进行识别判断。首先根据基本信号(未完全消去的一次磁场感应信号)的周期变化规律,建立无金属划过时的基准信号数据库,即一个周期的基准信号的完整波形数据。然后将实时采集到的总信号数据与基准信号数据进行比较,消去总信号中基准信号成分,得到有用信号。理论上,若没有金属导体通过感应区域,则有用信号为零。一旦有金属导体通过,则有用信号表现为一段连续变化的信号,称为异常信号。识别并建立异常信号的多特征值,即实现时域范围内对异常信号数据的重构,得到能反映原异常信号基本特征的多组特征值。本方法针对具体问题,建立以下 5 个异常多特征值:①第一异值——异常信号初始时间 S ;②第二异值——异常信号周期峰值 U ;③第三异值——异常信号算术平均值 A ;④第四异值——异常信号作用时间 T ;⑤第五异值——异常信号消失时间 F 。

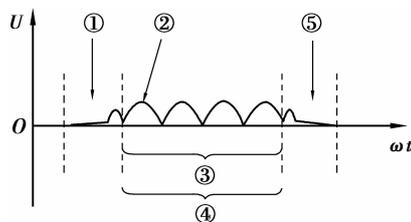


图 2 异常信号特征值示意图

第一异值和第五异值分别反映此段异常数据的起始和消失过程的信号情况,以持续时间进行量化,主要用来标志整个异常过程,区分稳定异常信号和不稳定异常信号,是表征异常信号的次要特征。第二异

值反映稳定信号段的感应信号峰值情况,是表征异常信号的主要特征。第三异值反映稳定信号段全部信号平均值情况,也是表征异常信号的主要特征。第四异值反映异常信号作用时间,是表征异常信号的次要特征。因此,在进行最后判定时,第二、三异值作为主要判定依据,所占判定权重最大。第一、四、五异值主要用来标志整个异常过程,权重最小。

所有特征值采集完成后,随即进行优化智能判定。优化智能判定借鉴模糊数学的基本思想^[12],建立一个判定指数公式模拟人的判断行为,通过不同参数的整定达到灵活调整和经验积累的目的。利用 5 个异常多特征值计算判定指数得出判定结论,判定指数公式如下:

$$X = 1 + \beta \left(\frac{T}{S + F} \right), \quad (6)$$

$$Y = U + \alpha A, \quad (7)$$

$$\eta = XY = \left(1 + \beta \left(\frac{T}{S + F} \right) \right) (U + \alpha A). \quad (8)$$

在式(6)中, X 称为主系数; T 为异常信号作用时间特征值; S 为异常信号起始特征值; F 为异常信号消失特征值; β 为时间比例权重系数; Y 称为主项; U 为异常信号峰值特征值; A 为异常信号算术平均特征值; α 为 A 对应的判定权重系数; η 称为判定指数,由主系数 X 和主项 Y 的乘积构成。 α 、 β 是相应的判定权重系数,可以根据具体经验情况灵活调整。理论上,只要 η 的值大于 0 即说明有金属物通过,但在实际过程中由于各种干扰因素、系统偏差的影响,导致判断出错。因此,建立一个判定阈值 η_0 ,可根据具体情况调试出一个理想值,使得当计算后得到的 η 与 η_0 进行比较后,可做出准确的判断。利用 α 、 β 和 η_0 的整定,可以构建合理的、准确的判断体系。

建立异常多特征值和优化智能判断所需时间很短,小于 0.1 s,完全可以达到实时监控的目的。并且,此方法是专门针对处理有无异常信号变化而设计的,具有原理简单实用,针对性强,可靠性高等特点。同时可以有效地降低错误识别的可能性,提高感应区域的有效范围,达到理想的判断效果。

3 试验研究

3.1 试验系统结构

基于电磁感应的金属零部件在线检测系统由激励信号发生器、信号接收传感器、高速数据采集器、中央信息处理器、计数显示及声光报警系统和电源管理电路构成,如图 3 所示。通过激励信号发生器产生高频交变强磁场,传感器感应信号变化,高速数据采集器实时采集信号并将其传送给中央信息处理器处理。中央信息处理器信号进行分析处理,控制计数器响应,若出现漏装,声光报警器将及时报警。

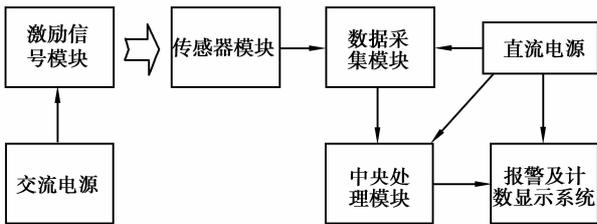


图 3 试验系统结构框图

1) 激励信号电路, 由信号发生芯片产生正弦波信号, 经功率放大电路放大后, 驱动激励线圈产生交变强磁场。功率放大电路主要由集成运放芯片 TDA7293 构成, 信号发生芯片采用 MAX038。

2) 传感器的设计^[6], 采用主副感应线圈, 两感应线圈采用同名端相对连接的串联, 内部件中间突出部分和外部件内壁有相咬合的螺纹, 通过旋转可以上下调节内部件的位置, 使两感应线圈处于一次磁场对称的位置, 以抵消一次磁场在感应线圈中产生的电动势^[8], 结构示意图如图 4 所示。

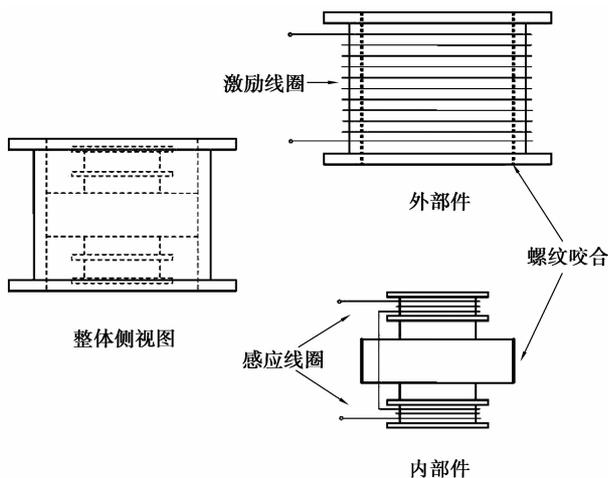


图 4 传感器结构示意图

3) 信号调理电路, 电压提升电路、信号缩小电路主要由 3 片 OP07CP 构成。滤波电路采用 MAXIM 公司的可编程滤波芯片 MAX260^[13]。

4) 信号采集和中央处理模块, 采用 Silicon Labs 公司的 C8051F060 单片机^[14], 该芯片包括两个 1Msps、16 位分辨率的逐次逼近寄存器型 ADC, ADC 中集成了跟踪保持电路、可编程窗口检测器和 DMA 接口。

3.2 可行性仿真及实验

根据之前建立的近似等效模型, 利用 MATLAB 软件对不同金属材料在相同环境条件下产生的二次感应电动势进行了仿真计算^[15]。由于导体尺寸、材质以及导体到感应线圈的距离等参数对电涡流以及二次磁场的产生均有显著的影响^[4-5],

结合实际情况, 选择并控制其他参数不变, 只考虑不同材质、不同感应距离对感应电动势的影响。

在仿真计算的基础上, 通过搭建的系统进行实验, 采集同样规格 3 种不同金属材料在感应线圈中产生的感应电动势, 实验环境与仿真计算的模型环境相同, 并将所得数据与仿真计算进行了对比, 如图 5 所示。

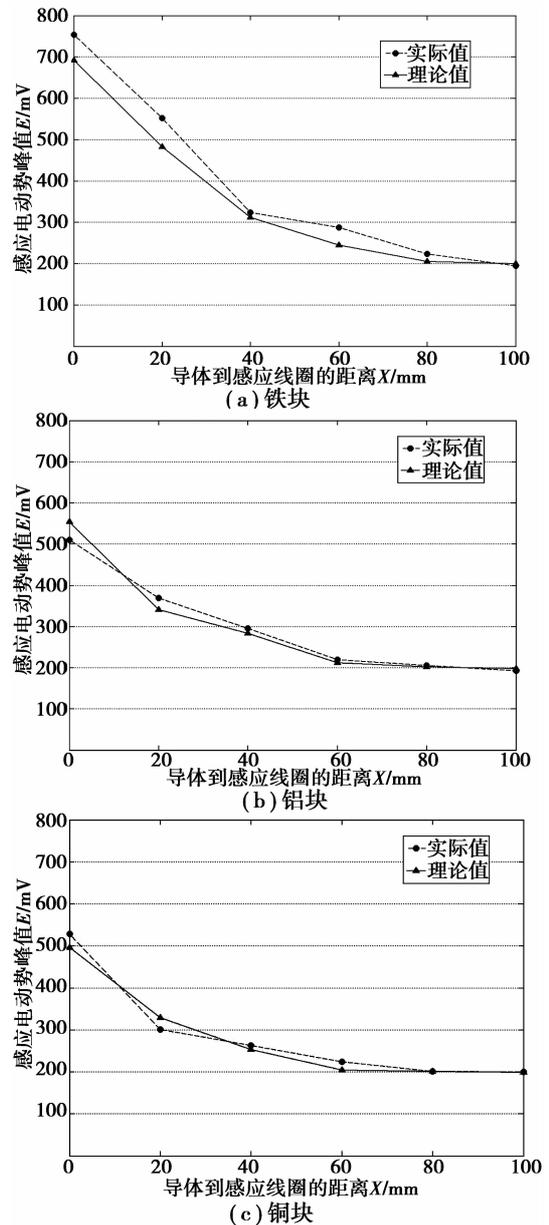


图 5 实验值与仿真值比较

由上述分析可知, 各金属材料均产生了二次感应电动势, 且产生的电动势都随感应距离的增大而迅速减小。相同条件下, 铁块产生的二次感应电动势最大, 铝块次之, 铜块相对最小。由此进一步验证了利用电磁感应监视金属材料移动的可行性。

3.3 模拟装配试验及数据分析

向传感器激励线圈中注入 200 Hz、1 A 的交变电流, 利用直径 40 mm、厚 10 mm 的圆柱形铁质材

料进行移动试验,距离传感器约为 10 mm,模拟实际装配过程中的金属零部件的拿取移动,绘制了异常信号的正半周波形,如图 6 所示。

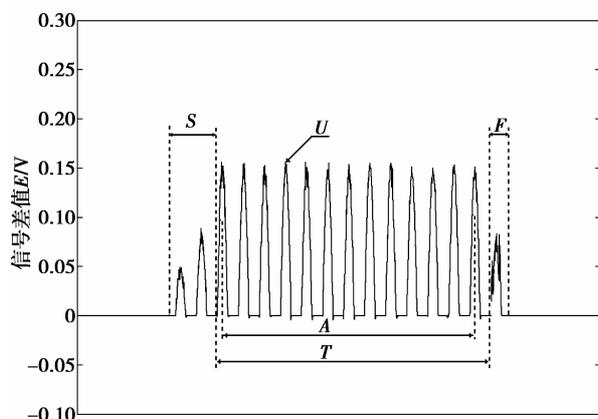


图 6 异常信号实际波形

得到异常特征值数据包括: $U=151.23$ mV, $A=107.94$ mV, $T=65$ ms, $S=10$ ms, $F=5$ ms。经过多次试验,积累了参数设定的经验。时间比例权重系数 β 不宜设置过高,否则会影响对主要判定依据 U 和 A 的判断,经验证设为 0.05 比较合适。 A 对应的判定权重系数 α 根据实际环境情况来整定,若高频干扰较大,则宜设定大于 1.5 以上,以突出主要判定依据 A ,若干扰较小,则宜设为 1 左右,与 U 相同。判定阈值 η_0 设在 50 mV 就可以达到良好的效果。

4 结 语

笔者介绍了一种基于电磁感应的金属零部件在线检测方法。提出通过利用电涡流效应对金属零部件的拿取过程进行计数,以实现工业装配过程的零部件漏装检测。在此基础上,又提出通过构建异常信号多特征值进行信号识别与逻辑判定。采用了自主研发的对称感应电涡流传感器,提高了感应效果,并且可以更方便地根据实际测量对象选择电涡流传感器的参数。本方法解决了由于人为因素导致的金属零部件漏装问题,实现对零部件装配过程漏装检测的自动化。同时,试验系统还存在一些问题,例如感应灵敏度还不够高,感应范围也有待进一步改善。这些问题主要与两方面有关:一个是检测信号的信噪比,一个是逻辑判断算法。需要重新设计信号调理电路,采用高阶滤波电路提高信噪比,同时改进逻辑判断算法。相信不久以后,将会开发出性能更好的零部件漏装检测系统。

参考文献:

[1] 郑峰,岳晓峰,韩立强. 汽车传动器同步环装配质量的机器视觉检测[J]. 长春工业大学学报,2003,24(1):27-29. ZHENG FENG, YUE XIAO-FENG, HAN LI-QIANG. The machine vision detection of the assembly

quality of synchronizing ring in automotive transmission gear [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2003, 24(1): 27-29.

- [2] 孟健. 金属电磁检测关键技术的研究[D]. 天津:天津大学,2008:1-59.
- [3] PLOTNIKOV Y, WANG C T, MCKNIGHT W, et al. Eddy current inspection of components with complex geometries [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2008, 975: 376-383.
- [4] 李贵娥,麻红昭,沈家旗,等. 电涡流检测技术及影响因素分析[J]. 传感技术学报,2009,22(11):1666-1669. LI GUI-E, MA HONG-ZHAO, SHEN JIA-QI, et al. Analysis of detection principle and influential factors of eddy current [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(11): 1666-1669.
- [5] SASAKI H R S. Eddy-current type proximity sensor with closed magnetic circuit geometry [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1749-1752.
- [6] 张刘泽,吴峻. 中低速磁悬浮列车电涡流间隙传感器设计[J]. 仪表技术与传感器,2010(1):1-17. ZHANG LIU-ZE, WU JUN. Design of eddy current sensor for low-speed maglev vehicle [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(1): 1-17.
- [7] 谢立新. 基于电磁感应的矿井探测方法研究及仿真[J]. 微计算机信息,2008,24(10):252-253. XIE LI-XIN. The method research and simulation of mine pit surveying based on electromagnetic induction [J]. Microcomputer Information, 2008, 24(10): 252-253.
- [8] 俞集辉. 电磁场原理[M]. 2版. 重庆:重庆大学出版社,2007.
- [9] DU P A. Two approaches to coil impedance calculation of eddy current sensor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of mechanical engineering science, 2008, 222(3): 507-515.
- [10] ABBAS N K. Calculation of maximum short circuit electromagnetic forces in the IPB using time stepping finite element method[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2009, 85(7): 45-49.
- [11] 徐征,何为,何传红,等. 开放式磁感应成像原理及成像试验研究 [J]. 中国生物医学工程学报,2009,28(1): 141-144. XU ZHENG, HE WEI, HE CHUAN-HONG, et al. Study on opening magnetic induction tomography principles and mapping experiment[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2009, 28(1): 141-144.
- [12] 蒋泽军. 模糊数学教程 [M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [13] 夏晓荣. 可编程开关电容滤波器系统的研究与实现[D]. 长沙:湖南大学,2009.
- [14] Silicon Laboratories. C8051F06X Data Sheet[EB/OL]. (2008-03-31) [2011-09-01]. www.silabs.com/Support%20Documents/.../C8051F06x.pdf.
- [15] SELLERI S. A matlab experimental framework for electromagnetic education [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2003, 45(5): 86-90.

(编辑 王维朗)