

# 电容电感复合桥式焊缝跟踪传感器

洪 波, 朱亚飞, 李湘文, 陈 宇

(湘潭大学 机械工程学院, 湘潭 411105)

**摘 要:** 针对平板对接焊的错边问题, 提出了一种组合电容和电感复合桥式焊缝自动跟踪方法, 并设计了传感器的结构. 这种复合桥式焊缝跟踪传感器利用电容对极板间距变化的灵敏检测和电感对边缘变化的灵敏检测, 可以确定焊枪横向和纵向的位置关系. 具有非接触、灵敏度高、抗干扰能力强、响应速度快、工作可靠的特点, 并能在一定程度上克服平板对接焊的错边问题. 最后, 自行搭建了简单的平台进行了焊缝跟踪试验, 效果良好, 为焊缝自动跟踪技术提供了新的方法.

**关键词:** 电桥; 电容; 电感; 焊缝跟踪

**中图分类号:** TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)04-0009-04

## 0 序 言

焊缝跟踪技术是焊接技术发展的关键<sup>[1,2]</sup>. 平板对接焊缝是工业生产中的一种非常广泛应用的焊接坡口形式, 但由于其坡口特征信号很微弱, 加之焊接过程中外界干扰因素多. 目前机械接触式的因适应坡口形式少, 探头摩擦大基本上已淘汰. 电弧传感器得到广泛应用, 但在不开坡口的对接接头等形式时, 仍不能准确识别. 因此其焊缝跟踪一直没有良好的解决方案.

针对对接焊缝的焊缝跟踪问题, 设计了一种基于电容电感复合电桥式的焊缝跟踪传感器. 通过传感器的对称结构和复合电桥的工作原理抑制了外界干扰及错边的影响. 结果表明, 该技术成功实现了平板对接焊缝的自动跟踪, 为焊缝跟踪技术提供了新的方法.

## 1 复合桥式焊缝跟踪传感器原理

复合桥式焊缝跟踪传感器原理如图1所示, 分别由两个电容和两个电感组成两个电桥. 由电容公式:  $C = \frac{\epsilon P}{l}$  可知 ( $\epsilon$  为电容两极板间的介质常数;  $P$  为极板间有效面积;  $l$  为两极板间距), 电容的大小与极

板间距  $l$  成反比关系. 通过电容桥可以检测到极板间距  $h$  的变化. 当电感处于无限大的工件中心时, 根据电涡流效应可知, 电感线圈阻抗  $Z = f(\rho, \mu, \gamma, \omega, h)$  ( $\rho$  为被测材料的电阻率;  $\mu$  为磁导率;  $\gamma$  为尺寸因子;  $\omega$  为线圈激励电流角频率;  $h$  为线圈和被检测金属导体之间的距离). 当电感线圈处于工件边缘时, 线圈阻抗存在边缘效应, 定为边缘因子  $k$ , 所以线圈阻抗  $Z = f(\rho, \mu, \gamma, \omega, h, k)$ .

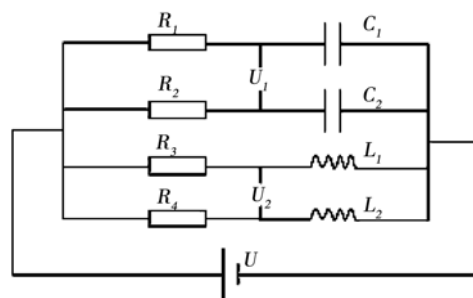


图1 传感器原理简图

Fig. 1 Principle diagram of sensor

由上面原理可知, 影响电容和电感的因素有:  $S, h, \rho, \mu, \gamma, \omega, k$ , 焊缝错变量  $\Delta h$  等. 焊接过程产生的高温、强弧光、强磁场会使影响电容电感的因素变得更加复杂. 然而考虑到  $\rho$  和  $\mu$  变化不大,  $\omega$  可以通过电路保持稳定,  $S$  和  $\gamma$  不变. 为简便起见, 假设  $\rho, \mu, \omega, S, \gamma$  不变, 则影响传感器的主要因素只有  $k, h, \Delta h$  和焊接过程的复杂环境. 即输出电压信号  $U_1$  和  $U_2$  由这4个因素决定, 而  $U_{c1}$  只与  $h$  和复杂环境有关. 因此设计如图2所示的对称的传感器结构, 结合电

收稿日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405414); 湖南省战略性新兴产业产学研结合创新平台创新能力项目(2012GK4100); 湖南省自然科学基金省市联合基金项目(2015JJ5013); 湖南省高校科技创新团队资助项目

桥原理去除外界复杂环境的影响. 通过电容桥输出信号  $U_1$  对电感桥信号  $U_2$  的补偿, 削弱错边  $\Delta h$  的影响. 最终得到  $k$  和  $h$  的变化关系即焊枪横向和纵向的位置关系, 实现焊缝的自动跟踪.

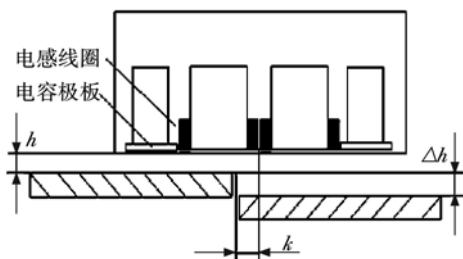


图2 传感器结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of sensor

## 2 传感器的检测元件的阻抗分析

### 2.1 检测线圈阻抗分析

螺旋管电感的自感公式

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} W^2 D \phi \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为磁导率;  $W$  为螺旋管的匝数;  $D$  为螺旋管半径;  $\phi$  为磁通量. 圆形回路的自感公式为

$$L = \mu_0 D \left( \ln \frac{8D}{d} - 2 \right) \quad (2)$$

螺旋管线圈与圆形回路的互感公式为(线圈与回路的纵向距离为零)

$$M_0 = \frac{2\pi}{4} \mu_0 W d \delta \beta F \quad (3)$$

式中:  $A$  为线圈的长度;  $F$  由  $\delta$  和  $\beta^2$  决定;  $\delta = \frac{d}{D}$ ,  $\beta^2$

$= \frac{4D^2}{4D^2 + 4A^2}$ ;  $d$  为圆形回路半径<sup>[3,4]</sup>. 当线圈与回路距离为  $h$  时, 有

$$M = \frac{\pi}{2A} \mu_0 W d^2 \left[ \frac{(A+h)F_{A+h}}{\sqrt{D^2 + (A+h)^2}} - \frac{hF_h}{\sqrt{D^2 + h^2}} \right] \quad (4)$$

如图 3b 所示, 当激励线圈置于金属板上时, 在激励线圈中施加一个正弦交变电流  $i_1$ , 线圈四周就会感生出正弦交变磁场  $H_1$ , 处于该交变磁场中的金属板内部的近表面将产生旋转的涡电流  $i_2$ ; 同理, 涡电流也会产生交变磁场  $H_2$ ,  $H_2$  的方向在任一时刻都与  $H_1$  的方向相反. 从电磁学角度可将被测金属板简化为一简单的感应线圈. 线圈与工件金属板的相互作用原理, 可用图 3a 的电路原理图表示<sup>[5-8]</sup>.

根据克西荷夫定律, 可列出方程组, 即

$$\begin{cases} R_1 i_1 + j\omega L_1 i_1 - j\omega M i_2 = U \\ R_2 i_2 + j\omega L_2 i_2 - j\omega M i_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

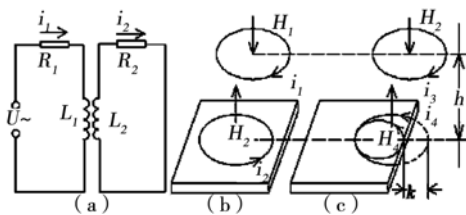


图3 线圈等效简图

Fig. 3 Equivalent diagram of coil

式中:  $R_1$  为激励线圈的电阻;  $L_1$  为激励线圈的电感;  $R_2$  工件金属板的电阻;  $L_2$  等效感应线圈的电感;  $U$  为激励线圈的激励电压.

如图 3c 所示, 线圈位于金属板边缘时, 根据法拉第电磁感应定律可知, 磁通量的变化产生电动势, 由  $E = n \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = n B S \omega$  ( $n$  为线圈匝数;  $S$  为感应线圈的面积;  $r$  为线圈的半径) 可知, 感应电流的大小与  $S$  成正比. 所以有

$$i_4 = \left( 1 - \frac{ar \cos \frac{r-k}{r}}{\pi} + \frac{0.5(r-k) \sqrt{2rk-k^2}}{\pi r^2} \right) i_2 \quad (6)$$

在保持  $x$  不变的情况下, 将感应线圈简化为一半径为  $\frac{2r-k}{2}$  的线圈, 此时互感  $M_1$  由式(1)得

$$M_1 = \frac{(2r-k)^2}{4r^2} M \quad (7)$$

联立式(4), 式(6), 式(7)和方程组(5)可解得检测线圈阻抗为

$$Z = R_1 + j\omega L_1 - \frac{j\omega m n M (2r-k)^2}{r^2} \quad (8)$$

式中:  $n = \frac{\omega^2 M L_2 + j\omega M R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2}$

$$m = 1 - \frac{ar \cos \frac{r-k}{r}}{\pi} + \frac{0.5(r-k) \sqrt{2rk-k^2}}{\pi r^2}$$

由式(8)可知, 当线圈位于金属板边缘的时候, 磁力线不全部经过金属板, 线圈阻抗还与边缘因子  $k$  相关, 可简写为  $Z = f(\rho, \mu, x, \omega, k)$ .

### 2.2 检测线圈阻抗边缘因子的 matlab 分析

改变边缘因子对其模型进行 matlab 仿真, 具体参数为: 线圈匝数为 100, 线圈长为 41 mm, 线圈电阻为 0.15  $\Omega$ , 线圈直径为 0.79 mm, 线圈离工件的距离为 3 mm. 仿真结果如图 4 所示.

由图 4 可知, 随着边缘因子  $k$  的增大, 检测线圈的阻抗的辐角增大, 而模变化不明显. 可以通过电桥检测这微弱信号判断边缘因子  $k$  的变化情况, 得到左右的偏差信号.

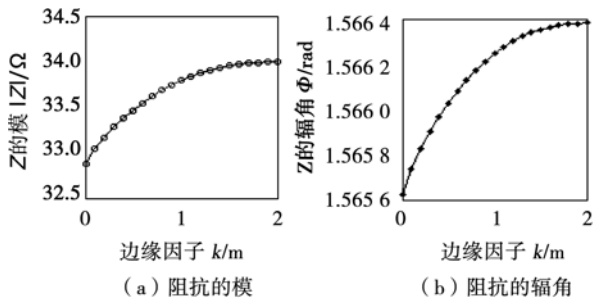


图4 检测线圈阻抗的 matlab 分析

Fig. 4 MATLAB analysis of coil Impedance

### 3 焊缝跟踪左右偏差信号提取模型

#### 3.1 偏差信号的提取模型建立

根据前面的分析可以知道电容阻抗和线圈阻抗

$Z$  的关系式. 根据电桥原理可得传感器模型传递函数, 即

$$\frac{U_1}{U} = \left( \frac{R_1}{R_1 + Z_{C1}} - \frac{R_2}{R_2 + Z_{C2}} \right) = G_1 \quad (9)$$

$$\frac{U_2}{U} = \left( \frac{R_3}{R_3 + Z_{L1}} - \frac{R_4}{R_4 + Z_{L2}} \right) = G_2 \quad (10)$$

根据传感器模型传递函数可以建立如图5所示的 matlab 模型.

#### 3.2 偏差信号的仿真结果分析

文中在 matlab/simulink 仿真模型中进行了随着  $\Delta h$  和  $k$  的变化传递函数幅值的实时跟踪仿真. 选择合适的电阻  $R_1, R_2, R_3, R_4$  和系数  $x$ , 仿真条件为错边  $\Delta h$  沿过零点斜率为 0.3 的直线变化, 边缘因子沿过零点斜率为 0.2 的直线变化. 仿真时间为 10 s, 得到传感器模型函数的变化规律如图6所示.

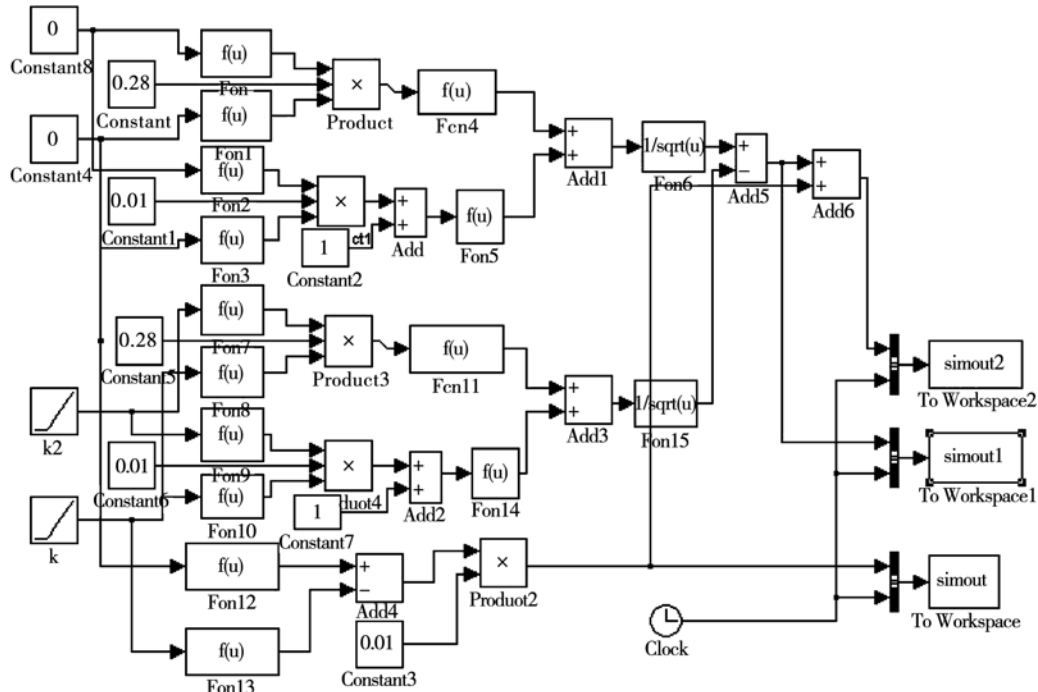


图5 提取偏差信号的 matlab 模型

Fig. 5 Matlab model of extracting deviation signal

由前面分析可知,影响左右偏差信号是边缘因子  $k$  和错边  $\Delta h$ , 所以通过用电容桥的信号对电感桥进行补偿. 如图6所示,通过选取合适的系数  $x$ , 可以很好的抑制错边的影响,得到线性度较好的输出信号.

### 4 传感器特性

为了验证对电容电感复合桥式焊缝跟踪传感器分析的正确性,进行了以下试验. 试验平台采用步

进电机带动十字滑块使得  $h$  和  $k$  平稳均匀的变化, 通过示波器观察输出结果.

试验输入信号频率可调节,幅值为 12 V, 随着  $h$  变化时,不同频率的激励作用下电容桥臂电容电压幅值变化如图7所示.

由图7可知,随着间距  $h$  的变大,电容极板电压的幅值随着增大;随着激励频率的增大,可测量的距离增大,输出信号的强度减弱. 综合考虑信号的强度和测量距离,选用频率为 12 kHz 的激励. 通过对电压幅值信号的处理,可得到焊枪高低的位置关系.

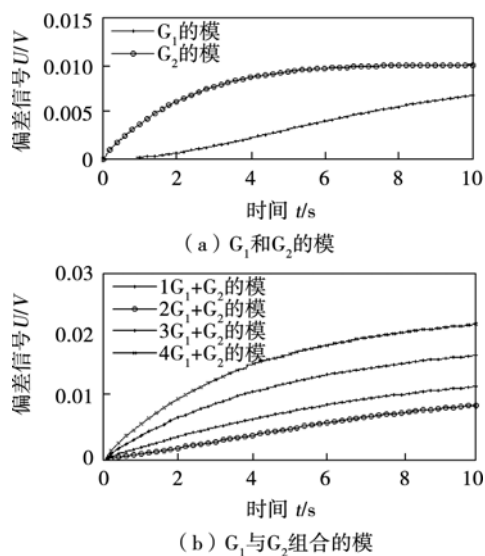
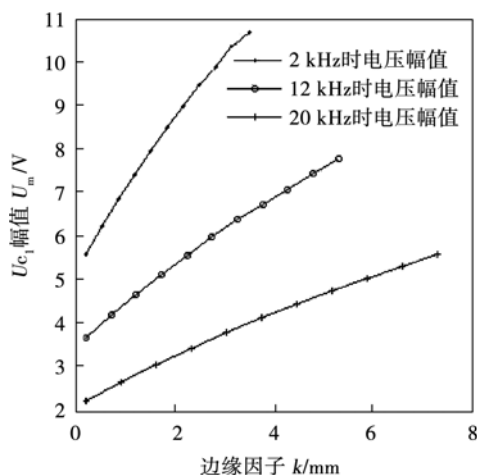
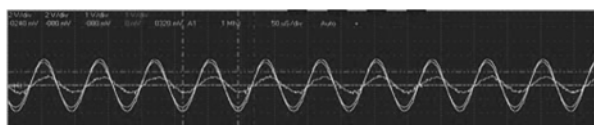


图 6 偏差信号的仿真结果

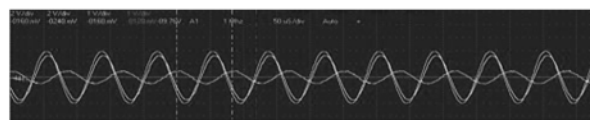
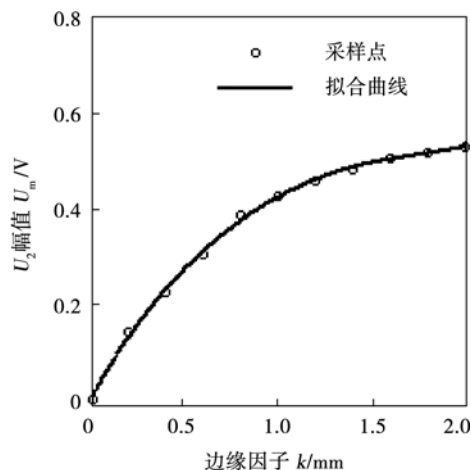
Fig. 6 Simulation results of deviation signal

图 7 电容幅值  $U_{c1}$  的变化规律Fig. 7 Variation of capacitance amplitude  $U_{c1}$ 

在上述试验条件下,检测电容桥电压  $U_1$ ,当  $\Delta h$  为正和负时, $U_1$  如图 8 和图 9 所示,可知,随着  $\Delta h$  正负的变化, $U_1$  的相位相差近  $180^\circ$ 。并且随着  $|\Delta h|$  的增大, $U_1$  的幅值的变化规律和图 7 相似。通过对  $U_1$  的处理,可以知道  $\Delta h$  的变化情况。

图 8  $\Delta h$  为正时  $U_1$  输出Fig. 8 Output of  $U_1$  when  $\Delta h$  is positive

绕制匝数为 100 的线圈,在相同的激励条件下对电感桥进行试验, $U_2$  幅值变化如图 10 所示。

图 9  $\Delta h$  为负时  $U_1$  输出Fig. 9 Output of  $U_1$  when  $\Delta h$  is negative图 10  $U_2$  的幅值变化规律Fig. 10 Amplitude variation of  $U_2$ 

由图 10 可知,随着  $k$  的增大, $U_2$  幅值增大。可以通过对输出信号  $U_2$  的处理,得到焊枪左右的位置关系。

由上述结果可知,由  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_{c1}$  的变化规律可以得到焊枪的位置关系,实现焊缝的自动跟踪。

## 5 结 论

(1) 采用电容电感复合桥式焊缝跟踪传感器的简化 matlab 模型,对传感器参数优化结果表明:设计的电容电感复合桥式焊缝跟踪传感器可以有效克服弧光温度等外界因素的干扰,削弱了平板对接焊缝跟踪过程中错边的影响。

(2) 在自行搭建了试验平台上实现了平板对接焊缝跟踪。结果表明:该方法结构简单、抗干扰能力强、工作可靠,为平板对接的焊缝跟踪提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 潘际銮. 现代弧焊控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [2] 周 律, 陈善本, 林 涛. 弧焊机器人焊缝跟踪方法的研究现状[C]// 中国机械工程学会焊接学会. 第十一次全国焊接会议论文集(2). 哈尔滨:黑龙江人民出版社, 2005: 33-35.

[下转第 24 页]

图 5 可以看出:(1)同一电流密度条件下,样品的初始电阻越小,其寿命越长;(2)电流密度越低,样品的失效时间越长。

## 5 结 论

(1) 在应用 Black 方程进行金属互连线电迁移寿命预测时,必须考虑焦耳热效应的影响。

(2) 环境温度越高,铝互连线的电迁移寿命越低。

(3) 同一电流密度条件下,样品的初始电阻越小,其电迁移寿命越长。

(4) 电流密度越低,样品的失效时间越长。

## 参考文献:

- [1] Chu M H, Liang S W, Chen C H, *et al.* Electromigration failure mechanism in Sn-Cu solder alloys with OSP Cu surface finish[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, 41(9): 2502–2507.
  - [2] 王家兵, 孙凤莲, 刘 洋. 微量元素对无铅焊点电迁移性能的改善[J]. *焊接学报*, 2012, 33(2): 29–32.  
Wang Jiabing, Sun Fenglian, Liu Yang. Improvement electromigration resistance of Pb-free solder joints with element addition [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(2): 29–32.
  - [3] Ogawa E T, Lee K D, Blashke V A, *et al.* Electromigration reliability issues in dual-damascene Cu interconnections [J]. *IEEE Transaction on Reliability*, 2002, 51(4): 403–419.
  - [4] 卢 曦, 徐 艳. 典型表面工艺强化对材料强度特性的影响[J]. *上海理工大学学报*, 2013, 35(2): 183–186.  
Lu Xi, Xu Yan. Investigation on the strength characteristics of material after typical surface strengthen[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2013, 35(2): 183–186.
  - [5] Hiroyuki A, Mikio M, Kazuhiko S, *et al.* A comparison of electromigration failure of metal lines with fracture mechanics [J]. *Acta Mechanical Solida Sinica*, 2012, 28(3): 774–781.
  - [6] Lu Y B, Tohmyoh H, Masumi S. Comparison of stress migration and electromigration in the fabrication of thin Al wires[J]. *Thin Solid Films*, 2012, 52(9): 3448–3452.
  - [7] Cher M T, Kelvin N, Chong Y. A reliability statistics perspective on the pitfalls of standard wafer-level electromigration accelerated test (SWEAT) [J]. *Journal of Electronic Testing Theory and Applications*, 2001, 17: 63–68.
  - [8] Black J R. Physics of electromigration [C] // *Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium*, 1983, 142–149.
  - [9] Dalleau D, Weide-Zaage K. Three-dimensional voids simulation in chip-level metallization structures; a contribution to reliability evaluation [J]. *Micro-Electronics Reliability*, 2001, 41(9/10): 1620–1630.
  - [10] Ye H, Basaran C, Hopkins D C. Pb phase coarsening in eutectic Pb/Sn flip chip solder joints under electric current stressing [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41: 2743–2755.
  - [11] JEDEC. JESD63 Standard. Standard method for calculating electro-migration model parameters for current density and temperature [S]. USA: JEDEC Solid State Technology Association, 2007.
  - [12] Rattalino I, Motto P, Piccinini G, *et al.* A new validation method for modeling nanogap fabrication by electromigration based on the resistance-voltage (R-V) curve analysis [J]. *Physics Letters*, 2012, 376: 30–31.
- 
- 作者简介:** 崔海坡,男,1978 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要研究方向为材料设计、分析与应用。发表论文 30 余篇。  
Email: h\_b\_cui@163.com
- 
- [上接第 12]**
- [3] Hannakam L, Tepe R. Praktische berechnung de gegeninduktivitat zweier kreisformigen leiter Schleifen in allgemeiner lage [J]. *Archiv fur Elektrotechnik*, 1980, 62: 351–357.
  - [4] 卡兰塔罗夫 II ИИ, 采伊特林 ИИ А. 电感计算手册 [M]. 陈汤铭等, 译, 北京: 机械工业出版社, 1992.
  - [5] 何文辉, 颜国正, 郭旭东. 一种新型电涡流传感器的理论分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(3): 495–498.  
He Wenhui, Yan Guozheng, Guo Xudong. Analysis of a novel eddy current sensor in theory [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(3): 495–498.
  - [6] Marinov S G. Theoretical and experimental investigation of eddy current inspection of pipes with arbitrary position of sensor coils [J]. *Review of Progress in Quantitative NDN*, 1986, (5A): 225–232.
  - [7] Hardy I, Billat A, Villermain-Lecolier G. Flat eddy-current matrix sensor for detecting metallic objects [J]. *Sensors and Actuators A*, 1991, 29(1): 13–19.
  - [8] Babic S, Akyel C. Calculating mutual inductance coils with inclined axes in air [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(7): 1743–1750.
- 
- 作者简介:** 洪 波,男,1960 年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要从事焊接机器人和自动化、焊接工艺及设备等方面的科研和教学工作。发表论文 50 余篇,获国家发明专利 14 项。Email: hongbo@xtu.edu.cn