

Optimal Design of a Contactless Sensor for Measuring Ferrous Wear Debris*

YANG Chongchong^{1,2}, CAO Guangzhong^{1,2*}, LI Xuejin², LU Piqing³,
ZHEN Xiang³, CAI Yuheng³

(1. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Shenzhen Sensors Technology Key Laboratory, Shenzhen 518060, China;
3. Shenzhen Yatai Optoelectronic Technology Co., Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The sensitivity of ferrous wear debris sensor which adopts transform structure is generally low due to strong flux leakage and weak coupling coefficient between the primary and the secondary windings, therefore, the structure of the sensor needs to be modified and optimized to improve its sensitivity. Firstly the measuring principle of this kind of contactless sensor to detect ferrous wear debris is presented. Secondly it is investigated main factors which affect the sensitivity of the sensor using combined simulation of magnetic field and electronic field based on finite element analysis (FEA) by ANSYS. Then optimal methods and a novel structure for the sensor are proposed. The design and experiment results show that the volume of the optimized sensor has significantly been decreased, and the sensitivity has obviously been increased.

Key words: wear debris sensor; optimal design; FEA; magnet field-electronic circuit coupling; sensitivity
EEACC: 7230; 3110C **doi:** 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.02.011

一种无接触铁磨粒测量传感器的优化设计*

杨冲冲^{1,2}, 曹广忠^{1,2*}, 李学金², 陆丕清³, 郑翔³, 蔡宇恒³

(1. 深圳大学机电与控制工程学院, 深圳 518060;
2. 深圳市传感器技术重点实验室, 深圳 518060;
3. 深圳市亚泰光电技术有限公司, 深圳 518057)

摘要: 针对非接触变压器结构形式的铁磨粒传感器, 由于存在漏磁较大、初次级线圈的耦合系数低导致的传感器灵敏度不高等问题, 为此, 需要对其结构进行优化。给出了铁磨粒传感器的检测机理, 分析了影响传感器灵敏度的各种参数, 采用 ANSYS 软件对该传感器进行了磁场-电路耦合有限元仿真与分析, 提出了提高传感器灵敏度的优化结构和方法。仿真和实验结果表明: 优化后的传感器在体积上大幅度缩减, 灵敏度显著提高。

关键词: 磨粒传感器; 优化设计; 有限元; 磁场-电路耦合; 灵敏度

中图分类号: TH1117; TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)02-0209-06

铁磨粒传感器主要用来检测机器的磨损状况, 这些状况可通过监测油液中的铁磨粒量来反映^[1-3]。机器在不停的运转中不可避免的产生磨损, 磨损的小铁磨粒大量的引入油液当中, 在一般的机械设备零部件失效中, 磨损失效率约占 80%, 所以油液中必然携带着设备运行状态的大量信息^[4]。铁磨粒传感器是利用电磁感应原理, 通过铁磨粒的引入, 导致磁场的变化, 使传感器的次级线圈感应压

差发生变化, 从而感应铁磨粒的质量。利用铁磨粒传感器即可对机器磨损程度进行判断^[5-6]。

铁磨粒传感器采用非接触变压器结构形式, 由于传感器漏磁较大, 初次级线圈的耦合系数较低, 使得传感器的灵敏度不高, 因此, 传感器结构设计的关键在于提高耦合系数。本文给出了铁磨粒传感器的原理结构, 在建立传感器的有限元模型的基础上, 利用 ANSYS 有限元分析工具对该传感器进行了场-路

耦合仿真,重点分析了影响传感器灵敏度的三个结构参量,获得影响传感器灵敏度的参量变化规律,提出了提高传感器灵敏度的优化结构方法,并且进行了样机研制和实验研究。

1 传感器的检测机理

铁磨粒传感器的原理结构图如图 1 所示,传感器以一个柱形内铁芯为核心,外面有空心环形外铁芯用于构成磁场回路,在内铁芯上绕制螺线管线圈,作为初级励磁线圈,在离柱形内铁芯的上下两个端面端约 1 mm 处各贴一个次级感应线圈,两次级感应线圈的工艺参数及与端面的相对位置完全相同,其中上端次级线圈为检测线圈,下端次级线圈为参考线圈,检测线圈和参考线圈与电阻 R2、R3 等元件联结,组成交流电桥,由两次级线圈的联结点 A 和电阻联结点 B 引出传感器的输出信号。当传感器初级励磁线圈由电压源提供一定频率和幅度的正弦激励信号时,初级励磁线圈中产生交变励磁电流,使得内铁芯中形成交变磁场,从而使参数完全相同的两个次级线圈中产生相等的感生电动势,当含铁磨粒的试样置于上端次级检测线圈时,将导致通过检测线圈的磁场发生改变,且其电感和互感量增加^[7-9],从而使检测线圈与参考线圈中的感生电动势出现差值,并在交流电桥中形成试样的检测信号输出。

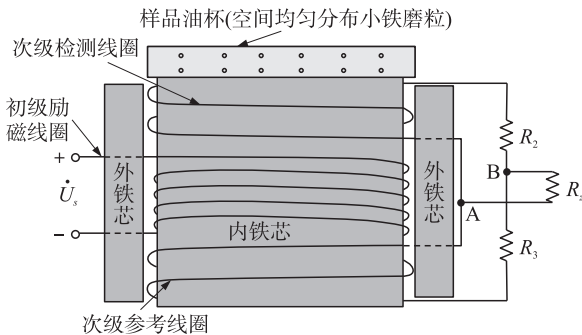


图 1 铁磨粒传感器原理结构图

传感器的等效电路如图 2 所示。

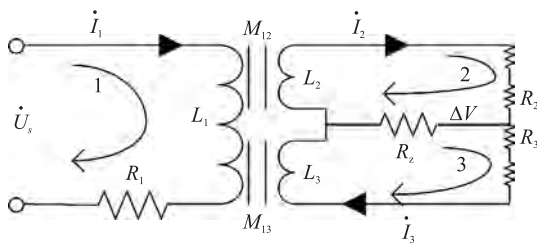


图 2 传感器等效电路原理图

根据基尔霍夫定律及电磁学原理并作相关的近

似处理后,当含铁磨粒的试样置于上端次级检测线圈时,得到交流电桥的检测信号电压的变化输出^[10]:

$$|\Delta V| = \frac{3}{4\mu_{r1}} U_s \Delta\mu \frac{N}{N_1} \cdot \frac{S}{S_1} \sqrt{\frac{l_1}{l}} \sqrt{K} \sqrt{1 + \frac{\frac{1}{9} - (1-2K)^2}{\frac{R}{wL} + (1-2K)^2}} \tag{1}$$

$$K = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M_{13}}{\sqrt{L_1 L_3}} = \frac{\mu_r \mu_0 \frac{N_2 N_1 S}{l}}{\sqrt{\mu_{r1} \mu_0 \frac{N_1}{l_1} S_1 \cdot \mu_r \mu_0 \frac{N_2}{l} S}} = \sqrt{\frac{\mu_r l_1 S}{\mu_{r1} l S_1}} \tag{2}$$

其中, U_s 为励磁交流电压源; i_1 为励磁电流; i_2 、 i_3 分别为检测线圈回路电流和参考线圈回路电流; ΔV 为灵敏度检测信号输出; L_1 、 L_2 、 L_3 分别为初级励磁线圈、次级检测和参考线圈的自感系数; M_{12} 、 M_{13} 分别为两个次级线圈和初级线圈的互感系数; R_1 、 R_2 、 R_3 为桥壁电阻; R_2 为传感器的电桥输出电阻; N_1 、 l_1 、 S_1 分别为初级励磁线圈匝数、高度、截面积; N 、 l 、 S 为检测线圈、参考线圈匝数、高度、截面积; K 为初次级线圈的耦合系数。

式(1)表明:影响传感器灵敏度的参数变量多,关系复杂,但影响灵敏度最为主要的因素是传感器本身的三个结构参量:初级激励线圈的结构参数 (N_1 、 l_1 、 S_1)、次级感应线圈的结构参数 (N 、 l 、 S) 和铁芯的结构参数 (主要指内铁芯的直径)。

2 传感器设计仿真

2.1 传感器设计的磁场-电路耦合有限元仿真

铁磨粒传感器激励线圈一般采用外接电压源形式,输出外接电桥电路,利用 ANSYS 有限元软件进行磁场-电路耦合仿真是优化传感器结构的一种有效的方法^[11-13],通过仿真可以快速、准确分析出传感器结构参数对其灵敏度的影响。场路耦合的方式涉及到磁场与电路两个物理区域,磁场分析采用三维有限元单元 solid97 单元建模,在电路分析中采用通用电路单元 CIRCU124 模拟电路元件建模,对 CIRCU124 单元通过设置 KEYOPT(1) 的值来确定该单元模拟的电路元件。场路耦合的关键在于两种不同物理场的连接,通用电路单元 CIRCU124 通过绞线型线圈 (KEYOPT(1)=5) 将电路和有限元(电磁)区连接,其模型示意图如图 3 所示,利用独立电压源给设备中的线圈加电压和电流载荷,采用 solid97 绞线型线圈单元中的一个节点作为 CIRCU124 绞线型线圈元件的 K 节点以实现电路和电磁区域的耦合^[14-15]。

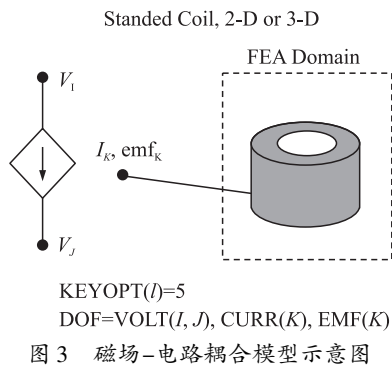


图 3 磁场-电路耦合模型示意图

2.2 传感器结构设计仿真与优化

图 4 为传感器优化前的初始模型, 模型参数见表 1。根据模型相关的参数, 在 ANSYS 中建立其有限元模型, 其传感器网格划分模型和磁场-电路耦合连接模型分别如图 5(a)、5(b) 所示。当施加幅值为 12 V、频率为 1 kHz 的交流电信号给激励线圈时, 获得的磁场分布分别如图 6、7 所示。根据多次仿真结果, 探讨传感器在不同工况下传感器的结构参数对灵敏度的影响。

表 1 传感器初始模型相关参数

	匝数	截面面积高 (m)	截面厚度 (m)	内径 (m)	外径 (m)	直径 (m)
初级线圈	2 230	0.058 0	0.016 5	0.016 0	0.032 5	-
次级线圈	900	0.005 0	0.013 0	0.020 0	0.033 0	-
内铁芯	-	0.060 0	0.015 0	-	-	0.030 0
外铁芯	-	0.060 0	0.007 5	0.032 5	0.040 0	-



图 4 传感器初始模型

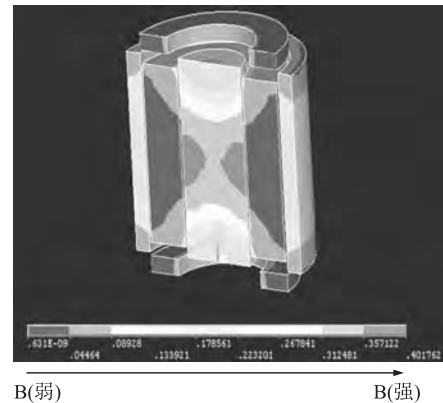
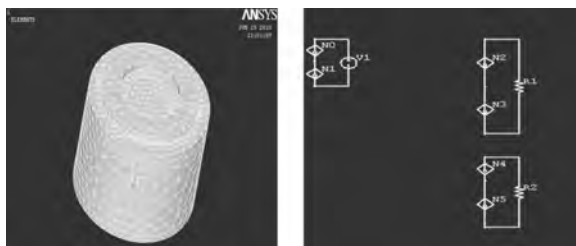


图 7 传感器磁场剖析分布图



(a) 传感器网格划分 (b) 磁场-电路耦合连接

图 5 传感器有限元模型

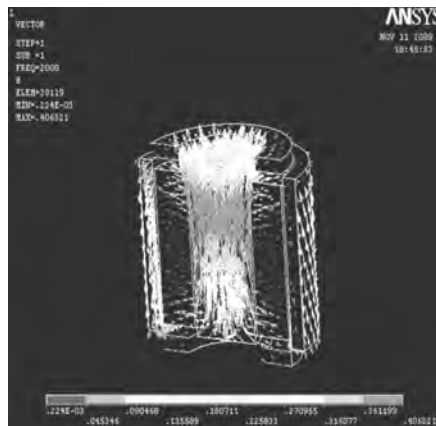


图 6 传感器磁力线剖析分布图

2.2.1 激励线圈结构参数对灵敏度的影响

根据式(1)可知, 当含铁磨粒的试样置于上端次级检测线圈时, 传感器次级线圈感应压差的变化与激励线圈截面高度 l_1 成正比, 与匝数 N_1 和截面积 S_1 成反比。由于增加激励线圈的高度必将使传感器的体积增加, 故不考虑该方案。比较合理的方法是保持传感器截面高度不变, 通过减少激励线圈的匝数, 进而减少了激励线圈厚度与截面积来提高传感器灵敏度。如图 8 为传感器激励线圈截面图。表 2 给出了在保持激励线圈截面高度一定时, 激励线圈匝数 N_1 、截面积 S_1 、以及厚度 w_x 的换算关系。图 9 为仿真中传感器次级线圈感应压差与激励线圈匝数变化关系曲线。

表 2 激励线圈匝数 N_1 、截面积 S_1 、以及厚度 w_x 的换算关系

No.	w_x/m	$N_1/匝$	$S_1(m^2)$
1	0.017 0	2 230	9.86E-04
2	0.015 0	2 000	8.80E-04
3	0.013 6	1 800	7.90E-04
4	0.011 4	1 500	6.60E-04
5	0.009 1	1 200	5.28E-04

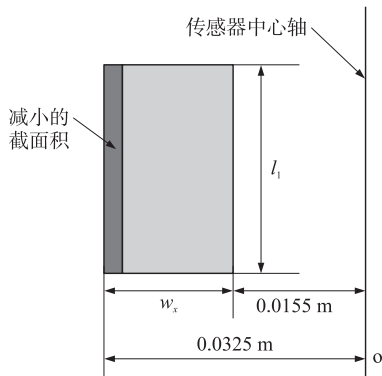


图8 激励线圈截面图

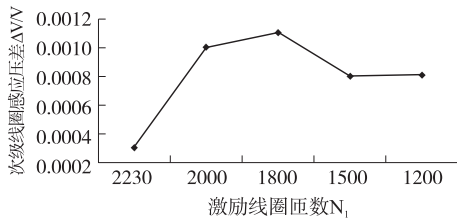


图9 传感器次级感应线圈压差 \$\Delta V\$ 与激励线圈匝数关系

从图9可以看出,保持传感器的其他参数不变,当传感器激励线圈匝数 N_1 由 2 230 匝减小到 1 800 匝时,次级线圈感应压差 ΔV 由 0.000 3 V 增加到 0.001 1 V,当传感器激励线圈匝数 N_1 由 1 800 匝减小到 1 200 匝时,次级线圈感应压差 ΔV 由 0.001 1 V 减小到 0.000 8 V。在减小传感器激励线圈的匝数(即减小激励线圈的截面积)过程中,次级线圈感应压差先增加后缓慢减小,次级线圈感应压差减小的原因在于:传感器截面厚度 w_x 在减少到 0.013 6 m 后造成了传感器总体结构的不合理。因此,在保持传感器结构合理的前提下,适当减少传感器激励线圈的匝数可提高传感器的灵敏度。

2.2.2 次级线圈结构参数对灵敏度的影响

减少次级线圈的高度 l 、增加次级线圈的匝数 N 和截面积 S 均可提高传感器的灵敏度。但次级线圈高度减小,同时会引起面积的减少,使问题复杂化。仿真中,固定次级线圈的高度为 5 mm,试探传感器的灵敏度随次级线圈的匝数(即增加次级线圈的截面积)的增加而变化的规律。图10为次级线圈截

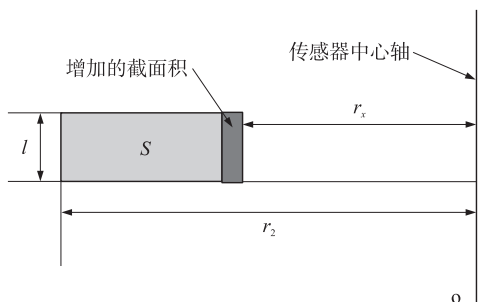


图10 次级线圈截面图

面图。表3为在保持次级线圈高度不变时,次级线圈匝数 N 、截面积 S 与内径 r_x 之间的换算关系,图11为仿真中传感器次级线圈感应压差与次级线圈匝数变化关系曲线。

表3 次级线圈内径、匝数和截面积换算关系

No.	r_x/m	$N/匝$	S/m
1	0.020 0	900	6.50E-05
2	0.019 0	977	7.00E-05
3	0.017 0	1 117	8.00E-05
4	0.016 0	1 187	0.50E-05
5	0.015 0	1 257	9.00E-05

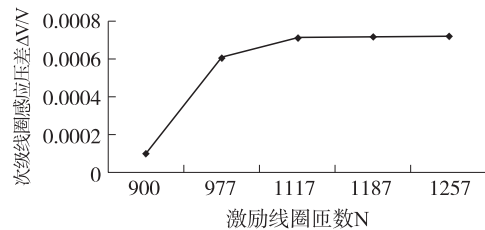


图11 传感器次级感应线圈压差 \$\Delta V\$ 与次级线圈匝数关系

从图11可以看出,保持传感器的其他参数不变,当传感器次级线圈的匝数 N 由 900 匝增加到 1 257匝(次级线圈的截面积由 6.50E-05 m^2 增加到 9.00E-05 m^2)时,传感器次级线圈感应压差 ΔV 由 0.000 1 V 增加到 0.000 7 V 以上,传感器次级线圈的压差传感器次级线圈感应压差随着次级线圈匝数的增加而增加,当传感器次级线圈的匝数增加到 1 117 匝以上时,次级线圈的压差变化并不明显,因此,在次级线圈匝数少于 1 117 匝时,适当增加传感器次级线圈的匝数可明显提高传感器的灵敏度。

2.2.3 内铁芯对灵敏度的影响

内铁芯的结构参数是影响传感器灵敏度的关键参数,在选择初级与次级线圈为一合理的结构并保持不变的情况下,试探传感器的灵敏度随内铁芯直径的减小而变化的规律。图12为当内铁芯直径从 0.030 0 m 减小到 0.014 0 m 时仿真所得到的次级感应线圈压差与内铁芯直径关系曲线图。

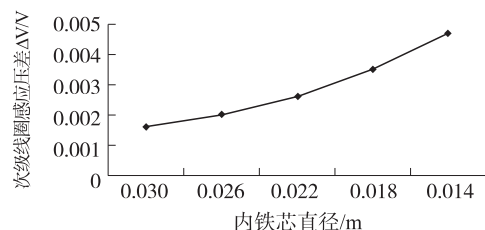


图12 传感器次级感应线圈压差 \$\Delta V\$ 与内铁芯直径关系

从图12可以看出,保持传感器的其他参数不变,当传感器内铁芯的直径由 0.030 0 m 减小到

0.014 0 m 时,传感器次级线圈感应压差 ΔV 由 0.001 7 V 增加到 0.004 8 V,次级线圈感应压差随着内铁芯直径的减小而增加,因此,适当减小传感器内铁芯直径可提高传感器的灵敏度。

影响传感器灵敏度的因素非常复杂,并且影响传感器灵敏度的各参数之间关系并不独立,而是相互影响相互制约的。但单独对各个参数进行仿真分析可对传感器结构优化设计形成重要参考。除重点探讨上述三个重要结构参数对传感器灵敏度的影响之外,本文还对其他的一些影响传感器灵敏度的参数进行了大量仿真分析,最终得出如下规律:

(1)保持传感器激励线圈高度不变,适当减小激励线圈的截面积(即减少激励线圈的匝数),可提高传感器的灵敏度,但过于减小会导致传感器的结构不合理并出现灵敏度微弱下降的现象。

(2)保持传感器次级线圈高度不变,适当增加次级线圈的匝数(即增加次级线圈的截面积)可提高传感器的灵敏度。

(3)在传感器整体结构合理的情况下,适当的减少内铁芯的直径会显著的增加传感器的灵敏度。

(4)优化传感器结构目的是使小铁磨粒区域磁场强度增加、初级线圈与次级线圈的互感量增加、耦合系数增大,从而提高传感器的灵敏度。

(5)由于外铁芯的作用使得磁场在内铁芯柱端面迅速外扩,使得大部分磁力线并不穿过铁磨粒区域,铁磨粒得不到磁化,不利于互感量增加与耦合系数的提高。在这种情况下,可去掉外铁芯,从而提高传感器灵敏度。

(6)适当的降低磁芯磁导率、提高激励电压源的幅值也有利于提高传感器的灵敏度。

3 实验结果

基于上述仿真,提出了新型传感器结构,即去掉了外铁芯,对新型传感器的结构参数进行了优化,完成了样机研制和实验。图 13 为优化前具有外铁芯的传感器实物图,图 14 为优化后无外铁芯的传感器的实物图,表 4 给出了优化设计前后的传感器相关参数与灵敏度实验测试结果。



图 13 优化前的传感器



图 14 优化后的传感器

表 4 传感器的相关参数与灵敏度实验测试结果

		直流阻抗 (Ω)	电感 (mH)	铁芯直径 (m)	电压传递比	相同激励下(600 μq 标样) 引起的次级线圈压差输出变化量(mV)
优化前传感器	初级激励线圈	29.9	125.0	0.030 0	10:1.07	0.033 0 ~ 0.050 0
	次级感应线圈	67.6	50.0			
优化后 传感器	初级激励线圈	12.2	9.6	0.020 0	10:4.00	0.315 0 ~ 0.017 0
	次级感应线圈	274.5	42.5			

从表 4 可以看出,优化后的传感器由于初级线圈的匝数的减小使初级线圈的直流电阻由 29.9 Ω 减小到 12.2 Ω ,那么电感值相应由 125.0 mH 减小到 9.6 mH,由于次级线圈的匝数的增加使次级线圈的直流电阻由 67.5 Ω 增加到 274.5 Ω ,电感值由 50.5 mH 变化到 42.5 mH,其电压传递比由 1:1.07 提高到 10:4.00,耦合系数大大提高,而内铁芯直径由 30 mm 下降为 20 mm,体积大幅度的缩减。在相

同的激励与铁磨粒标样下,优化后的传感器其次级感应线圈的压差由 0.033 0 mV ~ 0.050 0 mV 变为 0.315 0 mV ~ 0.317 0 mV,压差变化量增加了约 10 倍,因此,灵敏度得到了显著的提高,达到了应用要求。

4 结束语

本文给出了采用变压器结构型式设计的铁磨粒传

感器检测原理,建立了其 ANSYS 有限元分析模型并进行了磁场-电路联合仿真,重点分析了激励线圈、次级线圈和内铁芯结构参数对传感器灵敏度的影响,获得了提高该传感器灵敏度的优化结构的6条主要规律。仿真和实验均表明:优化后的传感器相比优化前的传感器在整体结构上更加合理,耦合系数更高,体积得到了大幅度的缩减;在相同的激励与铁磨粒标样下,优化后的传感器其次级感应线圈的压差变化是优化前的近10倍,灵敏度得到了显著的提高,满足了应用要求。

参考文献:

- [1] Chambers K W, Arebson M C, Waggoner C A. An On-Line Ferromagnetic Wear Debris Sensor for Machinery Condition Monitoring and Failure Detection[J]. *Wear*, 1988, 128(3): 325-337.
- [2] Flangan I M, Jordan J R, Whittington H W. An Inductive Method for Estimating the Composition and Size of Metal Particle[J]. *MeasSci Technol*, 1990, 1(5): 381-384.
- [3] Miller J L, Kitaljevich D. In-Line Oil Debris Monitor for Aircraft Engine Condition Assessment[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2000, 6: 49-56.
- [4] 宋轩, 杨成, 马媛慧. 油液监测技术实现手段的比较分析[J]. *润滑油*, 2008, 23(5): 62-64.
- [5] Dempsey J P, 2000. A Comparison of Vibration and Oil Debris Gear Damage Detection Methods Applied to Pitting Damage. NASA Report Number: TM - 2000 - 210371, Prepared for the 13th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Houston, Texas.
- [6] Messinger G S, Dube F R, Thibedeau R J. Rolling Element-Bearing Failure Detection with ODM On-Line Oil Debris Sensor[J]. National Research Council of Canada, Technical Report IMR-MCM-CTR-20, 1995.
- [7] 张玉明, 戚伯云. 电磁学[M]. 北京科学技术出版社, 2007, 2.
- [8] 范红波, 张英堂, 程远, 等. 磨粒径向分布对电感式磨粒传感器测试结果的影响[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(7): 958-962.
- [9] 范红波, 张英堂, 陶凤和, 等. 铁磁质磨粒形态对电感式磨粒传感器输出特性的影响[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(10): 1401-1405.
- [10] 朱煜, 王晓蕾, 杨志伊. KLD-1 型铁磁颗粒定量仪传感器的研制[J]. *河海大学机械分院学报*, 1995, 9(2): 22-27.
- [11] 孙明礼, 胡仁喜. 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 机械工业出版社, 2007, 4.
- [12] Candeo A, Dughiero F. Numerical FEM Models for the Planning of Magnetic Induction Hyperthermia Treatments with Nanoparticles[J]. *IEEE Trans. on Magnetics*, 2009, 45(3): 1658-1661.
- [13] Leonard P J, Lai H C. Treatment of Symmetry in Three Di-Mensional Finite Element Models of Machines Coupled to External Circuits[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14(4): 1276-1281.
- [14] 严宏志, 张亦军. 一种磨粒在线监测传感器的设计及其特性分析[J]. *传感技术学报*, 2002, (4): 333-338.
- [15] 阎照文. ANSYS 10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M]. 中国水利水电出版社, 2006, 11.



杨冲冲(1986-),男,湖北人,深圳大学硕士研究生,控制理论与控制工程专业,主要研究方向为传感器技术与自动检测系统的研究, yangchongchong86@gmail.com;



曹广忠(1968-),男,陕西人,博士,教授。主要研究方向为先进控制理论及其应用、智能信息处理、传感器技术研究。主持完成了多项国家科技攻关、国家自然科学基金等科研项目。发表论文六十余篇,拥有发明专利六项, gzcao@szu.edu.cn。