

# 一种新型磨粒传感器输出模型建立及其特性分析

陈书涵<sup>1</sup>, 张 蓉<sup>2</sup>, 刘金华<sup>3</sup>

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南工学院 机械系, 湖南 衡阳 421101)  
3. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 以研制的磨粒传感器为对象, 运用电磁场原理、毕奥-萨伐尔定律等, 推导出一种新型磨粒传感器的感应电动势输出模型, 并以试验验证其正确性。还由此分析了传感器的线性度、灵敏度与各个参数之间的变化规律。研究表明, 该传感器线性度较好, 但是在检测磨粒尺寸少于  $100\ \mu\text{m}$  时, 传感器的灵敏度与线性度较差, 因此还需对传感器进行线性化处理及结构参数优化, 以期获得较高的灵敏度。

**关键词:** 磨粒传感器; 数学模型; 线性度; 灵敏度

**中图分类号:** TP212

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2009)02-0045-05

## Analysis of Output Model Establishing and Its Characteristics of One New Type Wearing Debris Sensor

Chen Shuhan<sup>1</sup>, Zhang Rong<sup>2</sup>, Liu Jinhua<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, South Central University, Changsha 410083, China;  
2. Department of Mechanical, Hunan Institute of Technology, Hengyang Hunan 421101, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008)

**Abstract:** Taking the wearing debris sensor as the object, electromagnetic field principle and Biot-Savart Law were utilized to establish the output model of the new type wearing debris sensor induction voltage as well as confirmed by experiment. Additionally, the change rule among the linearity, sensitivity of sensor and every parameter were analyzed. The results show that the sensor has a better linearity, but sensor's sensitivity and the linearity are bad while the examination abrasive size is bellow  $100\ \mu\text{m}$ , therefore it obtains the high sensitivity by optimization the sensor with structure parameters and linear processing.

**Key words:** wearing debris sensor; mathematics model; linearity; sensitivity

## 0 引言

目前用于油液监测的传感器主要有光学型、光电型、电磁型、电量型、能量型、声波型及电子型, 它们大多为离线检测型, 而能用于在线、快速、连续进行监测的磨粒传感器却不多, 主要有加拿大 GasTops 公司开发的 FerroSCAN 传感器和 MetalSCAN 传感器<sup>[1]</sup>、美国 HIAC/ROYCO 公司的多通道磨粒计数器和激光扫

描传感器(不是连续地在线监测)。而磨粒检测技术方面, 主要有日本的 Takuso Sato 等人与美国的 M. Liner 联合开发的在线磨粒监测技术, 它将旋转磁场引入光导纤维射出的激光对磨粒的散射原理中, 可显示磨粒的形状和尺寸信息<sup>[2]</sup>。国内在传感器和磨粒检测技术上也有不少研究成果<sup>[3-6]</sup>, 但大部分还是在离线检测技术上。如中国矿业大学开发的旋转铁谱仪和与之配套的磨粒定量仪、中国农机化研究院研发的气动式铁谱

收稿日期: 2009-02-06

基金项目: 湖南省高等学校科学研究基金资助项目(06D075)

作者简介: 陈书涵(1978-), 男, 湖南衡阳人, 中南大学讲师, 博士, 主要从事设备状态监测技术方面的研究,

E-mail: [lccshcsu@126.com](mailto:lccshcsu@126.com)

仪、杭州轴承试验中心研发的旋转铁谱仪和配套的光密度测量仪等。少数单位也进行了在线式磨粒传感器的研制,如西安交通大学研发了OLF-4在线铁谱仪传感器、石家庄铁道学院研发了铁磁质磨粒在线监测器、海军工程大学研发了超声波磨粒监测传感器、武汉理工大学研发了感应式磨粒在线传感器<sup>[3-6]</sup>,但至今未有应用于实践的成熟技术。

本试验所研制的新型磨粒传感器原理与结构如图1所示。在一个磁惰性的管子上绕有3组线圈,初级线圈1和初级线圈2反向串联,由高频交流电源驱动,使得产生的磁场相反,刚好在次级线圈处抵消,即接近零磁场。当含有金属磨粒的油液流过时,引起次级线圈磁场扰动,导致次级线圈产生感应电动势。

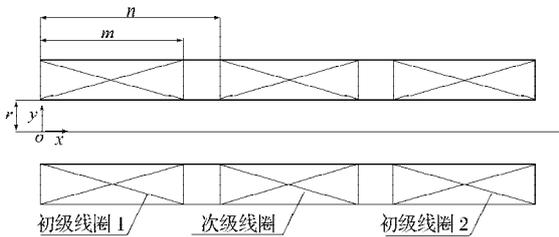


图1 磨粒传感器结构原理图

Fig. 1 The structure principle drawing of wearing debris sensor

## 1 传感器感应电动势输出模型建立

为便于计算,首先假设金属磨粒是球形的(如图1所示),半径为 $r_a$ ,速度为 $v$ ,经过初级线圈1的时间为 $t$ ,相对磁导率为 $\mu_m$ ;初级线圈1的长度为 $m$ ,匝数为 $N_1$ ,流过的电流为 $I$ ;磁惰性管子半径为 $r$ ,真空磁导率为 $\mu_0$ ,初级线圈1到次级线圈长度为 $n$ 。假设端点 $O$ 为坐标原点,取轴向为 $x$ 轴,向右为正方向;取径向为 $y$ 轴,向上为正方向。

金属磨粒没进入初级线圈1前,线圈1产生的电感为<sup>[7]</sup> $L = \mu_0 N_1^2 \pi r^2 \frac{\sqrt{r^2 + m^2} - r}{m^2}$ , (1)

当 $m/r > 5$ 时,可认为初级线圈1内部磁场均匀<sup>[8]</sup>,且式(1)可近似为 $L = \frac{\mu_0 N_1^2 \pi r^2}{m}$ 。 (2)

如果铁芯进入初级线圈1时,使得进入部分的磁阻下降,引起磁感应强度 $B$ 增大,从而使被覆盖的部分线圈局部电感增大<sup>[7]</sup>,即有:

$$L_c = \frac{\mu_0 \mu_r N_1^2 \pi r_c^2}{m^2} (\sqrt{r_c^2 + l_c^2} - r_c), \quad (3)$$

式(3)中, $r_c$ 、 $l_c$ 、 $\mu_r$ 、 $L_c$ 分别为铁芯的半径、进入线圈的长度、相对磁导率和局部线圈电感的增大值。

当把金属磨粒看作铁芯时,可得:当金属磨粒进入初级线圈1时,引起被覆盖的那部分线圈电感的增大值 $L_m$ 。取 $r_c = r_a$ 、 $\mu_r = \mu_m$ 、 $l_c = 2r$ 代入式(3)得:

$$L_m = 1.236 \mu_0 \mu_m N_1^2 \frac{\pi r_a^3}{m^2} \quad (4)$$

由于次级线圈的感应电动势 $E$ ,是金属磨粒进入初级线圈1引起次级线圈的磁感应强度的增大或减少而产生的,因此只要得到 $\Delta B$ ,再根据 $\phi = \Delta B S$ 、

$E = -\frac{d\phi}{dt}$ (负号代表方向)就可得到感应电动势 $E$ 。

$$\text{而由电感的定义可知: } L = \frac{\psi}{I} = \frac{N_1 \phi_1}{I}, \quad (5)$$

式(5)中, $\phi_1$ 为初级线圈1的磁通量。

从式(5)可知,被覆盖部分线圈局部电感增大了 $L_m$ ,这是因通过该部分线圈的磁通量增加了;也可等效认为磁通量不变,而电流 $I$ 减少了,由此可得:

$$L_0 = L_1 + L_m = \frac{2\pi r_a \mu_0 N_1^2 r^2}{m^2} + \frac{1.236 \pi \mu_0 \mu_m N_1^2 r_a^3}{m^2} = \frac{2N_1 r_a \phi_m}{mI} = \frac{2N_1 r_a \phi_1}{mI_m} \quad (6)$$

上式中, $L_0$ 为被覆盖部分线圈总电感; $L_1$ 为覆盖部分的线圈原电感; $\phi_m$ 为被覆盖部分的线圈磁通量; $I_m$ 为等效认为被覆盖部分的线圈电流。

$$\text{从式(6)可以得到 } I_m = \frac{2r^2 I}{2r^2 + 1.236 \mu_m r_a^2}, \quad (7)$$

进而得到电流的变化量 $\Delta I$ :

$$\Delta I = I - I_m = \frac{1.236 \mu_m r_a^2 I}{2r^2 + 1.236 \mu_m r_a^2} = \frac{I}{\frac{2r^2}{1.236 \mu_m r_a^2} + 1}, \quad (8)$$

$\Delta I$ 随金属磨粒的相对磁导率、半径的增大而增大。

根据毕奥-萨伐尔等定律,可以进一步得到由电流变化量 $\Delta I$ 引起的次级线圈中点的磁感应强度变化,

$$\text{为 } \Delta B = \frac{\mu_0 r^2 \Delta I N_1 r_a}{[r^2 + (n-vt)^2]^{3/2} m}, \quad (9)$$

$$\text{从而有 } \phi = \Delta B S = \frac{\pi r^4 \mu_0 \Delta I N_1 r_a}{[r^2 + (n-vt)^2]^{3/2} m}, \quad (10)$$

所以产生的感应电动势为:

$$E = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{3\pi r^4 \mu_0 \Delta I r_a v (n-vt)}{m [r^2 + (n-vt)^2]^{5/2}} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,次级线圈的感应电动势的输出电压不仅与磨粒的大小、相对磁导率、激励电源的电压、频率有关,而且还与油液的流速有关。当金属磨粒刚好完全通过初级线圈1时,次级线圈感应电动势的输出电压刚好达到最大值(由于次级线圈的磁感应强度接近于零,所以只考虑磨粒通过初级线圈1的情况),此时:

$$E_{\max} = -\frac{3\pi r^4 \mu_0 \Delta I N_1 r_a v (n-m)}{m [r^2 + (n-m)^2]^{5/2}}$$

$$\frac{3.708\pi r^4 \mu_0 N_1 (n-m) I}{m [r^2 + (n-m)^2]^{5/2}} \cdot \frac{\mu_m r_a^3 v}{2r^2 + 1.236\mu_m r_a^2}, \quad (12)$$

$$\text{令 } K = \frac{3.708\pi r^4 \mu_0 N_1 (n-m) I}{m [r^2 + (n-m)^2]^{5/2}}, \quad (13)$$

$$\text{则式 (12) 可化为 } E_{\max} = -K \frac{\mu_m r_a^3 v}{2r^2 + 1.236\mu_m r_a^2}, \quad (14)$$

式 (14) 为磨粒传感器的输出模型, 负号表示方向。

## 2 传感器特性分析

### 2.1 传感器的线性度分析

由式(14)可知, 当  $K$  为常数时:

1)  $\mu_m$  与  $r_a$  为定值时, 传感器的输出电压与油液的流速关系如图 2 所示。从图 2 中可知, 它们呈线性关系, 电压随油液的流速的增大而增加。

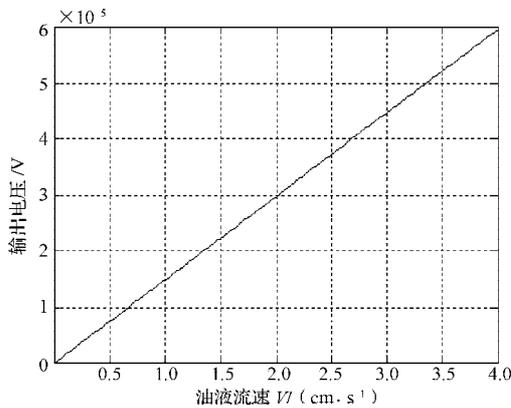


图 2 输出电压与流速关系图

Fig. 2 The relationship between output voltage and flow speed

2)  $r_a$  与  $v$  为定值时, 传感器的输出电压与油液中的磨粒相对磁导率关系如图 3 所示。从图 3 可知, 它们呈线性关系, 电压随相对磁导率的增大而增加。

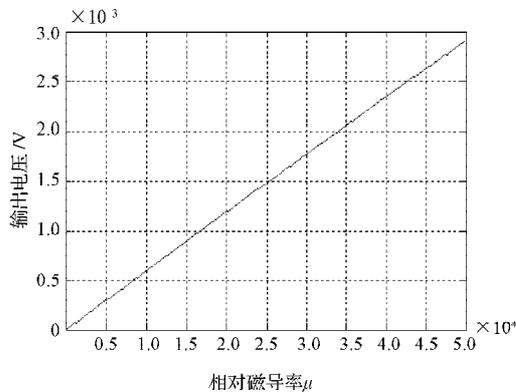


图 3 输出电压与磁导率关系图

Fig. 3 The relationship between output voltage and permeability

3)  $v$  与  $\mu_m$  为定值时, 传感器的输出电压与油液中磨粒的半径关系如图 4 所示。从图 4 可知, 它们前小部分呈非线性关系, 但大部分是呈线性关系, 且电压都是随着磨粒半径的增大而增加。

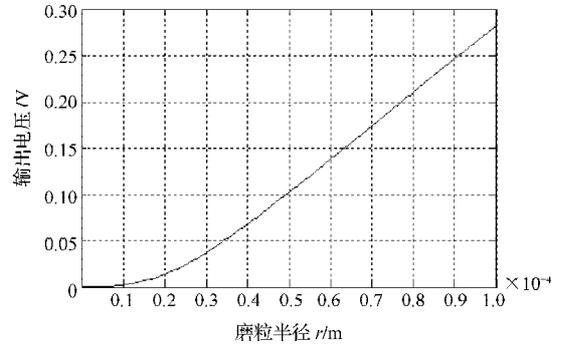


图 4 输出电压与磨粒半径关系图

Fig. 4 The relationship between output voltage and wearing debris radius

另外, 当油液的流速  $v$  为定值时, 传感器的输出电压与磨粒的半径  $r_a$ 、相对磁导率  $\mu_m$  的关系如图 5 所示。从图 5 可知, 它们呈近似线性关系。

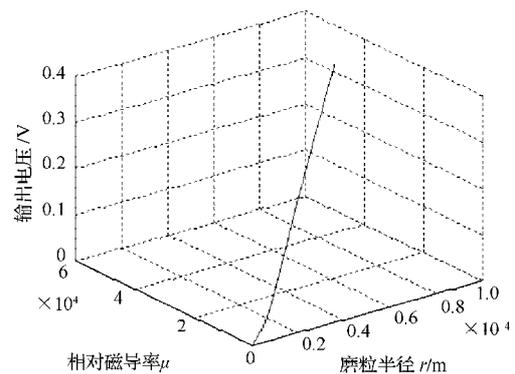


图 5 输出电压与磨粒半径、磁导率关系图

Fig. 5 The relationship between output voltage and permeability, wearing debris radius

以上分析结果表明, 该传感器的线性度比较好, 但由于传感器的输出电压变化趋势与变量的变化趋势是一致的, 为了使传感器的检测性能更好, 还可进一步对该传感器进行线性化处理。

### 2.2 传感器灵敏度分析

同样, 当  $K$  为常数时, 由式(14)分别对  $v$ 、 $r_a$ 、 $\mu_m$  求一阶导数, 得到灵敏度的数学模型, 进而根据此模型得到以下分析结果:

1)  $\mu_m$  与  $r_a$  为定值时, 传感器的灵敏度为定值。

2)  $v$  与  $\mu_m$  为定值时, 传感器的灵敏度与油液中磨粒的半径关系如图 6 所示。从图 6 可知, 它们呈非线性关系, 灵敏度随磨粒半径增大而增加。

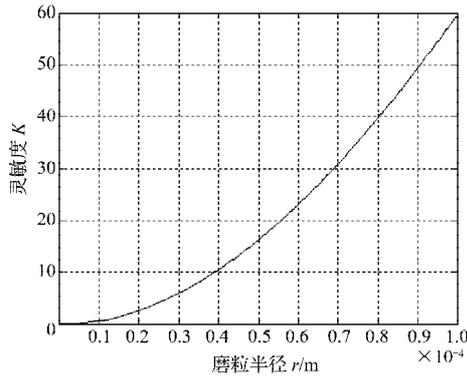


图6 灵敏度与磨粒半径关系图

Fig. 6 The relationship between sensitivity and wearing debris radius

3)  $r_a$  与  $v$  为定值时, 传感器的灵敏度与油液中的磨粒相对磁导率关系如图7所示。从图7可知, 它们呈非线性关系, 灵敏度是随相对磁导率增大而减小。

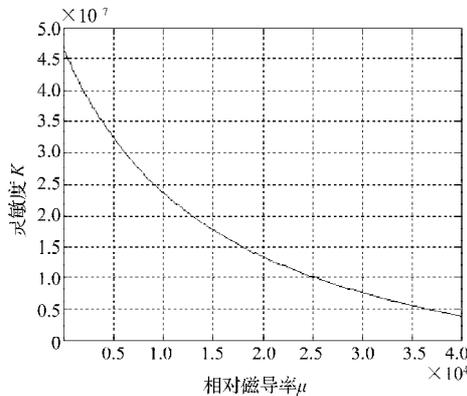


图7 灵敏度与相对磁导率关系图

Fig. 7 The relationship between sensitivity and permeability

另外, 传感器的灵敏度与  $K$  值有关。由式(13)可知, 传感器的灵敏度还与传感器的结构参数、高频电源的电流以及初级线圈1的匝数有关。下面仅就传感器的灵敏度与传感器的结构参数的关系进行分析。

1) 灵敏度  $K$  与磁性管半径  $r$  的关系如图8所示。由图8可知,  $K$  值随着  $r$  的增大而增加。

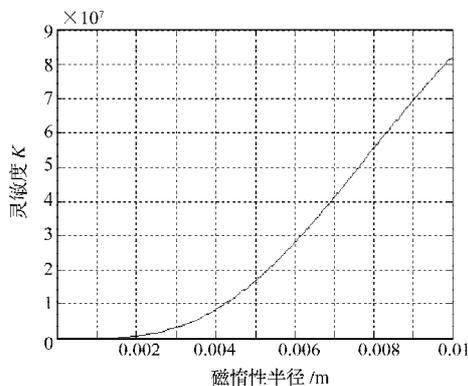


图8  $K$  与磁性管半径关系图

Fig. 8 The relationship between  $K$  and magnetic inert tube radius

2) 灵敏度  $K$  与  $n$  的关系如图9所示。从图9可以看出, 当  $n$  达到一定的值后,  $K$  的值将达到最大。

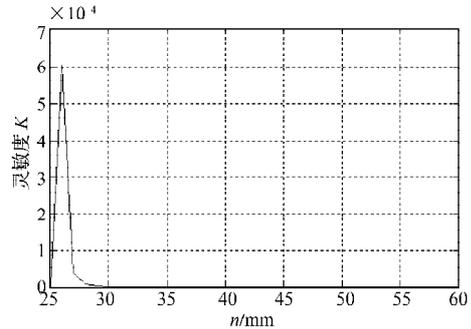


图9  $K$  与  $n$  关系图

Fig. 9 The relationship between  $K$  and  $n$

3) 灵敏度  $K$  与  $m$  的关系如图10所示。从图10可以看出, 当  $m$  达到一定的值后,  $K$  的值将达到最大。

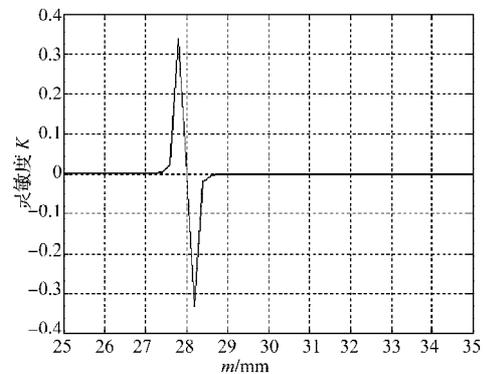


图10  $K$  与  $m$  关系图

Fig. 10 The relationship between  $K$  and  $m$

由以上分析可知:  $K$  与结构参数  $r$ 、 $n$  和  $m$  之间的关系既不是正比关系, 又不是反比关系。因此可优化传感器的结构参数, 尽可能地提高传感器的灵敏度。

### 3 试验

首先计算 220 V、50 Hz 电源下, 测量线圈的电感  $L$ 。采用图 11 所示的测量电路图, 经过计算可得到传感器初级线圈的最小阻抗  $Z_{\min} = 0.337 \Omega$ 。



图11 测线圈阻抗电路图

Fig. 11 The circuit diagram of measure coil impedance

其次采用双激励螺管式磨粒传感器核心结构——线圈绕组、DT9108A 万用电表 1 个、YE1312 高频扫频信号发生器 (激励电源) (频率范围 0 ~ 15 000 Hz、电压范围 0 ~ 20 V) 1 台、电线及塑料水管若干米、塑料漏斗 1 个、塑料瓶及烧杯若干、机油 2 000 ml、6 种不同粒度铁粉 1 瓶 (50 g) 进行实验。各种粒度铁粉的颗

粒尺寸如表 1 所示。

表 1 不同粒度铁粉的基本颗粒尺寸

Tab. 1 The basic particle sizes of different granularity iron powder

组别	粒度号	基本颗粒尺寸 / $\mu\text{m}$	组别	粒度号	基本颗粒尺寸 / $\mu\text{m}$
1	W5	3.5 ~ 5	4	180#	63 ~ 80
2	W20	14 ~ 20	5	120#	100 ~ 125
3	W40	28 ~ 40	6	60#	250 ~ 315

为了验证输出模型的正确性, 分别使用 6 种不同尺寸的铁粉颗粒, 并在不同的激励电压下进行试验, 试验结果如图 12、13 所示。

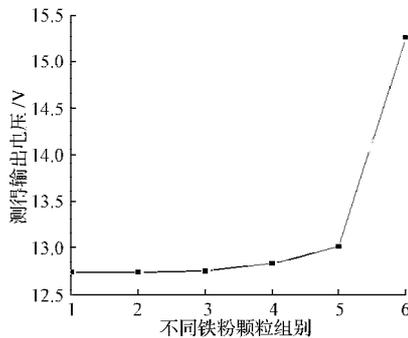


图 12 不同尺寸铁粉颗粒输出结果图

Fig. 12 The output results of different sizes iron powder

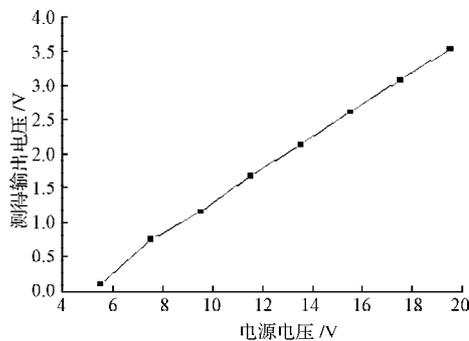


图 13 不同电源电压输出结果图

Fig. 13 The output results of different supply voltage

比较图 12 与 4 可知: 曲线的变化趋势很一致; 而从图 13 中可得到, 电源的电压与传感器的输出电压呈线性关系, 而由于传感器的次级线圈电阻是定值, 因此也可说是输入电流与传感器的输出电压呈线性关系, 这与式 (12) 完全一致, 所以该模型是正确的。

## 4 结语

利用电磁场原理、毕奥-萨伐尔定律等, 建立了该磨粒传感器输出电压的数学模型, 并用试验证明该模型的正确性。分析了传感器的线性度及灵敏度。从分析中可知, 所研制的传感器线性度较好, 但在检测磨粒尺寸小于  $100 \mu\text{m}$  时, 传感器的灵敏度与线性度

较差, 因此, 为获得更大范围的监测性能, 需对传感器进行线性化处理及结构参数优化, 以获得较高的灵敏度。

以上研究为该磨粒传感器的设计、制造及性能改善提供了理论依据, 也为其下一步研究奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 加拿大 GasTops 公司. GasTOPS MetalSCAN [EB/OL]. [2003-12-01]. <http://www.gastops.com>. Canadian GasTops Corporation. GasTOPS MetalSCAN [EB/OL]. [2003-12-01]. <http://www.gastops.com>.
- [2] 赵新泽, 刘纯天. 油液分析中传感器应用及评述[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2002, 24(2): 1-4. Zhao Xinze, Liu Chuntian. Application of Sensor to Oil Analysis and Commentary[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2002, 24(2): 1-4.
- [3] 张永祥, 明廷锋, 朴甲哲. 超声波磨粒监测传感器设计研究[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(4): 28-31. Zhang Yongxiang, Ming Tingfeng, Piao Jiazhe. Investigation on Transducer Design for Ultrasonic Wear Debris Monitoring [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2002, 14 (4): 28-31.
- [4] 高 磊, 潘存治, 马怀祥. 一种铁磁性磨粒监测器[J]. 河北工业科技, 1999, 3(16): 14-16. Gao Lei, Pan Cunzhi, Ma Huaixiang. A Kind of Magnetic Wear Particle Monitor[J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 1999, 3(16): 14-16.
- [5] 朱 煜, 王晓雷, 杨志伊. 微量铁磁性颗粒定量检测传感器[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(4): 71-75. Zhu Yu, Wang Xiaolei, Yang Zhiyi. New Type of Sensor for Detecting the Slight Ferromagnetic Particles[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(4): 71-75.
- [6] 马怀祥, 淮公锁, 吕宝华. 磨损微粒监测技术述评[J]. 柴油机, 2000(3): 26-28, 35. Ma Huaixiang, Huai Gongsuo, Lv Baohua. Analysis of Wear Particle Monitoring Technology[J]. Diesel Engine, 2000(3): 26-28, 35.
- [7] 单成祥. 传感器的理论与设计基础及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 176-210. Shan Chengxiang. Theory and Design Basis of Sensor and Application[M]. Beijing: Defense Industry Publishing House, 1999: 176-210.
- [8] 殷勇辉, 严新平, 萧汉梁. 电感式磨粒监测传感器的磁场均匀性研究[J]. 摩擦学报, 2001, 21(3): 228-231. Yin Yonghui, Yan Xinping, Xiao Hanliang. Study on the Magnetic Field Homogeneity of Wear Debris Detector[J]. Tribology, 2001, 21(3): 228-231.