

# 电感式磨粒在线监测传感器灵敏度提高方法<sup>\*</sup>

贾 然<sup>1</sup>, 马 彪<sup>1</sup>, 郑长松<sup>1†</sup>, 王立勇<sup>2</sup>, 杜 秋<sup>1</sup>, 王 凯<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192)

**摘 要:**电感式磨损颗粒在线监测传感器的研究所面临的主要瓶颈是传感器灵敏度与孔径之间存在矛盾, 灵敏度较高的传感器一般采用微流道结构(孔径 $<1$  mm), 最大允许流量小; 而大孔径的传感器其灵敏度较低. 为满足重型机械磨损状态在线监测的需求, 研究了大孔径(7 mm)的电感式磨粒监测传感器灵敏度提高方法. 提出使传感器工作于全谐振状态, 其中激励线圈工作于并联谐振状态, 感应线圈工作于串联谐振状态, 共同增强颗粒引起的传感器输出感应电动势. 检测机理上建立了交变磁场中金属颗粒对磁场的扰动模型, 考虑了颗粒在交变磁场中的涡流效应, 提高了模型的实用性. 实验表明谐振原理极大地提高了传感器的灵敏度, 实现了直径 $75\ \mu\text{m}$ 铁磁性颗粒和 $220\ \mu\text{m}$ 非铁磁性颗粒的有效检测, 初步满足了重型机械设备初期异常磨损阶段的在线监测需求.

**关键词:**磨粒监测; 传感器; 谐振; 灵敏度

**中图分类号:**TP212.1

**文献标志码:**A

## Sensitivity Improvement Method of On-line Inductive Wear Particles Monitor Sensor

JIA Ran<sup>1</sup>, MA Biao<sup>1</sup>, ZHENG Changsong<sup>1†</sup>, WANG Liyong<sup>2</sup>, DU Qiu<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. The Ministry of Education Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The main technical bottleneck in the research of on-line inductive wear particles monitoring sensor lies in the contradiction between the sensor sensitivity and channel diameter. The sensor with high sensitivity generally adopts the micro-flow channel structure, leading to a small maximum allowable flow rate, while the sensor with large channel diameter has markedly lower sensitivity. To satisfy the requirements of online wear condition monitoring of heavy machinery, the sensitivity improvement method of large aperture inductive abrasive particle sensor is studied. It is proposed to make the sensor work in full resonance state, in which the excitation coil works in the parallel resonance state and the induction coil works in the series resonance state so as to jointly enhance the sensor output induced electromotive force caused by the wear particles. For the detection mechanism, a perturbation model of magnetic field caused by wear debris in the alternating magnetic field is established, which considers the eddy current effect of particles in alternating magnetic field and improves the practicability of the model. The experimental re-

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475044), National Natural Science Foundation of China(51475044); 北京市教委科技计划重点项目(KZ201611232032), Beijing Finance Found of Science and Technology Planning Project (KZ201611232032)

作者简介:贾 然(1989—),男,河北保定人,北京理工大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: zhengchangsong@bit.edu.cn

sults show that the resonance mechanism largely increases the sensitivity of the sensor, which can successfully detect up to  $75\ \mu\text{m}$  ferromagnetic particles and  $220\ \mu\text{m}$  non-ferromagnetic particles, and satisfy the online monitoring requirements of initial abnormal wear stage of the heavy machineries.

**Key words:** particle monitoring; sensor; resonances; sensitivity

磨粒在线监测技术由于能够实时地监测设备磨损状态并反映设备磨损的变化历程而得到了广泛的研究. 目前国内外研究机构针对不同类型的磨粒监测系统开展了研究, 所采用的方法及原理主要包括: 光学原理、超声波原理、电学原理以及图像方法<sup>[1]</sup>. 其中光学磨粒监测传感器极易受到油液中气泡的影响而产生错误的检测结果, 超声波型磨粒监测传感器则容易受到背景噪声的干扰, 且温度稳定性较差, 极大的限制了该类型传感器在大型设备及复杂工况下的使用. 图像式磨粒监测传感器结构复杂, 依靠颜色判断磨粒材料属性, 其检测结果受光照影响较大, 且检测速度和精度与图像处理算法关系密切, 难以同时保证高精度和实时性. 基于电感原理的磨粒监测传感器因其结构形式简单可靠, 温度稳定性好, 抗背景噪声能力强等优点得到了广泛的研究.

根据传感器流道孔径的不同, 该类传感器可分为: 1) 微流道结构传感器. 该类型传感器流道直径一般  $< 1\ \text{mm}$ , 具有较高的灵敏度, 一般可实现  $20\ \mu\text{m}$  铁颗粒和  $50\ \mu\text{m}$  铜颗粒的检测<sup>[2-4]</sup>, 但由于传感器流道结构的限制, 难以满足大流量工程的实际应用. 2) 大流道结构传感器. 该类型传感器流道直径一般  $> 6\ \text{mm}$ , 可满足实际流量要求, 但检测灵敏度随之降低<sup>[5-10]</sup>.

关于磨损颗粒检测机理的研究主要以毕奥-萨伐尔定律为基础展开<sup>[11-13]</sup>, 但该定律只在静磁场中满足, 而该类传感器内部均为交变磁场, 且频率一般大于  $100\ \text{kHz}$ , 此时颗粒内部的涡流效应不可忽略, 因此颗粒的静磁学模型并不能完全适用于该类传感器的研究.

本文以重型机械磨损状态在线监测需求为驱动, 研究大流量(最大允许流量  $\geq 20\ \text{L}/\text{min}$ ) 高灵敏度的磨粒在线监测系统. 建立了交变磁场中金属颗粒对磁场扰动的模型, 考虑了颗粒在交变磁场中的涡流效应, 研究了交变磁场中颗粒对磁场的影响. 同时提出将谐振原理应用于传统三线圈式磨粒监测传感器中, 使传感器激励线圈工作于并联谐振状态, 感应线圈工作于串联谐振状态, 共同提高传感器灵敏度.

## 1 谐振的磨粒监测传感器结构及参数

谐振的磨粒监测传感器结构如图 1 所示, 该传感器采用平行三线圈结构. 为减小高温油液对传感器检测效果的影响, 线圈基体采用低热导率的可加工陶瓷制成; 为了降低外部电磁场对传感器信号的干扰, 为传感器设置了由铜和铁氧体双层材料叠加制成的电磁屏蔽层; 同时为了进一步提高传感器灵敏度, 为传感器线圈匹配了谐振电容, 使各线圈同步工作于谐振状态. 由于并联谐振时电路阻抗呈最大值, 该特征会放大颗粒引起的线圈阻抗变化, 因此使传感器激励线圈工作于并联谐振状态; 而串联谐振时电路内电流出现峰值, 该特征会放大线圈输出的感应电动势, 因此使传感器感应线圈工作于串联谐振状态, 增强颗粒引起的传感器输出感应电动势.

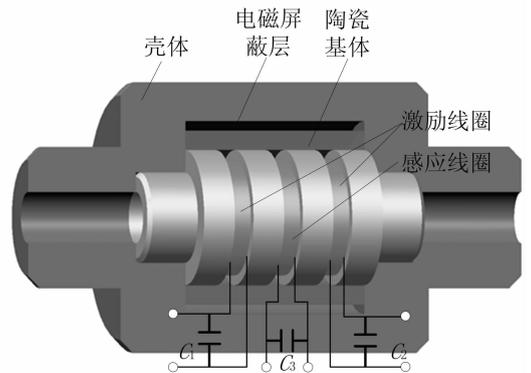


图 1 传感器结构图

Fig. 1 The structure of the sensor

传感器核心结构如图 2 所示. 基于传感器结构参数优化的研究<sup>[7, 14]</sup>, 同时满足最大流量的要求, 传感器各结构参数分别为: 流道直径  $7\ \text{mm}$ , 线圈内径  $d_0 = 10\ \text{mm}$ , 线圈宽度  $a = 2\ \text{mm}$ , 线圈间距  $b = 2.5\ \text{mm}$ ,  $d_1$  为线圈平均直径,  $d_2$  为线圈外径,  $r$  为线圈单边厚度, 激励线圈匝数  $N_1 = 180$  匝, 感应线圈匝数  $N_2 = 195$  匝.

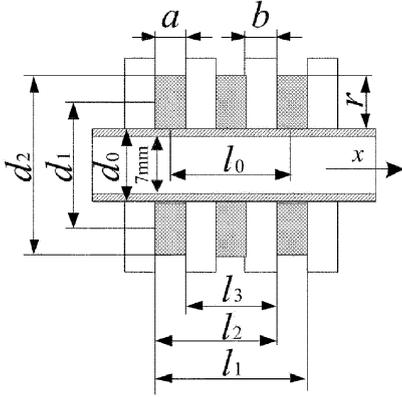


图2 传感器核心结构及参数

Fig. 2 The structure and parameters of the sensor core

传感器单个线圈电感值为:

$$L = 5.4 \frac{\mu_0 N^2 d_1^2}{4\pi \sqrt{ra}} \quad (1)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率。

考虑电感线圈绕制时漆包线外部绝缘层和线圈绕制方法对电感产生的误差:

$$\Delta L_c = \mu_0 N \frac{d_1}{2} (\ln \frac{\delta_1}{\delta_2} + 0.068) \quad (2)$$

式中: $\delta_1$ 为漆包线带绝缘层直径(0.2 mm); $\delta_2$ 为漆包线裸线直径(0.18 mm)。

因此传感器单个线圈自感为 $L_s = L - \Delta L_c$ 。由于向两激励线圈中通入了电流,势必引起两激励线圈磁场发生耦合效应而产生互感现象。传感器两激励线圈互感为:

$$M = \frac{\pi \mu_0 N^2 d_2^2}{8a^2} (K_1 F_1 - 2K_2 F_2 + K_3 F_3) \quad (3)$$

式中: $K_i = \sqrt{(d_2/2)^2 + l_i^2}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $F_i = -\frac{1}{5} \lambda_i^4 - \frac{1}{2^6} \lambda_i^2 + 1$ ;  $\lambda_i = d_2 / (2K_i)$ 。

因此传感器单侧激励线圈等效电感 $L_q = L_s - M$ 。通过计算得到该传感器激励线圈电感 $L_1 = L_2 = 300.8 \mu\text{H}$ ,感应线圈电感 $L_3 = 408.8 \mu\text{H}$ ,两激励线圈间互感 $M = 45.59 \mu\text{H}$ 。实验中采用同惠TH2821B型LCR数字电桥测试仪测量激励线圈电感 $L_1 = L_2 = 313.5 \mu\text{H}$ ,两激励线圈并联后电感 $L_p = 135.1 \mu\text{H}$ ,进一步计算得到实际互感 $M = 43.3 \mu\text{H}$ ,感应线圈电感 $L_3 = 427.2 \mu\text{H}$ 。

## 2 磁场分析

### 2.1 传感器磁场分析

向传感器两激励线圈同步通入交变电流 $I =$

$I_0 \cos \omega t$ , 传感器内部将产生交变磁场。由于该磁场在传感器截面内分布不均匀,线圈内壁处磁场较强,而轴心处磁场较弱,为保证实验工况与计算的一致性,将颗粒固定于直径与传感器内径相同的磁惰性棒中心,并使其沿传感器轴向运动,此时颗粒始终处于传感器轴线上,因此颗粒位置处的磁感应强度为传感器轴线磁感应强度。由文献[14]可知,单侧激励线圈内近轴轴向磁感应强度为:

$$B_x(x, t) = \frac{\mu_0 J_{\text{coil}}}{2} \left( \left( x + \frac{a}{2} \right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (x + a/2)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x + a/2)^2}} - \left( x - \frac{a}{2} \right) \ln \frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + (x - a/2)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x - a/2)^2}} \right) \mathbf{i} \quad (4)$$

式中: $R_1$ 为线圈内半径, $R_2$ 为线圈外半径,线圈内电流密度 $J_{\text{coil}} = NI/[2a(R_2 - R_1)]$ , $\mathbf{i}$ 为 $x$ 轴单位向量。

传感器内部磁场为两激励线圈磁场的叠加,因此传感器内部近轴轴向磁感应强度见式(5),其中: $m$ 为两激励线圈间距(9 mm)。

$$B_{sx}(x, t) = B_x(x, t) - B_x(x + m, t) \quad (5)$$

传感器轴线磁感应强度分布如图3所示。感应线圈位于传感器0位置处,可见当无磨粒通过传感器时,感应线圈磁感应强度为0,因此不输出感应电动势。

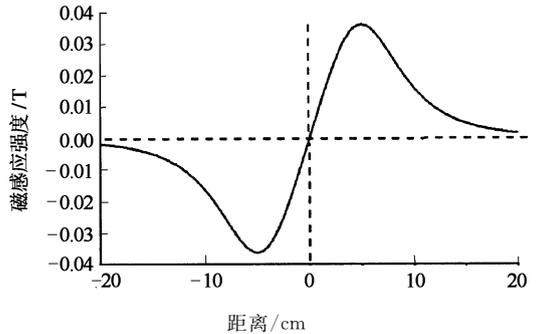


图3 传感器轴线磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution on the axis of the sensor

磨粒进入传感器后会对传感器内磁场产生扰动 $\Delta B$ ,其 $x$ 轴分量是影响传感器磁通量变化的主要因素。准确的计算颗粒对磁场的扰动有助于研究优化传感器性能的方法。颗粒进入传感器内部时,其轴向磁感应强度为:

$$B'_{sx}(x, t) = B_{sx}(x, t) + \Delta B_x(x, t) \quad (6)$$

由于颗粒引起的传感器内磁场变化只发生在局部,而线圈内其余大部分位置处磁场并未受到影响,因此颗粒引起的传感器线圈总磁通量变化为:

$$\Delta\varphi = \int_v \gamma \Delta \mathbf{B}_x(x, t) dv \quad (7)$$

其中  $\gamma$  为激励线圈匝数线密度,  $dv$  为颗粒体积微元。

颗粒引起两侧激励线圈磁通量产生差异, 并致使传感器感应线圈磁通量发生变化而输出感应电动势见式(8)。可见提高激励线圈匝数线密度以及颗粒引起的磁感应强度的变化将有助于提高传感器检测灵敏度。

$$E = N \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = N \frac{\int_v \gamma \Delta \mathbf{B}_x(x, t) dv}{\Delta t} \quad (8)$$

## 2.2 交变磁场中金属颗粒对磁场的影响

金属颗粒通过传感器时会对传感器内部磁场产生影响, 铁磁性颗粒会增强传感器内磁场, 而非铁磁性颗粒则会减弱传感器内磁场。当前对于颗粒引起的传感器内磁场变化主要以静磁场方法进行研究, 即忽略颗粒内的涡流效应, 而该类磨粒监测传感器内磁场均为交变磁场, 且频率通常大于 100 kHz, 此时颗粒内的涡流效应是不可忽略的。因此本文建立了交变磁场中颗粒磁特性模型, 分析了交变磁场中铁磁性颗粒对外磁场的影响(由于颗粒运动速度通过影响相对激励频率而间接影响传感器输出感应电动势, 因此模型中并不直接考虑颗粒运动速度对传感器输出信号的影响)。

铁磁性颗粒在交变磁场中会同时产生磁化效应及涡流效应, 前者会增强外部磁场而后者则会减弱外部磁场, 因此需对二者进行综合分析。根据金属磁化理论, 铁磁性颗粒磁化时其内部磁感应强度满足:

$$\begin{aligned} \mu_0 \mathbf{H}_{in} &= \mathbf{B}_0 - \frac{1}{3} \mu_0 \mathbf{M} \\ \mathbf{B}_{in} &= \mathbf{B}_0 + \frac{2}{3} \mu_0 \mathbf{M} \\ \mu_0 \mathbf{M} &= 3 \left( \frac{\mu - \mu_0}{\mu + 2\mu_0} \right) \mathbf{B}_0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{B}_{in}$  为颗粒内部磁感应强度,  $\mathbf{H}_{in}$  为颗粒内部磁场强度,  $\mathbf{B}_0$  为颗粒外部磁感应强度,  $\mathbf{M}$  为颗粒磁化强度,  $\mu$  为材料磁导率。因此可得磁化效应使铁磁性颗粒内部产生均匀的磁场分布, 其内部磁感应强度见式(10), 其中  $\mathbf{B}_s$  为材料饱和磁感应强度。

$$\mathbf{B}_{in} = \begin{cases} \left( \frac{3\mu}{\mu + 2\mu_0} \right) \mathbf{B}_0, & \mathbf{B}_0 < \mathbf{B}_s \\ \mathbf{B}_0 + 2\mathbf{B}_s, & \mathbf{B}_0 > \mathbf{B}_s \end{cases} \quad (10)$$

由式(7)~(10)可知, 未达到磁饱和时, 半径为  $r_1$  的球形颗粒磁化引起的线圈总磁通量变化为:

$$\Delta\varphi_1 = 2\gamma \mathbf{B}_0 \frac{4\pi}{3} r_1^4 \quad (11)$$

颗粒在交变磁场中会产生涡流效应, 该效应会减弱外部磁场。由于集肤效应的影响, 颗粒中感应电流密度分布不均。交变磁场中电磁波透入深度为:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (12)$$

式中:  $\omega$  为角频率,  $\mu$  为导体磁导率,  $\sigma$  为导体电导率。

当颗粒半径  $r_1 < h$  时, 颗粒内不存在集肤效应, 即颗粒内部电流密度均匀分布; 当颗粒半径  $r_1 > h$  时, 颗粒内部产生集肤效应, 该效应使颗粒内感应电流密度分布产生严重不均匀。由于颗粒半径为微米级, 因此忽略渗透层内电流密度的分布差异, 其感应电流分布模型简化为渗透层电流密度均匀分布, 非渗透层中电流密度为 0 的理想球壳, 如图 4 所示, 均匀带电圆环产生的磁矢势如图 5 所示。

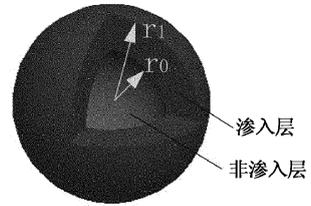


图 4 电流密度分布模型

Fig. 4 Current density distribution model

考虑颗粒的涡流效应, 交变磁场引起的涡流电场分布可由法拉第定律描述:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint \mathbf{j}\omega \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (13)$$

对上式两侧进行积分, 可得:

$$\int_{-r_1}^{r_1} \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} dr = - \int_{-r_1}^{r_1} \iint \mathbf{j}\omega \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} dr \quad (14)$$

由于渗透层内电流密度分布均匀, 因此交变磁场引起的颗粒内涡流电场分布为:

$$\int_{-r_1}^{r_1} \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} dr = \frac{\pi^2 (r_1^2 - r_0^2) \mathbf{J}}{\sigma} \quad (15)$$

外部交变磁场的积分为:

$$- \int_{-r_1}^{r_1} \iint \mathbf{j}\omega \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} dr = - \mathbf{j}\omega \frac{4\pi \mathbf{B}_{sx}(x, t) r_1^3}{3} \quad (16)$$

因此可解得渗透层电流密度  $\mathbf{J}$  见式(17), 其中  $r_0 = r_1 - h$ 。

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{j}4\omega \mathbf{B}_{sx} r_1^3 \sigma}{3(r_1^2 - r_0^2) \pi} \quad (17)$$

半径  $r_e$  截面积为  $ds$  电流密度为  $\mathbf{J}$  的均匀带电圆环对空间任意位置产生的磁矢势见式(18):

$$\mathbf{A}_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{\mathbf{J} ds d\mathbf{l}}{r} = - \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{\mathbf{j}4\omega \mathbf{B}_{sx} r_1^3 \sigma}{3r(r_1^2 - r_0^2) \pi} ds d\mathbf{l} \quad (18)$$

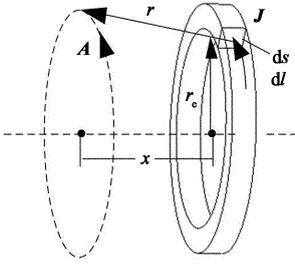


图 5 均匀带电圆环产生的磁矢势

Fig. 5 The magnetic vector potential caused by a uniformly charged circle

由方程  $\varphi = \oint_{\Sigma} \mathbf{A} d\mathbf{l}$  可知,考虑涡流效应时颗粒引起的传感器线圈总磁通量变化见式(19),其中  $\mathbf{A}_s$  为颗粒表面磁矢势。

$$\Delta\varphi_2 = 2r_1\gamma \int_{-r_1}^{r_1} 2\pi \sqrt{(r_1^2 - x^2)} \mathbf{A}_s dx \quad (19)$$

因此金属颗粒在交变磁场中引起的线圈总电感变化为:

$$\Delta L = \frac{2r_1\gamma \int_{-r_1}^{r_1} 2\pi \sqrt{(r_1^2 - x^2)} \mathbf{A}_s dx}{I} \quad (20)$$

图 6 描述了直径 0 ~ 400  $\mu\text{m}$  的铁磁性颗粒 ( $\mu_r = 1000$ ) 引起的线圈电感变化。可见考虑交变磁场中颗粒的涡流效应时,颗粒对线圈电感的影响将弱于静磁场,且该减弱效应随着颗粒直径的增加而越发明显。同时磨损颗粒引起的线圈电感变化是非常微弱的,交变磁场中(300 kHz)直径 400  $\mu\text{m}$  铁磁性颗粒引起的电感相对变化量仅为 0.35%,因此为了更好的检测磨损颗粒,传感器灵敏度提高方法需要进一步研究。

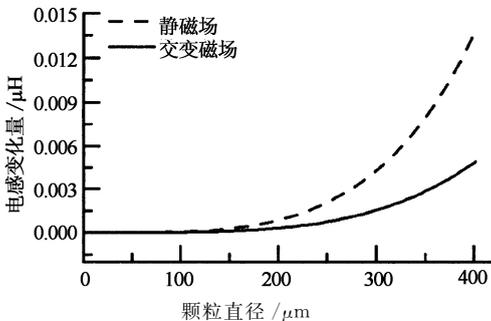


图 6 铁磁性颗粒引起的线圈电感变化

Fig. 6 The inductance alteration of the coil caused by ferromagnetic particles

### 3 谐振的磨粒监测传感器灵敏度分析

磨损颗粒引起的传感器线圈电感(阻抗)变化是非常微弱的,因此基于不同谐振电路的特点,提出采用并联谐振的激励线圈提高磨损颗粒引起的传感器线圈阻抗变化,采用串联谐振的感应线圈放大颗粒引起的感应电动势输出,以提高该类传感器的灵敏度。

采用谐振原理的磨粒监测传感器等效电路如图 7 所示,传感器激励线圈通入交流电流源  $I = 50^{-3} \cos(\omega t) \text{A}$ ,由于传感器各线圈处于同步谐振状态,因此传感器线圈电感  $L_q$ 、谐振电容  $C$  以及激励信号频率  $f$  满足谐振条件,见式(21)。

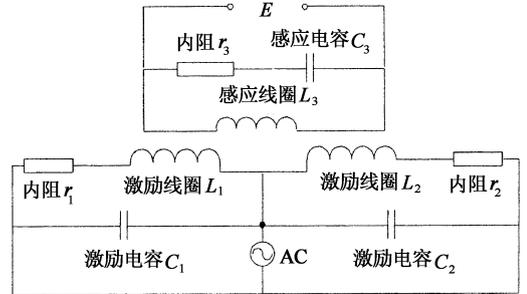


图 7 传感器电路原理图

Fig. 7 Electric schematic diagram of the sensor

$$f = \frac{1}{2\pi L_q C} \sqrt{1 - \frac{Cr^2}{L_q}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q C}} \quad (21)$$

传感器灵敏度可描述为特定颗粒引起的两侧激励电路阻抗变化的差值。当无颗粒通过传感器时,传感器单侧激励电路阻抗为:

$$Z_c = \frac{(j\omega L_q + r) \frac{1}{j\omega C}}{(j\omega L_q + r) + \frac{1}{j\omega C}} \quad (22)$$

式中:  $L_q = L_i - M, i = 1, 2; L_i$  为激励线圈自感;  $M$  为两激励线圈间互感。

当传感器激励电路处于并联谐振状态时,电路阻抗呈最大值且远大于激励线圈阻抗值。当金属磨粒进入传感器时,线圈电感将发生改变  $\Delta L$ ,颗粒为铁磁性时  $\Delta L > 0$ ,颗粒为非铁磁性时  $\Delta L < 0$ 。此时传感器单侧激励线圈电感变为  $L_i = L_q + \Delta L$ ,颗粒引起的传感器两侧激励电路阻抗差为:

$$\Delta Z_c = \frac{j\omega \Delta L}{(1 - \omega^2 C(L + \Delta L) + jC r \omega)(1 - \omega^2 C L + jC r \omega)} \quad (23)$$

对于非谐振的磨粒监测传感器,颗粒引起的传感器两侧激励电路阻抗差异  $\Delta Z_{Nc}$  与线圈的阻抗变化  $\Delta Z_L$  相同,即  $\Delta Z_{Nc} = \Delta Z_L = j\omega\Delta L$ . 由于谐振状态下  $\omega^2 CL \approx 1$ ,因此有

$$\Delta Z_c = \frac{1}{-C^2 r^2 \omega^2 - j\omega^3 C^2 \Delta L r} \Delta Z_{Nc} \quad (24)$$

为了阐述谐振的磨粒监测传感器灵敏度提高机理,以铁磁性颗粒检测为例进行说明. 考虑交变磁场中铁磁性颗粒的涡流效应,直径  $0 \sim 400 \mu\text{m}$  铁磁性颗粒引起的激励线圈电感变化如图 6 所示,此时传感器激励电路阻抗变化如图 8 所示. 可见谐振状态下,颗粒引起的传感器激励电路阻抗变化远大于线圈的阻抗变化,这一明显的阻抗变化差异将直接增加两激励线圈间的磁场不均匀程度,并增大传感器感应线圈的磁通量.

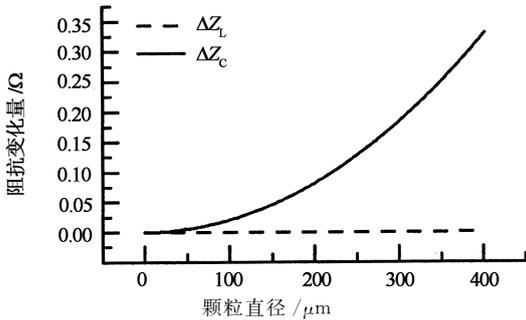


图 8 磨粒引起的激励电路阻抗变化

Fig. 8 Alternation of impedance of the exciting circuit caused by wear particles

通过计算发现,改变传感器谐振频率会影响传感器激励电路的阻抗变化量,并进一步影响传感器灵敏度. 图 9 描述了谐振频率分别为 76 kHz、107 kHz、151 kHz、214 kHz、262 kHz 和 321 kHz 时,颗粒引起的激励电路阻抗变化量,由图可知,随着谐振频率

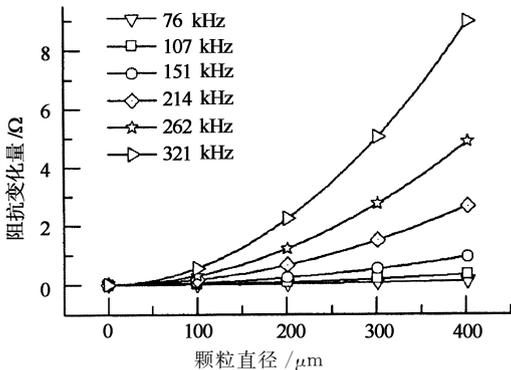


图 9 激励频率影响的电路阻抗变化

Fig. 9 Alternation of impedance of the exciting circuit on various frequencies

的提高,颗粒引起的激励电路阻抗变化随之增加,传感器对小颗粒的检测能力进一步增强. 但过高的谐振频率会使线圈内产生较大的电流并产生严重的集肤效应,而影响传感器线圈的使用寿命,因此综合考虑磨损颗粒磁特性及激励电路阻抗变化特点,传感器激励频率设定为 300 kHz.

颗粒引起的传感器激励电路阻抗变化会导致两激励线圈内电流重新分配并在两线圈内产生电流差  $\Delta I$  见式(25),其中:  $Z_s$  为颗粒通过传感器时两激励线圈的总阻抗,  $Z_L = j\omega L$  为激励线圈阻抗.

$$\Delta I = I_0 * Z_s \left( \frac{1}{Z_L + \Delta Z_L + r} - \frac{1}{Z_L + r} \right) \quad (25)$$

图 10 描述了不同谐振频率下传感器两侧激励线圈内部电流差,图中 a 为非谐振的磨粒监测传感器两激励线圈内电流差, b 为谐振的磨粒监测传感器两激励线圈内电流差. 可见采用谐振原理的磨粒监测传感器中两激励线圈中出现明显的电流差,且该电流差随着激励频率的增加而急剧增大. 由线圈内磁通量  $\varphi = LI$  可知,较大的电流差将增大两激励线圈内磁通量的差异,并增强传感器检测效果.

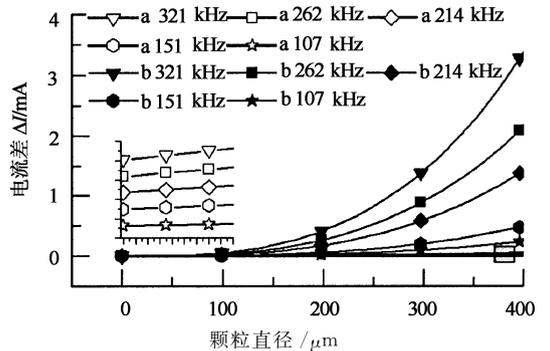


图 10 传感器两激励线圈内电流差

Fig. 10 The current difference between the two exciting coils in the sensor

对于感应线圈,由于其工作于无源状态,因此感应线圈谐振结构为串联谐振(谐振电容为  $C_3$ , 谐振频率与激励线圈谐振频率相同). 串联谐振时,感应线圈电路内部阻抗最小,回路内电流呈现峰值:  $I_{\max} = E_0 / r_3$ , 其中  $E_0$  为感应线圈输出感应电动势,此时传感器输出电动势为:

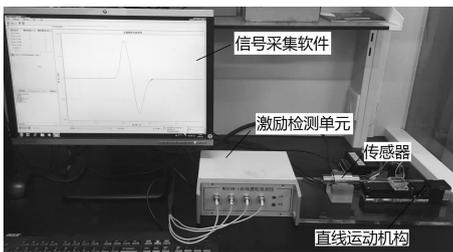
$$E_{\text{out}} = \frac{(j\omega L_3 + r_3)}{r_3} E_0 \gg E_0 \quad (26)$$

可见,感应线圈工作于串联谐振状态时,传感器输出的感应电动势被进一步放大了,且当感应线圈一定时,感应电动势放大倍数与谐振频率成正比,因此

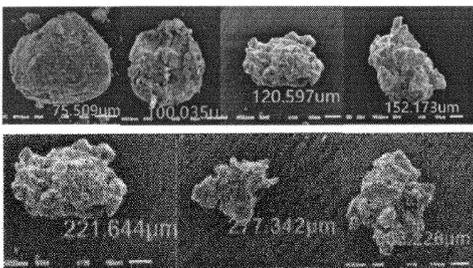
提高传感器激励频率有助于提高传感器的检测能力. 同时由于颗粒引起的感应电动势幅值一般为  $\mu\text{V}$  级, 而环境噪声干扰一般为  $\text{mV}$  级, 因此颗粒信号极容易淹没在环境噪声中. 而谐振的感应线圈具备选频特性, 掺杂在感应电动势内的高斯干扰信号将被极大程度的滤除, 感应线圈只输出与激励信号同频率的有效感应电动势, 有助于微弱感应电动势的提取.

## 4 实 验

为了验证上述方法的正确性及有效性, 对电感式磨粒在线监测系统进行了实验研究, 所采用的实验系统如图 11(a) 所示, 该系统包括信号采集软件、激励检测单元、传感器和直线运动机构, 其中直线运动机构带动磨粒沿传感器轴线往复运动, 激励及检测单元为传感器提供正弦激励信号并对感应电动势进行采集和放大. 实验采用不同粒度的铁颗粒和铜颗粒进行验证, 所选择的铁颗粒直径分别为  $75\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 、 $120\ \mu\text{m}$  和  $150\ \mu\text{m}$ , 铜颗粒直径分别为  $220\ \mu\text{m}$ 、 $280\ \mu\text{m}$ 、 $380\ \mu\text{m}$ . 所选用的金属颗粒如图 11(b) 所示. 实验前对比了  $120\ \mu\text{m}$  铁颗粒在有油液和无油液环境下传感器的响应, 发现二者之间差异很小, 因此实验全部在无油液状态完成.



(a) 磨粒监测系统



(b) 磨损颗粒

图 11 磨粒监测系统及磨损颗粒

Fig. 11 The wear particle monitoring system and the debris

图 12 显示了铁颗粒和铜颗粒通过传感器时传感器的输出信号. 图中(a)为非谐振的磨粒监测传感器输出, (b)为谐振的磨粒监测传感器输出. 可见谐振方法明显地提高了颗粒引起的传感器输出感应电动势, 增强了传感器的检测效果. 颗粒引起的传感器输出感应电动势幅值见表 1 所示, 可见非谐振的磨粒监测传感器难以检测直径小于  $75\ \mu\text{m}$  的铁颗粒和直径小于  $220\ \mu\text{m}$  的铜颗粒, 而采用谐振原理的磨粒监测传感器仍能输出明显信号, 因此可知谐振原理显著提高了传感器的检测灵敏度. 同时由于同体积的非铁磁性颗粒对磁场的影响远小于铁磁性颗粒对磁场的影响, 因此传感器可有效检测的非铁磁性颗粒粒度远大于铁磁性颗粒. 由文献[14]可知, 机械系统正常磨损阶段内磨损颗粒粒度范围为  $20\sim 50\ \mu\text{m}$ , 初期非正常磨损阶段, 磨粒粒度范围为  $50\sim 100\ \mu\text{m}$ , 因此采用谐振原理的磨粒监测传感器能够初步满足机械设备初期非正常磨损的监测需求.

表 1 传感器输出感应电动势幅值

Tab. 1 The amplitude of the induced electromotive force

传感器	$E_{\text{out}}/\text{mV}$						
	铁颗粒直径/ $\mu\text{m}$				铜颗粒直径/ $\mu\text{m}$		
	75	100	120	150	220	280	380
非谐振的传感器	—	0.52	0.64	1.1	—	0.8	1.2
谐振的传感器	2.8	4.3	5.2	9.6	1.8	4.7	9.2

采用谐振原理的磨粒监测传感器输出感应电动势仿真与实验结果对比如图 13 所示, 可见实验结果与仿真值呈现较好的趋势一致性. 但由于实验所采用的颗粒并非均匀球体颗粒, 因此仍存在一定误差.

磨损颗粒以不同速度通过传感器时, 相对激励频率(传感器激励频率/颗粒信号频率)会发生改变而影响颗粒内部涡流效应强度. 当颗粒以较高速度通过传感器时, 相对激励频率降低, 颗粒内部涡流效应减弱, 即颗粒内涡流对外部磁场的抑制作用减弱, 致使传感器输出感应电动势发生变化. 图 14 描述了同一铁颗粒以不同速度 ( $0.8\ \text{m/s}$ 、 $1.08\ \text{m/s}$ 、 $2.2\ \text{m/s}$  和  $3.6\ \text{m/s}$ ) 通过传感器时传感器输出的感应电动势, 其幅值分别为:  $18.23\ \text{mV}$ 、 $19.35\ \text{mV}$ 、 $20.14\ \text{mV}$  和  $20.98\ \text{mV}$ . 可见随着颗粒运动速度的提高, 颗粒信号周期明显变短, 传感器输出感应电动势的幅值逐渐增加. 该现象也间接表明高频磁场中颗粒内的涡流效应会影响传感器的检测效果.

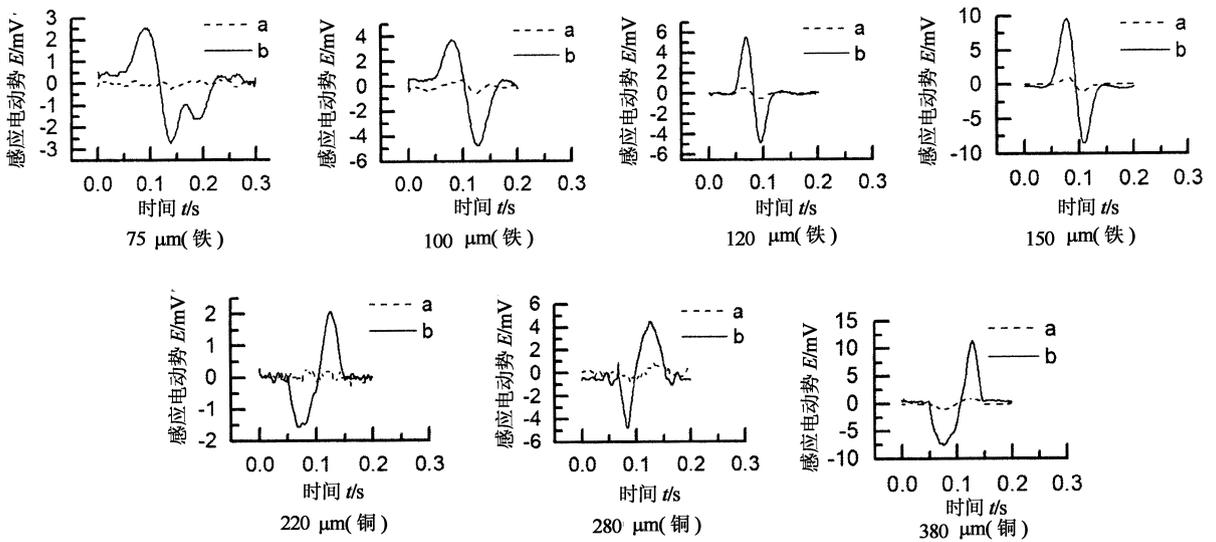


图 12 传感器输出信号

Fig. 12 The output signal of the sensor

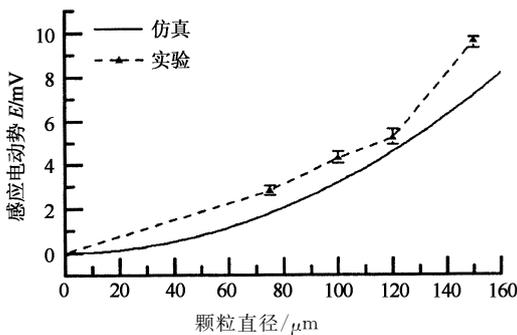


图 13 铁磁性颗粒仿真结果与实验对比图

Fig. 13 Comparison of simulation results and experiment for iron particles

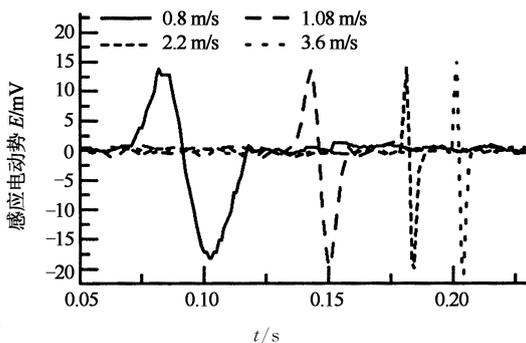


图 14 颗粒运动速度对信号的影响

Fig. 14 The influence on the output signal by the particle speed

## 5 结论

1) 传感器内部磁场为交变磁场,因此在检测机

理的研究中不能仅采用静磁场理论进行计算,为保证准确的计算结果,必须同时考虑铁磁性颗粒的磁化效应以及在交变磁场中的涡流效应。

2) 谐振原理能够显著提高传感器灵敏度。其中激励线圈处于并联谐振状态可增大线圈内磁通量变化,同时以谐振状态时激励电路的阻抗变化代替激励线圈的阻抗变化,从本质上提高了传感器的检测灵敏度。

3) 减小谐振电容、增大激励频率会进一步提高线圈电感变化引起的激励电路阻抗变化,增强传感器对小颗粒的检测能力,但过高的谐振频率会使线圈内产生较大的电流及严重的集肤效应,影响传感器线圈使用寿命。

4) 感应线圈处于串联谐振状态可实现对感应电动势的放大,其放大倍数与谐振频率成正比。同时谐振状态的感应线圈能够实现干扰杂波的滤除,即只允许与激励信号同频的有效感应电动势通过,可进一步提高传感器输出感应电动势。

5) 实验证明采用谐振原理的大流量(通道孔径 7 mm)磨粒监测传感器可实现直径 75  $\mu\text{m}$  铁颗粒和 220  $\mu\text{m}$  铜颗粒的有效检测,其检测灵敏度远高于非谐振的磨粒监测传感器,可初步满足重型机械磨损状态在线监测需求,实现对机械系统初期异常磨损阶段的有效监测。

## 参考文献

[1] DU L, ZHE J. Parallel sensing of metallic wear debris in lu-

- bricants using under sampling data processing[J]. *Tribology International*, 2012, 53(9):28-34.
- [2] DAVIS J P, CARLETTA J E, VEILLETTE R J, *et al.* Instrumentation circuitry for an inductive wear debris sensor [C]//New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), 2012 IEEE 10th International. IEEE, 2012: 501-504.
- [3] DU L, ZHU X, HAN Y, *et al.* Improving sensitivity of an inductive pulse sensor for detection of metallic wear debris in lubricants using parallel LC resonance method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 600-664.
- [4] 王志娟,赵军红,丁桂甫. 新型三线圈式滑油磨粒在线监测传感器[J]. *纳米技术与精密工程*, 2015, 13(2):154-159.  
WANG Zhijuan, ZHAO Junhong, DING Guifu. A novel online oil debris monitoring sensor with three coils[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, 13(2):154-159. (In Chinese)
- [5] KIM B, HAN S, KIM K. Planar spiral coil design for a pulsed induction metal detector to improve the sensitivities[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 1501-1504.
- [6] ZHANG X, ZHANG H, SUN Y, *et al.* Research on the output characteristics of microfluidic inductive sensor[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2014(15):1-7.
- [7] 郑长松,李萌,高震,等. 电感式磨粒传感器磨感电动势提取方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(1):36-41.  
ZHENG Changsong, LI Meng, GAO Zhen, *et al.* An approach of extract inductive debris sensor weak signal[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(1):36-41. (In Chinese)
- [8] 张兴明,张洪朋,陈海泉,等. 微流体油液检测芯片分辨率-频率特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(2):427-433.  
ZHANG Xingming, ZHANG Hongpeng, CHEN Haiquan, *et al.* Study on the resolution-frequency characteristic of microfluidic oil detection chip[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(2):427-433. (In Chinese)
- [9] 郭海林,王晓雷. 基于平面线圈的磨粒监测传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(2):3-4.  
GUO Hailin, WANG Xiaolei. Study of wearing debris sensor based on planar coil[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012(2):3-4. (In Chinese)
- [10] LI C, LIANG M. Enhancement of oil debris sensor capability by reliable debris signature extraction via wavelet domain target and interference signal tracking[J]. *Measurement*, 2013, 46(4): 1442-1453.
- [11] 范红波,张英堂,陶风和,等. 电感式磨粒传感器中非铁磁质磨粒的磁场特性[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(2):35-37.  
FAN Hongbo, ZHANG Yingtang, TAO Fenghe, *et al.* Magnetic characteristic of unferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(2):35-37. (In Chinese)
- [12] 吴超,郑长松,马彪. 电感式磨粒传感器中铁磁质磨粒特性仿真研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(12):2774-2780.  
WU Chao, ZHENG Changsong, MA Biao. Simulation study on the characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(12): 2774-2780. (In Chinese)
- [13] 范红波,张英堂,任国全,等. 新型磨粒在线监测传感器及其试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(4):338-343.  
FAN Hongbo, ZHANG Yingtang, REN Guoquan, *et al.* Experimental study of on-line monitoring sensor for wear particles in oil[J]. *Tribology*, 2010, 30(4):338-343. (In Chinese)
- [14] 高震,郑长松,贾然,等. 综合传动油液金属磨粒在线监测传感器研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(2):409-418.  
GAO Zhen, ZHENG Changsong, JIA Ran, *et al.* Study on on-line monitoring wear debris sensor of power shift-steering transmission[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(2):409-418. (In Chinese)