

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108791

高灵敏低压电磁感应式滑油磨屑传感器

曾周末¹,许恩蕾¹,黄新敬¹,赵建远²,李健¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 中国航发控制系统研究所 无锡 214063)

摘要:提出了一种高灵敏低压低功耗的三线圈电磁感应式磨屑检测方法。理论推导了金属磨屑穿过线圈组引起的感应电压变化的表达式,并据此对线圈组的几何参数进行了优化。通过在激励和感应线圈两端分别并联和串联恰当容值的电容实现双LC谐振,以获得更高的激励电流和感应电压。实验验证了在108 kHz、5 V_{pp}的正弦信号激励下,上述两种方法同时使用能够较大幅度提高信噪比,在相敏检波电路之后未使用放大电路的情况下能够清晰地检测到低至150 μm的铁质颗粒,而此时激励线圈的有功功率仅为1.12 mW。所设计的传感器能够在平衡低功耗的同时获得高灵敏度,其优化思路对于同类型传感器优化具有借鉴意义。

关键词:电磁敏感;磨屑检测;多线圈;LC谐振

中图分类号: TP212.1 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

High-sensitivity, low-voltage lubricating oil wear debris sensor based on electromagnetic induction

Zeng Zhoumo¹, Xu Enlei¹, Huang Xinjing¹, Zhao Jianyuan², Li Jian¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. AECC Control System Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: A three-coil electromagnetic induction wear debris detection method with high sensitivity, low voltage and low power consumption is proposed. The induced voltage change caused by wear debris passing through the coil set is theoretically deduced, and the geometric parameters of the coil set are optimized based on the derivation. The dual LC resonance is realized by connecting capacitors of appropriate capacitance values to both sides of the coil set in parallel and in series to obtain higher excitation current and induced voltage. Experimental results show that under the excitation of sinusoidal signal of 108 kHz and 5 V_{pp}, the above two methods can greatly improve the signal-to-noise ratio, and ferrous debris as small as 150 μm can be clearly detected without using any amplifier circuit after the phase sensitive demodulation circuit, the active power of the excitation coil is only 1.12 mW. The designed sensor can achieve high sensitivity while the low power consumption is balanced. The optimization idea can be used as a reference for the optimization of the same type of sensors.

Keywords: electromagnetic sensitivity; wear debris detection; multiple coils; LC resonance

0 引言

航空航天发动机工作载荷和条件恶劣,其轴承、齿轮等极易产生磨损。现有的磨损失效检测技术包括振动检测、声发射检测、压力检测、油液磨屑检测等^[1],其中油液磨屑检测应用最为广泛。设备运行过程中,摩擦磨损产生的磨屑、腐蚀产物、胶质、燃烧产物等会混入润滑油并

随之运动,滑油磨屑的尺寸和浓度等与机械部件的磨损程度有直接关系,对其检测对于发动机的故障分析和维护保养具有重要意义^[2]。

发动机滑油磨屑检测可分为离线和在线两大类。离线检测精度高,但是采样具有离散性、取样周期较长、分析的颗粒尺寸范围小,因而效率不高^[3]。在线检测实时性较好,主要包括超声法^[4-5]、光学法^[6-8]、电磁法^[9-10]与能量法^[11]。其中电磁法通过检测磨屑引起的电阻率、介

电常数等电参数的变化,得到磨屑的材质、尺寸和浓度等信息,又分为磁感应型、电阻型、电容型、电荷型以及电感型。电感型利用金属材料的感应磁场对总磁场的影响来检测金属磨粒,检测速度快,对金属材质敏感,而对非金属的油液^[1]、水、气泡等其他杂质不敏感^[12],并能够直接分辨磨屑尺寸与数量。

电感型磨屑传感器的电感线圈多采用在管道上绕制螺线管,或在平面上绕制平面线圈。对于螺线管线圈传感器:1990年,Flanagan等^[13]提出了一种基于单线圈传感器的磨屑材质和尺寸的测量方法,可以在直径6 mm的玻璃管中探测到100 μm 以上的磨屑。2000年,Miller等^[14]介绍了一种三线圈传感器,它可以探测到1/2英寸直径管中125 μm 以上的球形磨屑,并成功应用于F22发动机。2005年,陈书涵^[15]分析了双激励螺线管式磨屑传感器的工作原理,对传感器结构进行了优化设计。2010年,范红波等^[16]借鉴单线圈传感器抗混叠能力强与三线圈传感器稳定性强的特点,设计了双线圈磨屑传感器,对大于500 μm 的铜磨屑和大于100 μm 的铁磨屑具有较好的检测能力。2014年,刘晓琳等^[17]研究了螺线管线圈多层缠绕的情况,分析了传感器等效电路,推导了多层线圈内磁感应强度、电感公式,并提出了一种三线圈内外层结构传感器。2015年,Wang等^[18]提出了一种改进的感应式传感器,利用鞍形线圈探头产生均匀磁场来提高磨屑检测的灵敏度,对直径小于100 μm 的铁磁性和非铁磁性磨屑具有良好的识别能力。2019年,Liu等^[19]提出了一种通过在单个微型螺线管周围放置铁粉而提高导磁率从而提高检测灵敏度的新方法,在内径300 μm 的管道内将检测极限扩展到11 μm 。2021年,Qian等^[20]在三线圈磨屑传感器中引入两级自不对称补偿电路来实时自动抑制残余电压,在一个直径为43 mm的传感通道中,成功检测到了70 μm 的铁磁磨屑和165 μm 的有色金属磨屑。

对于平面线圈传感器:2013年,Du等^[21]提出利用并联LC谐振方法进一步提高双层平面线圈传感器的灵敏度,可以在1.2 mm直径的管道中检测到大于20 μm 的铁磁磨屑和大于55 μm 的非铁磁磨屑。但其灵敏度与线圈直径密切相关,进一步缩小通道尺寸,灵敏度将显著提高,但传感器很容易被阻塞。2017年,Zhu等^[22]提出了一种带有铁氧体磁芯的磨屑传感器,传感器使用双层平面线圈,能够检测到直径1 mm射流管中11 μm 和7 mm射流管中50 μm 的铁磁性磨屑。相比于平面线圈,螺线管线圈的灵敏度不够高,较少采用多线圈组进行检测,且优化措施十分有限;而高灵敏度的平面线圈传感器存在通量小的瓶颈。为获得高灵敏度,这类方法常常倾向于选择较高的激励电压或电流^[15,20-21,23-25],在获得高灵敏度的,同时也会带来高功耗等问题。

本文提出了一种应用三线圈的高灵敏低功耗的电磁感应式磨屑检测方法,通过检测金属磨屑穿过螺线管组时引起的感应电压变化,分析得到磨屑的材质与尺寸,从而达到监测滑油中磨屑的目的。为在不降低灵敏度的前提下降低激励电压、保证灵敏度,建立了磨屑穿过线圈组引起感应电压变化的数学模型,基于该模型对线圈组的几何参数进行优化。此外,还引入双谐振来获得更高的感应电压,在降低激励电压同时能够获得较高的屑末检测灵敏度。

1 检测原理

1.1 测量模型建立

电感型磨屑传感器基于电磁感应原理,通常通过测量感应线圈的电压变化或谐振频率,来监测金属磨屑引起的电感变化。如图1所示,磨屑传感器由2个位于取样管两侧、反向串联绕制的激励线圈与1个位于中央的感应线圈构成。两激励线圈中电流大小相同而方向相反,在两激励线圈之间的中央位置形成的磁场相互抵消,无磨屑经过时位于此中央位置的感应线圈不产生感应电压。当有磨屑进入一侧激励线圈,将打破两激励线圈在中央位置磁场的平衡,感应线圈输出一随磨屑位置变化而变化的感应电压。当非铁磁性金属磨屑随油液进入一侧激励线圈时,磨屑内部会产生与原磁场相反的涡流,使得该侧线圈内总磁通减小,导致其与感应线圈的互感减小,感应线圈处的磁场平衡被打破,感应线圈输出一感应电压。磨屑继续向前运动时,由于磨屑所处位置的磁场增大而使得涡流增强,进而使得感应电压继续增大,磨屑到达该侧激励线圈边缘时感应电压达到最大。磨屑继续运动离开激励线圈区域时,涡流减弱使得感应电压减小,到达感应线圈中点时,感应电压降为0。磨屑在继续运动穿过另一侧激励线圈时将引起一对称的变化。故在单个磨屑穿过整个传感器线圈组时,感应线圈将产生一类

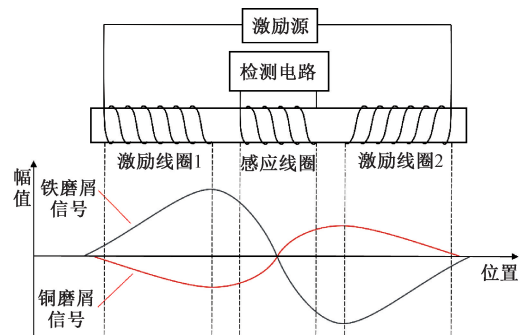


图1 感应式磨屑传感器线圈的结构及信号与线圈位置对应

Fig. 1 Coil structure of the inductive wear debris sensor and correspondence between signal and coil position

似于单周期正弦波的感应电压。当有相对磁导率明显高于油液的铁磁性磨屑进入一侧激励线圈时,磁导率和涡流两个因素将导致相反的电感变化而产生竞争:一方面,磨屑内部也会产生涡流,导致互感降低;另一方面,由于铁磁性磨屑的磁导率较高,线圈内总磁通会增大,导致线圈间互感增加。激励频率较低时,涡流较小,磁导率变化引起的互感增大占主导地位。因此,铁磁性磨屑将产生一与非铁磁性磨屑信号相位相反的感应电压。

对磨屑进入激励线圈所引起的感应电压变化进行定量分析,以进一步分析影响感应电压大小的线圈几何因素。由于铁质磨屑更为常见,故主要对铁质磨屑穿过线圈组的过程进行详细推导。

如图2所示为单螺线管线圈内部磁场计算模型。匝数为 N_1 的多层密绕激励线圈,轴向长度为 l ,半径为 r 。以中心轴线的中点 O 为原点,向右为 x 轴正向。根据毕奥-萨伐尔定律,原点处的磁感应强度为:

$$B_0 = \frac{\mu_0 I N_1}{2l} \frac{l}{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + r^2}} \quad (1)$$

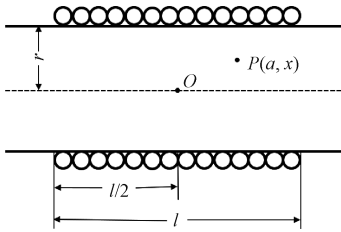


图2 单线圈磁场计算模型

Fig.2 Magnetic calculation model of signal coil

管内任意点 $P(a, x)$ 磁感应强度的轴向分量为:

$$B_x(a, x) = B_0 \times \left[1 + \beta_1 \xi^2 + \beta_2 \xi^4 + (\beta_1 + 6\beta_2 \xi^2) \frac{\rho^2}{8\tau^2} - \frac{3}{128} \beta_2 \frac{\rho^4}{\tau^4} \right] \quad (2)$$

其中, $\xi = \frac{x}{l}, \rho = \frac{a}{r}, \tau = \frac{l}{2r}, \beta_1 = \frac{6\tau^2}{(\tau^2 + 1)^2},$

$$\beta_2 = \frac{10\tau^4(4\tau^2 - 3)}{(\tau^2 + 1)^4}$$

由此得到激励线圈的电感近似为:

$$L = \frac{1}{I} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_0^r \frac{N_1 2\pi a}{l} B_x(a, x) da dx \quad (3)$$

当有长度为 l_c 的铁磁性磨屑沿轴线进入激励线圈内部时,被覆盖部分的原电感增大。被覆盖部分的原电感可近似为式(4)所示。

$$L_0 = \frac{l_c}{l} L \quad (4)$$

如图3所示为磨屑进入传感器线圈示意图,图中深色区域为线圈组。以左侧激励线圈1中心轴线与左端面的交点为原点,向右为 x 轴正向。根据式毕奥-萨伐尔定律,铁磁性磨屑在 $(x, 0, 0)$ 处,使得该处磁导率变化,两侧激励线圈在该处产生的磁感应强度增加为:

$$B_c = \frac{\mu_0 \mu_c I N_1}{2l} \times \left[\frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{r^2 + (l-x)^2}} + \frac{l+2l_0-x}{\sqrt{r^2 + (l+2l_0-x)^2}} - \frac{2l+2l_0-x}{\sqrt{r^2 + (2l+2l_0-x)^2}} \right] \quad (5)$$

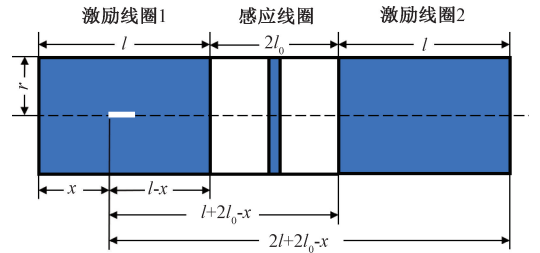


图3 磨屑穿过传感器线圈过程及尺寸定义

Fig.3 The process of wear debris passing through the sensor coil and dimension definitions

由于 l_c 远小于 l 和 r ,为简化计算,可忽略 l_c 长度内磁感应强度的变化。此时磁通量的变化,所引起的电感变化量为:

$$L_c = S_c B_c \frac{l_c}{l} N_1 = \pi r_c^2 \frac{l_c}{l} N_1 B_c = \frac{V_c}{l} N_1 B_c \quad (6)$$

电感的增大是由于通过被覆盖部分的磁通量增大。电感的增大也可等效认为磁通量不变,而通过该部分的电流减小:

$$L'_0 = L_0 + L_c = \frac{N_1 l_c \phi_c}{l} = \frac{N_1 l_c \phi_0}{l} = \frac{L_0 I}{I_c} \quad (7)$$

从而得到等效电流的变化量为:

$$\Delta I = I - I_c = \frac{L_c}{L_c + L_0} I \quad (8)$$

等效电流变化量在次级线圈中点引起的磁感应强度变化量为:

$$\Delta B = \frac{\mu_0 r^2 \Delta I}{2[(l+l_0-x)^2 + r^2]^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{N_1 l_c}{l} \quad (9)$$

在次级线圈内产生的磁通量变化近似为:

$$\Phi_2 = \Delta B S = \frac{\mu_0 \Delta I}{2[(l+l_0-x)^2 + r^2]^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{N_1 l_c}{l} \cdot \pi r^2 \quad (10)$$

根据法拉第电磁感应定律,上式对时间求导数,可得出磁通量 Φ_2 引起的次级感应电动势 E 为:

$$E = \frac{N_2 d\Phi_2}{dt} \quad (11)$$

1.2 线圈几何参数优化

根据上述对于铁质磨屑穿过线圈组引起感应电压变化的理论推导结果,在一定范围内对现有线圈组的几何参数进行扫描,寻找能够获得更高感应电压的几何参数组合。扫描的几何参数分别为线圈内半径 r 、激励线圈与感应线圈中心的距离 l_0 。其余不变的参数如表 1 所示。

表 1 固定的线圈几何参数

Table 1 Geometric parameters of the fixed coil

参数	数值
激励电流频率 f/kHz	108
激励线圈匝数 N_1	90
激励线圈长度 l/mm	4.8
感应线圈匝数 N_2	60
磨屑长度 l_c/mm	1
磨屑半径 r_c/mm	0.5
磨屑速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1
磨屑相对磁导率 μ_c	100

扫描线圈半径 r 范围为 1~20 mm,其中激励线圈与感应线圈中心的距离 l_0 为 5.32 mm,绘制感应电压的最大值 E_{\max} 。如图 4 所示为扫描结果,图中最大值点使用星号标记。由于实际滑油管径的限制,分别选择接近最大值点的 $r=6.5$ mm,以及 $r=10.15$ mm 用于对比。

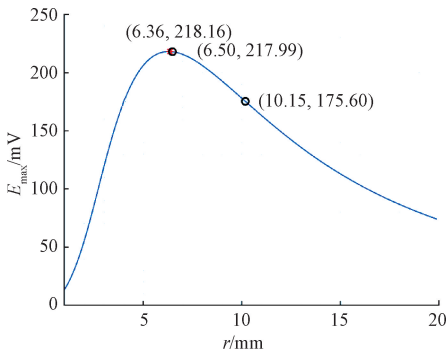


图 4 在 1~20 mm 内扫描线圈半径 r 的结果

Fig. 4 Results of sweeping r from 1 mm to 20 mm

扫描激励线圈与感应线圈中心的距离 l_0 范围为 3~12 mm,其中线圈半径 r 为 10.15 mm,绘制感应电压的最大值 E_{\max} 。如图 5 所示为扫描结果,图中最大值点使用星号标记。由于实际线圈组总长度的限制,分别选择接近最大值点的 $l_0=5.32$ mm,以及 $l_0=8.32$ mm 用于对比。

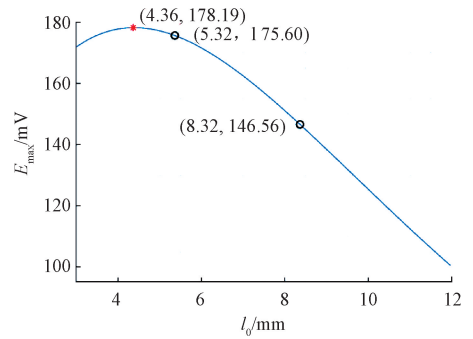


图 5 在 3~12 mm 范围内扫描 l_0 的结果

Fig. 5 Results of sweeping l_0 from 3~12 mm

将上述两个几何参数进行组合,制作一系列线圈并测量线圈的参数。线圈参数如表 2 所示。对比得到,减小线圈半径 r 后线圈内的单侧电感减小,增大激励线圈与感应线圈中心的距离 l_0 后线圈的单侧电感增大。

表 2 线圈几何参数

Table 2 Geometric parameters of the coil

电参数	$r=6.5$ mm	$r=10.15$ mm	$r=10.15$ mm
	$l_0=5.32$ mm	$l_0=5.32$ m	$l_0=8.32$ m
激励侧电感/ μH	196.55	377.81	390.75
激励侧电阻/ Ω	4.08	6.60	6.74
感应侧电感/ μH	50.33	99.69	99.43
感应侧电阻/ Ω	0.85	1.39	1.42

1.3 引入 LC 谐振增敏

在线圈组的激励侧与感应侧分别并联、串联电容,并使得线圈-电容结构发生谐振,以此来进一步提高检测时的灵敏度。在线圈的激励侧并联电容形成 LC 并联谐振,以获得更大的激励电流。在线圈的感应侧串联电容,以获得更高的感应电压。谐振频率计算公式如式 (12) 所示。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12)$$

计算得到理论上需要的谐振电容值。为使得激励侧与感应侧同时发生统一频率的谐振,以及减少电容加工误差的影响,还需对电容值进行细微的调整。

使用无线探测的方式探查谐振结构的谐振情况,在探查过程中微调电容容值,从而微调谐振频率,最终使得线圈两侧发生统一频率的谐振。将接入扫频激励源的无接触式的检测线圈靠近无源的线圈组时,两者将发生电磁场耦合,使用阻抗分析仪分析检测线圈两端阻抗变化,可以获知线圈组的激励侧或感应侧与电容结构内的谐振情况,如图 6 所示。检测线圈在空间产生电磁场,并基于

法拉第电磁定律在线圈组内产生电动势。当加在检测线圈两侧的激励信号频率与线圈-电容结构的谐振频率相同时,结构内发生尖锐谐振,感应线圈两端的感应电压达到最大,通过检测线圈产生的反电动势也最大,表现为检测线圈的阻抗在谐振频率附近发生变化^[26-27]。在理论电容值附近选择相近电容,检测电路内谐振情况,使得线圈在激励频率处达到谐振状态。线圈的电感、计算得到的理论电容值、测试后实际使用的电容值如表 3 所示。实际使用的电容由括号内一组电容并联得到。在加入实际电容后,阻抗分析仪(Agilent, 4294A)测得的检测线圈的阻抗在谐振频率附近发生的变化如图 7 所示。

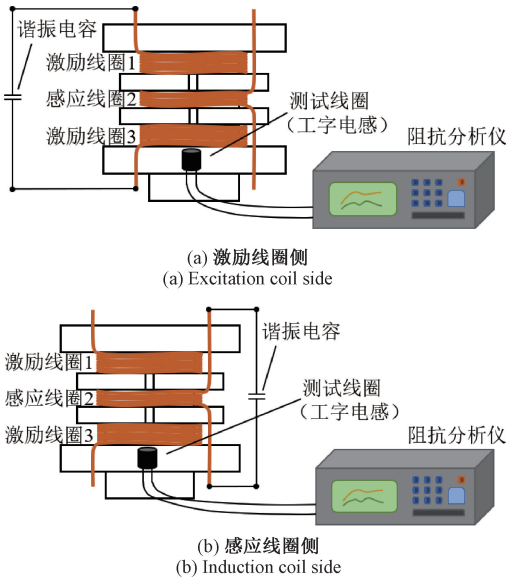


图 6 利用无接触式检测线圈来探知谐振频率

Fig. 6 The resonant frequency detection using the non-contact detection coil

表 3 线圈的电感与实际使用的电容

Table 3 Inductance of coils and capacitances actually used

谐振侧	线圈电感/ μH	理论电容/ nF	实际电容/ nF
激励侧	196.55	11.05	11.13(10//0.47//0.33//0.33)
感应侧	50.33	43.15	51.30(47//3.3//1)

2 实验装置

绕制线圈组并进行磨屑检测实验,线圈骨架示意图及线圈照片如图 8 所示。使用线径 0.25 mm 的铜芯漆包线绕制多层线圈,每层匝数一致且为整数。为尽可能使得在没有金属磨屑时感应线圈处于平衡状态,绕线时绕组 1 与 3 反向绕制且匝数严格一致。线圈放置于铝质盒中,以避免周围电磁干扰的影响。

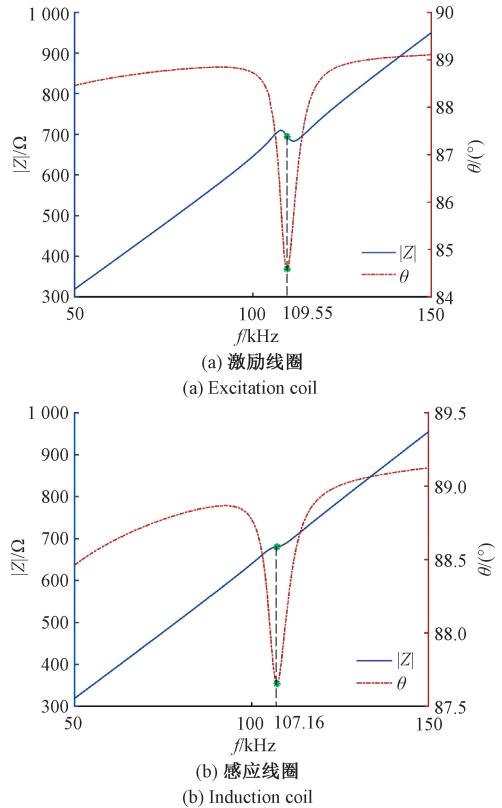


图 7 检测线圈的阻抗在谐振频率附近的变化
Fig. 7 Impedance change of the detection coil near the resonance frequency

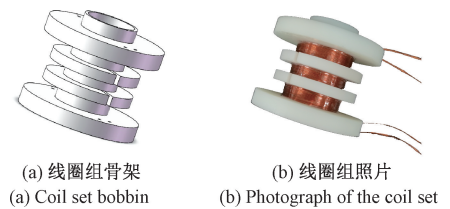
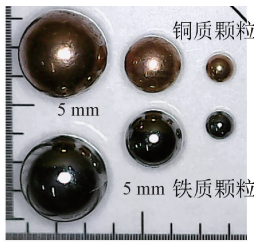


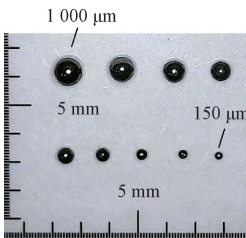
图 8 线圈组

Fig. 8 Coil set

采用不同材质、不同尺寸的球形金属颗粒作为磨屑用于检测。其中铁质颗粒的材料为 Ger15 轴承钢,铜质颗粒的材料为紫铜。如图 9 所示为使用显微镜(MIXOUT, SM-U500)拍摄的实验采用的颗粒的照片,图 9(a)中包含 1~3 mm 的铁质与铜质颗粒,图 9(b)中包含 150、350、400、500、600、700、800、900、1 000 μm 的铁质颗粒。测试中将金属颗粒粘附在塑料板上。相比于金属颗粒,塑料板对于线圈之间感应的影响可忽略不计。图 10 为实验系统结构。使用信号发生器(Siglent, SDG 5162)产生 108 kHz/5 V_{pp} 正弦信号用于激励。激励信号经过移相器后和感应信号一起接入相敏检波电路,解调信号接示波器。将粘附有金属颗粒的塑料板匀速从



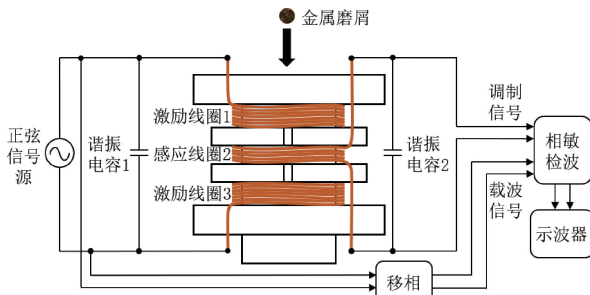
(a) 直径1~3 mm的铁质与铜质颗粒
(a) Ferrous and copper debris with diameter of 1~3 mm



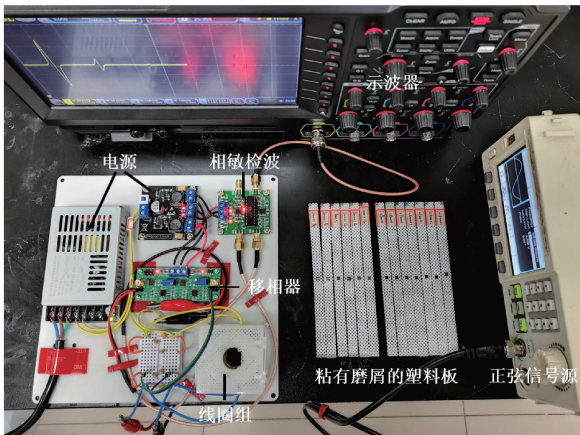
(b) 直径150~1 000 μm的铁质颗粒
(b) Ferrous debris with diameter of 150~1 000 μm

图9 实验采用的金属颗粒

Fig.9 Metal particles used in experiments



(a) 实验系统结构
(a) Structure of the experiment system



(b) 实验系统照片
(b) Photograph of the experiment system

图10 实验系统

Fig.10 Experiment system

线圈组一侧穿过到另一侧,以模拟磨屑颗粒穿过线圈组的过程。使用示波器(RIGOL, MSO5072)显示解调后的磨屑信号。首先利用较大磨屑线圈几何参数优化的有效性和双LC谐振增敏的有效性,在用较小磨屑检验最灵敏度。

3 实验结果分析

3.1 磨屑信号形状与位置验证

对单个直径1~3 mm的铁质颗粒与铜质颗粒进行测试,示波器实时显示的信号如图11所示。单个颗粒对应的信号近似为单周期正弦波,且材质不同的颗粒信号相位相反,相同材质颗粒的信号幅度近似正比于颗粒体积。

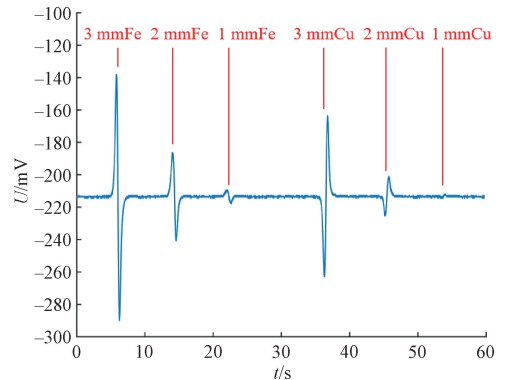


图11 对1~3 mm颗粒测试得到的信号

Fig.11 Signal obtained from the test of 1~3 mm debris

将理论推导结果与实际磨屑信号进行对比。取激励线圈的电流 $I = A \sin \omega t$, 频率 108 kHz。线圈尺寸 $r = 10.15 \text{ mm}$ 、 $l_0 = 5.32 \text{ mm}$, 测量的铁质磨屑 $r_c = 0.5 \text{ mm}$ 、 $l_c = 1 \text{ mm}$ 、 $\mu_c = 100$ 。使用 MATLAB 绘制推导结果,与实验测量磨屑时视频截图对比,如图12所示。推导结果与实验测得的信号时间节点基本相符,并表明,当磨屑刚离开激励线圈1的靠近感应线圈那侧的一端时,所引起的感应电压达到最大。

3.2 线圈几何参数优化的有效性

使用上述不同几何参数组合的线圈测试直径1~3 mm铁质颗粒,得到的线圈参数与10次测量信号幅度均值如表4所示。对比得到,减小线圈半径后线圈内的单侧电感减小,但由于线圈之间互感增大等因素,测试得到的信号幅值增大。增大激励线圈与感应线圈中心的距离 l_0 后线圈的单侧电感增大,但信号幅值减小。经过比较,选择 $r = 6.5 \text{ mm}$ 、 $l_0 = 5.32 \text{ mm}$ 参数组合线圈作为最终的检测线圈。根据测量结果,在激励频率下该参数线圈激励侧阻抗 $|Z| = 132.73 \Omega$, 阻抗角 $\varphi = 92.72^\circ$, 在 5 V_{pp} 激励电压下 $U_m = 2.5 \text{ V}_{pp}$, 线圈激励侧有功功率 P 如式(13)所示。

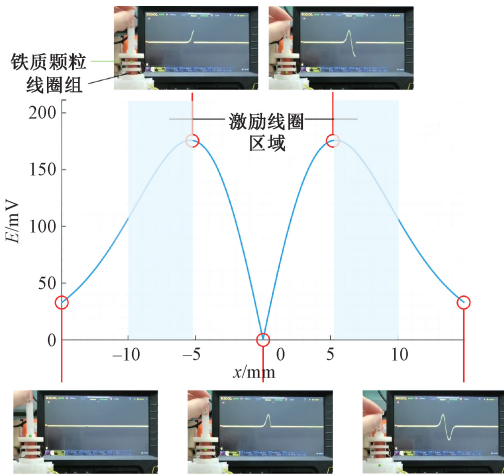


图 12 铁质颗粒信号理论与实验对比

Fig. 12 Comparison of theoretical and experimental results of ferrous debris signals

$$P = \frac{U_m^2 \cos \varphi}{|Z|} = \frac{(2.5 / \sqrt{2})^2 |\cos(92.72^\circ)|}{132.73} W \approx 1.12 \text{ mW} \quad (13)$$

表 4 不同几何参数的线圈组信号对比

Table 4 Comparison of signals of coil sets with different geometric parameters

颗粒材质	铁	铁	铁	铜	铜	铜
颗粒直径/mm	3	2	1	3	2	1
$r=6.5 \text{ mm}$						
$l_0=5.32$ mm/mV	113.78	42.43	6.57	67.96	17.42	1.29
$r=10.15 \text{ mm}$						
$l_0=5.32$ mm/mV	46.32	16.17	2.26	28.04	6.51	0.49
$r=10.15 \text{ mm}$						
$l_0=8.32$ mm/mV	35.33	11.95	1.78	20.84	4.94	0.45

3.3 引入双谐振的有效性

为验证双侧谐振能够提高灵敏度,使用未谐振的、单独的线圈组多次检测颗粒,与带有电容的谐振线圈组的多次测量结果进行对比。10 次测量信号幅度均值的对比结果如表 5 所示。对比单独的线圈组与带有电容的线圈组对同一颗粒测试的结果,可以看到产生谐振,对于信号幅值和测试灵敏度均有明显地提升作用。其中感应侧的串联谐振对于提高感应电压作用,较激励侧的并联谐振更为明显。

表 5 单独线圈组与带有电容的谐振线圈组对比

Table 5 Comparison of signals between a single coil set and a resonant coil set with capacitors

颗粒材质	铁	铁	铁	铜	铜	铜
颗粒直径/mm	3	2	1	3	2	1
无谐振/mV	113.78	42.43	6.57	67.96	17.42	1.27
仅激励侧谐振/mV	118.29	45.86	6.90	69.76	18.07	1.29
仅感应侧谐振/mV	1 185.61	457.15	71.63	706.86	180.63	13.75
双侧谐振/mV	1 240.77	491.09	75.37	759.57	194.00	14.62

3.4 检测灵敏度

使用经过上述优化得到的线圈组,分别检测不同直径的铁质颗粒,以得到其检测灵敏度。

由于信号中的直流偏置电压限制采集系统直流耦合时的显示精度,改用交流耦合方式时能够更加明显观察到磨屑信号。在实际测量中可观察到低至 $150 \mu\text{m}$ 铁质颗粒产生的明显区别于背景噪声的磨屑信号。图 13 所示,为使用交流耦合方式采集到的直径 $150 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 铁质颗粒产生的信号,从图中可以清晰看出 $150 \mu\text{m}$ 的铁质颗粒产生的磨屑信号。

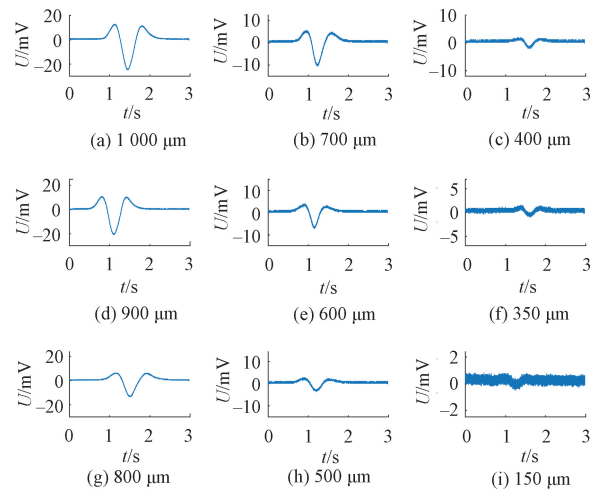


图 13 交流耦合方式下 $150 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 的铁质颗粒信号

Fig. 13 Signals obtained under AC coupling mode of $150 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ ferrous debris

4 结 论

本文提出了一种应用三线圈的高灵敏低电压的电磁感应式磨屑检测传感器,通过检测金属磨屑穿过线圈组时引起的感应电压变化来获知磨屑的材质、尺寸等情况。并对线圈组进行优化:通过改进几何参数与使用双谐振两种途径,来提高检测信号信噪比,进而实现了在低电压

激励、低功耗、未使用检波后放大电路的情况下实现较高灵敏度。实验验证了两种优化方法的有效性,实验测得了 150 μm 的铁质颗粒,而激励电压和功耗仅为 5 V_{pp} 和 1.12 mW。系统同时具备较高灵敏度与低功耗优势,其优化思路对于同类型传感器优化具有适用性。

参考文献

- [1] LI D, JIANG Z. On-line wear debris detection in lubricating oil for condition based health monitoring of rotary machinery [J]. *Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering*, 2011, 4(1): 1-9.
- [2] 马立恒, 颜维, 刘恢先. 某型航空发动机台架滑油系统颗粒监控标准研究 [J]. *润滑与密封*, 2018, 43(1): 135-140.
MA L H, YAN W, LIU H X. Research on particle monitoring standard of an aeroengine bench lubricating oil system [J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(1): 135-140.
- [3] 徐贞, 樊瑜瑾, 邢凡, 等. 基于铁谱分析技术的齿轮磨损研究 [J]. *润滑与密封*, 2009, 34(5): 87-89.
XU ZH, FAN Y J, XING F, et al. Research on gear wear based on ferrography analysis technology [J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(5): 87-89.
- [4] WÖCKEL S, HEMPEL U, WESER R, et al. Particle characterization in highly concentrated suspensions by ultrasound scattering method [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 47(10): 582-585.
- [5] 徐超, 张培林, 王怀光, 等. 超声磨粒传感器非线性声场的数值模拟与实验研究 [J]. *润滑与密封*, 2014, 39(7): 11-15.
XU CH, ZHANG P L, WANG H G, et al. Numerical simulation and experimental research on the nonlinear acoustic field of ultrasonic abrasive sensor [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 39(7): 11-15.
- [6] 唐语, 朱永凯, 陈晓晖, 等. 基于光学低相干成像的滑油磨屑在线检测 [J]. *无损检测*, 2020, 42(10): 18-23.
TANG Y, ZHU Y K, CHEN X H, et al. On-line detection of lubricant wear debris based on optical low-coherence imaging [J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(10): 18-23.
- [7] WU T, PENG Y, WU H, et al. Full-life dynamic identification of wear state based on on-line wear debris image features [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2014, 42(s1-2): 404-414.
- [8] IWAI Y, HONDA T, MIYAJIMA T, et al. Quantitative estimation of wear amounts by real time measurement of wear debris in lubricating oil [J]. *Tribology International*, 2010, 43(43): 388-394.
- [9] MOURA E E, BERBERT P A, BERBERT-MOLINA M A, et al. Performance analysis of RF dielectric models for density-independent estimation of moisture content in sorghum [J]. *Powder Technology*, 2013, 246(9): 369-378.
- [10] WANG J, MENG H. Computation of streaming current in oil pipes [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2009, 16(2): 299-304.
- [11] MOHAMMADPOUR J, FRANCKEK M, GRIGORIADIS K. A survey on diagnostic methods for automotive Engines [J]. *International Journal of Engine Research*, 2012, 13(1): 41-64.
- [12] ZHANG F, LIU B, SU Y, et al. Research on the detection of metal debris with micro inductive sensor embedded in lubricant [J]. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2014, 6(7): 2249-2254.
- [13] FIANAGAN I M, JORDAN J R, WHITTINGTON H W. An inductive method for estimating the composition and size of metal particles [J]. *Measurement Science and Technology*, 1990, 1(5): 381.
- [14] MILLER J L, KITALJEVICH D. In-line oil debris monitor for air-craft engine condition assessment [C]. 2000 IEEE Aerospace Conference PROCEEDINGS, Big Sky Manhattan, 2000, March 18-25, 6: 49-56.
- [15] 陈书涵. 双激励螺旋管式磨粒传感器特性研究 [D]. 长沙:中南大学, 2005.
CHEN SH H. Research on the characteristics of double excitation helical tube wear debris sensor [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [16] 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 H B, ZHANG Y T, REN G Q, et al. A new type of online monitoring sensor for wear particles and its experimental research [J]. *Tribology*, 2010, 30(4): 338-343.
- [17] 刘晓琳, 施洪生. 三线圈内外层电感磨粒传感器研究 [J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(11): 12-15.
LIU X L, SHI H SH. Research on three-coil inner and outer inductance wear particle sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(11): 12-15.
- [18] WANG C, LIU X, CHEN Z. A new inductive sensor for online health monitoring of mechanical transmission systems [C]. *Magnetics Conference, IEEE*, 2015.
- [19] LIU L, CHEN L, WANG S, et al. Improving sensitivity of a micro inductive sensor for wear debris detection with magnetic powder surrounded [J]. *Micromachines*, 2019,

10(7): 440.

- [20] QIAN M, REN Y J, ZHAO G F, et al. Ultrasensitive inductive debris sensor with a two-stage autoasymmetrical compensation circuit [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8885-8893.
- [21] 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 & Technology, 2013, 24(7): 660-664.
- [22] ZHU X, ZHONG C, ZHE J. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring[J]. MeScT, 2017, 28(7): 075102.
- [23] 李斌. 电磁敏感航空发动机滑油磨屑在线检测技术研究[D]. 天津: 中国民航大学航空自动化学院, 2014.
LI B. The detection methods of aircraft engine lube oil abrasive dust based on electromagnetic sensibility [D]. Tianjin: Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, 2014.
- [24] 韩娇. 滑油金属磨屑电磁检测传感器仿真研究[D]. 辽宁: 沈阳航空航天大学, 2016.
HAN J. Electromagnetic detection sensor simulation for lubricating oil metal grindings [D]. Liaoning: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [25] 万洋. 某型航空发动机滑油金属屑末在线检测系统研制[D]. 四川: 中国民用航空飞行学院航空工程学院, 2019.
WAN Y. Development of on-line detection system for a certain type of aero-engine oil metal debris [D]. Sichuan: College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation Flight University of China, 2019.
- [26] JIA Y, SUN K, AGOSTO F J, et al. Design and characterization of a passive wireless strain sensor [J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(11): 2869.
- [27] 李小菲. LC 无源湿度传感器研究及实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
LI X F. Research and implementation of LC passive humidity sensor [D]. Xi'an: Xidian University. 2014.

作者简介



曾周末, 1982年和1985年于华中工学院分别获得学士学位和硕士学位, 1993年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院讲席教授、博士生导师, 主要研究方向为检测技术及仪器。

E-mail: zhmeng@tju.edu.cn

Zeng Zhoumo received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Huazhong University of Science and Technology in 1982 and 1985, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1993. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include detection technology and instrument.



许恩蕾, 2019年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为基于电磁敏感的滑油金属磨屑检测。

E-mail: enleixu@tju.edu.cn

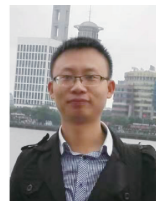
Xu Enlei received her B. Sc. degree from Tianjin University in 2019. She is currently a master student in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. Her research interests include detection of metal wear debris in lubricating oil based on electromagnetic sensitivity.



黄新敬(通信作者), 2010年和2016年于天津大学分别获得学士学位和博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为结构健康检测技术及仪器, 声人工结构传感器, 智能感知, 磁声检测。

E-mail: huangxinjing@tju.edu.cn

Huang Xinjing (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2016, respectively. He is currently an associate professor and a master advisor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include structural health inspection and monitoring technology and instrument, acoustic artificial structure sensor, intelligent perception, magnetic and acoustic detection.



赵建远, 2010年和2015年于天津大学分别获得学士学位和博士学位, 现为中航发控制系统研究所高级工程师, 主要研究方向为航空发动机健康管理和控制系统。

E-mail: jianyuan_tju@126.com

Zhao Jianyuan received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2015, respectively. He is currently a senior engineer at AECC Control System Institute. His main research interest includes aero engine health management and control system.