

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006246

一种高梯度静磁场感应式全流量磨粒监测传感器^{*}

萧红, 周威, 罗久飞, 谭峰, 冯松

(重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆 400065)

摘要:针对传统单激励油液磨粒传感器难以实现全流量润滑油监测的问题,提出了一种基于多激励结构的感应式磨粒监测传感器。在传感器流道周向均匀布置多个激励结构,扩大检测范围,从而实现全流量磨粒监测。建立三维有限元模型,分析了感应线圈的静磁场和瞬态特性,揭示了激励结构数量与 y - z 平面周向磁场均匀性的关系。同时,优化了传感器的磁极形状。单颗粒模拟实验表明激励电流、电流方向和激励结构数量直接影响磨粒感应信号波形,验证了激励结构数量是影响传感器有效检测范围的重要因素。润滑油系统循环条件下的磨粒注入实验结果显示,传感器能够在直径为40 mm的流道中检测到13 μm 的铁磁性磨粒。

关键词:多激励结构;感应式;全流量;磨粒监测传感器

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

An inductive sensor based on the high-gradient static magnetic field for full flow debris monitoring

Xiao Hong, Zhou Wei, Luo Jiufei, Tan Feng, Feng Song

(Advanced Manufacturing Engineering School, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: It is difficult to achieve full-flow lubricant monitoring by using the traditional single excitation wear debris sensor. Hence, this paper designs an inductive wear debris monitoring sensor based on the multi-excitation structure. Multiple excitation structures are placed in the circumferential direction of the flow channel, which expand the detection range. In this way, the debris detection within the whole diameters can be realized. By formulating a three-dimensional finite element model, the static magnetic field and transient characteristics of the induction coil are analyzed. The relationship between the number of excitation structures and the uniformity of the y - z plane circumferential magnetic field has been revealed. Meanwhile, the magnetic pole shape of the sensor is optimized. By using the generated signal, experimental results show that intensity and direction of excitation current, and the number of excitation structures have directly influence on the inductive signal. Results verify that the number of excitation structures is an important influencing factor on the effective detection range of the sensor. And the results of inputting wear debris experiment show that the 13 μm ferromagnetic debris in a 40 mm diameter flow channel under the condition of lubricating oil circulation can be detected.

Keywords: multi-excitation structures; inductive; full flow; wear debris monitoring sensor

0 引言

磨粒是机械部件发生摩擦磨损的产物,其数量、大小和形态等特征信息直接反映装备磨损状态^[1]。油液分析技术通过监测润滑油路中的磨粒,能够表征出机械装备的磨损情况^[2]。目前,油液分析技术分为离线和在线两

种方式^[3]。离线油液分析技术通常采用光谱^[4]、铁谱^[5]等手段提取磨粒特征信息,但脱机检测难以实时获取动态连续信号^[6]。而在线监测技术能够在设备正常运行情况下实时进行油液磨粒特性检测和分析,可及时有效地反映装备健康状态^[7]。

磨粒监测传感器是实现在线油液分析的关键核心部件,主要分为感应式、光学式、电容式和超声波式等^[8-11]。

收稿日期:2020-04-05 Received Date: 2020-04-05

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51605064,51705057)、国家留学基金委资助项目(201907845005)

其中,感应式传感器利用金属微颗粒的电磁特性来实现磨粒监测,具有结构简单,检测精度高等特点,广泛应用于航空发动机、风机齿轮箱和船舶动力系统等重大装备的磨损监测^[12],已成为近年来国内外学者的研究热点。例如,史皓天等^[13]在平面型微流体感应式传感器的基础上,设计出一种基于微流体芯片的多参数检测传感器,将直径为 300 μm 的激励导线置于流道中心,与内径为 900 μm 的流道形成环状检测区,能够检测到 40 μm 的铁磨粒和 140 μm 的铜磨粒。Zhu 等^[14]采用了 3×3 的多通道阵列结构,将磨粒监测传感器的流通量提升至 460 mL/min,可以在内径为 1 mm 的流道内检测到 50 μm 的铁磁性磨粒。范红波等^[15]利用检测线圈与参考线圈之间的电感平衡原理,实现了一种双线圈感应式传感器,并研究了提高流道磁场均匀性的方法。郭翠娟等^[16]提出了一种基于多线圈组的感应式传感器,能够在直径为 1 mm 的流道中检测并分辨出 100 μm 的铜磨粒和 100 μm 的铁磨粒。贾然等^[17]利用三线圈传感器在全谐振状态下的工作特性,增强了磨粒引起的感应电动势,提高了传感器灵敏度,并在内径为 7 mm 的管道中检测到 75 μm 铁磁性磨粒和 220 μm 非铁磁性磨粒。

然而,为了保证检测精度,传感器的流道直径常常受到限制,这不但制约了油液的流量大小,而且使得油液在流道口处受到较大的阻力,进而产生杂质堆积,造成流道堵塞。同时,由于传感器通量较小,通常只能安装在润滑油旁路,导致传感器仅对部分润滑油进行取样监测,检测结果随机性较大。与低通量传感器相比,全流量传感器不改变油路结构,传感器直接嵌入润滑油主油路中,一方面可以实现全流量监测,一方面降低了润滑油的流阻,减小传感器被杂质堵塞的风险。为了提高传感器的流通量,Hong 等^[18]设计了一种基于径向磁场的油液磨粒监测传感器,能够在直径为 20 mm 的流道中检测到等效直径为 290 μm 的铁磁性磨粒。由于该传感器在流道结构中心的径向磁场强度仅为 7.5 mT,导致传感器输出的信号十分微弱,需配置高倍数信号放大装置。Ren 等^[19]提出了一种“一激多感”的感应式磨粒监测传感器,能够在内径为 34 mm 的管道中检测到 120 μm 的铁磨粒和 210 μm 的铜磨粒。但该传感器的感应线圈侵入到流道中,导致流阻增大,进而影响了润滑油流动。最近,Xiao 等^[20]设计了一种直流激励的大通量感应式磨粒监测传感器,该传感器在油路中产生局部的高梯度磁场,当磨粒随润滑油流经磁场时,感应线圈产生感应电压,随后利用统计分析获取油路中的磨粒粒度分布信息。然而,实验发现在直径为 40 mm 的油管中,单激励结构传感器的有效检测区域仅限于半径为 8 mm 的扇形区域。研究表明若油路管径过大,传感器检测到的磨粒将不足以表征润滑油系统中的磨

粒粒度分布。

为了解决单激励结构传感器无法实现全流量磨粒监测的问题,本文提出一种基于多激励结构的感应式磨粒传感器结构。通过在流道周向均匀布置多个高梯度静磁场,可有效扩大传感器的检测范围,进而实现全流量磨粒监测。同时,本文还优化了传感器的磁极形状,讨论了激励结构数量与管径大小的适配问题,分析了激励结构数量对传感器性能的影响,从多方面提升多激励结构传感器的检测性能。实验中分别采用单磨粒和油液样本研究了传感器的磨粒检测效能,验证了传感器的有效性。

1 传感器设计和检测原理

1.1 传感器模型

本文所提出的传感器由流道(直径 40 mm)、感应线圈(8 000 匝,长度 50 mm,线直径 0.05 mm)、L 形磁极、激励线圈(1 800 匝,长度 60 mm,线直径 0.4 mm)、铁芯、屏蔽外壳和 L 形磁极支架组成。传感器激励结构如图 1 所示,将棱柱状铁芯嵌入激励线圈中,并与 L 形磁极相连,铁芯、激励线圈和一对 L 形磁极组成传感器的激励结构。

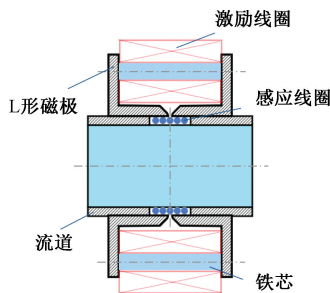


图 1 激励结构剖视图

Fig. 1 Sectional view of the excitation structure

图 2(a)所示为传感器结构,其中,磁极支架的材料采用树脂,支架套在流道上,将激励结构均匀固定在流道周向。为了减小外部环境对电磁感应的影响,使用铝制屏蔽外壳降低外界电磁干扰,如图 2(b)所示。传感器的两磁极之间留存有 1 mm 气隙^[21],激励结构经过恒流源驱动,将会气隙处产生一个高梯度静磁场。每个激励结构产生的磁场相互叠加,在全管径内形成一个稳定磁场。

1.2 检测原理

如图 3 所示,流道对称中心作为坐标原点, x 轴沿流道轴线方向,垂直方向定义为 z 轴。令半径为 r 的球状磨粒沿 x 轴方向以速度 v 通过流道, β 为磨粒运动方向和磁场方向之间的夹角。

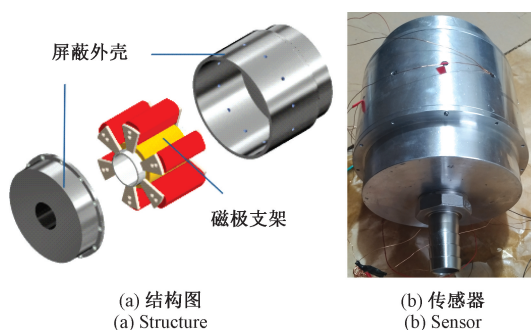


图2 传感器结构

Fig. 2 Structure of the sensor

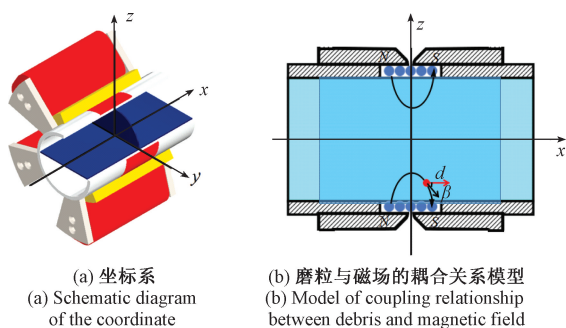


图3 传感器原理

Fig. 3 Schematic diagram of the sensor

根据法拉第电磁感应定律,感应线圈输出的感应电压可表示为:

$$u = N \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: N 为感应线圈匝数; $\Delta \varphi$ 是磨粒引起的磁通量变化。磨粒引起的磁通量变化可表示为^[21]:

$$\Delta \varphi = \frac{2Fr^3 \pi \mu_0 \sin \beta (1 - 1/\mu)}{l_d^2} \quad (2)$$

式中: F 表示磁势; l_d 为 d 路径长度; μ_0 和 μ 分别为真空磁导率和磨粒的相对磁导率。由于磨粒沿 x 轴方向运动,令 $l_d = l(x)$, 根据式(1)和(2),感应线圈的输出电压可以表示为:

$$u = 4NFr^3 \pi \mu_0 (1 - 1/\mu) \frac{d}{dx} \left(\frac{\sin \beta}{l^2(x)} \right) \quad (3)$$

2 优化设计与仿真分析

2.1 磁极形状的优化

前期研究工作表明,由于传统梯形磁极与流道之间间距不等,特别是磁极边缘部分与流道相距较远,导致气隙过大,容易造成磁场能量的浪费。因此本文首先对传感器的磁极形状进行了优化,磁极形状如图4所示。将

磁极的轴向面设计成弧面,与圆形流道贴合,从而减小磁极与感应线圈之间的气隙,提高磁场的利用率。采用直径为 20 mm 的感应线圈进行数值仿真,内管壁的周向磁感应强度变化如图5所示。与梯形磁极相比,采用弧形磁极的传感器可以获得更高的磁感应强度,最大磁感应强度提高了 20.63%。

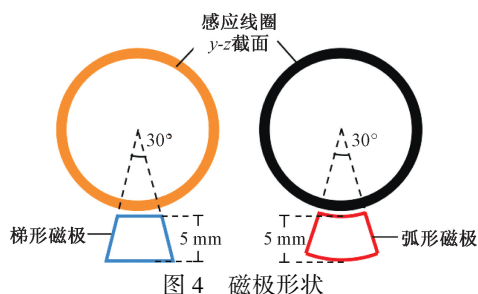


Fig. 4 Schematic diagram of the magnetic pole shape

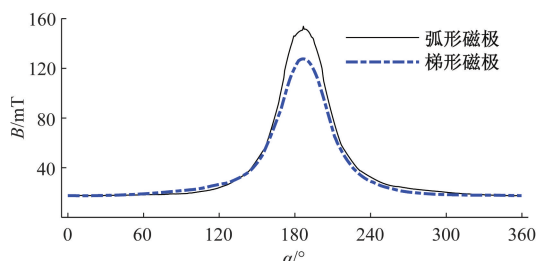


图5 流道内壁上的周向磁感应强度

Fig. 5 The circumferential magnetic field on pipe inner wall

2.2 管径与激励结构数的优化

单激励传感器由于自身结构限制,导致管道内部分区域的磁感应强度过小,不足以实现全流量磨粒监测。通过增加激励结构数量,可扩大传感器的有效检测区域,从而实现全管径的磨粒检测。前期研究表明,当磁势为 1 000 AN,信号增益为 30 倍时,若管道内的磁感应强度低于 25 mT,单激励结构传感器将无法有效检测磨粒^[20]。因此,以 25 mT 为阈值,通过磁密云图将 y - z 平面划分为有效检测区域和无效检测区域,如图6所示。然后,采用像素统计法计算出有效检测区域在 y - z 检测面中的占比值,从而表示传感器在管道内的磨粒监测范围。

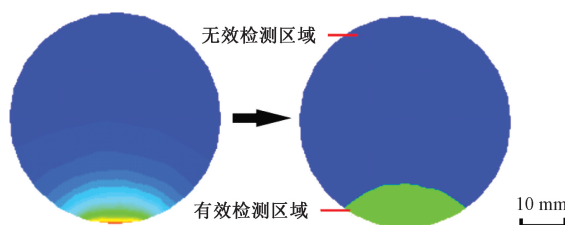


图6 有效检测区域示意图(管径为 40 mm)

Fig. 6 Schematic diagram of the effective detection area (40 mm inner diameter)

设 E 为新型多激励结构传感器的激励结构数,通过有限元仿真,在不同流道直径下,分析传感器的激励结构数对有效检测区域占比值的影响。不同激励结构数和不同管径下有效检测区域占比值如表 1 所示。可以发现,当激励结构数 $E=6$ 时,传感器的有效检测区域能够完全覆盖管径为 40 mm 的流道,从而实现全管径区域的磨粒监测。

表 1 不同激励结构数的有效检测区域对比 (%)
Table 1 Comparison of the effective detection area for different the numbers of excitation structure (%)

管径/mm	$E=1$	$E=3$	$E=6$	$E=12$
10	100	100	100	100
20	39.86	100	100	100
30	18.46	100	100	100
40	10.43	48.09	100	100
50	8.94	28.01	95.35	100

为了考察多激励结构传感器磁感应强度的分布,以 $E=6$,管径 40 mm 为例,建立传感器的仿真模型,如图 7 所示。磁极与感应线圈的最小距离设置为 1 mm,激励线圈的磁势设置为 1 000 AN。在 y - z 平面上,过原点做线段 l , l 的长度为流道半径, α 为 l 与 z 轴之间的夹角。图 8 所示为 y - z 平面的磁感应强度分布,磁极附近的轴向磁感应强度最高约为 172 mT,在管道中心的轴向磁感应强度最低约为 30 mT,超过最低磁感应强度阈值要求。

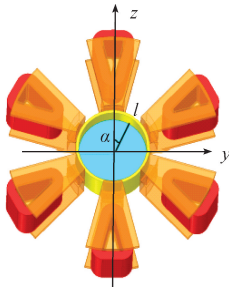


图 7 仿真模型
Fig. 7 Simulation model

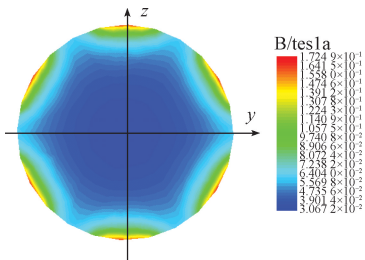


图 8 y - z 平面磁密云图
Fig. 8 Magnetic flux density nephogram of the y - z plane

当激励结构数量 E 为 3、6、12 时,管道内壁的周向磁感应强度随 α 的变化如图 9 所示。当 $E=3$ 时,磁感应强度显示出 3 个较大的峰值,约为 153 mT。随着激励结构数的增加,磁感应强度的波动幅度减弱。当激励结构数量增加到 12 时,磁感应强度几乎不再受到 α 的影响。可见随着激励结构的数量增加,传感器周向磁场的均匀性得到极大改善。

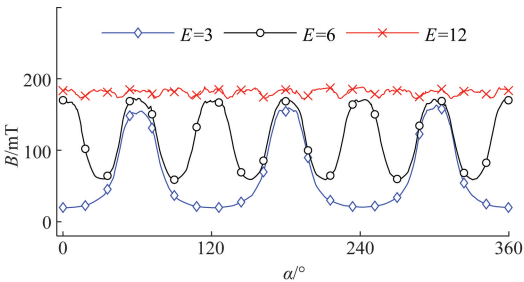
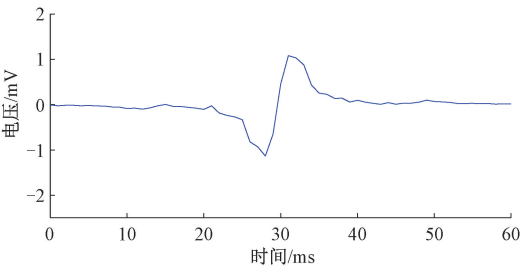


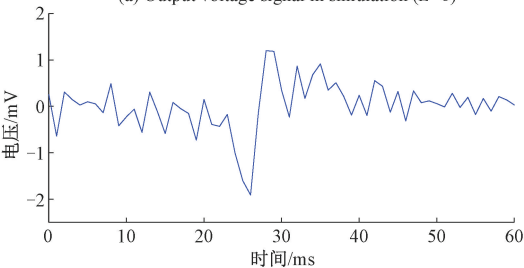
图 9 周向磁感应强度
Fig. 9 The circumferential magnetic field

2.3 仿真信号分析

仿真中采用铁磁性颗粒 (0.5 mm×0.5 mm×1 mm) 以 1 m/s 的速度沿 x 轴匀速运动,近似忽略磨粒的径向运动。感应电压仿真波形如图 10(a) 所示,该波形类似一个先下降后上升的单周期正弦信号,与静电传感器的输出波形相似^[22],输出信号的峰峰值约为 2.2 mV。图 10(b) 中,由于激励结构之间的磁场可能存在较大干扰,导致传感器输出的感应信号信噪比较低,造成波形失真。



(a) 仿真输出的电压信号($E=6$)
(a) Output voltage signal in simulation ($E=6$)



(b) 仿真输出的电压信号($E=12$)
(b) Output voltage signal in simulation ($E=12$)

图 10 仿真信号

Fig. 10 The simulation signal

3 实验结果

单磨粒实验原理如图 11 所示,主要包括由步进电机构成的磨粒驱动单元,由低功耗仪表放大器构成的信号调理单元和 A/D 转换装置构成的数据采集单元。磨粒采用半径为 0.75 mm 的球状铁颗粒,材质为 Q235。由于磨粒引起的感应电压较为微弱,信号需要经过增益调节,再由 A/D 转换装置传入计算机。传感器的激励结构数量为 6,供电电流为 0.4 A,放大电路增益设置为 310。实验中磨粒以 2.36 m/s 的速度经过 y - z 平面,与流道内壁相距 3 mm,感应线圈产生的感应电压信号如图 12 所示,磨粒信号的峰峰值约为 1 296 mV,经过滤波处理后,输出信号的峰峰值约为 1 428 mV。

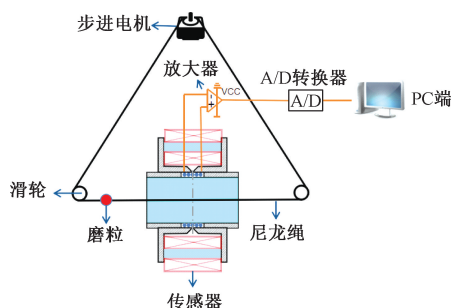


图 11 单磨粒实验原理图

Fig. 11 Schematic diagram of the single debris experiment

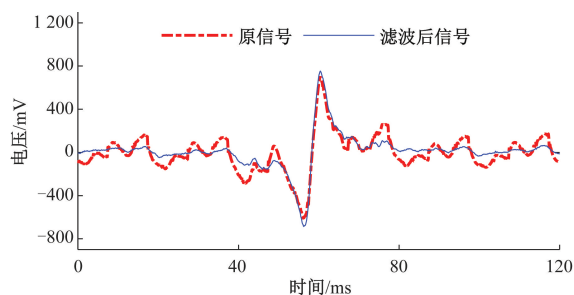


图 12 感应电压信号

Fig. 12 The induced voltage signal

4 讨论

4.1 电流与感应电压之间的关系

为了验证激励电流对磨粒感应电压信号的影响,采用不同强度的激励电流,传感器的输出信号波形如图 13 所示。随着电流增加,输出信号的峰峰值也随之增大,当输入电流为 0.5 A 时,感应电压信号的峰峰值最大,约为 1 667 mV。图 14 所示为磨粒信号峰峰值和底噪峰峰值^[23]的变化,在恒流源供电下,激励线圈的供电电流与感应电压信号的峰峰值成近似线性关系,并且电流对底噪峰峰值造成的影响较小。

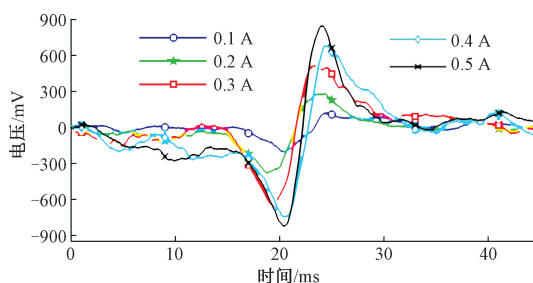


图 13 不同电流大小供电下的输出信号

Fig. 13 Output signals in different current values

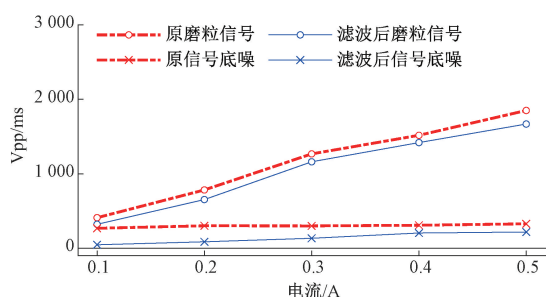


图 14 不同电流供电下的感应电压峰峰值

Fig. 14 The induced voltage peak-peak in different current values

图 15 所示为激励线圈供电示意图,在激励线圈匝数相同的情况下,由于线圈之间的电阻值相差较小,所以电流供电对周向磁场均匀度的影响可忽略不计。给激励线圈输入方向相反、大小为 0.2 A 的恒定电流,传感器的输出波形如图 16 所示,随着电流输入方向改变,信号波形的变化也随之反向,而信号的底噪没有受到电流方向的影响,峰峰值约为 36.32 mV。

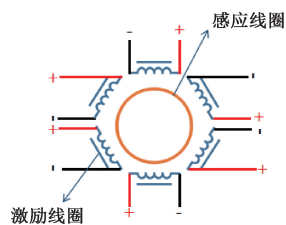
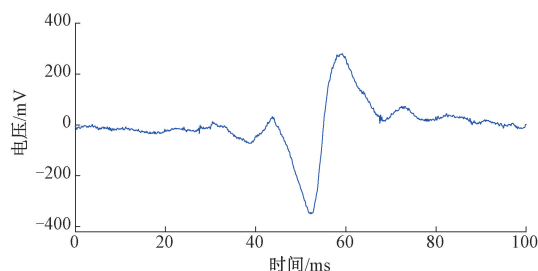


图 15 电流输入方向

Fig. 15 Schematic diagram of current direction



(a) Positive input and negative output

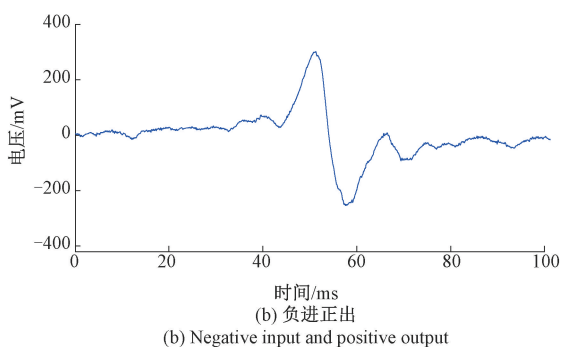


图16 不同电流方向下的输出信号

Fig. 16 Output signals in different current directions

4.2 径向位置与感应电压之间的关系

在 y - z 平面中,令 θ 表示两个相邻激励结构之间的夹角,当 $E=6$ 时, $\theta=60^\circ$ 。磨粒分别经过激励结构间隙处和相邻激励结构之间,即 α 分别等于 0° 和 $\theta/2$ 。磨粒信号的峰峰值变化如图 17 所示,当 $l \leq 10$ mm,即磨粒经过管道中心区域时, $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=\theta/2$ 的峰峰值几乎相同。当 $l \geq 10$ mm,即磨粒经过管壁附近时,输出电压的峰峰值受角度 α 的影响较大。实验表明,与管壁附近的磁场相比,感应线圈的周向磁场在管道中心区域内有更高的均匀性。

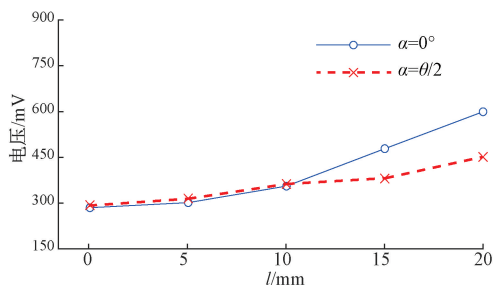


图17 输出电压信号的峰峰值

Fig. 17 The peak-peak values of the output voltage signals

4.3 激励结构数量对磨粒信号的影响

实验中将激励结构数量 E 分别设置为 3 和 6,相应的 θ 为 120° 和 60° ,此时研究传感器输出信号的变化趋势。在 y - z 平面中,当 $\alpha=0^\circ$ 时,磨粒经过磁感应强度较强的区域, $\alpha=\theta/2$ 时,磨粒经过相邻激励结构之间的中心线处,即磁感应强度较弱区域。图 18 所示为传感器的输出波形,随着传感器的激励结构数量增多,流道内的磁感应强度随之增强,感应电压信号幅值也相应升高。对于管径大于 40 mm 的流道,适当增加传感器的激励结构数量,可以扩大传感器的有效检测范围。但需要指出的是,过多的激励结构数量必然会引起不同激励磁场相互干扰,导致传感器输出感应信号波形失真,不利于磨粒信号的辨识。

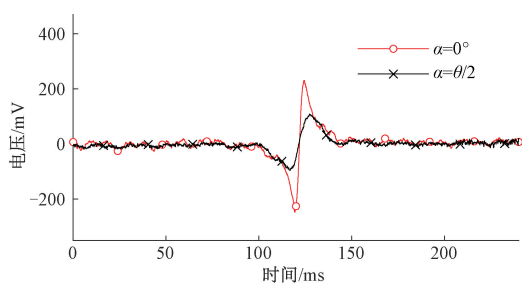
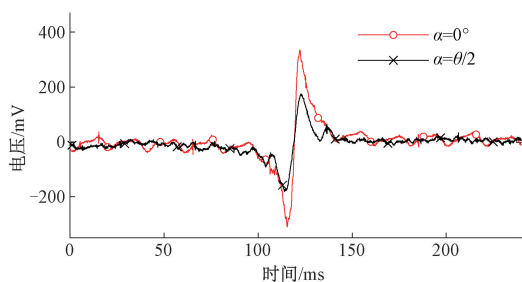
(a) 感应电压信号 ($E=3$)
(a) The induced voltage signal of debris ($E=3$)(b) 感应电压信号 ($E=6$)
(b) The induced voltage signal of debris ($E=6$)

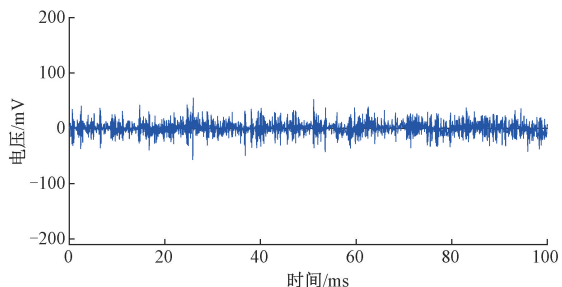
图18 不同激励结构数的感应电压信号

Fig. 18 The induced voltage signal for different numbers of excitation structure

4.4 传感器的检测范围对比

面对高通量润滑油循环系统,小口径传感器难以实现全流量监测,通常采用引出支路的方法来达到磨粒监测的目的。但改变油路结构会对装备的润滑造成一定的影响,并且流道的口径越小,在黏性流体中的阻力和压差阻力就会越大,这种情况下,小口径的传感器很容易发生堵塞,进而影响磨粒监测的可靠性。针对这一问题,文献[20]提出一种大口径的磨粒监测传感器,尝试在不改变润滑油流动状态的情况下,在直径为 40 mm 的流道中实现磨粒监测。

为了对比两种传感器的检测效能,将激励电流设置为 0.3 A,半径为 0.75 mm 的球状铁磨粒沿 x 轴通过流道中心,流道直径为 40 mm,图 19 所示为两种传感器输出的感应电压信号。结果显示,在单激励结构传感器输出的电压信号中未观察到明显的磨粒信号特征,而多激励结构传感器获取了位于检测面中心的磨粒信号特征,验证了多激励结构传感器在磨粒检测范围方面的优势。

(a) 单激励结构传感器输出的电压信号
(a) Output voltage signal of the sensor based on a single excitation structure

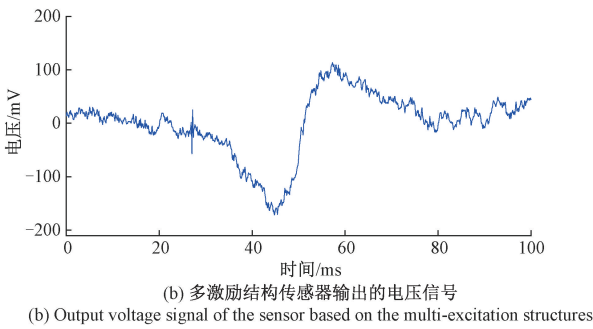


图 19 传感器的输出信号

Fig. 19 The sensor output signal

4.5 全流量磨粒监测验证

采用 $\leq 13\text{ }\mu\text{m}$ 铁磁性磨粒的油液样本验证传感器的

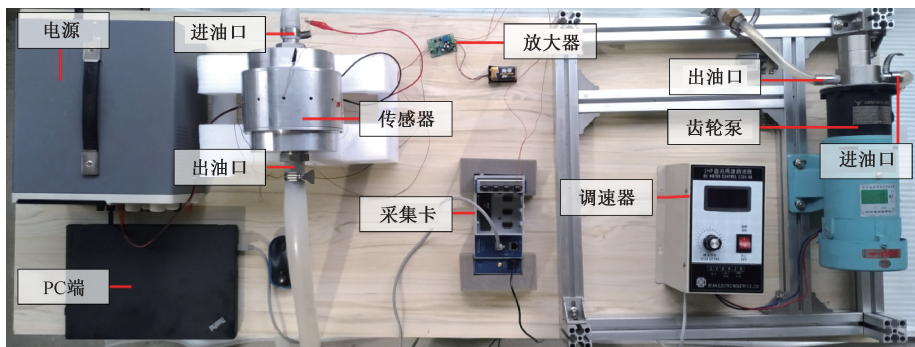


图 20 试验装置

Fig. 20 Experimental equipment

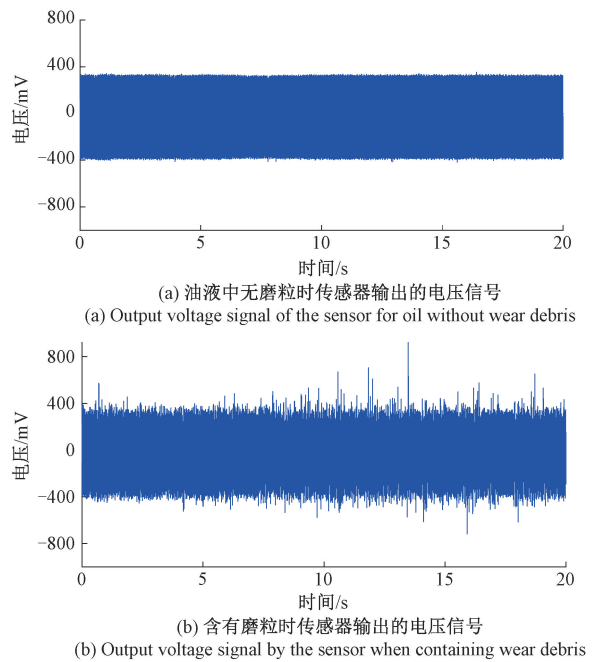


图 21 传感器的输出信号(磨粒大小为 $13\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 21 Output signal of the sensor($13\text{ }\mu\text{m}$ wear debris)

实际检测效果,驱动电流设置为 0.6 A ,增益为 $1\text{ }020$ 。实验平台如图 20 所示,主要包括恒流供电电源、采集卡、齿轮泵、计算机、低功耗仪表放大器和传感器 6 个部分组成。通过控制齿轮泵,使油液以 3.82 L/min 的速度在管道内循环,磨粒随润滑油流经传感器,产生感应电压信号。此外,为了抑制电源噪声干扰,信号放大模块采用干电池供电。

油液样本中不存在磨粒时,传感器的输出信号如图 21(a)所示,信号峰值较为平稳。将 $13\text{ }\mu\text{m}$ 的磨粒注入油液样本中,传感器输出电压中出现明显的磨粒特征信号。大口径油液循环实验表明,当激励结构数量 $E=6$ 时,传感器能在直径为 40 mm 的流道中检测到 $13\text{ }\mu\text{m}$ 的铁磁性磨粒。

5 结 论

本文提出了一种基于多激励磁场的全流量磨粒监测传感器。首先,通过数值仿真分析了激励结构数量 E 与 y - z 平面周向磁场均匀性的关系,同时优化了传感器的磁极形状,采用所提出的弧形磁极能够有效提高磁场的利用率。通过磨粒实验表明在恒流源供电条件下,适当增大激励电流能够提升磨粒信号的信噪比。与传统单激励结构的传感器相比,本文所提出的传感器能在全管径 (40 mm) 内实现磨粒监测。最后,通过油液样本验证了传感器的实际检测效能,结果表明多激励结构的传感器能够在流量为 3.82 L/min 的油路中获取到 $13\text{ }\mu\text{m}$ 铁磁性磨粒信号。

参考文献

[1] 史皓天, 张洪朋, 王文琪, 等. 一种液压油磨粒检测新方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 44-51.
SHI H T, ZHANG H P, WANG W Q, et al. Research on a novel method for detection of wear debris in

- hydraulic oil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9):44-51.
- [2] 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): 136-142.
- WU CH, ZHENG CH S, MA B. Simulation study on the characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12):136-142.
- [3] YAN L, SHIZHU W, YOUNG X, et al. Advances in research on a multi-channel on-line ferrograph [J]. Tribology International, 1997, 30(30):279-282.
- [4] BRENDLÉ M C, DISS P H, SPANO F J. 3D optical-profilometric assessment of transfer and its significance for the mechanisms of primary particle detachment and wear[J]. Wear, 1999, 225:417-426.
- [5] ZHU X, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring: A review[J]. Tribology International, 2017, 109: 473-484.
- [6] 姚智刚, 王伟钢, 武通海, 等. 油液综合监测数据管理及分析系统[J]. 润滑与密封, 2009, 34(7): 102-106.
- YAO Z G, WANG W G, WU T H, et al. Data management and synthetic system for oil monitoring[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(7):102-106.
- [7] 孙衍山, 杨昊, 佟海滨, 等. 航空发动机滑油磨粒在线监测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7):1561-1569.
- SUN Y SH, YANG H, TONG H B, et al. Review of on-line detection for wear particles in lubricating oil of aviation engine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7):1561-1569.
- [8] 刘鹏鹏, 左洪福, 孙见忠, 等. 涡喷发动机气路滑油泄漏故障在线监测研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11):2601-2607.
- LIU P P, ZUO H F, SUN J ZH, et al. Study of on-line monitoring of lubricating oil leakage in turbojet engine gas path[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11):2601-2607.
- [9] 龚小龙, 田洪祥, 孙云岭, 等. 遮光法颗粒计数器测量结果的影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(8): 133-135.
- GONG X L, TIAN H X, SUN Y L, et al. Influencing factors on measurement results of light extinction particle counters[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(8): 133-135.
- [10] DU L, ZHE J. An integrated ultrasonic-inductive pulse sensor for wear debris detection[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 22(2): 025003.
- [11] HAN Z, WANG Y, QING X. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2851.
- [12] CHAMBERS K W, ARNESON 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.
- [13] 史皓天, 张洪朋, 顾长智, 等. 液压油污染物多参数检测传感器[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 172-179.
- SHI H T, ZHANG H P, GU CH ZH, et al. Multi-parameter sensor for hydraulic oil pollutant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 172-179.
- [14] ZHU X, DU L, ZHE J. A 3×3 wear debris sensor array for real time lubricant oil conditioning monitoring using synchronized sampling [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 83:296-304.
- [15] 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):64-68.
- FAN H B, ZHANG Y T, CHENG Y, et al. Effect of the radial distribution of the wear debris position on the testing results of inductive wear debris sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(7): 64-68.
- [16] 郭翠娟, 马雪皓, 荣锋, 等. 基于平面线圈的油液磨粒监测传感器设计[J]. 传感技术学报, 2019, 32(2):56-60.
- GUO C J, MA X H, RONG F, et al. Design of the induction sensor for on-line oil debris monitoring based on planar coil [J], Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(2):56-60.
- [17] 贾然, 马彪, 郑长松, 等. 电感式磨粒在线监测传感器灵敏度提高方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2018, 45(4):129-137.
- JIA R, MA B, ZHEN CH S, et al. Sensitivity improvement method of on-line inductive wear particles monitor sensor[J], Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(4):129-137.
- [18] HONG W, WANG S, TOMOVIC M, et al. Radial inductive debris detection sensor and performance analysis [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12):125103.
- [19] REN Y J, LI W, ZHAO G F, et al. Inductive debris sensor using one energizing coil with multiple sensing coils for sensitivity improvement and high throughput[J].

Tribology International, 2018, 128: 96-103.

- [20] XIAO H, WANG X, LI H, et al. An inductive debris sensor for a large-diameter lubricating oil circuit based on a high-gradient magnetic field [J]. Applied Sciences, 2019, 9(8): 1546.
- [21] FENG S, YANG L, QIU G, et al. An inductive debris sensor based on a high-gradient magnetic field [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2879-2886.
- [22] 黄文杰, 左洪福. 滑油系统全流量磨粒在线监测静电传感技术研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(8): 1786-1794.
- HUANG W J, ZUO H F. Research on electrostatic sensing for in-line abrasive monitoring in full flow oil system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(8): 1786-1794.
- [23] 陈鸣, 余晨辉. HgCdTe 柔性中波红外探测器放大电路设计及噪声分析 [J]. 红外技术, 2019, 41(7): 661-665.
- CHEN M, YU CH H. Amplification circuit design and noise analysis for an HgCdTe flexible medium wave infrared detector [J]. Infrared Technology, 2019, 41(7): 661-665.

作者简介



萧红, 2010 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为先进检测技术、仿真分析等领域。

E-mail: xiaohong@cqupt.edu.cn

Xiao Hong received her Ph. D. degree from Chongqing University in 2010. She is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests include advanced detection technology, simulation analysis, etc.



冯松 (通信作者), 2010 年于重庆大学获得学士学位, 2016 年于西安交通大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为在线油液监测传感器、数字图像处理等领域。

E-mail: fengsong@cqupt.edu.cn

Feng Song (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2010 and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2016. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include online oil monitoring sensor, digital image processing, etc.