



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107340544 A

(43)申请公布日 2017. 11. 10

(21)申请号 201611073681.X

(22)申请日 2016.11.29

(71)申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学机械与车辆学院

(72)发明人 郑长松 陈漫 贾然 杜秋 李慧珠 高震 闫书法

(74)专利代理机构 北京远创理想知识产权代理事务所(普通合伙) 11513

代理人 张素妍

(51)Int.Cl.

G01V 3/11(2006.01)

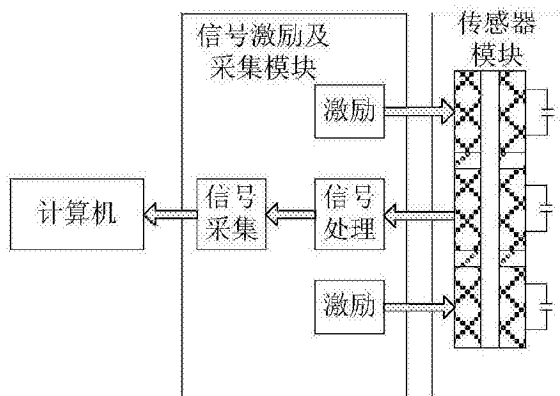
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统及方法

(57)摘要

本发明涉及一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统及方法,其包括传感器模块、信号激励及采集模块和计算机;所述传感器模块与所述信号激励及采集模块进行信息交互;所述传感器模块用于接收所述信号激励及采集模块传输至的激励信号,对微小金属颗粒进行在线检测,并将检测到的信号传输至所述信号激励及采集模块内进行处理,处理后的信号传输至所述计算机内。本发明针对当前金属颗粒检测传感器灵敏度低的问题,实现了大孔径的高灵敏度微小金属颗粒在线检测;可以广泛应用于机械设备润滑油金属磨损颗粒在线检测领域。



1. 一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:该系统包括传感器模块、信号激励及采集模块和计算机;所述传感器模块与所述信号激励及采集模块进行信息交互;所述传感器模块用于接收所述信号激励及采集模块传输至的激励信号,对微小金属颗粒进行在线检测,并将检测到的信号传输至所述信号激励及采集模块内进行处理,处理后的信号传输至所述计算机内。

2. 如权利要求1所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述传感器模块包括第一激励线圈、第二激励线圈、第一谐振激励电容、第二谐振激励电容、感应线圈、谐振感应电容和线圈基体;

所述第一激励线圈、第二激励线圈和感应线圈都绕制在所述线圈基体上;所述第一激励线圈、第二激励线圈位于所述线圈基体两侧,所述第一激励线圈与所述第二激励线圈相邻的一端经第一连接线串联,所述第一激励线圈另一端经第二连接线与所述第二激励线圈串联;位于所述第一连接线与所述第二连接线之间依次并联设置有所述第一谐振激励电容、信号激励及采集模块和第二谐振激励电容,且所述第一谐振激励电容位于所述第一激励线圈一侧,所述第二谐振激励电容位于所述第二激励线圈一侧;所述感应线圈位于所述线圈基体中部,所述感应线圈两端引出线之间并联所述谐振感应电容后输出,与所述信号激励及采集模块连接。

3. 如权利要求2所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述第一激励线圈、第二激励线圈、第一连接线、第二连接线和感应线圈都采用直径为0.2mm的铜质漆包线。

4. 如权利要求2所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述第一激励线圈和第二激励线圈匝数相同且绕制方向相反;所述感应线圈的匝数大于所述第一激励线圈或所述第二激励线圈的匝数,方向任意设置。

5. 如权利要求4所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述第一激励线圈和第二激励线圈的匝数均采用255匝,所述感应线圈的匝数为300匝。

6. 如权利要求2所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述在传感器模块外部设置里有传感器壳体,位于所述传感器模块与所述传感器壳体之间还依次设置有磁屏蔽层和电屏蔽层,所述电屏蔽层靠近所述传感器模块,所述磁屏蔽层位于所述电屏蔽层外侧。

7. 如权利要求2所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述线圈基体采用可加工陶瓷材料制成,其热导率为1.71W/m.k。

8. 如权利要求1所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述信号激励及采集模块包括信号激励源和信号采集处理模块;所述信号激励源并联在所述传感器模块内的第一连接线与第二连接线之间,所述信号采集处理模块与所述传感器模块内的感应线圈输出端连接。

9. 如权利要求8所述的一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在於:所述信号激励源包括两个方波激励信号输入端、两个信号升压放大器和两个信号整形模块;每一所述方波激励信号输入端都将方波激励信号传输至一所述信号升压放大器处理后,传输至一所述信号整形模块,经所述信号整形模块处理后传输至所述第一激励线圈或所述第二激励线圈;所述信号采集处理模块包括谐振放大器、50Hz工频滤波器、抗混滤波器、锁相放

大器和AD转换器;所述感应线圈传输至的信号经所述谐振放大器放大处理后,依次经所述50Hz工频滤波器、抗混滤波器和锁相放大器处理后,传输至所述AD转换器,经所述AD转换器模数转换处理后输出感应信号。

10.一种基于如权利要求1-9任一项所述高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统的检测方法,其特征在于包括以下步骤:

- 1) 为第一激励线圈、第二激励线圈和感应线圈按照谐振条件匹配的谐振电容;
- 2) 当没有金属颗粒通过传感器模块时,线圈静态电感值为:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d_1 \varphi,$$

式中, $\mu_0$ 为真空磁导率, $N$ 为线圈匝数, $d_1$ 为线圈平均直径, $\varphi = \frac{5.4}{\sqrt{\rho\alpha}}$ , $\rho = \frac{r}{d_1}$ , $\alpha = \frac{a}{d_1}$ , $a$ 为线圈宽度;

两激励线圈互感值 $M$ 为:

$$M = \frac{\pi\mu_0}{8} N^2 \frac{d_2^2}{a^2} (k_1 F_1 - 2k_2 F_2 + k_3 F_3),$$

式中, $k_i = \sqrt{(d_2/2)^2 + l_i^2}$ , $\lambda_i = d_2/(2k_i)$ , $F_i = -\frac{1}{5}\lambda_i^4 - \frac{1}{26}\lambda_i^2 + 1$ , $l_i$ 为不同线圈间距离, $d_2$ 为线圈外径;

3) 信号激励源向串联连接的第一激励线圈、第二激励线圈通入方波激励信号,则并联回路幅频特性为:

$$\alpha_v(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}},$$

式中, $\omega_0$ 为谐振角频率, $Q$ 为LC并联回路品质因数;

4) 金属颗粒进入任一激励线圈时会改变线圈磁阻,表现为线圈电感值发生变化;当半径为 $r_a$ 的铁磁性颗粒进入到内径为 $r$ 宽为 $l$ 的任一激励线圈中时,所产生的电感变化量为:

$$\Delta L = \frac{(\sqrt{5}-1)\mu_0\mu_r N^2 r_a^3}{l^2};$$

所产生的电路阻抗变化 $\Delta Z = j\omega \Delta L$ ;

激励线圈采用谐振原理后,金属颗粒引起的线圈阻抗的变化为:

$$\Delta Z = \frac{\frac{r}{(\omega C)^2} - j\frac{1}{\omega C} \left[ r^2 + (\omega(L+\Delta L))^2 - \frac{(L+\Delta L)}{C} \right]}{r^2 + \left( \omega(L+\Delta L) - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - \frac{\frac{r}{(\omega C)^2} - j\frac{1}{\omega C} \left[ r^2 + (\omega L)^2 - \frac{L}{C} \right]}{r^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2};$$

此时两激励线圈在感应线圈位置处产生的磁通量之差即为感应线圈磁通量变化,其值为:

$$\Delta \Phi = \Delta Z * I;$$

感应线圈输出感应电动势为:

$$E = -j\omega N \Delta \Phi;$$

5) 由步骤4)得到的输出感应电动势幅值数量级为 $\mu V$ 级,与外界噪声信号为同一数量级,由感应线圈对该微弱感应电动势信号进行放大,其放大倍数为:

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R};$$

6) 经步骤5) 进行放大后的微弱信号经工频滤波和抗混滤波后, 由锁相放大器进行锁相放大, 最终感应线圈输出电动势:

$$E_{out} = -j100 \frac{2\pi f_0 L}{R} \omega N \Delta \Phi。$$

## 一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种金属颗粒检测系统及方法,特别是关于一种在线式机械设备润滑油金属磨损颗粒的高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统及方法。

### 背景技术

[0002] 随着设备故障诊断技术的不断发展,油液监测技术已成为设备运行状态监测的重要手段,并已逐步发展成为一项系统的科学。其中油液在线监测技术由其能够实时有效的对设备磨损状态进行检测,并反映设备磨损情况的变化过程,因此成为近年间的一个研究热点,并逐渐发展成为油液检测技术的一个独立分支。

[0003] 目前,国内外研究机构已研制出多种类型的磨粒检测传感器,主要依据的原理包括:光学原理(光散射,光衍射)、超声波原理、电学原理(电容、电阻、电感)及图像。综合对比了各类传感器的特点,光学磨粒检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,超声波型传感器则容易受到背景噪声的干扰,且温度稳定性差,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。图像式磨粒检测传感器结构复杂,依靠颜色判断磨粒材料属性,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。基于电学原理的磨粒检测传感器结构形式简单,温度稳定性好,抗背景噪声能力强,但容易受到外界电磁干扰的影响,因此在传感器系统中必须进行必要的电磁屏蔽。

[0004] 同时多个国内外研究机构围绕该方向均开展了大量的科学研究工作,Akron大学研究了单线圈结构、平行线圈结构及平面线圈结构的微流道磨粒监测传感器,实现了最高 $20\mu\text{m}$ 铁颗粒和 $55\mu\text{m}$ 铜颗粒的检测,但由于传感器都采用的微流道(内径 $\approx 1\text{mm}$ ),因此难以在工程实际中得到应用。国内大连海事大学、南京航空航天大学对平面螺旋线圈式磨粒传感器进行了研究。石家庄军械工程学院研究了双线圈式磨粒检测传感器,分析了铁磁性颗粒及非铁磁性颗粒经过传感器时的磁场特性以及传感器的输出特性,能够成功检测 $100\mu\text{m}$ 铁磁性颗粒和 $500\mu\text{m}$ 非铁磁性颗粒。中国科学技术大学开发的差分式传感器的磁场模型,该传感器内径 $25\text{mm}$ ,能成功检测 $200\sim 300\mu\text{m}$ 铁磁性颗粒和 $700\mu\text{m}$ 非铁磁性磨粒。但目前国内大部分研究还处于实验室阶段,无法达到工程使用要求。

[0005] 目前电感式磨粒传感器发展面临的主要问题在于传感器检测灵敏度与传感器孔径之间存在矛盾,检测精度较高的传感器一般采用微流道(孔径 $< 1\text{mm}$ ),难以在实际工程中使用,大孔径的磨粒检测传感器检测灵敏度相对较低,因此对于如何提高大孔径磨粒检测传感器检测灵敏度是一个亟待解决的问题。

### 发明内容

[0006] 针对上述问题,本发明的目的是提供一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统及方法,其针对当前金属颗粒检测传感器灵敏度低的问题,实现了大孔径的高灵敏度微小金属颗粒在线检测。

[0007] 为实现上述目的,本发明采取以下技术方案:一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其特征在于:该系统包括传感器模块、信号激励及采集模块和计算机;所述传感器模块与所述信号激励及采集模块进行信息交互;所述传感器模块用于接收所述信号激励及采集模块传输至的激励信号,对微小金属颗粒进行在线检测,并将检测到的信号传输至所述信号激励及采集模块内进行处理,处理后的信号传输至所述计算机内。

[0008] 进一步,所述传感器模块包括第一激励线圈、第二激励线圈、第一谐振激励电容、第二谐振激励电容、感应线圈、谐振感应电容和线圈基体;所述第一激励线圈、第二激励线圈和感应线圈都绕制在所述线圈基体上;所述第一激励线圈、第二激励线圈位于所述线圈基体两侧,所述第一激励线圈与所述第二激励线圈相邻的一端经第一连接线串联,所述第一激励线圈另一端经第二连接线与所述第二激励线圈串联;位于所述第一连接线与所述第二连接线之间依次并联设置有所述第一谐振激励电容、信号激励及采集模块和第二谐振激励电容,且所述第一谐振激励电容位于所述第一激励线圈一侧,所述第二谐振激励电容位于所述第二激励线圈一侧;所述感应线圈位于所述线圈基体中部,所述感应线圈两端引出线之间并联所述谐振感应电容后输出,与所述信号激励及采集模块连接。

[0009] 进一步,所述第一激励线圈、第二激励线圈、第一连接线、第二连接线和感应线圈都采用直径为0.2mm的铜质漆包线。

[0010] 进一步,所述第一激励线圈和第二激励线圈匝数相同且绕制方向相反;所述感应线圈的匝数大于所述第一激励线圈或所述第二激励线圈的匝数,方向任意设置。

[0011] 进一步,所述第一激励线圈和第二激励线圈的匝数均采用255匝,所述感应线圈的匝数为300匝。

[0012] 进一步,所述在传感器模块外部设置里有传感器壳体,位于所述传感器模块与所述传感器壳体之间还依次设置有磁屏蔽层和电屏蔽层,所述电屏蔽层靠近所述传感器模块,所述磁屏蔽层位于所述电屏蔽层外侧。

[0013] 进一步,所述线圈基体采用可加工陶瓷材料制成,其热导率为1.71W/m.k。

[0014] 进一步,所述信号激励及采集模块包括信号激励源和信号采集处理模块;所述信号激励源并联在所述传感器模块内的第一连接线与第二连接线之间,所述信号采集处理模块与所述传感器模块内的感应线圈输出端连接。

[0015] 进一步,所述信号激励源包括两个方波激励信号输入端、两个信号升压放大器和两个信号整形模块;每一所述方波激励信号输入端都将方波激励信号传输至一所述信号升压放大器处理后,传输至一所述信号整形模块,经所述信号整形模块处理后传输至所述第一激励线圈或所述第二激励线圈;所述信号采集处理模块包括谐振放大器、50Hz工频滤波器、抗混滤波器、锁相放大器和AD转换器;所述感应线圈传输至的信号经所述谐振放大器放大处理后,依次经所述50Hz工频滤波器、抗混滤波器和锁相放大器处理后,传输至所述AD转换器,经所述AD转换器模数转换处理后输出感应信号。

[0016] 一种基于上述高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统的检测方法,其特征在于包括以下步骤:1)为第一激励线圈、第二激励线圈和感应线圈按照谐振条件匹配的谐振电容;2)当没有金属颗粒通过传感器模块时,线圈静态电感值为:

$$[0017] \quad L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d_1 \varphi,$$

[0018] 式中,  $\mu_0$ 为真空磁导率,  $N$ 为线圈匝数,  $d_1$ 为线圈平均直径,  $\varphi = \frac{5.4}{\sqrt{\rho\alpha}}$ ,  $\rho = \frac{r}{d_1}$ ,  $\alpha = \frac{a}{d_1}$ ,  $a$ 为线圈宽度;两激励线圈互感值 $M$ 为:

$$[0019] \quad M = \frac{\pi\mu_0}{8} N^2 \frac{d_2^2}{a^2} (k_1 F_1 - 2k_2 F_2 + k_3 F_3),$$

[0020] 式中,  $k_i = \sqrt{(d_2/2)^2 + l_i^2}$ ,  $\lambda_i = d_2 / (2k_i)$ ,  $F_i = -\frac{1}{5}\lambda_i^4 - \frac{1}{26}\lambda_i^2 + 1$ ,  $l_i$ 为不同线圈间距离,  $d_2$ 为线圈外径;3) 信号激励源向串联连接的第一激励线圈、第二激励线圈通入方波激励信号,则并联回路幅频特性为:

$$[0021] \quad \alpha_v(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}},$$

[0022] 式中,  $\omega_0$ 为谐振角频率,  $Q$ 为LC并联回路品质因数;4) 金属颗粒进入任一激励线圈时会改变线圈磁阻,表现为线圈电感值发生变化;当半径为 $r_a$ 的铁磁性颗粒进入到内径为 $r$ 宽为 $l$ 的任一激励线圈中时,所产生的电感变化量为:

$$[0023] \quad \Delta L = \frac{(\sqrt{5}-1)\mu_0\mu_r N^2 r_a^3}{l^2};$$

[0024] 所产生的电路阻抗变化 $\Delta Z = j\omega\Delta L$ ;激励线圈采用谐振原理后,金属颗粒引起的线圈阻抗的变化为:

$$[0025] \quad \Delta Z = \frac{\frac{r}{(\omega C)^2 - j\frac{1}{\omega C} \left[ r^2 + (\omega(L+\Delta L))^2 - \frac{(L+\Delta L)}{C} \right]}}{r^2 + \left( \omega(L+\Delta L) - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - \frac{\frac{r}{(\omega C)^2 - j\frac{1}{\omega C} \left[ r^2 + (\omega L)^2 - \frac{L}{C} \right]}}{r^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2};$$

[0026] 此时两激励线圈在感应线圈位置处产生的磁通量之差即为感应线圈磁通量变化,其值为: $\Delta\Phi = \Delta Z * I$ ;感应线圈输出感应电动势为: $E = -j\omega N\Delta\Phi$ ;5) 由步骤4)得到的输出感应电动势幅值数量级为 $\mu V$ 级,与外界噪声信号为同一数量级,由感应线圈对该微弱感应电动势信号进行放大,其放大倍数为:

$$[0027] \quad Q = \frac{2\pi f_0 L}{R};$$

[0028] 6) 经步骤5)进行放大后的微弱信号经工频滤波和抗混滤波后,由锁相放大器进行锁相放大,最终感应线圈输出电动势:

$$[0029] \quad E_{out} = -j100 \frac{2\pi f_0 L}{R} \omega N \Delta\Phi。$$

[0030] 本发明由于采取以上技术方案,其具有以下优点:1、本发明将LC谐振原理引入进磨粒检测传感器模块,第一、第二激励线圈反向绕制并串联连接,向激励线圈中通入特定频率正弦交流电源,并按照谐振条件匹配相应的谐振激励电容,以提高激励线圈阻抗变化灵敏度。2、本发明采用的感应线圈独立绕制,方向任意,按照谐振条件以与相同频率为感应线圈匹配谐振感应电容,以增强传感器检测效果。3、本发明将传统磨粒检测传感器磨粒引起的线圈电感的变化转变为LC谐振电路阻抗的变化,有效提高了传感器灵敏度。4、由于传感器输出信号为微伏级,与环境噪声为同一数量级,因此本发明直接对传感器输出信号进行放大将造成信号信噪低,微小金属磨粒通过传感器时不能有效识别的现象。5、本发明采用锁相放大技术对传感器模块输出信号进行前处理,将信号中与激励信号同频的信号成分视

为有效信号进行采集和放大,而其他频率成分的信号全部视为无效信号进行滤除,可有效的提高信号信噪比进而提高传感器的检测灵敏度。6、本发明为传感器模块设置有电磁屏蔽层,其中电屏蔽层选用低电阻率的紫铜材料,其电阻率为 $0.018\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;磁屏蔽层选用高磁导率、低矫顽力的坡莫合金材料,相对磁导率为 $20000\sim 200000\text{H}/\text{m}$ 。传感器线圈基体采用惰磁性材料可加工陶瓷制成,该材料热传导率为 $1.71\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$ ,在降低线圈基体对磁场产生影响的同时可减小油液热量向线圈的传递对系统检测性能造成影响,增强系统的抗干扰能力和稳定性。7、本发明将谐振原理引入至传感器模块,采用谐振电路的阻抗变化代替传统电路的电感变化,同时利用感应线圈谐振特点对信号进行一次选频和放大。信号激励和检测模块采用锁相放大技术对信号进行二次选频和放大,极大的提高了检测系统的灵敏度,缩小了最小可检测磨粒直径。

[0031] 综上所述,本发明可以广泛应用于机械设备润滑油金属磨损颗粒在线检测领域中。

### 附图说明

- [0032] 图1是本发明的整体结构示意图;
- [0033] 图2是本发明的传感器模块电路结构示意图;
- [0034] 图3是本发明的传感器模块结构示意图;
- [0035] 图4是本发明的传感器模块等效电路图;
- [0036] 图5是本发明的信号激励及采集模块结构示意图;
- [0037] 图6是本发明铁磁性颗粒通过传感器模块时引起的线圈电感变化示意图;
- [0038] 图7是本发明铁磁性颗粒通过传感器时引起的电路阻抗变化示意图;
- [0039] 图8是本发明 $75\mu\text{m}$ 铁磁性颗粒通过传感器时输出信号示意图;
- [0040] 图9是本发明 $250\mu\text{m}$ 非铁磁性颗粒通过传感器时输出信号示意图。

### 具体实施方式

[0041] 本发明采用向两个反向绕制的激励线圈中通入相同的正弦交流电,在两激励线圈内部会分别产生动态变化的大小相等方向相反的磁场,感应线圈位于两激励线圈中部,当没有金属颗粒通过传感器时感应线圈处磁场强度为零,因此不输出感应电动势,当铁磁性颗粒通过传感器时,会对线圈内部磁场产生增强作用,当非铁磁性颗粒进入传感器时会对线圈内部磁场产生减弱作用,造成两激励线圈磁场不平衡,感应线圈磁场不为零,输出感应电动势。下面结合附图和实施例对本发明进行详细的描述。

[0042] 如图1所示,本发明提供一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测系统,其包括传感器模块、信号激励及采集模块和计算机。传感器模块与信号激励及采集模块进行信息交互;传感器模块用于接收信号激励及采集模块传输至的激励信号,对微小金属颗粒进行在线检测,并将检测到的信号传输至信号激励及采集模块内进行处理,处理后的信号传输至计算机内。

[0043] 上述实施例中,如图2、图3所示,传感器模块包括第一激励线圈1、第二激励线圈2、第一谐振激励电容3、第二谐振激励电容4、感应线圈5、谐振感应电容6和线圈基体7。

[0044] 第一激励线圈1、第二激励线圈2和感应线圈5都绕制在线圈基体7上。第一激励线



圈1、第二激励线圈2位于线圈基体7两侧,第一激励线圈1与第二激励线圈2相邻的一端经第一连接线串联,第一激励线圈1另一端经第二连接线与第二激励线圈2串联。位于第一连接线与第二连接线之间依次并联设置有第一谐振激励电容3、信号激励及采集模块、第二谐振激励电容4,且第一谐振激励电容3位于第一激励线圈1一侧,第二谐振激励电容4位于第二激励线圈2一侧。感应线圈5位于线圈基体7中部,感应线圈5两端引出线之间并联谐振感应电容6后输出,与信号激励及采集模块连接。本发明为了使各线圈工作在谐振状态,为两激励线圈分别配备第一谐振激励电容3、第二谐振激励电容4,为感应线圈5配备谐振感应电容6。

[0045] 在一个优选实施例中,第一激励线圈1、第二激励线圈2、第一连接线、第二连接线和感应线圈5都采用直径为0.2mm的铜质漆包线。

[0046] 在一个优选实施例中,第一激励线圈1和第二激励线圈2匝数相同且绕制方向相反;感应线圈5的匝数大于第一激励线圈1(或第二激励线圈2)的匝数,方向可以任意设置。在本实施例中,第一激励线圈1和第二激励线圈2的匝数均采用255匝,感应线圈5的匝数优选为300匝。

[0047] 在一个优选实施中,为增强传感器模块的抗干扰能力,在传感器模块外部设置里有传感器壳体10,位于传感器模块与传感器壳体10之间还依次设置有磁屏蔽层11和电屏蔽层12,电屏蔽层12靠近传感器模块,磁屏蔽层11位于电屏蔽层12外侧。其中磁屏蔽层11采用高磁导率、低矫顽力的坡莫合金材料(相对磁导率为20000~200000H/m),电屏蔽层12采用低电阻率的紫铜材料(电阻率为 $0.018 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )。

[0048] 在一个优选实施中,由于传感器模块工作环境油液温度一般大于 $90^\circ\text{C}$ ,为减小油液热量对传感器模块中各线圈的影响,线圈基体7采用可加工陶瓷材料制成,其热导率为 $1.71\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$ ,可有效的减少油液热量向各线圈的传递。

[0049] 上述各实施例中,如图5所示,信号激励及采集模块包括信号激励源8和信号采集处理模块9。信号激励源8并联在第一连接线与第二连接线之间,信号采集处理模块9与感应线圈5输出端连接。信号激励源8包括两个方波激励信号输入端、两个信号升压放大器和两个信号整形模块;每一方波激励信号输入端都将方波激励信号传输至一信号升压放大器处理后,传输至一信号整形模块,经信号整形模块处理后传输至第一激励线圈1或第二激励线圈2。信号采集处理模块9包括谐振放大器、50Hz工频滤波器、抗混滤波器、锁相放大器和AD转换器;感应线圈5传输至的信号经谐振放大器放大处理后,依次经50Hz工频滤波器、抗混滤波器和锁相放大器处理后,传输至AD转换器,经AD转换器模数转换处理后输出感应信号。

[0050] 本发明在使用时,传感器模块静态时,第一激励线圈1、第二激励线圈2内部会产生大小相等方向相反的交变磁场,当没有金属颗粒通过传感器模块时,两磁场会在感应线圈5处互相抵消,感应线圈磁通量变化为0,不输出感应电动势。当金属颗粒进入传感器时,会改变某一激励线圈磁场强度,致使第一激励线圈1、第二激励线圈2磁场不均衡,导致感应线圈5处磁通量不为零,感应线圈输出感应电动势,且此电动势大小随金属颗粒直径增大而增大。

[0051] 本发明基于上述检测系统,还提供一种高灵敏度的微小金属颗粒在线检测方法,其包括以下步骤:

[0052] 1)如图4所示,为第一激励线圈1、第二激励线圈2和感应线圈5按照谐振条件匹配

的谐振电容;其中,谐振条件为:

$$[0053] \quad f = \frac{1}{2\pi LC} \sqrt{1 - \frac{Cr^2}{L}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

[0054] 式中, $f$ 为激励信号频率, $L$ 为线圈电感值, $r$ 为线圈内阻, $C$ 为匹配谐振电容。

[0055] 激励频率选择时,若频率过低,则非铁磁性金属颗粒经过传感器模块时不能形成涡流,因此传感器模块不能有效的对非铁磁性颗粒进行检测,若频率过高,铁磁性颗粒内部会形成较大的涡流而抑制铁磁性颗粒对外磁场的增强作用,因此会降低铁磁性颗粒的检测效果。因此,综合对比本发明最终确定传感器激励频率优选为300KHz。

[0056] 2) 当没有金属颗粒通过传感器模块时,线圈静态电感值为:

$$[0057] \quad L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d_1 \Phi, \quad (2)$$

[0058] 式中, $\mu_0$ 为真空磁导率, $N$ 为线圈匝数, $d_1$ 为线圈平均直径, $\Phi = \frac{5.4}{\sqrt{\rho\alpha}}$ , $\rho = \frac{r}{d_1}$ ,

$\alpha = \frac{a}{d_1}$ , $a$ 为线圈宽度。

[0059] 两激励线圈互感值 $M$ 为:

$$[0060] \quad M = \frac{\pi\mu_0}{8} N^2 \frac{d_2^2}{a^2} (k_1 F_1 - 2k_2 F_2 + k_3 F_3), \quad (3)$$

[0061] 式中, $k_i = \sqrt{(d_2/2)^2 + l_i^2}$ , $\lambda_i = d_2 / (2k_i)$ , $F_i = -\frac{1}{5}\lambda_i^4 - \frac{1}{26}\lambda_i^2 + 1$ , $l_i$ 为不同线圈间距离, $d_2$ 为线圈外径,其中, $i = 1, 2, 3$ ;通过计算本发明激励线圈电感值为500 $\mu$ H,两激励线圈互感为75 $\mu$ H,感应线圈自感为215 $\mu$ H。

[0062] 3) 信号激励源8向串联连接的第一激励线圈1、第二激励线圈2通入频率为300KHz幅值为5V的方波激励信号,该方波激励信号 $I$ 可通过傅里叶变换展开为:

$$[0063] \quad I = 4 * I / \pi (\sin \omega t + 1/3 \sin 3 \omega t + 1/5 \sin 5 \omega t + 1/7 \sin 7 \omega t + \dots), \quad (4)$$

[0064] 式中, $\omega = 2\pi f$ , $f$ 为激励信号频率。

[0065] 并联回路幅频特性 $\alpha_v(j\omega)$ 为:

$$[0066] \quad \alpha_v(j\omega) = \left| \frac{H(j\omega)}{H_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}, \quad (5)$$

[0067] 式中, $\omega_0$ 为谐振角频率, $Q$ 为LC并联回路品质因数。由此可见LC并联谐振电路会保留谐振信号,而对非谐振信号进行抑制,因此方波激励信号经过由第一激励线圈1和第二激励线圈2构成的激励线圈回路后被转化为同频率的正弦激励信号。

[0068] 4) 如图6所示,金属颗粒进入任一激励线圈时会改变线圈磁阻,表现为线圈电感值发生变化。当半径为 $r_a$ 的铁磁性颗粒进入到内径为 $r$ 宽为 $l$ 的任一激励线圈中时,所产生的电感变化量 $\Delta L$ 为:

$$[0069] \quad \Delta L = \frac{(\sqrt{5}-1)\mu_0\mu_r N^2 r_a^3}{l^2}; \quad (6)$$

[0070] 所产生的电路阻抗变化 $\Delta Z = j\omega \Delta L$ 。

[0071] 激励线圈采用谐振原理后,金属颗粒引起的线圈阻抗的变化 $\Delta Z$ 为:

$$[0072] \quad \Delta Z = \frac{\frac{r}{(\omega C)^2} - j\frac{1}{\omega C} \left[ r^2 + (\omega(L+\Delta L))^2 - \frac{(L+\Delta L)}{C} \right]}{r^2 + \left( \omega(L+\Delta L) - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - \frac{\frac{r}{(\omega C)^2} - j\frac{1}{\omega C} \left[ r^2 + (\omega L)^2 - \frac{L}{C} \right]}{r^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}; \quad (7)$$

[0073] 如图7所示,可知激励线圈采用并联谐振电路后,由金属颗粒引起的电路阻抗的变化远远大于未采用谐振原理的阻抗变化,并以此原理提高传感器模块灵敏度。

[0074] 此时两激励线圈在感应线圈位置处产生的磁通量之差即为感应线圈磁通量变化,其值 $\Delta\Phi$ 为:

$$[0075] \quad \Delta\Phi = \Delta Z * I; \quad (8)$$

[0076] 感应线圈输出感应电动势E为:

$$[0077] \quad E = -j\omega N \Delta\Phi. \quad (9)$$

[0078] 5)由步骤4)得到的输出感应电动势幅值数量级为 $\mu V$ 级,与外界噪声信号为同一数量级,为使检测系统能够有效的检测该微弱感应电动势信号,需借助感应线圈谐振状态再次对信号进行滤波和放大,以增强信号信噪比。由式(5)可知并联谐振状态下的激励线圈能够保留与谐振频率同频信号同时抑制其他频段信号,同时感应线圈还能够对该微弱感应电动势信号进行放大,其放大倍数为:

$$[0079] \quad Q = \frac{2\pi f_0 L}{R}. \quad (10)$$

[0080] 6)经步骤5)进行放大后的微弱信号经工频滤波和抗混滤波后,由锁相放大器进行锁相放大,最终感应线圈输出电动势;其中,锁相放大器参考信号为频率与谐振频率相同,幅值为5V的标准正弦信号,信号放大倍数为100倍;

[0081] 本发明针对感应线圈输出感应电动势信号特点,为进一步保证对该微弱信号的顺利提取,将锁相放大技术应用于信号采集中。

[0082] 其中,感应线圈输出电动势 $E_{out}$ 为:

$$[0083] \quad E_{out} = -j100 \frac{2\pi f_0 L}{R} \omega N \Delta\Phi. \quad (11)$$

[0084] 综上所述可知,传感器输出电动势与线圈参数(匝数N,电感L)激励信号参数(频率 $f_0$ ,电流I)金属颗粒参数(半径 $r_a$ ,相对磁导率 $\mu_r$ )等参数有关,且呈现非线性特征。由于不同属性(铁磁性和非铁磁性)金属颗粒对磁场的影响不同,铁磁性颗粒会加强外部磁场,非铁磁性颗粒会减弱外部磁场,因此不同属性颗粒通过传感器时传感器会输出不同相位的感应电动势。将直径75微米的铁磁性颗粒和直径250微米的非铁磁性颗粒通过传感器时,传感器输出信号分别如图8、图9所示。图中虚线为传统传感器采集到的信号,实线为本发明采集到的信号,可见不同属性金属颗粒经过传感器时传感器输出信号存在明显相位差,因此可凭借此相位差判断金属颗粒材料属性,同时,通过对比可发现本发明可将传感器检测灵敏度大幅提升。

[0085] 上述各实施例仅用于说明本发明,各部件的结构、尺寸、设置位置及形状都是可以有所变化的,在本发明技术方案的基础上,凡根据本发明原理对个别部件进行的改进和等同变换,均不应排除在本发明的保护范围之外。

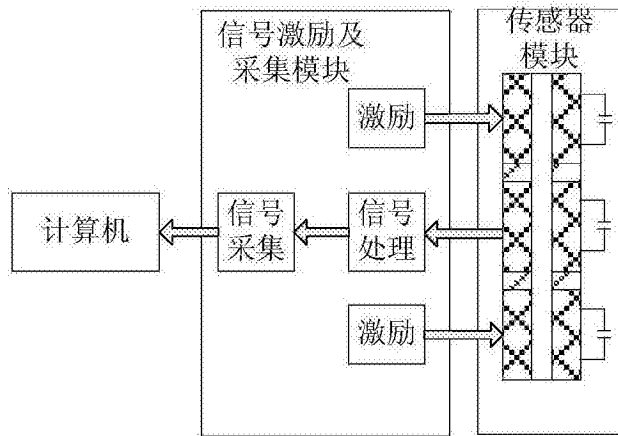


图1

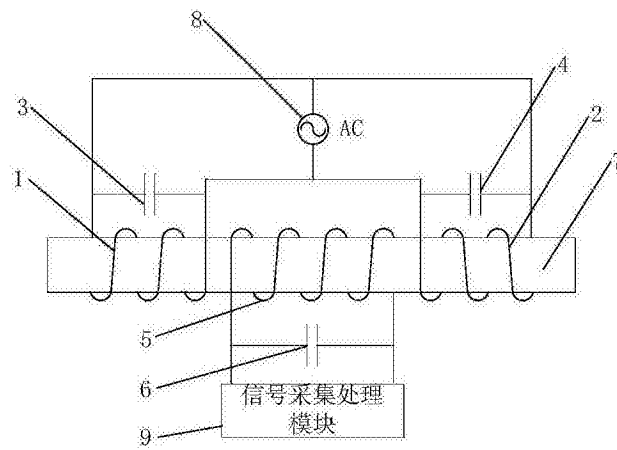


图2

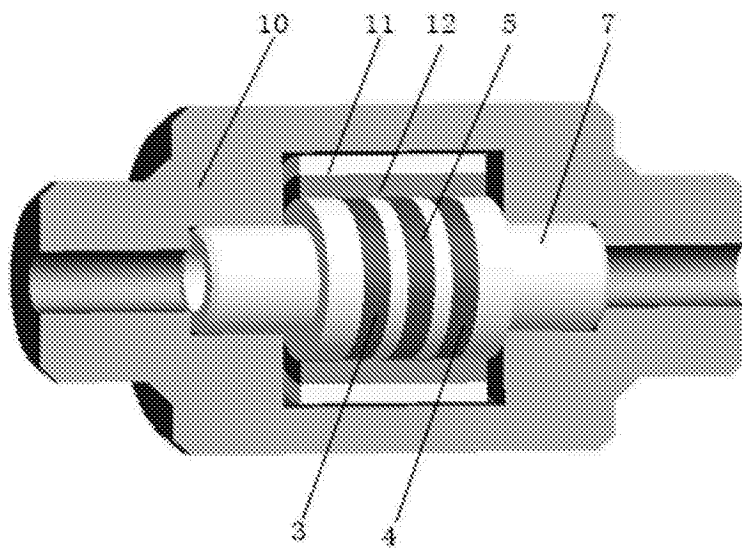


图3

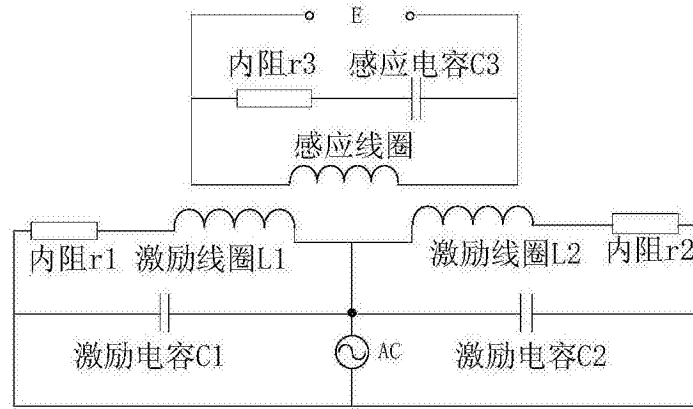


图4

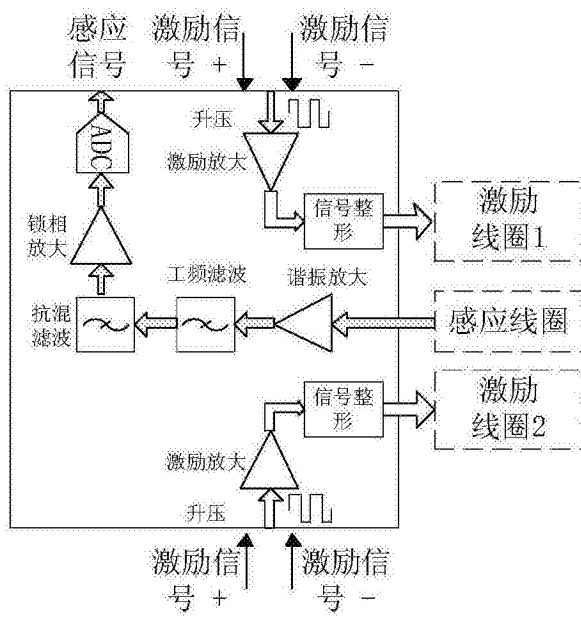


图5

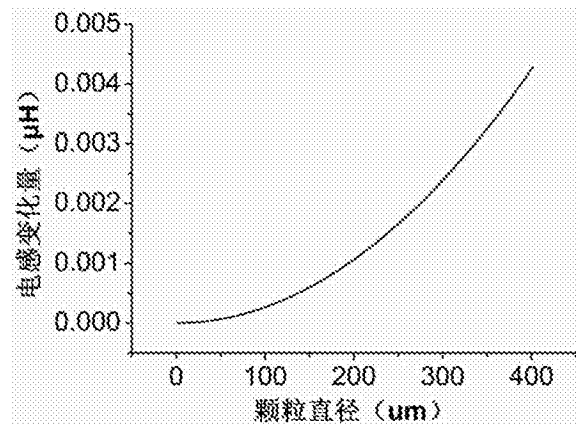


图6

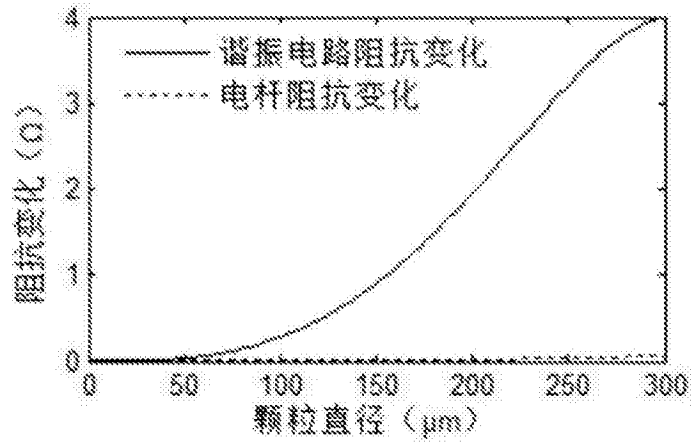


图7

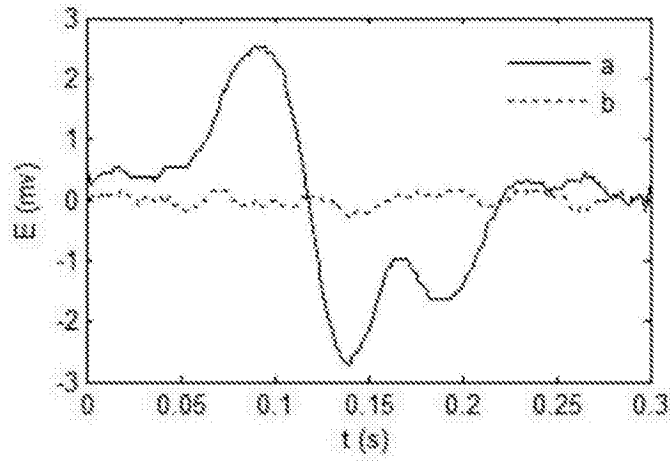


图8

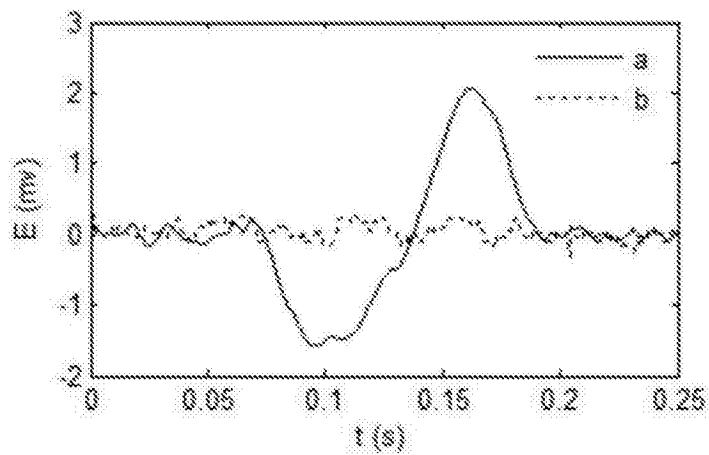


图9