



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108106972 A

(43)申请公布日 2018.06.01

(21)申请号 201711293195.3

(22)申请日 2017.12.08

(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 贾然 马彪 郑长松 陈漫
李慧珠 杜秋

(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.

G01N 15/00(2006.01)

B03C 1/02(2006.01)

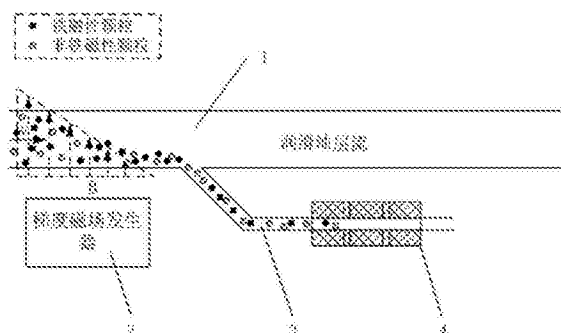
权利要求书3页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统

(57)摘要

本发明涉及一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统，其包括润滑油主回路，润滑油通过润滑油主回路流回油箱，由润滑油主回路使得油液在回路内部处于层流状态；润滑油主回路上设置有微流道旁路，微流道旁路与润滑油主回路之间具有夹角；沿油液流动方向，位于微流道旁路前端的润滑油主回路上设置有梯度磁场发生器，由梯度磁场发生器产生的梯度磁场覆盖微流道旁路的入口，通过该梯度磁场将油液中的磨损颗粒分离至微流道旁路内；在微流道旁路上设置有微流道磨粒检测传感器，由微流道旁路将包含磨损颗粒的流体引导至微流道磨粒检测传感器。本发明实现了大孔径的高灵敏度微小磨损颗粒在线检测；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. 一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:该系统包括润滑油主回路、梯度磁场发生器、微流道旁路和微流道磨粒检测传感器;机械设备中的润滑油通过所述润滑油主回路流回油箱,磨损颗粒随润滑油同步运动,由所述润滑油主回路使得油液在回路内部处于层流状态;所述润滑油主回路上设置有所述微流道旁路,所述微流道旁路与所述润滑油主回路之间具有夹角;沿油液流动方向,位于所述微流道旁路前端的所述润滑油主回路上设置有所述梯度磁场发生器,由所述梯度磁场发生器产生的梯度磁场覆盖所述微流道旁路的入口,通过该梯度磁场将油液中的磨损颗粒分离至所述微流道旁路内;在所述微流道旁路上设置有所述微流道磨粒检测传感器,由所述微流道旁路将包含磨损颗粒的流体引导至所述微流道磨粒检测传感器。

2. 如权利要求1所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:所述润滑油主回路由内壁光滑的低磁导率的金属材料制成,该金属材料相对磁导率 ≈ 1 。

3. 如权利要求1所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:所述梯度磁场发生器包括磁铁安装支架、第一磁极、第二磁极、第一梯度线圈和第二梯度线圈;所述磁铁安装支架设置在所述润滑油主回路一侧,所述磁铁安装支架上部设置有所述第一磁极,下部设置有与所述第一磁极对称设置的所述第二磁极;位于所述第一磁极与所述第二磁极之间的所述润滑油主回路上设置有所述第一梯度线圈和第二梯度线圈;所述第一磁极、第二磁极产生匀强磁场,通过电流控制器分别向所述第一梯度线圈和第二梯度线圈通入相反的电流,此时在两线圈间会产生反向的磁场,并通过两线圈产生的反向电磁场与磁极产生的匀强磁场相叠加,最终获得所需的梯度磁场。

4. 如权利要求3所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:所述电流控制器包括波形发生器、功率放大器和电流换向器;所述波形发生器产生电流控制信号,该电流控制信号经过功率放大器进行放大产生驱动电流,所述驱动电流经过所述电流换向器后输入所述梯度线圈中。

5. 如权利要求1所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:所述微流道旁路设置一个或两个,且每个所述微流道旁路上都设置有所述微流道磨粒检测传感器。

6. 如权利要求1所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:当磁场梯度 $dH/dx < 0$ 时,两类磨损颗粒所受磁场力方向相同,因此所有颗粒均进入同侧同一个所述微流道旁路中,实现两种磨损颗粒的同侧分离;当磁场梯度 $dH/dx > 0$ 时,两类磨损颗粒所受磁场力方向相反,因此两种颗粒将分别进入一个所述微流道旁路中,实现磨损颗粒的异侧分离。

7. 如权利要求1所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:所述微流道旁路的入口倾斜角及直径的优化方程如下:

流体连续性方程:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

伯努利方程:

$$g dz + \frac{dP}{\rho} + v dv = 0$$

欧拉运动微分方程:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(P)$$

式中, ∇ 为梯度运算符号; $\vec{v}$ 为流体速度; $\vec{f}$ 为流体质量力; g 为颗粒重力加速度; ρ 为流体密度; v 为流体局部速度; P 为流体压力; z 为同一流线上的流体位置; h_f 为管摩擦损失; λ 为阻力系数; l 为管道长度; d 为润滑油主回路1管径; h_j 为管径突变造成的局部阻力; ξ 为局部阻力系数; d_1 为润滑油主回路直径; d_2 为微流道旁路管径; θ 为微流道旁路与润滑油主回路夹角。

8. 如权利要求1所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统, 其特征在于该系统所采用的磨损颗粒分离方法, 包括以下步骤:

1) 为保证润滑油主回路内流体处于层流状态, 设定流体雷诺数为:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

式中, ρ 为流体密度; v 为流体局部速度; μ 为流体粘性系数; d 为润滑油主回路管径;

2) 磨损颗粒通过梯度磁场时所受的磁场力是颗粒分离的关键作用力, 计算磨损颗粒所受的磁场力;

3) 根据磨损颗粒在分离区域中运动时所受的电磁力、重力、浮力及流体粘性阻力, 得到多种力的合力, 并在此合力的作用下进行分离运动:

当磁场梯度 $dH/dx < 0$, 磁场对铁磁性颗粒及非铁磁性颗粒所产生的电磁力方向相同均为吸引力, 由牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = m \cdot a$ 得:

$$m_p \cdot \frac{du_s}{dt} = F_m + G - F_u - F_r = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\vec{B} \times \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \vec{n}] ds + \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho) g - C_D \frac{\pi d^2 \rho \mu_s^2}{8}$$

式中, m_p 为颗粒质量; 颗粒重力 G 、颗粒所受浮力 F_u 、颗粒所受液体阻力 F_r 与颗粒属性和流体属性相关, 而磨粒所受电磁力则与外部电磁场参数有关, 此时通过配置磁场参数使得磨损颗粒受到向下的合力而运动至润滑油主回路底部, 并进入微流道旁路中;

当梯度磁场时 $dH/dx > 0$, 此时铁磁性颗粒仍受到磁场的引力, 颗粒受到向下的合力而向润滑油主回路底部运动; 而非铁磁性颗粒则受到磁场的排斥力, 由牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = m \cdot a$ 得:

$$m_p \cdot \frac{du_s}{dt} = F_m + F_u - G - F_r = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\vec{B} \times \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \vec{n}] ds + \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho - \rho_s) g - C_D \frac{\pi d^2 \rho \mu_s^2}{8}$$

因此通过配置磁场参数, 使非铁磁性颗粒受到向上的合力而向上运动, 实现铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒的异侧分离。

9. 如权利要求8所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统, 其特征在于: 所述流体雷诺数 $Re < 1000$ 。

10. 如权利要求8所述的一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统, 其特征在于: 铁磁性颗粒通过梯度磁场区域时, 所受的磁场力 F_m 为:

$$F_m = \mu_0 V_m \frac{3\chi_m}{\chi_m + 3} (H_a \cdot \nabla) H_a$$

式中 H_a 为颗粒所在位置的外部磁场强度; $\chi_m = (\frac{\mu_m}{\mu_0} - 1)$, μ_m 为铁磁性磨损颗粒的磁导率, μ_0 为真空磁导率, V_m 为磨损颗粒体积;

非铁磁性颗粒所受的电磁力 $\overline{F}_m$ 为:

$$\overline{F}_m = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\overline{B} \times \overline{n}) \overline{B} - \frac{1}{2} B^2 \overline{n}] ds$$

式中, μ_0 为真空磁导率, $\overline{B}$ 为非铁磁性颗粒中磁感应强度分布, B 为磁感应强度, $\overline{n}$ 为非铁磁性颗粒法线方向。

一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种金属颗粒检测系统,特别是关于一种在机械设备润滑油金属磨损颗粒在线检测领域中应用的颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统。

背景技术

[0002] 磨损是机械设备中最常见的故障形式,是影响机械设备正常运行的主要障碍之一。随着现代工业的发展,对生产的连续性和机械设备的可靠性要求不断提高,因而对机械设备进行磨损工况监测和在线故障诊断具有重要意义。电磁式油液在线监测系统由其结构形式简单、温度稳定性好、抗背景噪声能力强,以及能够实时有效的对润滑油液中磨损颗粒的材料属性(铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒)以及粒度进行在线监测,并反映设备磨损状态的变化历程,因此得到了广泛的研究和关注。

[0003] 目前国内外研究机构针对电磁式磨粒检测传感器的研究出现明显的两极化发展趋势,分别为研究满足大流量工程使用传感器及微流道结构传感器,但二者所采用的传感器结构基本相同,主要包括为单线圈结构、双线圈平行结构、三线圈平行结构、三线圈内外层结构以及平面螺旋线圈结构等。其中大流量磨粒检测传感器流体通道一般大于7mm,其典型特点是最大允许流量大,但检测灵敏度及准确性较低,一般可检测磨粒粒度为铁磁性颗粒 $>100\mu\text{m}$,非铁磁性颗粒 $>300\mu\text{m}$,而微流道结构传感器由于其具备较高的检测灵敏度以及在生物、化学等领域的需求近年间得到迅速的发展,其流道直径一般为1~2mm,该类型传感器能够轻易检测到 $30\mu\text{m}$ 铁磁性颗粒,具备较高的检测灵敏度与准确性。随着微纳加工技术的快速发展,研究者将传感器流道孔径进一步缩小至微米级别,并将全部传感器系统设计在一芯片上,逐步形成了“片上实验室”概念,美国Akron大学已成功实现了在芯片上设计完整的磨粒在线监测系统,包括磨粒检测传感器及数据采集系统,该研究中传感器采用双线圈平行结构,流道直径仅 $230\mu\text{m}$,可实现最小 $10\mu\text{m}$ 铁磁性颗粒的在线监测。

[0004] 在该类型传感器的研究中所面临的主要技术瓶颈是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结构,其主要特点在于传感器孔径较小,最大允许流量小但具备较高的检测精度;而大孔径的磨粒检测传感器虽最大允许流量较大,但检测灵敏度相对较低,难以对机械设备中小磨损颗粒进行有效检测。因此,如何解决传感器灵敏度与传感器孔径之间的矛盾成为目前亟需解决的技术问题。

发明内容

[0005] 针对上述问题,本发明的目的是提供一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其能同时实现具有较大的润滑油流量以及较高的检测灵敏度。

[0006] 为实现上述目的,本发明采取以下技术方案:一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统,其特征在于:该系统包括润滑油主回路、梯度磁场发生器、微流道旁路和微流道磨粒检测传感器;机械设备中的润滑油通过所述润滑油主回路流回油箱,磨损颗粒随润滑油同步运动,由所述润滑油主回路使得油液在回路内部处于层流状态;所述润滑油主回路上

设置有所述微流道旁路,所述微流道旁路与所述润滑油主回路之间具有夹角;沿油液流动方向,位于所述微流道旁路前端的所述润滑油主回路上设置有所述梯度磁场发生器,由所述梯度磁场发生器产生的梯度磁场覆盖所述微流道旁路的入口,通过该梯度磁场将油液中的磨损颗粒分离至所述微流道旁路内;在所述微流道旁路上设置有所述微流道磨粒检测传感器,由所述微流道旁路将包含磨损颗粒的流体引导至所述微流道磨粒检测传感器。

[0007] 进一步,所述润滑油主回路由内壁光滑的低磁导率的金属材料制成,该金属材料相对磁导率 ≈ 1 。

[0008] 进一步,所述梯度磁场发生器包括磁铁安装支架、第一磁极、第二磁极、第一梯度线圈和第二梯度线圈;所述磁铁安装支架设置在所述润滑油主回路一侧,所述磁铁安装支架上部设置有所述第一磁极,下部设置有与所述第一磁极对称设置的所述第二磁极;位于所述第一磁极与所述第二磁极之间的所述润滑油主回路上设置有所述第一梯度线圈和第二梯度线圈;所述第一磁极、第二磁极产生匀强磁场,通过电流控制器分别向所述第一梯度线圈和第二梯度线圈通入相反的电流,此时在两线圈间会产生反向的磁场,并通过两线圈产生的反向电磁场与磁极产生的匀强磁场相叠加,最终获得所需的梯度磁场。

[0009] 进一步,所述电流控制器包括波形发生器、功率放大器和电流换向器;所述波形发生器产生电流控制信号,该电流控制信号经过功率放大器进行放大产生驱动电流,所述驱动电流经过所述电流换向器后输入所述梯度线圈中。

[0010] 进一步,所述微流道旁路设置一个或两个,且每个所述微流道旁路上都设置有所述微流道磨粒检测传感器。

[0011] 进一步,当磁场梯度 $dH/dx < 0$ 时,两类磨损颗粒所受磁场力方向相同,因此所有颗粒均进入同侧同一个所述微流道旁路中,实现两种磨损颗粒的同侧分离;当磁场梯度 $dH/dx > 0$ 时,两类磨损颗粒所受磁场力方向相反,因此两种颗粒将分别进入一个所述微流道旁路中,实现磨损颗粒的异侧分离。

[0012] 进一步,所述微流道旁路的入口倾斜角及直径的优化方程如下:

[0013] 流体连续性方程:

$$[0014] \quad \nabla \cdot (\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

[0015] 伯努利方程:

$$[0016] \quad g dz + \frac{dP}{\rho} + v dv = 0$$

[0017] 欧拉运动微分方程:

$$[0018] \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(P)$$

[0019] 式中, ∇ 为梯度运算符号; $\vec{v}$ 为流体速度; $\vec{f}$ 为流体质量力; g 为颗粒重力加速度; ρ 为流体密度; v 为流体局部速度; P 为流体压力; z 为同一流线上的流体位置; h_f 为管摩擦损失; λ 为阻力系数; l 为管道长度; d 为润滑油主回路管径; h_j 为管径突变造成的局部阻力; ξ 为局部阻力系数; d_1 为润滑油主回路直径; d_2 为微流道旁路管径; θ 为微流道旁路与润滑油主回路夹角。

[0020] 进一步,该系统所采用的磨损颗粒分离方法,包括以下步骤:1) 为保证润滑油主

回路内流体处于层流状态,设定流体雷诺数为:

$$[0021] \quad Re = \frac{\rho v d}{\mu},$$

[0022] 式中, ρ 为流体密度; v 为流体局部速度; μ 为流体粘性系数; d 为润滑油主回路管径;2) 磨损颗粒通过梯度磁场时所受的磁场力是颗粒分离的关键作用力,计算磨损颗粒所受的磁场力;3) 根据磨损颗粒在分离区域中运动时所受的电磁力、重力、浮力及流体粘性阻力,得到多种力的合力,并在此合力的作用下进行分离运动;当磁场梯度 $dH/dx < 0$,磁场对铁磁性颗粒及非铁磁性颗粒所产生的电磁力方向相同均为吸引力,由牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = m \cdot a$ 得:

$$[0023] \quad m_p \cdot \frac{du_s}{dt} = F_m + G - F_u - F_r = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\vec{B} \times \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \vec{n}] ds + \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho) g - C_D \frac{\pi d^2 \rho \mu_s^2}{8}$$

[0024] 式中, m_p 为颗粒质量;颗粒重力 G 、颗粒所受浮力 F_u 、颗粒所受液体阻力 F_r 与颗粒属性和流体属性相关,而磨粒所受电磁力则与外部电磁场参数有关,此时通过配置磁场参数使得磨损颗粒受到向下的合力而运动至润滑油主回路底部,并进入微流道旁路中;当梯度磁场时 $dH/dx > 0$,此时铁磁性颗粒仍受到磁场的引力,颗粒受到向下的合力而向润滑油主回路底部运动;而非铁磁性颗粒则受到磁场的排斥力,由牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = m \cdot a$ 得:

$$[0025] \quad m_p \cdot \frac{du_s}{dt} = F_m + F_u - G - F_r = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\vec{B} \times \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \vec{n}] ds + \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho - \rho_s) g - C_D \frac{\pi d^2 \rho \mu_s^2}{8}$$

[0026] 因此通过配置磁场参数,使非铁磁性颗粒受到向上的合力而向上运动,实现铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒的异侧分离。

[0027] 进一步,所述流体雷诺数 $Re < 1000$ 。

[0028] 进一步,铁磁性颗粒通过梯度磁场区域时,所受的磁场力 F_m 为:

$$[0029] \quad F_m = \mu_0 V_m \frac{3\chi_m}{\chi_m + 3} (H_a \cdot \nabla) H_a$$

[0030] 式中 H_a 为颗粒所在位置的外部磁场强度; $\chi_m = \left(\frac{\mu_m}{\mu_0} - 1 \right)$, μ_m 为铁磁性磨损颗粒的磁导率, μ_0 为真空磁导率, V_m 为磨损颗粒体积;

[0031] 非铁磁性颗粒所受的电磁力 $\vec{F}_m$ 为:

$$[0032] \quad \vec{F}_m = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\vec{B} \times \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \vec{n}] ds$$

[0033] 式中, μ_0 为真空磁导率, $\vec{B}$ 为非铁磁性颗粒中磁感应强度分布, B 为磁感应强度, $\vec{n}$ 为非铁磁性颗粒法线方向。

[0034] 本发明由于采取以上技术方案,其具有以下优点:1、本发明通过施加在油液管路外部的电磁场对油液中的磨损颗粒产生吸引力或排斥力,使得磨损颗粒产生垂直于流体流动方向的运动,而实现磨损颗粒与润滑油液逐步分离,并最终使其脱离润滑油主回路而进入微流道旁路中,通过在旁路上安装微流道结构磨粒检测传感器对磨损颗粒进行检测,该发明可同时实现较大的润滑油流量以及较高的检测灵敏度与准确性。2、本发明中磨粒在线监测传感器采用了微流道结构,大大提高了传感器灵敏度。3、本发明中通过调整梯度磁场的布置方式,可轻松实现铁磁性金属颗粒及非铁磁性金属颗粒的同侧分离检测和异

侧分离检测。4、本发明中通过颗粒分离技术使得磨损颗粒主要分布在微流道旁路内，大大改善了主润滑回路中润滑油液的洁净程度。

[0035] 综上所述，本发明融合了大孔径传感器允许流量大和微流道传感器检测灵敏度高双重优点，可同时满足大型设备及工程对流量以及微小磨粒检测的要求。可以广泛应用于重型机械设备润滑油金属磨损颗粒在线检测领域中，尤其适用于大润滑油流量场合。

附图说明

[0036] 图1是本发明实施例中单向分离式磨粒检测传感器示意图；

[0037] 图2是本发明实施例中梯度磁场中铁磁性颗粒内部磁场分布示意图；

[0038] 图3是本发明实施例中负梯度磁场中非铁磁性颗粒涡流示意图；

[0039] 图4是本发明实施例中双向分离式磨粒检测传感器示意图；

[0040] 图5是本发明实施例中微流道磨粒检测传感器系统示意图；

[0041] 图6a是本发明实施例中金属颗粒在负梯度磁场-流场中受力分析图；

[0042] 图6b是本发明实施例中金属颗粒在正梯度磁场-流场中受力分析图；

[0043] 图7a是本发明实施例中磁场梯度 $dH/dx < 0$ 时，磨损颗粒在正梯度磁场-流场中受力分析图；

[0044] 图7b是本发明实施例中磁场梯度 $dH/dx > 0$ 时，磨损颗粒在正梯度磁场-流场中受力分析图。

具体实施方式

[0045] 本发明旨在解决大流量的电磁式磨粒监测传感器灵敏度低的问题，机械设备润滑油中的磨损颗粒主要为金属磨损颗粒，包括铁磁性颗粒（铁、钢）和非铁磁性颗粒（铜、铝及其合金等），磨损颗粒随油液沿管道回路向前运动，此时通过在管道周围施加梯度磁场，使得磨粒通过该区域时受到电磁场产生的垂直于油液流动方向的吸引力或排斥力（力属性与颗粒材料和磁场梯度正负有关），导致磨损颗粒沿管路轴向运动的同时，产生径向方向的运动，实现磨损颗粒与润滑油液逐步分离，并沿传感器管壁向前运动，而最终脱离传感器主管路进入微流道旁路中。并通过对微流道旁路流道直径与入口倾斜角度进行优化，以保证润滑油液中较大体积的磨损颗粒全部运动至旁路管道中，而大量只包含较少微小磨损颗粒的润滑油液仍通过主回路向前运动。最终在微流道旁路中安装微流道结构磨粒检测传感器对磨损颗粒进行检测，可充分发挥微流道磨粒检测器检测灵敏度高的优点，该发明可同时实现较大的润滑油流量以及较高的检测灵敏度。下面结合附图对本发明进行详细的描述。

[0046] 如图1所示，本发明提供一种颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统，其包括润滑油主回路1、梯度磁场发生器2、微流道旁路3和微流道磨粒检测传感器4。机械设备中大量的润滑油通过润滑油主回路1流回油箱，磨损颗粒（铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒）随润滑油同步运动，由润滑油主回路1保证大流量油液的顺利通过，并使得油液在回路内部处于层流状态，以确保磨损颗粒通过磁场后在油液中的相对位置固定化。润滑油主回路1上设置有微流道旁路3，微流道旁路3与润滑油主回路1之间具有夹角。沿油液流动方向，位于微流道旁路3前端的润滑油主回路1上设置有梯度磁场发生器2，由梯度磁场发生器2产生的梯

度磁场覆盖微流道旁路3的入口,通过梯度磁场发生器2产生的梯度磁场将油液中的磨损颗粒分离至微流道旁路3内。在微流道旁路3上还设置有微流道磨粒检测传感器4,由微流道旁路3将包含磨损颗粒的流体引导至微流道磨粒检测传感器4,实现磨损颗粒的在线高精度检测;同时去除磨损颗粒的大量润滑油仍沿润滑油主回路1继续完成循环。

[0047] 上述各实施例中,如图2所示,润滑油主回路1由内壁光滑的低磁导率的金属材料制成,其主要实现:(1)润滑油管路中油液流体状态复杂多变(层流、过渡流、湍流),其中过渡流和湍流中的流体旋涡会使得磨损颗粒运动情况发生急剧变化,因此通过光滑长直导管,对进入传感器主管路的润滑油流动状态进行调整,使流体处于层流状态(雷诺数 $Re < 1000$ 即可)。(2)高磁导率的材料将引起磁屏蔽效应,使得润滑油主回路1内部磁场强度大大减弱,因此为避免磁屏蔽效应传感器主管路材料采用奥氏体不锈钢制成,其材料相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ (3)保证传感器有较大的允许流量。

[0048] 上述各实施例中,如图2所示,梯度磁场发生器2包括磁铁安装支架5、第一磁极6、第二磁极7、第一梯度线圈8和第二梯度线圈9。磁铁安装支架5设置在润滑油主回路1一侧;磁铁安装支架5上部设置有第一磁极6,下部设置有与第一磁极6对称设置的第二磁极7。位于第一磁极6与第二磁极7之间的润滑油主回路1上设置有第一梯度线圈8和第二梯度线圈9,两梯度线圈串联连接。其中,第一磁极6、第二磁极7在该区域内产生匀强磁场,通过电流控制器分别向第一梯度线圈8和第二梯度线圈9通入相反的电流,此时在两线圈间会产生反向的磁场,并通过两线圈产生的反向电磁场与磁极产生的匀强磁场相叠加,最终获得所需的梯度磁场。

[0049] 如图3所示,电流控制器控制第一梯度线圈8和第二梯度线圈9内电流大小及方向,电流控制器包括波形发生器、功率放大器和电流换向器。其中波形发生器产生电流控制信号,该电流控制信号经过功率放大器进行放大产生驱动电流,驱动电流经过电流换向器后输入梯度线圈中。通过调整波形发生器可对梯度线圈内电流大小进行调整,以改变磁场梯度的大小。电流换向器实现两梯度线圈内电流方向的改变,以调整磁场梯度的正负。

[0050] 上述各实施例中,微流道旁路3设置一个或两个,且每个微流道旁路3上都设置有微流道磨粒检测传感器4。如图4所示,由于微流道磨粒检测传感器4对铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒的最佳检测参数是不同的,因此通过微流道磨粒检测传感器4对磨损颗粒按照材料属性进行分离后独立检测,可充分发挥微流道磨粒检测传感器4的性能,提高磨损颗粒的检测效果。

[0051] 如图1、图4所示,铁磁性磨损颗粒通过梯度磁场时,会被外部磁场磁化,当通过该磁场区域后由于磁滞现象,颗粒内部仍保留一定的磁场。此部分剩余磁场将使得磨损颗粒通过微流道磨粒检测传感器4时,增大微流道磨粒检测传感器4内部的磁场变化,以使其产生更强的感应电动势,增强了铁磁性颗粒的检测效果。

[0052] 上述实施例中,通过梯度磁场发生器2产生的梯度磁场将油液中的磨损颗粒分离至微流道旁路3内过程如下:当磨损颗粒随润滑油液在润滑油主回路1中运动时,由于磁场区域内的场强为梯度磁场,因此对于金属磨损颗粒而言,铁磁性颗粒会产生磁化效应而非铁磁性颗粒则会产生涡流效应,施加在润滑油主回路1附近的磁场对管路内部金属磨损颗粒则会产生垂直于颗粒运动方向的电磁力,此时磨损颗粒在电磁力、流体阻力及重力的综合作用下将沿管壁发生聚集作用,并以此效应为基础实现磨损颗粒的分离。

[0053] 如图5所示,铁磁性颗粒的分离方法为颗粒经过该梯度磁场区域时会同时产生磁化效应和涡流效应,但由于其磁化效应强度远大于涡流效应,因此铁磁性颗粒中涡流可被忽略。此时颗粒内部磁场分布近似为匀强磁场,方向与外磁场方向相同,磁场强度约为3倍外部磁场强度,颗粒受到外磁场较强的吸引力,使其发生沿管路径向的运动。由于颗粒所受的引力与颗粒体积成正比,因此较大的磨损颗粒将优先与油液发生分离,并最终运动至润滑油主回路1的管路底部而随油液进入微流道旁路3中。

[0054] 如图6a、图6b所示,非铁磁性颗粒的分离方法为颗粒经过该梯度磁场区域时会产生涡流效应,即在颗粒内部或表面产生涡电流,涡流效应强度与磁场梯度、颗粒体积及材料参数相关。由楞次定律可知该涡流产生的感生磁场是为了抵御外部磁场变化。因此其涡流方向及其所受电磁力的方向与外磁场梯度值的正负有关。当磁场梯度 $dH/dx > 0$ 时,分布在非铁磁性颗粒内部或表面的涡电流所产生的感生磁场与外部磁场方向相反,此时非铁磁性颗粒受到磁场的排斥力,向远离磁场的方向运动,此时采用两个微流道旁路3。当磁场梯度 $dH/dx < 0$ 时,分布在非铁磁性颗粒内部或表面的涡电流所产生的感生磁场与外部磁场方向相同,此时非铁磁性颗粒受到磁场的吸引力而向靠近磁场的方向运动,此时采用一个微流道旁路3。

[0055] 如图4所示,通过调整梯度磁场发生器2参数,进而对磁场梯度(dH/dx)进行调节,可实现铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒的同侧分离和异侧分离。当磁场梯度 $dH/dx < 0$ 时,两类磨损颗粒所受磁场力方向相同,因此所有颗粒均进入同侧同一个微流道旁路3中,实现两种磨损颗粒的同侧分离。当磁场梯度 $dH/dx > 0$ 时,两类磨损颗粒所受磁场力方向相反,因此两种颗粒将分别进入两侧微流道旁路(即分别进入一个微流道旁路3)中,实现磨损颗粒的异侧分离。

[0056] 上述各实施例中,如图1、图4所示,由于润滑油主回路1与微流道旁路3管道直径差异较大,在微流道旁路3的入口处,由于旁路管径的突然缩小,旁路中流体阻力突然增大,将对旁路入口的流体产生明显的扰动,容易使得微流道旁路3入口处的流体产生局部湍流造成颗粒运动状态发生突变,而使得磨损颗粒在微流道旁路3入口处运动状态复杂。同时直径过小的旁路管道3将使得管道内流体所受的局部阻力急剧增加,而造成润滑油主回路1中的流体难以流入微流道旁路3中,因此为了保证较好的颗粒分离效果,需要对微流道旁路3的入口倾斜角及直径进行优化,力求保证分离效率的情况下最小化旁路管径,以保证流体能够平稳流入微流道旁路。优化方程如下:

[0057] 流体连续性方程:

$$[0058] \quad \nabla \cdot (\rho \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

[0059] 伯努利方程:

$$[0060] \quad g dz + \frac{dP}{\rho} + v dv = 0 \quad (2)$$

[0061] 欧拉运动微分方程:

$$[0062] \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(P) \quad (3)$$

[0063] 流体在管路中所受阻力:

$$[0064] \quad h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (4)$$

[0065] 流体在微流道入口处所受局部阻力为：

$$[0066] \quad h_j = \xi(d_1, d_2, \theta) \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

[0067] 式中， ∇ 为梯度运算符号； $\vec{v}$ 为流体速度； $\vec{f}$ 为流体质量力； g 为颗粒重力加速度； ρ 为流体密度； v 为流体局部速度； P 为流体压力； z 为同一流线上的流体位置； h_f 为管摩擦损失； λ 为阻力系数； l 为管道长度； d 为润滑油主回路1管径； h_j 为管径突变造成的局部阻力； ξ 为局部阻力系数； d_1 为润滑油主回路直径； d_2 为微流道旁路管径； θ 为微流道旁路与润滑油主回路夹角。

[0068] 上述各实施例中，微流道磨粒检测传感器4采用三线圈式电感性磨损颗粒传感器，其具体结构已经在公开号为CN107340544的专利中公开，在此不再赘述。采用微流道磨粒检测传感器4能大大缩小了传统磨粒检测传感器的流道孔径，而采用微流道结构，极大的提高传感器的检测灵敏度和准确性。

[0069] 本发明的颗粒分离式的金属颗粒在线检测系统中所采用的磨损颗粒分离方法，包括以下步骤：

[0070] 1) 由于磨损颗粒在润滑油管路1中运动时，油液的流动状态对其影响非常严重，处于过渡流或湍流的流体将使得磨损颗粒产生难以控制的升降运动，因此为了保证较好的颗粒分离效率，需保证润滑油主回路1内流体处于层流状态，设定流体雷诺数为：

$$[0071] \quad Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (6)$$

[0072] 式中， ρ 为流体密度； v 为流体局部速度； μ 为流体粘性系数； d 为特征长度，本发明中为润滑油主回路1管径；

[0073] 流体雷诺数优选为 $Re < 1000$ 。

[0074] 2) 磨损颗粒通过梯度磁场时所受的磁场力是颗粒分离的关键作用力，计算磨损颗粒所受的磁场力：

[0075] 2.1) 铁磁性颗粒通过梯度磁场区域时，由于可忽略其涡流效应的影响，因此所受的磁场力 F_m 为：

$$[0076] \quad F_m = \mu_0 V_m \frac{3\chi_m}{\chi_m + 3} (H_a \cdot \nabla) H_a \quad (7)$$

[0077] 式中 H_a 为颗粒所在位置的外部磁场强度； $\chi_m = \left(\frac{\mu_m}{\mu_0} - 1\right)$ ， μ_m 为铁磁性磨损颗粒的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率，铁磁性颗粒所受的磁场力使其趋向于最强磁场处； V_m 为磨损颗粒体积。

[0078] 2.2) 非铁磁性颗粒在经过该梯度磁场时会产生涡流效应，其涡流效应的强度与磁场梯度、颗粒材料属性、颗粒通过磁场速度等参数有关。非铁磁性颗粒产生的涡流及磁感应强度分布可通过麦克斯韦方程组进行计算。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$[0079] \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \delta$$

[0080] 式中, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $\mathbf{J}$ 为电流密度, δ 为电荷密度, $\mathbf{D}$ 为位移电流。

[0081] 此时非铁磁性颗粒所受的电磁力 $\overline{\mathbf{F}}_m$ 为:

$$[0082] \quad \overline{\mathbf{F}}_m = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\overline{\mathbf{B}} \times \overline{\mathbf{n}}) \overline{\mathbf{B}} - \frac{1}{2} B^2 \overline{\mathbf{n}}] d\mathbf{s} \quad (9)$$

[0083] 式中, μ_0 为真空磁导率, $\overline{\mathbf{B}}$ 为非铁磁性颗粒中磁感应强度分布 (由麦克斯韦方程组计算得到), $\overline{\mathbf{n}}$ 为非铁磁性颗粒法线方向, $d\mathbf{s}$ 为面积微元。

[0084] 非铁磁性颗粒所受的电磁力方向与磁场梯度值有关, 由楞次定律 (感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化) 可知, 当磁场梯度 $dH/dx > 0$ 时, 非铁磁性颗粒受到磁场的排斥力而趋于向磁场较弱的方向运动; 当磁场梯度 $dH/dx < 0$ 时, 非铁磁性颗粒受到磁场的吸引力而趋于向磁场较强的方向运动。

[0085] 3) 磨损颗粒在分离区域中运动时除了所受的电磁力外, 还受到重力、浮力及流体粘性阻力的作用, 得到多种力的合力, 并在此合力的作用下进行分离运动。

[0086] 颗粒本身重力 G 为:

$$[0087] \quad G = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_s g \quad (10)$$

[0088] 式中 d 为颗粒直径, ρ_s 为颗粒密度, g 为颗粒重力加速度;

[0089] 颗粒所受浮力 F_u 为:

$$[0090] \quad F_u = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho g \quad (11)$$

[0091] 式中, ρ 为流体密度;

[0092] 颗粒所受液体的阻力 F_r 为:

$$[0093] \quad F_r = C_D \frac{\pi d^2 \rho \mu_s^2}{8} \quad (12)$$

[0094] 式中, C_D 为阻力系数, μ_s 为颗粒沉降速度。

[0095] 在图1所示传感器结构下, 当磁场梯度 $dH/dx < 0$, 因此磁场对铁磁性颗粒及非铁磁性颗粒所产生的电磁力方向相同均为吸引力, 此时磨损颗粒在垂直于运动方向的受力分析如图7a所示。由牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = m \cdot a$ 可得:

$$[0096] \quad m_p \frac{d\mu_s}{dt} = F_m + G - F_u - F_r = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\overline{\mathbf{B}} \times \overline{\mathbf{n}}) \overline{\mathbf{B}} - \frac{1}{2} B^2 \overline{\mathbf{n}}] d\mathbf{s} + \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_s - \rho) g - C_D \frac{\pi d^2 \rho \mu_s^2}{8} \quad (13)$$

[0097] 其中, m_p 为颗粒质量。上式中颗粒重力 G 、颗粒所受浮力 F_u 、颗粒所受液体阻力 F_r 与颗粒属性和流体属性相关, 而磨粒所受电磁力则与外部电磁场参数有关。此时通过配置磁场参数可使得磨损颗粒受到向下的合力而运动至润滑油主回路底部, 并进入微流道旁路3

中。

[0098] 如图6所示的传感器结构下,当梯度磁场时 $dH/dx > 0$,此时铁磁性颗粒仍受到磁场的引力,因此其受力状态仍如图7b所示,颗粒受到向下的合力而向润滑油主回路底部运动;而非铁磁性颗粒则受到磁场的排斥力,为了实现非铁磁性颗粒沿上管壁运动,由牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = m \cdot a$ 可得:

$$[0099] \quad m_p \cdot \frac{du_s}{dt} = F_m + F_u - G - F_r = \frac{1}{\mu_0} \oint_s [(\vec{B} \times \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \vec{n}] ds + \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho - \rho_s) g - C_D \frac{\pi d^2 \rho \mu_s^2}{8} \quad (14)$$

[0100] 因此通过配置磁场参数,可使得非铁磁性颗粒受到向上的合力而向上运动,以此实现铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒的异侧分离。例如:当铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒同向运动时,为兼顾两种磨损颗粒的检测,微流道磨粒检测传感器4激励频率采用107kHz;当两种颗粒异向分离时,可对铁磁性颗粒及非铁磁性颗粒进行分别检测,为保证两种颗粒的有效检测,铁磁性颗粒的微流道磨粒检测传感器4激励频率采用107kHz,而非铁磁性颗粒微流道磨粒检测传感器4激励频率采用300kHz。

[0101] 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。

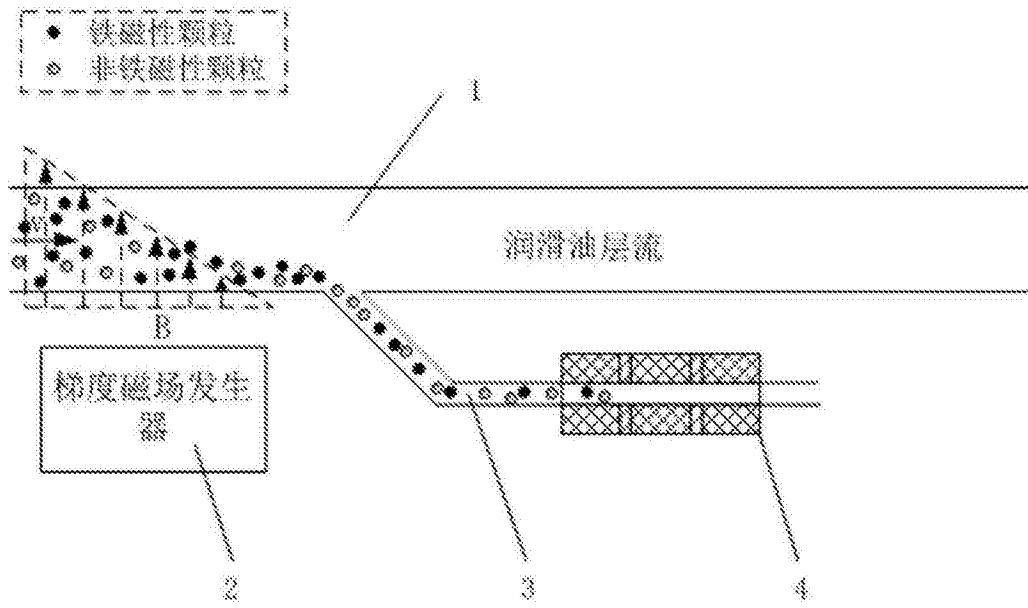


图1

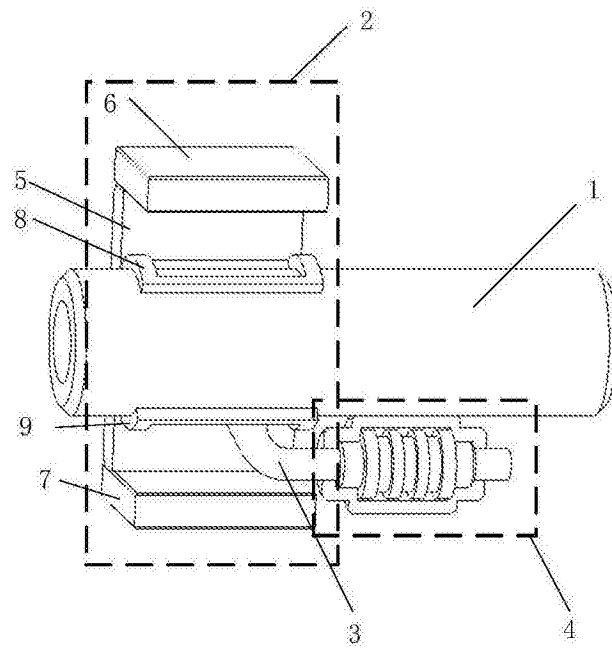


图2

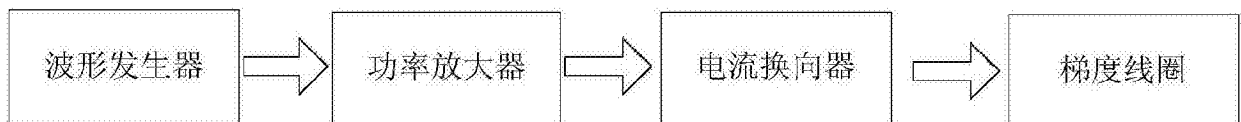


图3

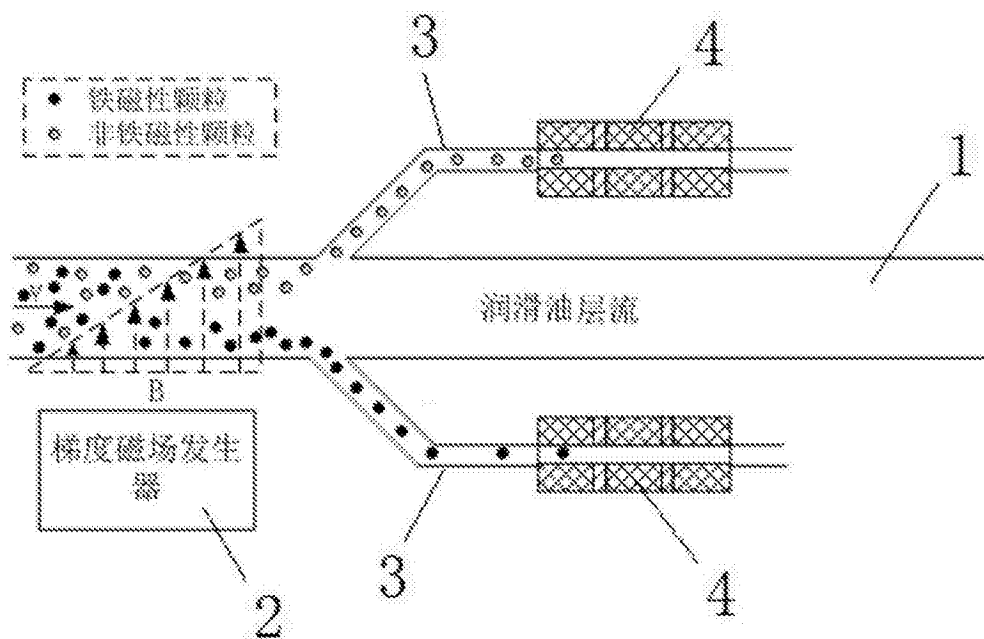


图4

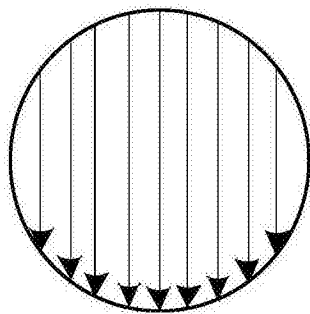


图5

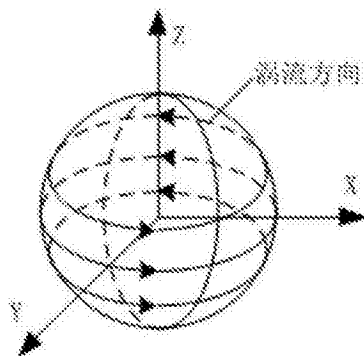


图6a

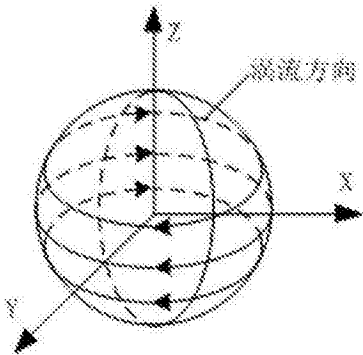


图6b

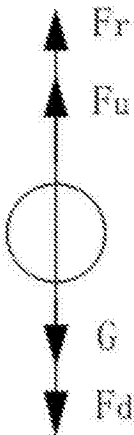


图7a

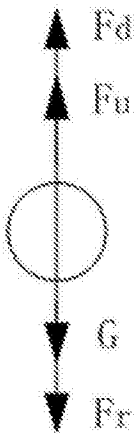


图7b