

文章编号: 2095-2163(2020)04-0129-05

中图分类号: TP391

文献标志码: A

# 基于 ANSYS Maxwell 的传感器涡流场仿真与分析

商英丽, 张洋, 李庆宇, 王琦, 徐冲

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 磨粒监测技术在状态监测和故障诊断领域,因其准确性高,实用性好,故得出的结论在领域内有着极高的应用价值。本文将传感器设计为电涡流式,阐述了传感器设计原理。利用仿真软件 ANSYS Maxwell 进行了磁场仿真,分析了仿真结果。  
**关键词:** 油液监测; 电涡流; 传感器; 有限元仿真

## Simulation and analysis of sensor eddy current field based on ansys maxwell

SHANG Yingli, ZHANG Yang, LI Qingyu, WANG Qi, XU Chong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**【Abstract】** Abrasive particle monitoring technology has a great prospect in the field of condition monitoring and fault diagnosis. At the same time, due to its high accuracy and good practicability, the conclusion is of high application value in the field. In this paper, the design principle of the sensor is described. The magnetic field simulation was carried out by ANSYS and Maxwell, and the simulation results were analyzed.

**【Key words】** Oil monitoring; Eddy current; Sensor; Finite element simulation

### 0 引言

油液监测技术是状态监测及故障诊断的主要方法之一。金属磨粒监测技术作为油液监测内容,在机械故障提前预警方面起着重要的作用。早期金属磨粒信息的获取意味着损失的减少及安全性的提高,而目前常用于金属磨粒监测的电磁式磨粒传感器,易被磨粒连续所影响,而导致监测失效。因此,提出了基于电涡流原理的传感器监测技术,用以进行磨粒监测,从而提高监测精度与效率。本文主要研究了电涡流传感器的影响因素,结合理论依据以及仿真软件 ANSYS Maxwell,对主要参数进行仿真并进行了结果分析,为后续电涡流技术在油液监测领域的发展做了铺垫。

### 1 电涡流传感器

#### 1.1 检测原理

金属磨粒的监测主要采用电涡流检测原理,如图1所示。当传感器中的感应线圈接通高频交变电流  $I_1$  后,由电磁感应定律可知,传感器内部将有交变磁场  $H_1$  产生。磁场能量消失时,表明线圈周围没有金属磨粒;当磁场周围出现金属磨粒时,电路的磁通量将产生连续性变化,磨粒表面将出现电涡流  $I_2$

及交变磁场  $H_2$ 。此时,  $H_2$  与  $H_1$  的方向正好相反,在这样的情况下感应线圈的交变磁场明显变化。根据能量守恒,当感应线圈中存在金属磨粒,金属磨粒内部能量衰减,能量衰减导致感应线圈电动势的减少<sup>[1]</sup>。

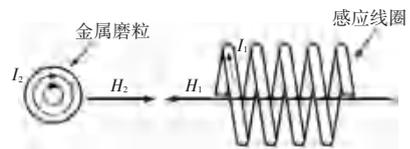


图1 电涡流检测原理

Fig. 1 Eddy current testing principle

#### 1.2 等效电路

为研究金属磨粒的尺寸大小、感应线圈的相关参数特征、材料性能与电流产生的涡流传感器之间的输出相应关系及装置里有无磨粒的状态,可以利用等效电路来表达。等效电路如图2所示。假设不存在金属磨粒触碰感应线圈时,将一个电阻  $R$  和一个电感  $L$  构成的等效电路近似的当作一个传感器感应线圈,如图2(a)所示。当线圈的状态是空载的情况,磁场和能量全部为零;当带有金属性质的磨粒靠近感应线圈时,可以视为短回路,直接与传感器感应

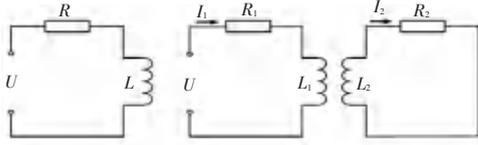
**基金项目:** 上海工程技术大学校级创新创业项目。

**作者简介:** 商英丽(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:状态监测;张洋(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:安全性评估与持续适航;李庆宇(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:自动驾驶;王琦(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:汽车被动安全;徐冲(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:民用航空器污染物排放检测与评估。

**通讯作者:** 李庆宇 Email: 407796420@qq.com

收稿日期: 2019-10-31

圈磁性相接,将感应线圈当成变压器原边,将金属性质的磨粒假设为变压器副边的情况,如下图2(b)所示。图2(b)中,电阻 $R_1$ 视作感应线圈电阻,阻抗 $L_1$ 视作一个感应线圈电感,电阻 $R_2$ 视作带有金属性质的磨粒电阻,阻抗 $L_2$ 视作带金属性质的磨粒电感, $U$ 是一个励磁电压元件,公式(5)中的 $M$ 是感应线圈与带金属性质的磨粒之间的互感系数<sup>[2]</sup>。



(a) 空载等效电路

(b) 负载等效电路

(a) No load equivalent circuit (b) Load equivalent circuit

图2 涡流传感器的等效电路<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Equivalent circuit of eddy current sensor

利用克希霍夫定律原理,对图2模拟的等效电路研究可知,求解出2个回路的电压平衡方程如下:

$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1, \\ R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

等效阻抗为:

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega \frac{\omega L_1}{\omega} - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}. \quad (2)$$

等效电感为:

$$L = L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (3)$$

品质因素为:

$$Q = \frac{L_m(Z)}{R_e(Z)} = \frac{Q_0 \frac{\omega L_1}{\omega} - \frac{L_2 \omega^2 M^2}{L_1 Z_2^2}}{1 + \frac{R_2 \omega^2 M^2}{R_1 Z_2^2}}. \quad (4)$$

其中, $Q_0$ 表示无磨粒时传感器感应线圈的品质

因素, $Q_0 = \frac{\omega L_1}{R_1}$ ; $Z_2$ 表示磨粒的等效阻抗, $Z_2 =$

$\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$ ;互感系数,公式如下<sup>[3]</sup>:

$$M = \frac{\mu_0 \pi a^2 b^2}{2(a^2 + b^2 + d^2)^{3/2}}. \quad (5)$$

其中, $a$ 表示线圈直径; $b$ 表示磨粒直径; $d$ 为磨粒距线圈的距离; $\mu_0$ 表示真空磁导系数。

### 1.3 对电涡流传感器输出参数的影响

根据以上分析内容,可得出磨粒的材质、尺寸等

因素都会影响传感器的输出结果。同时,线圈的各项参数也会影响传感器输出结果。因此,后续的仿真分析将变量定为磨粒的尺寸、材质,线圈的激励频率及内径。

## 2 利用 ANSYS Maxwell 进行传感器涡流场仿真

仿真电磁场主要采用 ANSYS Maxwell 软件,将麦克斯韦方程组的微分形式应用于软件底层算法中,利用自适应分析作为网格剖分方法来分析。通过离散形式的数值计算方法,计算含有庞大矩阵的电磁场问题<sup>[5-6]</sup>。仿真流程如图3所示。

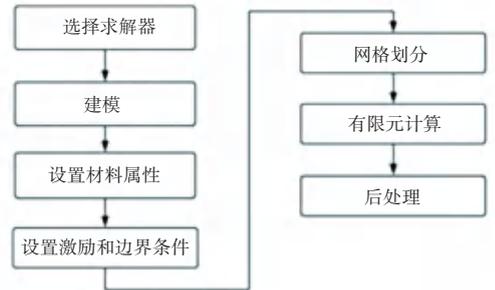


图3 ANSYS Maxwell 仿真流程

Fig. 3 ANSYS Maxwell simulation flow chart

### 2.1 建模

本文选用的研究对象模型为感应线圈和金属磨粒,在 ANSYS Maxwell 中建模。为便于后续的分析,建模前需将传感器模型进行简化为三部分:金属磨粒、感应线圈、真空求解域。由于本文所涉及的传感器因感应线圈长度较短,故采用三维建模。为了计算的方便与效率,将金属磨粒简化为球形进行仿真处理,感应线圈简化为同心的多匝线圈。由于本文目的是改进磨粒连续性对金属磨粒传感器的影响,因此其感应线圈的长度要尽量短,匝数要尽量少,而在 ANSYS Maxwell 仿真环境下,可近似看成理想环境。因此,将线圈匝数设置成一匝,进而等效为一个圆环。求解域设置为偏离模型 30%,仿真模型如图4所示。

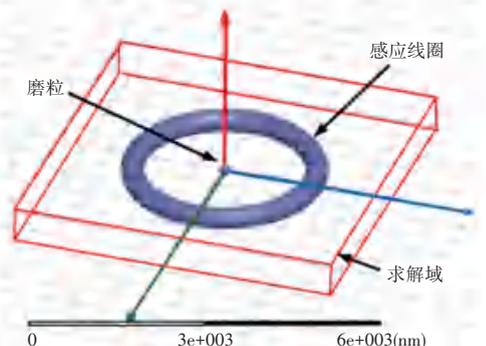


图4 仿真模型图

Fig. 4 Simulation model diagram

### 2.2 网格划分

网格划分的好坏是通过网格质量来区分的,当网格密度过低或者网格质量较差时,某些单元的计算会发生畸变,结果偏离正常值,甚至会造成计算无法收敛的结果。

划分网格时,为节省后期的网格划分时间、提高计算精度,需对模型进行预处理。对于不同的模型,需要采用不同的网格参数。本文将磨粒和感应线圈

的网格划分进行手动加密处理,对求解域用自动网格划分。仿真结束后,金属磨粒、感应线圈及求解域的网格划分质量如图 5 所示。

### 2.3 边界条件、激励源及求解对象设置

首先建立一个激励源的施加面,在感应线圈上分割出两个横截面。再将两个横截面分成两个独立的切面。最后选择切面,给线圈施加大小为 1 A,相位为 0° 的电流激励,如图 6 所示。

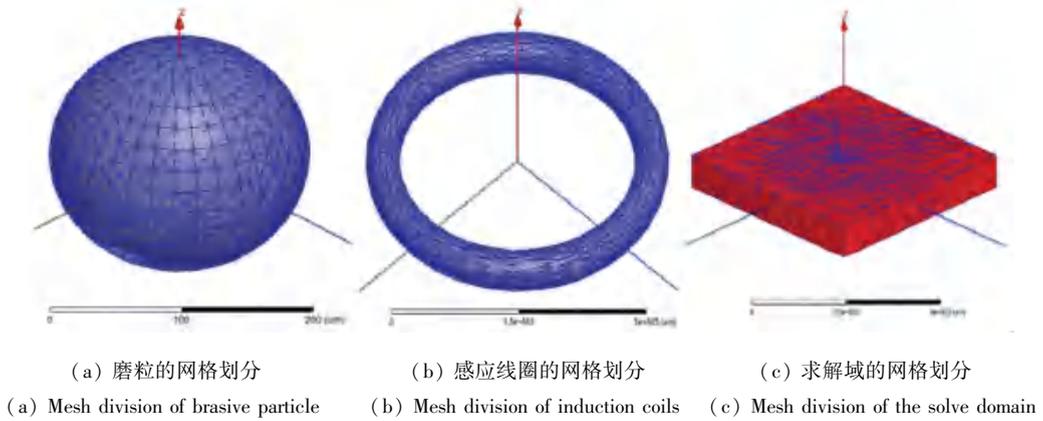


图 5 网格划分

Fig. 5 Meshing

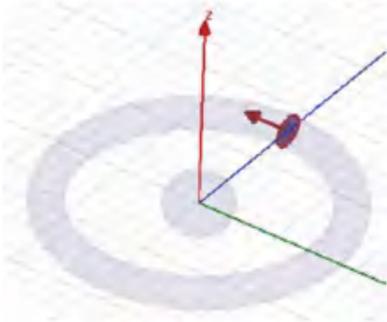


图 6 电流源激励图

Fig. 6 Current source excitation diagram

将整体进行网格划分并设置求解选项参数。在 ANASYS Maxwell 中,根据本文仿真要求设置涡流场求解参数,收敛步数最大值设为 20,其他参数选用默认值。输出结果如图 7、8 所示。

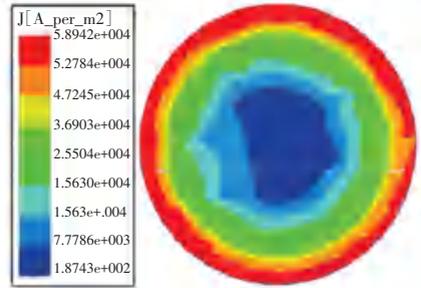


图 8 XOY 剖面的涡流密度云图

Fig. 8 Eddy current density cloud map of XOY profile

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 磨粒尺寸结果分析

本文采用 ANSYS Maxwell 进行仿真分析。利用上述提出的仿真方法,采用控制变量法。在 280 MHz 下,线圈内径为 1 600 μm、半径为 100 μm,磨粒半径采用 50~500 μm 的金属磨粒。通过仿真分析得出不同磨粒半径下电涡流密度。仿真数据如表 1 所示,根据数据生成的曲线如图 9 所示。

表 1 不同磨粒尺寸的电涡流密度表

Tab. 1 Eddy current density of different abrasive particle sizes

磨粒半径/μm	涡流密度/(kA · m <sup>-2</sup> )
50	339.52
100	390.48
150	445.63
300	3812.33
400	8753.61
500	15510.76

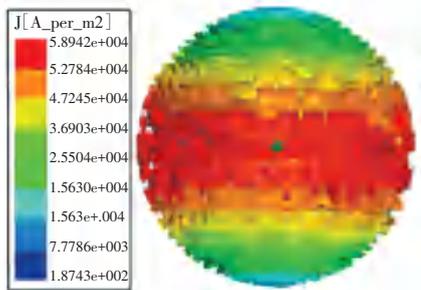


图 7 沿线圈中轴线的磨粒涡流密度云图

Fig. 7 Abrasive vortex density cloud map along the central axis of the coil

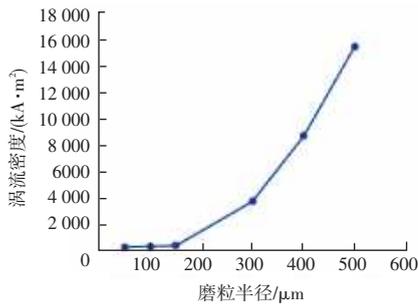


图9 不同磨粒半径下的涡流密度图

Fig. 9 Eddy current density map at different abrasive radius

通过表1和图9可以得出:尺寸越大的磨粒,其涡流密度与之成正比。当磨粒尺寸逐渐增大,涡流密度增加速率也跟着变快。所以,电涡流作用能有效识别出磨粒尺寸<sup>[8]</sup>。

### 3.2 磨粒材质结果分析

在有限元分析软件中,可将材料设置为不同的金属磨粒,也可以设置不同的非金属磨粒。如硅、铁磁性磨粒、镍以及铜磨粒等。带金属性质的磨粒材质仿真参数表征如下:磨粒半径为50 μm、感应线圈区分为直径和内径,它们的参数分别为200 μm和1 600 μm、一个感应线圈的激励频率调整为280 MHz。五种磨粒材质的金属磨粒产生电涡流密度数据如表2所示,利用表2中数据获得的涡流密度如图10所示。

表2 各个材料的涡流密度表

Tab. 2 Eddy current density of each materia

材质	涡流密度(kA/m <sup>2</sup> )
硅	0
铜	390.32
铁	780.69
镍	1 138.82

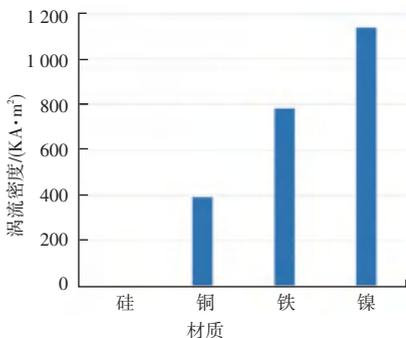


图10 不同磨粒材质下的涡流密度图

Fig. 10 Eddy current density map under different abrasive materials

由此可见,不同的电涡流产生的主要原因,来源于不同的材料。因为金属导体有不同的电导率和磁导率等特性,可以根据不同的电涡流大小来鉴别磨粒的材质。

### 3.3 激励频率结果分析

设置分析的材料为铜材质,磨粒半径为50 μm、

线圈半径为1 600 μm、直径为200 μm。改变激励频率得到不同的涡流密度,如表3和图11所示。可以明显看出,涡流密度与激励频率成正比,但其增长速率随着频率的增加而下降。

表3 不同激励频率的涡流密度表

Tab. 3 Eddy current density at different excitation frequencies

激励频率(MHz)	涡流密度(KA/m <sup>2</sup> )
0.5	1.91
1	6.33
10	56.02
120	246.05
260	369.85
500	518.89

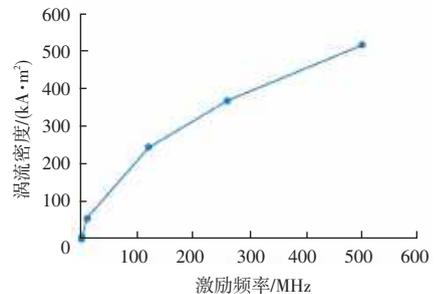


图11 不同激励频率下的涡流密度图

Fig. 11 Eddy current density map at different excitation frequencies

### 3.4 线圈内径结果分析

感应线圈内径大小的不同,关键取决于电涡流传感器流量和安全性因素。归纳总结以上仿真数据分析,将线圈内径从1 200–1 800 μm区域范围等间隔,选取4组参数特征依次进行仿真分析,数据记录如表4所示,根据数据得出的曲线如图12所示。

表4 不同线圈内径的涡流密度表

Tab. 4 Eddy current density of different coil inner diameters

线圈内径(μm)	涡流密度(kA/m <sup>2</sup> )
1 200	2255.16
1 400	998.55
1 600	390.48
1 800	157.22

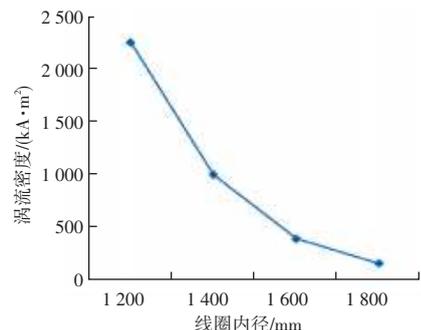


图12 不同线圈内径下的涡流密度图

Fig. 12 Eddy current density map under different coil inner diameters