

# 基于有限元仿真电涡流传感器的结构优化\*

周海婷 厚康 潘红良 陈建钧 王庆明

(华东理工大学 机械与动力工程学院 上海 200237)

**摘要:** 传感器性能受线圈形状及其几何参数影响。为优化传感器性能,运用 COMSOL Multiphysics 建立了有限元仿真模型。通过有限元数值仿真分析,研究了传感器的结构,优化并实验验证了有限元模型的合理性。通过有限元仿真分析发现双正交矩形柱型传感器比单正交矩形柱型传感器具有更高的检测灵敏度。此外,进一步研究分析了在线圈匝数密度不变情况下,双正交矩形柱型传感器辅助线圈厚度、外形状系数、内形状系数、激励电流、外形状比例系数对其检测灵敏度的影响,为合理选择线圈参数提高传感器性能提供参考。

**关键词:** 涡流检测;双正交矩形柱型传感器;辅助线圈;几何参数

**中图分类号:** TP21 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

## Structure optimization of eddy current sensor based on the finite element simulation

Zhou Haiting Hou Kang Pan Hongliang Chen Jianjun Wang Qingming

(School of Mechanical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The performance of sensor is affected by the shape and the geometric parameters of coil. In order to optimize the detection performance of sensor, finite element model was established in the COMSOL Multiphysics. Simulation analysis on the structural optimization of sensor was conducted, and verified by the experiments. The biorthogonal rectangular sensor was found to have higher detection sensitivity comparing with the single orthogonal rectangular sensor. Otherwise, the effects of thickness, external shape coefficient, internal shape coefficient, excitation current, external shape proportionality coefficient of the auxiliary coil on detection sensitivity of sensor were investigated under the case of a fixed coil turn density. The conclusions from the study provide a reference for the determining of the coil parameters and the improvement of the sensor performance.

**Keywords:** eddy current; biorthogonal rectangular sensor; auxiliary coil; geometric parameters

## 1 引言

20世纪70年代兴起的基于电磁感应原理的涡流检测设备具有非接触、不需要耦合剂、抗干扰能力强、结构简单等优点,被广泛应用于各行业。在交变电流的激励下,通过阻抗分析法测定检测线圈与被测试样的耦合作用,可以获得被测试样性能的变化信息,用于缺陷、镀层厚度、材料性能等的评价。

随着对检测能力要求的提高,高性能检测传感器已成为行业发展的重要需求。传感器的灵敏度是衡量其性能的重要因素,检测灵敏度受线圈的磁场分布影响并取决于线圈形状及其几何参数<sup>[1-3]</sup>。因此研究线圈形状及其几何参数对获得高性能检测传感器具有重要意义。国内外学者对

此也进行了大量的研究<sup>[4-6]</sup>,但这些研究对象主要为圆柱型传感器、矩形柱型传感器以及平面型传感器,已有研究表明,与这些常规传感器相比双正交矩形柱型传感器具有更高的检测精度和灵敏度<sup>[8]</sup>,因此基于双正交矩形柱型传感器的研究对涡流探伤具有重要意义。

本文在前期研究的基础上<sup>[8-9]</sup>,基于 COMSOL Multiphysics<sup>[10]</sup>平台对单正交矩形柱型传感器与双正交矩形柱型传感器在裂纹检测方面的灵敏度进行了分析比较,特别是在双正交矩形柱型传感器辅助线圈几何参数对其检测性能的影响方面做了详尽的有限元模拟。通过计算得到检测线圈和试样耦合作用下的感应电压值,研究了辅助线圈厚度、外形状系数、内形状系数、激励电流值、外形状比例系数对传感器检测性能的影响,为高灵敏性传感器的设计

收稿日期:2015-12

\* 基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057602)资助项目

和优化提供了理论基础。

## 2 有限元建模与分析

为了分析双正交矩形柱型传感器的涡流探伤性能,建立如图 1 所示的有限元仿真模型。其中被测件的材料为 SUS304 不锈钢,被测件的几何尺寸为 100 mm×100 mm×20 mm,被测件材料性能电导率为  $1.35 \times 10^6$  S/m,相对磁导率为 1,相对介电常数为 1,系统激励电流密度为  $1 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>,激励电流频率为 12 kHz。模型边界条件为矢量磁位  $A$  为 0,求解域设定在半径为 80 mm,高度为 120 mm 的空气层范围内。

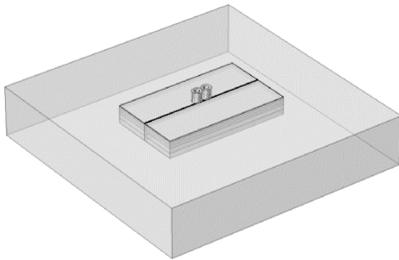
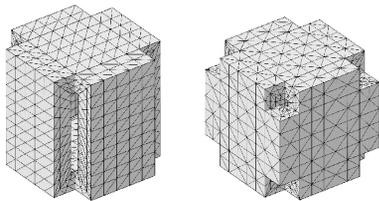


图 1 仿真几何模型

### 2.1 探头有限元模型

本文通过有限元分析对比了正交矩形柱型传感器和双正交矩形柱型传感器在裂纹检测方面的性能,建立的传感器有限元模型如图 2 所示,其中单正交矩形柱型传感器划分为 1 980 网格单元,双正交矩形柱型传感器划分为 2 340 网格单元。有限元分析使用的双正交矩形柱型传感器主线圈由两个相同的矩形柱线圈组成,截面为矩形,外形为正方形。主线圈和辅助线圈形状如图 3 所示,主要几何参数包括主线圈形状参数  $d$ ,辅助线圈厚度  $h$ ,长  $a$ ,宽  $b$  和  $e$ ,并定义  $RC_o = \frac{a}{b}$  为外形状系数,  $RC_i = \frac{a-\theta}{b}$  为内形状系数。



(a) 单正交矩形柱型传感器 (b) 双正交矩形柱型传感器

图 2 传感器有限元模型

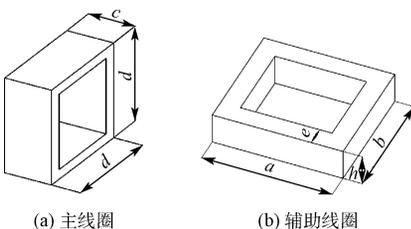


图 3 双正交矩形柱型传感器线圈示意

### 2.2 模型理论分析及试验验证

为研究线圈参数对其检测性能的影响,首先需要验证有限元模型的合理性。通过有限元仿真值与理论推导值及仿真信号值与实验值的对比可以得到有限元计算的误差值,从而验证有限元仿真模型的准确性。因此,首先利用有限元分析了圆柱单线圈模型的磁场分布,建立的模型示意图如图 4 所示,提高距离分别设为 0.3 mm,0.9 mm,1 mm,1.6 mm,2 mm,2.4 mm 和 3 mm。

线圈轴线上的磁感应强度  $B$  与提高距离的关系由毕奥-萨伐尔定律推导得到<sup>[5]</sup>,理论解析式为:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2(R_b - R_a)h} \left\{ (z+h) \ln \frac{R_b + \sqrt{R_b^2 + (z+h)^2}}{\sqrt{R_a^2 + (z+h)^2}} - z \ln \frac{R_b + \sqrt{R_b^2 + z^2}}{\sqrt{R_b^2 + z^2}} \right\} \quad (1)$$

式中: $R_a$  为线圈外径, $R_b$  为线圈内径, $h$  为线圈厚度, $z$  为提高高度。

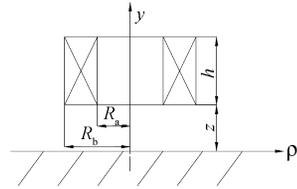


图 4 理论求解模型

模型的理论值以及由有限元计算得到的仿真值如表 1 所示,仿真计算导出的电压信号值与试验值的对比如图 5 所示。分析结果可知,结果误差小于 1%,模型的仿真计算

表 1 模型磁场分布理论计算结果与有限元分析结果比较

$z$ /mm	理论值/mT	仿真值/mT	结果误差 $e$ /(%)
0.3	50.511	50.438	0.14
0.9	29.107	28.957	0.52
2.0	10.928	10.965	0.34
2.7	6.430	6.452	0.34

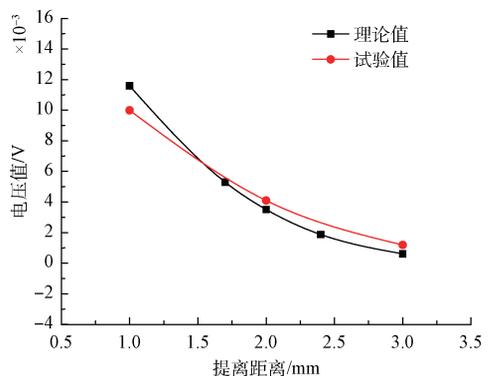


图 5 仿真值与实验值对比

曲线与实验值误差最大为  $1.598 \times 10^{-3}$  V,在工程允许范围内,表明建立的有限元模型的仿真结果可用于传感器性能的分析研究。

### 2.3 检测性能比较

有限元计算结果如图6~8所示。从图6可以看出,随裂纹深度值增加两种矩形柱型传感器电压输出值增加,电压变化梯度值减少。双正交矩形柱型传感器比单正交矩形柱型传感器具有更高的电压输出值和电压梯度值,因此,双正交矩形柱型传感器比单正交矩形柱型传感器具有更高的裂纹检测灵敏度。从图7可以看出两种矩形柱型传感器电压输出值随裂纹长度值增加而增加,而双正交矩形柱型传感器电压梯度值变化比单正交矩形柱型传感器大,同样说明了双正交矩形柱型传感器检测灵敏度更高。从图8可以看出单正交矩形柱型传感器电压输出值随裂纹宽度值增加变化很小,而双正交矩形柱型传感器电压输出值与裂纹宽度值呈线性增长关系,更适用于检测裂纹宽度的细小变化。

通过分析可知,在裂纹检测方面双正交矩形柱型传感器比单正交矩形柱型传感器具有更高的检测灵敏度,双正交矩形柱型传感器的辅助线圈对其具有优化作用。因此,进一步研究辅助线圈几何参数对其性能的影响对获得高性能传感器具有重要的现实意义。

### 3 辅助线圈几何参数对传感器性能的影响

为了更好的理解双正交矩形柱型传感器中几何结构的作用,保持主线圈及辅助线圈其他参数不变,分析线圈参数  $h, RC_o, RC_i, I$  对传感器性能的影响,其中  $h$  为辅助线圈厚度,  $RC_o$  为外形状系数,  $RC_i$  为内形状系数,  $I$  为辅助线圈激励电流。通过有限元分析了双正交矩形柱型传感器的仿真模型,计算得到各几何参数影响下的输出电压值。通过分析电压值的变化规律可以得到线圈几何参数对传感器性能的影响规律。

#### 3.1 线圈厚度的影响

辅助线圈厚度对传感器性能的影响如图9所示。由分析结果可知,不同线圈厚度,双正交矩形柱型传感器的电压输出值随裂纹深度的增加而增加,并且随裂纹深度增加,电压变化梯度值减小。线圈厚度越大,电压输出值越大,传感器电压值随裂纹深度变化梯度越大,双正交矩形柱型传感器的检测灵敏度越高。

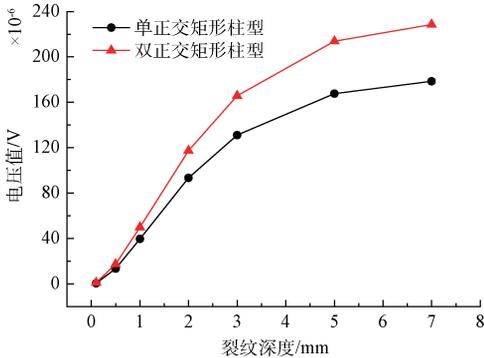


图6 单正交矩形柱型传感器和双正交矩形柱型传感器电压输出值与裂纹深度的关系

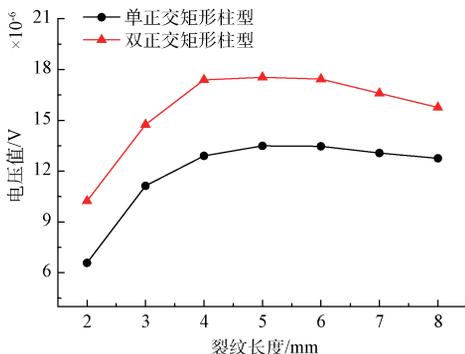


图7 单正交矩形柱型传感器和双正交矩形柱型传感器电压输出值与裂纹长度的关系

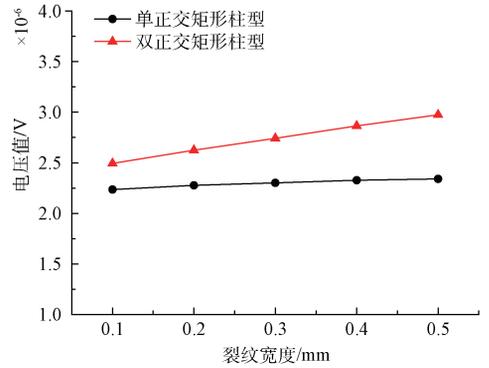


图8 单正交矩形柱型传感器和双正交矩形柱型传感器电压输出值与裂纹宽度的关系

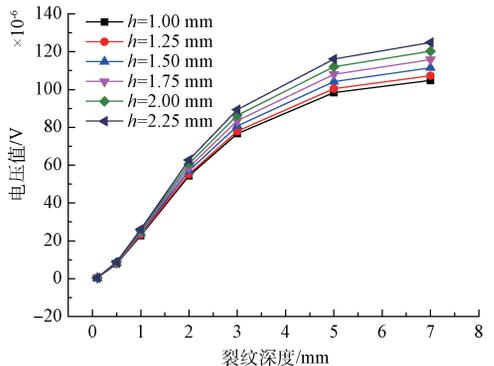


图9 辅助线圈厚度对传感器性能的影响

#### 3.2 线圈外形状系数 $RC_o$ 的影响

辅助线圈外形状系数  $RC_o$  对传感器性能的影响如图10所示。分析结果可知,不同辅助线圈外形状系数  $RC_o$ ,

随裂纹深度的增加,双正交矩形柱型传感器的电压输出值增加,电压变化梯度值减小。辅助线圈参数  $RC_0$  对传感器性能的影响有最优影响系数出现,即当形状系数  $RC_0$  的值接近 0.6 时,电压输出值最大,传感器电压值随裂纹深度变化梯度最大,此时,双正交矩形柱型传感器的检测灵敏度最高。

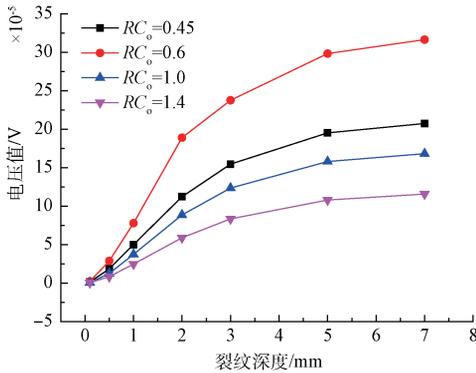


图 10 辅助线圈外形状系数  $RC_0$  对传感器性能的影响

### 3.3 线圈内形状系数 $RC_i$ 的影响

辅助线圈内形状系数  $RC_i$  对传感器性能的影响如图 11 所示。由所示结果可知,不同辅助线圈内形状系数  $RC_i$ ,随裂纹深度值的增加,双正交矩形柱型传感器的电压输出值增加,电压变化梯度值减小。且主线圈内形状系数  $RC_i$  值越大,  $e$  越小,电压输出值与电压变化值越大,双正交型传感器的检测性能越好。

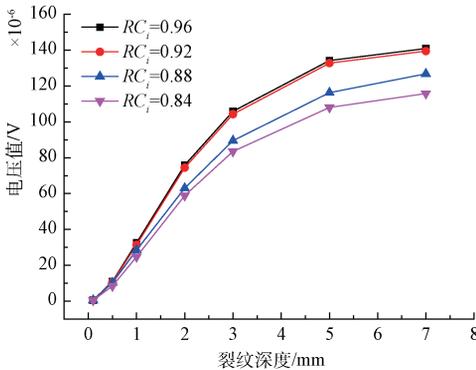


图 11 辅助线圈内形状系数  $RC_i$  对传感器性能的影响

### 3.4 激励电流的影响

辅助线圈激励电流对传感器性能的影响如图 12 所示。分析结果可知,不同辅助线圈激励电流,双正交矩形柱型传感器的电压输出值随裂纹深度的增加而增加,并且随裂纹深度增加,电压变化梯度值减小。且线圈激励电流越大,随裂纹深度增加,电压输出值越大,电压值变化梯度越大,传感器的检测灵敏度越高。

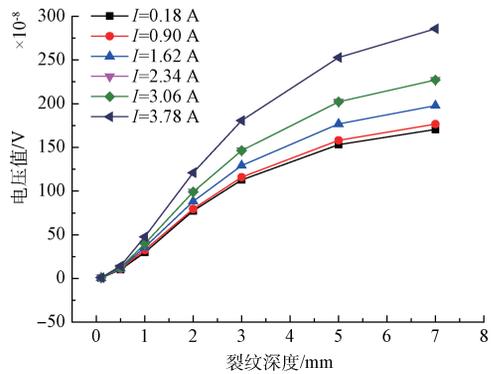


图 12 辅助线圈激励电流对传感器性能的影响

### 3.4 辅助线圈外形状比例系数对传感器性能的影响

因辅助线圈最佳外形状系数  $RC_0$  的存在,为获得高灵敏度的传感器,需要进一步研究最佳外形状系数值受主线圈形状参数  $d$  的影响。

有限元分析后得到的结果如图 13 所示,分析图中正则化信号值最大值的产生规律,可以发现,当外形状比例系数  $\eta = \frac{a}{d}$  接近 0.6 时,正则化信号值最大,传感器检测性能最佳。

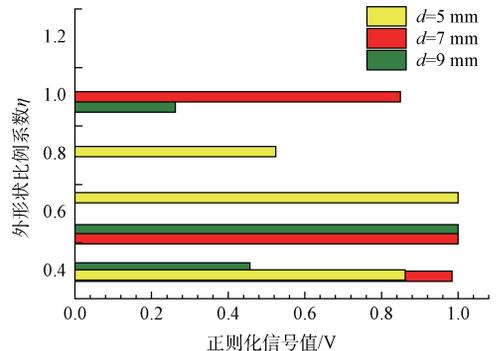


图 13 辅助线圈外形状比例系数  $\eta$  对传感器性能的影响

## 4 结 论

通过有限元仿真分析的方法研究了双正交矩形柱型传感器辅助线圈几何参数对其检测性能的影响,用于传感器的设计得出如下结论:

- 1)在裂纹深度的涡流评价应用中,双正交矩形柱型传感器比单正交矩形柱型传感器具有更好的检测性能。
- 2)辅助线圈参数对传感器检测性能有直接影响。线圈厚度越厚,外形状系数越接近 0.6,内形状系数越大,激励电流越大,双正交矩形柱型传感器的信号输出值越大,信号变化值越大,传感器灵敏度越高,检测性能越好。

因此,在电涡流传感器的设计中,可以通过选择合适的线圈形状及几何参数,获得高性能的检测传感器。上述结论可为传感器的设计及性能优化提供参考。

## 参考文献

- [1] VYROUBAL D, LACKOVIC I. Target temperature effect on eddy-current displacement sensing [C]. Proceedings of the 10th IEEE Sensors Applications Symposium, 2015.
- [2] 李贵娥,麻红昭,沈家旗等. 电涡流检测技术及影响因素分析[J]. 传感技术学报, 2009, 22(11): 1665-1669.
- [3] 赵友全,刘潇,陈玉榜,等. 微型涡流电导率测量传感器的优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 598-603.
- [4] 付跃文,喻星星. 油套管腐蚀脉冲涡流检测中探头类型的影响[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 208-217.
- [5] WU J, ZHOU D, WANG J. Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic materials using pulsed eddy current based on rectangular differential probe [J]. Journal of Sensors, 2014.
- [6] 顾国华,张飞猛,李毅等. 基于涡流探伤的油(气)管裂纹检测研究与实现[J]. 电子测量技术, 2011, 34(4): 103-105.
- [7] FAVA J O, LANZANI L, RUCH M C. Multilayer planar rectangular coils for eddy current testing: Design considerations [J]. NDT & E International, 2009, 42(8): 713-20.
- [8] WANG J, YUSA N, PAN H, et al. Discussion on modeling of thermal fatigue cracks in numerical simulation based on eddy current signals [J]. NDT & E International, 2013(55): 96-101.
- [9] WANG J, YUSA N, PAN H, et al. Modeling of thermal fatigue crack for enhancement of electromagnetic non-destructive evaluation of nuclear power plant [C]. Proceedings of the 2013 21st International Conference on Nuclear Engineering, 2013.
- [10] 孙凯,卢荣胜,张勇,等. 基于 COMSOL Multiphysics 电涡流传感器的仿真和设计[J]. 中国仪器仪表, 2010(4): 63-66.

## 作者简介

周海婷, 博士研究生。主要研究方向为涡流检测在高压氢系统氢损伤评价中的应用。

E-mail: 020130031@mail.ecust.edu.cn

王庆明(通讯作者), 教授, 博士生导师。主要研究方向为先进制造技术、制造过程监控理论与技术、现代制造工程等。

E-mail: 18521569630@163.com