

## 基于瞬变场激励传感器设计及仿真研究\*

王磊磊<sup>1</sup> 张涛<sup>2</sup> 彭振华<sup>1</sup> 刘翼<sup>1</sup> 明连勋<sup>1</sup> 朱子东<sup>3</sup>

(1. 国家管网集团西气东输公司 武汉 430000; 2. 陕西国防工业职业技术学院 西安 710300;

3. 国家管网公司沈阳龙昌管道检测中心 沈阳 110000)

**摘要:**针对瞬变电磁法激励磁场不聚焦问题展开研究,设计出一种具有聚焦磁场功能的传感器,主要由双激励线圈、检测线圈和磁芯构成。利用三维有限元仿真对传感器进行建模仿真,与单线圈的数据进行对比分析,结果表明,传感器主要把磁场集中在 $R=250\text{ mm}$ 的区域内,磁感应强度 $B=1.745\times 10^{-5}$ ,比单线圈磁场集中范围缩小了50%,磁感应强度提高了31%,满足设计要求,且磁场分布梯度大,有助于后期数据处理。该传感器设计可以为瞬变电磁法提供有效的激励源,提高技术的检测灵敏度和准确性,为后期现场应用提供参考价值。

**关键词:**传感器;聚焦;腐蚀;磁场

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Design and simulation of excitation sensor based on transient field

Wang Leilei<sup>1</sup> Zhang Tao<sup>2</sup> Peng Zhenhua<sup>1</sup> Liu Yi<sup>1</sup> Ming Lianxun<sup>1</sup> Zhu Zidong<sup>3</sup>

(1. Pipe China West East Gas Pipeline Company, Wuhan 430000, China; 2. Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710300, China;

3. National Pipe Network Corporation Shenyang Longchang Pipeline Inspection Center, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** Based on the research of excitation sensor based on transient electromagnetic detection technology, a kind of sensor with focusing magnetic field function is designed, which is mainly composed of double excitation coil, detection coil and magnetic core. The results show that the sensor mainly concentrates the magnetic field in the region of  $R=250\text{ mm}$ , and the magnetic induction intensity  $B=1.745\times 10^{-5}$ , which is 50% smaller than the single coil magnetic field concentration range, and the magnetic induction intensity is increased by 31%, which meets the design requirements, and the magnetic field distribution gradient is large, which is helpful for the later data processing reason. The sensor can effectively detect the local corrosion of metal pipeline, provide key components for transient electromagnetic detection technology, and provide the basis for the structure optimization and field application of the sensor.

**Keywords:** sensor; focusing; corrosion; magnetic field

## 0 引言

瞬变电磁法检测技术之前主要用于探矿,随着技术的革新被引用到埋地金属管道腐蚀检测,但是由于传统检测装置的局限性,对于金属管道局部缺陷检测灵敏度不高,主要原因在于传统检测传感器能量不聚焦且强度低。文献[1]提出通过施磁芯的方法来实现磁场聚焦及提高磁感应强度,进一步提高金属管道局部缺陷的检出率;文献[2]提出通过响应面法对设计出的检测传感器参数进行优化,以便后续批量制作提供数据支撑。

因此本文主要以瞬变电磁法激励传感器为研究对象,对比目前已设计出的几种激励传感器的效果,优化出一种符合

要求的传感器结构进行仿真。采用双激励线圈和加磁芯的方法来实现磁场聚焦,提高检测灵敏度,达到检测要求。

## 1 瞬变电磁技术概述

瞬变电磁技术又称时域电磁法(transient electromagnetic method, TEM)。从地面上激励传感器向地面发射脉冲电磁波,待稳定后切断后会在空间形成一次磁场扩散到地下金属管道表面形成涡流效应,随着一次磁场被消耗,管道表面会形成阻碍一次磁场减小的二次磁场,二次磁场被接收分析,二次磁场携带管道的基本信息,如磁导率、材质、埋深、高度和壁厚等,研究二次磁场的衰减规律,可以解决埋地金属管道壁厚腐蚀量和位置的问题<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期:2020-12-25

\* 基金项目:陕西国防工业职业技术学院 2020 院级课题(Gfy20-19)项目资助

## 2 传感器磁场分布情况

通过调研资料可知,目前瞬变电磁检测技术的激励传感器装置主要是通过多个单线圈组合而成,利用电磁场是矢量的特性,把单个线圈按照特定的结构来对空间带电粒子进行束缚,达到聚焦的效果。主要有半球型、圆环型、塔型和矩形阵列如图1所示。通过被每一种结构进行有限元仿真,计算距离线圈结构中心1 m处电磁感应强度和分布情况如表1所示<sup>[7-10]</sup>。

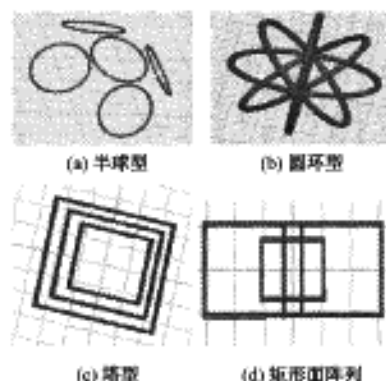


图1 4种激励传感器结构

表1 4种聚焦线圈参数对比

探头结构	磁感应强度/ T	聚焦 效果	互感 强度	加工难易 程度
半球型	$1.715\ 2 \times 10^{-5}$	较好	一般	较难
圆环型	$1.947\ 1 \times 10^{-5}$	最好	最大	最难
塔型	$1.348\ 4 \times 10^{-5}$	一般	较小	容易
矩形面阵列型	$1.464\ 3 \times 10^{-5}$	较好	一般	容易

通过仿真数据对比4种激励传感器效果可以看出,塔型聚焦效果一般,圆环型聚焦效果最好,半球型和矩形阵列聚焦效果一般,但是塔型和矩形阵列制造简单且互感效应小,圆环型不仅制造难度最大,而且线圈之间互感效应最大,造成检测结果可信度较低。以上设计的4种激励传感器装置都要依托支撑架来完成检测工作,这对人员和工作流程有相当高的要求。因此本文在对以上4种聚焦传感器结构进行优化,设计出一张双激励传感器结构,解决传统传感器在使用过程中的各种问题。

## 3 激励传感器结构设计及检测原理

### 3.1 激励传感器结构设计

激励传感器是瞬变电磁法检测技术中的关键部件,主要是束缚空间电磁场达到聚焦的效果,提高埋地金属管道局部缺陷的检测灵敏度以及定位的准确性,通过仿真结果表明传统的激励线圈在空间1 m处的电磁感应强度  $B = 1.210\ 0 \times 10^{-5}$  T,磁场分布有效范围为  $R = 0.6$  m 的区域。

根据传统激励线圈的数据提出本次设计要求,设计出

的双激励传感器需要使空间电磁场聚焦在  $R < 0.3$  m 的区域内,在传感器正下方1 m处的电磁感应强度  $B > 1.210\ 0 \times 10^{-5}$  T,设计原则为传感器性能稳定,结构简单,设备轻便,互感效应小等,双激励传感器结构,如图2所示,传感器结构剖面如图3所示。

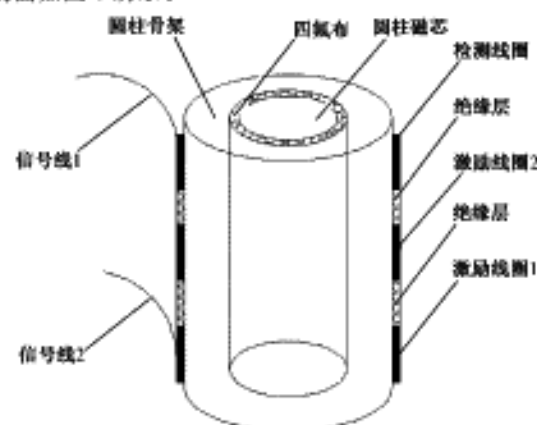


图2 双激励传感器结构

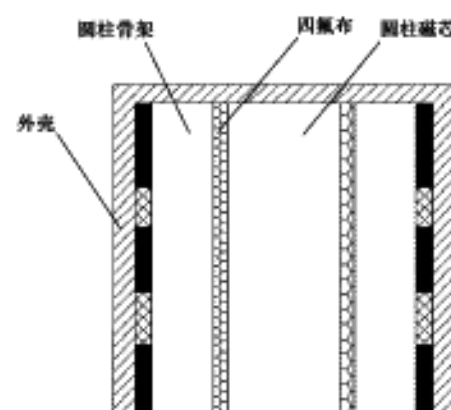


图3 传感器结构剖面

双激励传感器结构包括圆柱骨架及外部采用漆包线缠绕的激励线圈和检测线圈,激励线圈数量2个,两者之间连接方式为串联,线圈之间设有绝缘层起物理隔离作用,圆柱骨架中心位置安装有圆柱磁芯,圆柱磁芯和圆柱骨架同轴度满足要求且之间含有四氟布,起绝缘作用。激励线圈安装有信号线2用来连接外部电源装置,检测线圈安装有信号线1用来连接数据处理装置,对埋地金属管道腐蚀进行评价。该结构利用两次激励在空间形成电磁场,再通过磁芯进行束缚磁力线把电磁场进行聚焦,形成电磁能力强,穿透能力强且频率丰富的电磁场,实现金属管道局部缺陷的检测灵敏度和准确性。

### 3.2 瞬变电磁传感器工作原理

通过信号线2连接外部电源装置给两个激励线圈输入阶跃型电压信号,在电压信号突变的拐点处空间形成一次电磁场,通过圆柱磁芯对磁力线进行束缚达到聚焦效果,扩散到埋地金属管道表面形成涡流效应,随着一次磁场逐渐

被消耗,涡流效应在空间形成二次磁场,二次磁场被检测线圈接收以电压通过信号1传输到数据处理设备进行分析,电压衰减中携带金属管道自身的物理信息进行提取分析壁厚损失情况。

### 3.3 瞬变电磁法信号特性分析

V. O. De 等研究指出,涡流效应产生的二次磁场信号微弱且具有很大的动态变化,检测线圈上的电压信号也非常小,不利于分析得出有效信息。根据分析瞬变电磁法信号得出前期满足逆幂变化规律,后期满足指数衰减规律,前期和后期数据是一个平滑的过渡区域,经过对该特性进行分析得出,瞬变电磁法信号需要进行坐标变化,把原来的笛卡尔坐标系换算成双对数坐标系,可以清楚地了解变化规律且利于分析,笛卡尔坐标系如图4所示,双对数坐标系如图5所示<sup>[11-14]</sup>。

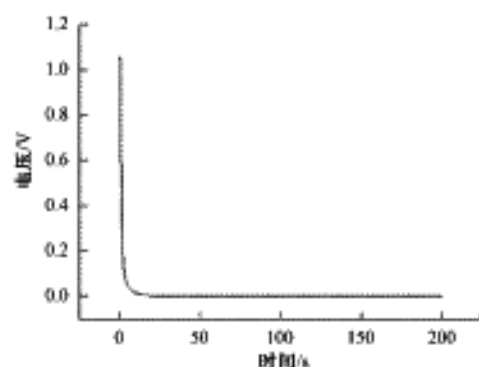


图4 笛卡尔坐标系数据变化趋势

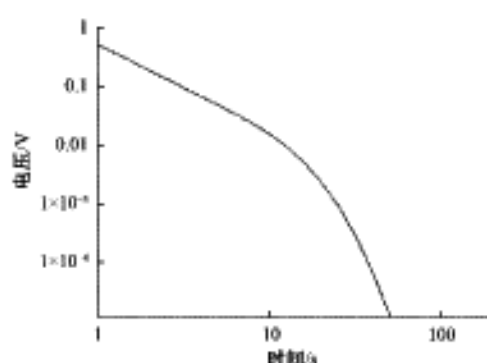


图5 双对数坐标系数据变化趋势

薄壁圆筒来简化。模型主要包括激励线圈1、激励线圈2、检测线圈、绝缘层及空气介质,采用MAXWELL 3D软件中瞬态求解模式,整个求解域为正方体且填充为空气介质,尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ,传感器位于正方体的中心,采用自由划分网格,对激励线圈和检测线圈的磁场进行细微分析,采用网格精度为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.01\text{ m}$ ,磁芯和空气介质及其他网格精度为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.2\text{ m}$ ,模型的详细参数如表2所示。

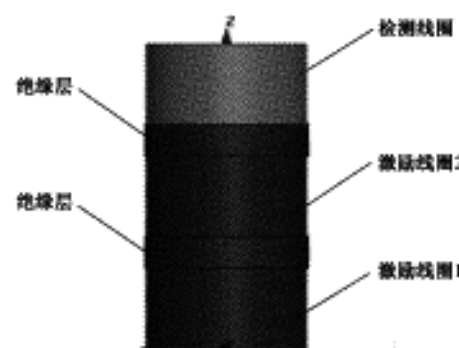


图6 激励传感器三维仿真模型

## 4 激励传感器仿真及结果分析

### 4.1 有限元模型仿真

根据瞬变电磁传感器工作原理建立有限元仿真模型如图6所示,对模型进行简化,利用圆柱体代表磁芯,线圈用

表2 模型的基本参数

激励线圈		检测线圈		圆柱磁芯	
外径/mm	350	外径/mm	350	直径/mm	70
内径/mm	330	内径/mm	330	高度/mm	300
高度/mm	8	高度/mm	80	四氟布	
匝数	750	匝数	800	磁导率/( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )	0.999 8
磁导率/( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )	1	磁导率/( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )	1	电导率/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$9.8 \times 10^{-4}$
电导率/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$5.8 \times 10^7$	电导率/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$5.8 \times 10^7$		

### 4.2 外接激励电路设计

根据工作原理可知该技术的关键点在于瞬间切断电流,让涡流在空间形成二次磁场,二次磁场携带管道基本信息。采用MAXWELL 仿真软件中的电路设计模块,通过绕组耦合的方式输入和输出信号。激励信号波形如图7所示,电路设计如图8所示,具体设计参数为激励周期1 s,保持时间为0.5 s,信号幅值12 V,占空比50%,信号上升

到最大值和最大值减小到零的时间为 $0.1\text{ }\mu\text{s}$ ,电阻 $12\text{ }\Omega$ ,通过该方式可以有效的得到理想的阶跃型激发信号,确保检测信号的准确性,为后期数据处理提供有力保障<sup>[13-15]</sup>。

### 4.3 仿真结果分析

通过合理的设置求解参数,计算传感器正下方1 m处的磁感应强度,如图9、10所示,可以明显的看到,磁场强度 $B = 1.745 \times 10^{-5}\text{ T}$ ,磁场主要集中在 $R = 250\text{ mm}$ 的区域



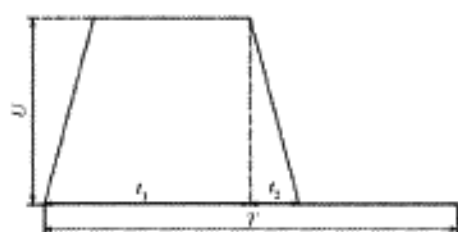


图7 激发信号波形



图8 阶跃形信号波形

内。对目前瞬变电磁检测方法使用的单线圈进行仿真结果如图11、12所示，发现磁场主要集中在 $R=500\text{ mm}$ 区域内，磁感应强度 $B=1.210\times 10^{-5}$ 。数据对比表明，该传感器聚焦范围比单线圈缩小了50%，磁感应强度提高了31%，从磁场梯度得知，如图13所示，该传感器比单线圈梯度大，有利于后期数据采集和分析。进一步验证该传感器结构设计的有效性，满足设计要求。

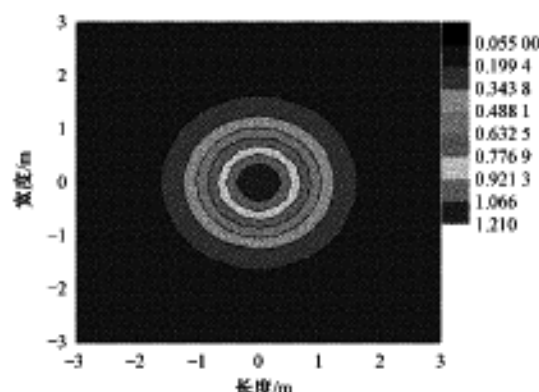


图11 单线圈磁场分布云图

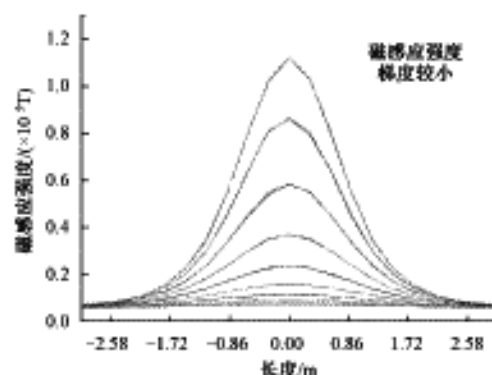


图12 单线圈磁感应强度梯度图

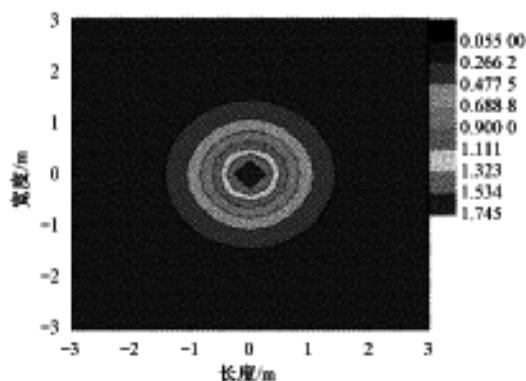


图9 传感器磁场分布云图

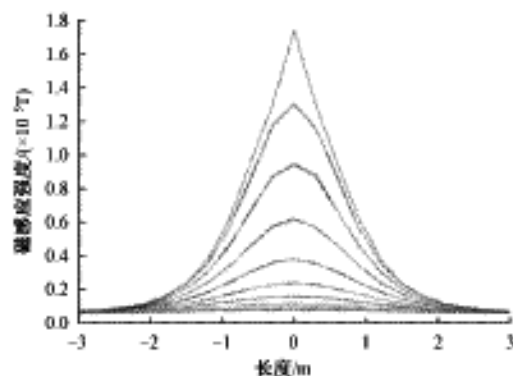


图10 传感器磁感应强度梯度图

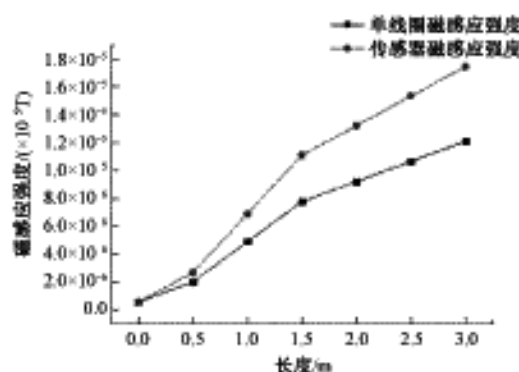


图13 磁感应强度梯度对比

## 5 结 论

通过分析瞬变电磁法检测传统单线圈的缺点提出设计要求，设计出一种具有聚焦磁场功能的传感器，主要由双激励线圈、检测线圈和磁芯构成。利用三维有限元仿真对传感器进行建模仿真，与传统单线圈的数据进行对比分析，结果表明，传感器主要把磁场集中在 $R=250\text{ mm}$ 的区域内，磁感应强度 $B=1.745\times 10^{-5}$ ，比单线圈磁场集中范围缩小了50%，磁感应强度提高了31%，满足设计要求，且磁场分布梯度大，有助于后期数据处理。该传感器可以有效地检测金属管道局部腐蚀，为瞬变电磁法检测技术提供关

键部件,为后面传感器结构优化和现场应用提供依据。

# 参考文献

- [1] 张涛.基于脉冲涡流的传感器设计及仿真研究[J].电子测量技术,2020,43(12):163-167.
- [2] 张涛,赵弘,王维斌,等.基于响应面法的瞬变电磁法聚焦线圈优化设计[J].电子测量技术,2016,39(7):28-32,38.
- [3] 王安泉,陈健飞.铁磁性材料的脉冲涡流测厚与特征量提取[J].无损检测,2020,42(11):38-41.
- [4] 何江龙.基于地磁场理论的管线探测技术研究与应用[J].电子测量技术,2017,40(12):182-186.
- [5] 马炬,邹金慧.铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J].电子测量与仪器学报,2019,33(7):137-144.
- [6] 唐东林,唐训雄,丁超,等.基于多尺度特征的储罐腐蚀缺陷面积量化[J].电子测量与仪器学报,2019,33(8):179-186.
- [7] 刘圣霞,许祥辉,王晶.分布式脉冲磁场测量系统研究[J].电子测量技术,2017,40(5):104-108.
- [8] LI Q, CHEN J B, ZHAO L, et al. Research on an improved metal surface defect detection sensor based on a 3D RFID tag antenna[J]. Journal of Sensors, 2020,1-13.
- [9] 张娜,彭磊,吴瑞,等.高分辨率 TMR 传感器阵列磁场成像涡流检测探头[J].仪器仪表学报,2020,41(7):45-53.
- [10] 张维景,胡博,于润桥,等.埋地管道腐蚀的瞬变电磁法检测探头优化设计[J].仪表技术与传感器,2016(12):37-40,68.
- [11] 葛亮,黄凯强,田贵云,等.基于电磁检测机理的井下环空流量测量方法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(12):161-174.
- [12] 任旭虎,张圣坤,张振.铁磁性材料缺陷的脉冲涡流检测系统设计[J].无损检测,2020,42(10):72-75.
- [13] 范光,王志宇,方广有.无人直升机轴频磁场信号检测方法研究[J].电子测量技术,2017,40(6):180-183.
- [14] 辛伟,梁琳,丁克勤,等.基于磁各向异性的铁磁构件残余应力检测理论与方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(11):137-146.
- [15] 杜娜,杨玲,张雄,等.基于 Comsol 的井下瞬变电磁传感器建模与仿真[J].电子测试,2017(18):27-29,36.

# 作者简介

王磊磊,学士,主要从事腐蚀防护相关研究。

E-mail: 412690303@qq.com

张涛(通信作者),硕士,主要研究方向为管道无损检测技术。

E-mail: 951297058@qq.com