

基于瞬变电磁法的传感器设计及仿真研究

刘晓青 张涛

(陕西国防工业职业技术学院 西安 710300)

摘要: 针对瞬变电磁检测技术探头开展研究。首先介绍了瞬变电磁技术原理,分析目前几种聚焦探头的优缺点,然后根据设计要求提出一种新型瞬变电磁聚焦探头结构,解决瞬变电磁探头不聚焦,能量小及设备笨重等缺点,最后通过有限元仿真验证新型聚焦探头的聚焦效果,并与传统线圈仿真结果进行对比。结果表明,新型聚焦探头使磁场的主要能量聚焦在半径小于0.3 m,比传统线圈磁场分布缩小了40%,磁感应强度 $B=1.4998 \times 10^{-5}$,比传统线圈磁感应强度提高了19.3%,且聚焦探头比传统线圈的磁感应强度分布梯度较大。为瞬变电磁技术探头优化设计及精确测量金属管道腐蚀量提供了有效的参考价值,也为该技术在压力管道和热力管道的扩展应用提供了依据。

关键词: 瞬变电磁法;探头;聚焦;检测精度;参考价值

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

Sensor design based on transient electromagnetic detection technology

Liu Xiaoqing Zhang Tao

(Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710300, China)

Abstract: Research on probes for transient electromagnetic detection technology. Firstly, the principle of transient electromagnetic technology is introduced, and the advantages and disadvantages of several kinds of focusing probes are analyzed. Then, a new type of transient electromagnetic focusing probe structure is proposed according to the design requirements, which solves the shortcomings of transient electromagnetic probes, such as non-focusing, low energy and heavy equipment. Finally, The finite element simulation is used to verify the focusing effect of the new focusing probe, and compared with the traditional coil simulation results, the results show that the new focusing probe focuses the main energy of the magnetic field at a radius of less than 0.3 m, which is 40% smaller than the traditional coil magnetic field distribution, and the magnetic induction intensity. $B=1.4998 \times 10^{-5}$, which is 19.3% higher than the traditional coil induction intensity, and the focus probe has a larger gradient of magnetic induction intensity distribution than the conventional coil. It provides an effective reference value for optimizing the design of transient electromagnetic technology probes and accurately measuring the corrosion of metal pipes. It also provides a basis for the extended application of this technology in pressure pipes and heat pipes.

Keywords: transient electromagnetic method; probe; focusing; detection accuracy; reference value

0 引言

目前管道运输方式逐渐成为重要的运输方式,金属材质的管道随着服役年限的增加会暴露出各种各样的安全隐患^[1]。对于长期处于潮湿环境的埋地金属运输管道会加快腐蚀导致管壁变薄,进而造成管内介质外泄遇到明火时发生安全事故^[2-3]。传统的瞬变电磁探头主要是通过单线圈或者多个线圈组合向地下激发电磁场。传统瞬变电磁探头设计具有以下缺点^[4-5]:

1) 激发的电磁场能量小,由金属管道本身存在欧姆消

耗,造成磁场扩散到埋地金属表面时形成的涡流效应响应太小,使接收信号信噪比低且容易失真;

2) 激发的电磁场不聚焦,致使磁场在空间太分散,当扩散到埋地金属管道表面时覆盖范围过大,进而对管道孔状或者点蚀缺陷检测灵敏度不高;

3) 激发的电磁场频率单一,体积较大,检测成本较高^[6]。

1 瞬变电磁技术原理

瞬变电磁技术又称时域电磁法(transient electromagnetic

method, TEM)。通过给发射线圈施加阶跃型电流信号在空间产生稳定的一次磁场,然后瞬间关断电流信号,在地下管道的表面上形成涡流,由于管体本身和周围介质的欧姆损耗,涡流随着时间慢慢衰减形成二次磁场,二次磁场信息被地面上的接收线圈接收且以电压变化的形式表示出来^[7]。二次磁场的变化携带着地下管道本身的特征信息,且与管道材质、壁厚、提高高度有着密切关系^[8-9]。

2 几种瞬变电磁聚焦探头

通过调研了解到目前瞬变电磁聚焦探头主要由一定结构的多个线圈组成,线圈通电后对周围电磁场进行矢量叠加,实现对空间带电粒子进行聚焦和约束^[10-11]。聚焦结构根据形状可分为半球型阵列、圆环型阵列、上(下)塔型阵列及矩形面阵列,如图 1 所示。通过 ANSYS Maxwell 有限元仿真软件对每一种聚焦探头进行模拟得到距离探头正下方 1 m 处的磁场分布情况如表 1 所示。

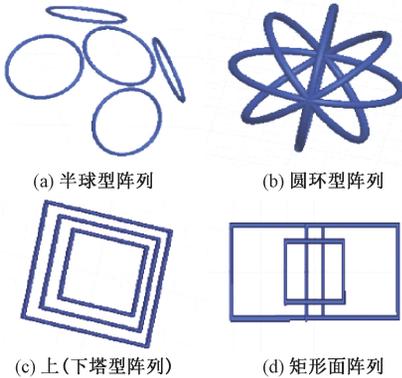


图 1 几种聚焦探头结构

表 1 5 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	1.6648×10^{-5}	较好	一般	较难
圆环型	1.9347×10^{-5}	最好	最大	最难
上塔型	1.2684×10^{-5}	一般	较小	容易
下塔型	1.3365×10^{-5}	一般	较小	容易
矩形面阵列型	1.4498×10^{-5}	较好	一般	容易

通过对比 5 种线圈都有很好的聚焦效果,其中圆环型聚焦效果最好,但是加工最难且互感强度最大;半球型和矩形面阵列型聚焦效果较好,但是半球型加工也较难;上、下塔型聚焦效果一般也容易加工^[12-14]。

以上聚焦探头共同点在于都是通过若干个线圈组合而成,在实际应用中比较笨重,需要搭配支撑架来完成检测,这就对支撑架的结构和材料有很高的要求,进而带来的检测成本增加,因此本文提出一种新型聚焦探头,解决瞬变电

磁探头不聚焦,能量小及设备笨重等缺点。

3 瞬变电磁探头设计

3.1 瞬变电磁探头结构设计

瞬变电磁探头主要目的是聚焦磁场能量,提高磁场能力及局部缺陷的检出率。对于传统线圈目前磁场主要分布在 $R=0.5\text{ m}$ 的圆形区域,磁感应强度只有 $1.2100 \times 10^{-5}\text{ T}$,因此本次设计要求需达到磁场聚焦在 $R < 0.4\text{ m}$ 的圆形区域内,磁感应强度达到 $1.2100 \times 10^{-5}\text{ T}$ 以上。设计原则是稳定性高、互感效应小、电路稳定及设备轻便等。如图 2 所示为探头总体结构头,图 3 所示为截面图。

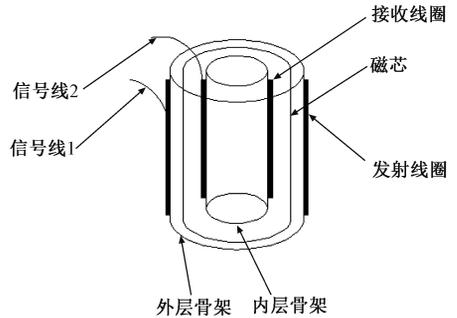


图 2 探头总体结构

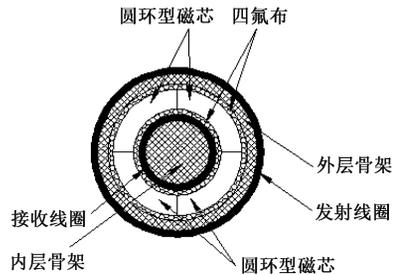


图 3 探头横截面

瞬变电磁探头结构包括外层圆柱管骨架,外层圆柱管骨架的表面缠绕发射线圈,发射线圈安装有信号线 1;外层圆柱管骨架内设置有内层圆柱管骨架,内层圆柱管骨架的外表面缠绕接收线圈,接收线圈安装有信号线 2;外层圆柱管骨架与内层圆柱管骨架之间设置有磁芯,磁芯内外表面用四氟布包裹紧密安装在外圆柱管骨架和内圆柱管骨架之间。磁芯由 4 个 1/4 圆环型磁芯柱装配而成,且 4 个圆环型磁芯柱采用不同的磁性材料,并紧密地连接在一起形成磁芯圆筒。磁芯主要的功能是使激发的电磁场能量大,频率成分多且空间聚焦。

3.2 瞬变电磁探头工作原理

首先外接电路向激发线圈上的信号线输入阶跃信号,由于磁芯是由多种不同的磁性材料组成,通过磁芯对空间电磁场进行束缚后激发出磁场能量大,频率成分多且聚焦

的一次磁场在地下扩散。然后瞬间关断外接电路,当一次磁场遇到地下金属管体会在管体表面形成涡流效应产生二次磁场阻碍一次磁场的变化,二次磁场信息被接收线圈接收进行分析,提取有效参数计算金属管道壁厚损失量。该探头结构能够提高点状腐蚀、孔状腐蚀和并行管道腐蚀位置的检测灵敏度。

3.3 瞬变电磁法数学模型

根据电磁感应原理,瞬间关断的阶跃型信号使得管道表面产生涡流效应,阶跃信号满足如下条件:

$$V(t) = \begin{cases} V, & t < 0 \\ 0, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

当 $t < 0$ 时,激励线圈与周围介质产生稳定的一次磁场;当 $t \geq 0$ 时,阶跃信号瞬间关断,管道上表面产生涡流。由于周围介质的欧姆消耗,随时间变化的涡流在空间形成二次磁场被接收线圈接收。整个过程的原理如图4所示。

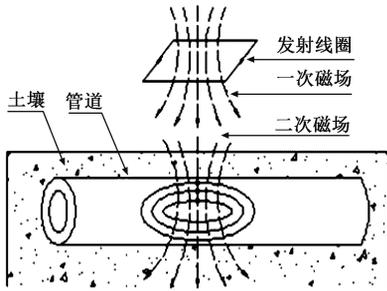


图4 瞬变电磁法原理

假设接收线圈的磁通量为 Φ ,接收线圈的有效面积和匝数分别为 S 、 N 。根据法拉第电磁感应原理知,接收线圈与管道上涡流效应产生的磁场存在以下关系:

$$V(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB(t)}{dt} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,影响接收信号变化的只是磁感应强度,而磁通量的变化直接影响接收线圈电压信号。

4 有限元仿真验证

4.1 建立有限元模型

根据瞬变电磁法检测原理建立的传感器模型如图5所示,对于复杂的线圈模型用实心圆环柱代替从而有利于模型简化,模型包括发射线圈、接收线圈、磁芯、四氟布及空气介质。模型采用 MAXWELL 3D 模块进行参数化建模,参数化建模的优点是方便后期修改模型参^[15-16]。求解器为 Transient 瞬态求解。由于有限元分析只能求解封闭区域内的电磁场信息,首先设置求解区域为正方体 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,且充满空气介质,采用自由划分网格,设置网格精度为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1 \text{ m}$ 。传感器位于计算区域正中心($x=0, y=0, z=0$),发射线圈和接收线圈是主要部分网格精度为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.05 \text{ m}$,磁芯网格精度

为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1 \text{ m}$ 。如表2所示为模型的具体参数。

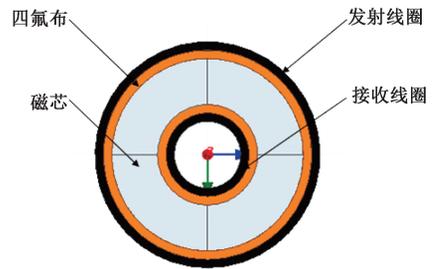


图5 模型示意图

表2 模型的基本参数

结构	外径/ mm	内径/ mm	高度/ mm	匝数	磁导率/ ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	电导率/ ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)
发射线圈	350	330	500	150	1	5.8×10^7
接收线圈	150	130	500	500	1	5.8×10^7
磁芯	310	170	500	—	58	5.8×10^6
四氟布	330	310	500	—	0.999 8	9.8×10^{-4}

4.2 激发电路设计

瞬变电磁法的激发电路产生的电流信号是阶跃形信号,如图6所示,瞬变电磁法检测技术的关键点就是在实现发射源的瞬间关断,因此采用 Maxwell 仿真软件中自带的 circuit editor 电路设计模块联合仿真,使用绕组耦合的方式实现阶跃形信号的收入和检测信号的获取^[17]。图7所示为阶跃信号和设计的激发电路,设置信号周期 $T = 1 \text{ s}$,信号持续时间 $t_1 = 0.5 \text{ T}$,幅值为 $U = 12 \text{ V}$,占空比为 50%,信号上升和下降时间为 $t_2 = 0.2 \mu\text{s}$,电路中设置电阻 $R = 12 \Omega$ 。

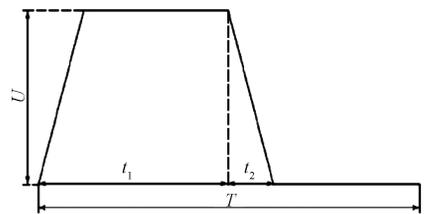


图6 激发电路

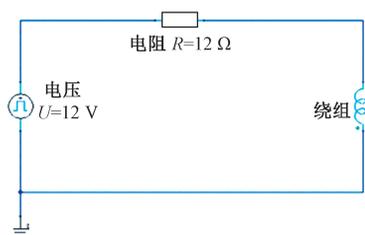


图7 阶跃形信号波形

4.3 仿真结果分析

通过 ANSYS Maxwell 有限元仿真软件建立探头模型,设置合适的网格大小及求解器^[9]。计算出该聚焦探头在正下方 1 m 处的磁场分布和二维梯形图,如图 8 和 9 所示。从图中可以看到磁场聚焦范围为 $R=300$ mm,磁感应强度 $B=1.4998 \times 10^{-5}$ 。

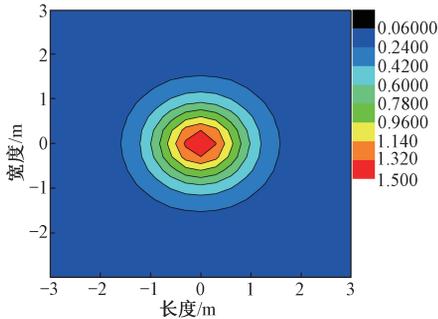


图 8 聚焦探头磁场分布云图

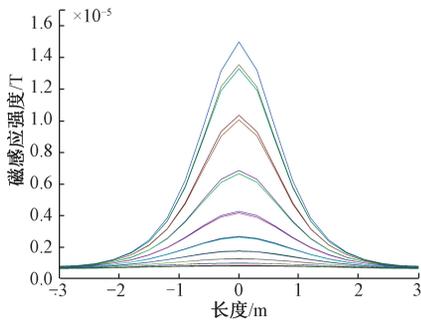


图 9 聚焦磁感应强度梯形图

然后对传统的线圈进行有限元仿真如图 10 和 11 所示。从图中可以看出磁场覆盖范围为 $R=500$ mm,磁感应强度 $B=1.2100 \times 10^{-5}$ 。对比表明该聚焦探头磁场聚焦范围缩小了 40%,磁感应强度比传统线圈提高了 19.3%,且聚焦探头比传统线圈的磁感应强度分布梯度较大,进一步说明该聚焦结构的合理性。

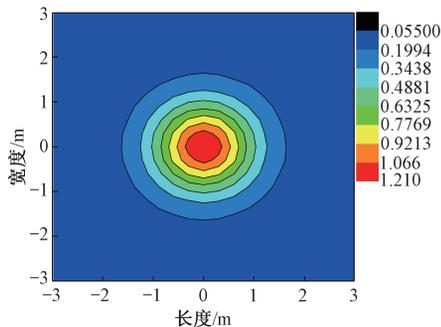


图 10 传统线圈磁场分布云图

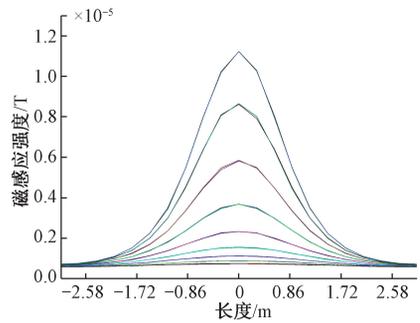


图 11 传统线圈磁感应强度梯形图

5 结 论

为了解决传统聚焦线圈的缺点,根据设计要求提出一种新型的瞬变电磁聚焦探头结构,主要由发射线圈、接收线圈、四氟布、内外层骨架及磁芯组成。通过有限元仿真对其聚焦效果进行模拟仿真并与传统线圈仿真结果进行对比,结果表明,磁场聚焦范围在 $R=300$ mm 内,聚焦区域缩小了 40%,磁感应强度为 $B=1.4998 \times 10^{-5}$,提高了 19.3%,且聚焦探头比传统线圈的磁感应强度分布梯度较大,达到设计要求。该探头能够有效地提高金属管道点状腐蚀和孔状腐蚀量的检测灵敏度,为以后瞬变电磁法探头优化和现场应用提供参考价值和指导作用,也为以该技术在压力管道和热力管道的扩展应用提供了依据。

参考文献

- [1] 吴信民,张振坤,徐剑波.瞬变电磁法理论的探测深度问题[J].地球物理学进展,2015,30(3):1333-1336.
- [2] 张莹莹,李貅.地空瞬变电磁法研究进展[J].地球物理学进展,2017,32(4):1735-1741.
- [3] 薛国强,于景邗.瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J].地球物理学进展,2017,32(1):319-326.
- [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] BOWLER J, JOHNSON M. Plused eddy-current response to a conducting half-space[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(3): 2258-2264.
- [6] 薛国强,武欣,李海,等.多道瞬变电磁法(MTEM)国外研究进展[J].地球物理学进展,2016,31(5):2187-2191.
- [7] 马炳镇.瞬变电磁法回线源形态对一次场畸变特征研究[J].煤田地质与勘探,2017,45(6):154-158.
- [8] 彭良玉.基于多匝小线圈的瞬变电磁发射系统设计[D].长春:吉林大学,2016.
- [9] 马晨,肖军.瞬变电磁地质矿产探测仪发射系统设计[J].中国锰业,2017,35(1):154-156.
- [10] 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.
- [11] 李玉东,易庚,李凯存.基于 dSPACE 的永磁同步电机

- 低速无位置传感器控制系统[J].电子测量技术,2016,39(12):21-26.
- [12] 蒙超.大回线瞬变电磁法浅层探测研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2017.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 蒋大青,付志红,侯兴哲,等.基于 Maxwell 3D 瞬变电磁法三维正演研究[J].电测与仪表,2012,49(6):29-32.
- [16] 范尧,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.
- [17] 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

刘晓青,硕士、讲师,主要研究方向为数控技术。

E-mail: 94202239@qq.com

张涛(通信作者),硕士、助教,主要研究方向为管道无损检测技术。

E-mail: 951297058@qq.com