

基于三分量法的地下金属管线探测仪结构设计

陈 旭, KIM Gun-hoi

(全州大学 机械与汽车工程系, 韩国 全州 430074)

摘要:目前现有的探测器工作原理多数是通过电场源激励接收电磁波信号,电场和磁场的分布是结构设计的理论前提,因此分析电性分布参数与地下管线在探测技术中的作用和影响,建立数学模型剖析载流导体与周围环境电性参数的关系,通过空间三维向量磁场强度分布情况设计了线圈搭建的模型与接收器在二维空间的结构设计,组成双球面空间结构。针对磁场强度分布不平衡性,用数学模型作为理论依据,提出一种新型结构进行补偿,进一步提高定位精度。

关键词:地下金属管线;三分量法;电性分布参数;接收器;结构设计

中图分类号:TB21 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)01-0171-04

目前地下管线探测器种类繁多,品质良莠不齐,基于环境和设备的条件约束,想要明确清晰地掌握地下管线情况,通常采用电磁感应的直接法、夹钳法等检测技术并不能明显地区分介质之间应有的电性和物性差异;另外地下管线也会产生异常的场分量,这些干扰源因素加大了对电磁感应法定位的难度,而通过接收场磁交变信号的定位方法精度仍然停留在面的维度使得有较大的预测误差纵而精度不高。

利用将电性参数和三分量磁场特性的数学模型作为理论依据,设计一种线圈三维空间球面结构与接收器在二维空间平面“Y”星型的结构体系,同时简述两者特点及其工作机理。相比较传统的接收器,该结构能够克服检测效率低、精度差的缺点。

1 地下管线的电性分布参数

1.1 电性分布参数的作用

交变的磁场是由交变电流引起的,但交变电流可能通过周围介质进行分流,管线上电信号随长度不同衰减的程度也不同,而地下各点的电场分量大小又和场源的位置有着密切的关系。另外,分布电容与周围介质电阻率之间的关系也不能忽视,像这样传输线管类的载流情况与这些参量有密切的关系,因此分析电性分布参数,可以为检测结构的设计提供必要的理论依据。

1.2 电性分布参数分析

地下管线剖面图如图 1 所示,即管线、绝缘层及周围土壤,理想情况不记自身电阻分析,金属管线和绝缘层外的半径分别为 R_1, R_2 , 管线、绝缘层及周

围土壤的电阻率分别为 ρ_1, ρ_2, ρ_3 , 而且三者间形成一种类似于同轴传输电缆的关系且大小关系为 $\rho_1 \leq \rho_2 \geq \rho_3$, 其电性分布参数分析如下,分布电容 C_1 为

$$C_1 = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \left(\ln \frac{R_2}{R_1} \right)^{-1} \quad (1)$$

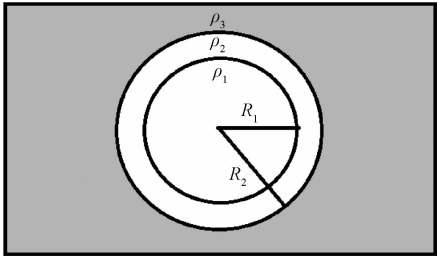


图 1 绝缘管线剖面示意图

其中, ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为中间绝缘层的相对介电常数^[1], 当绝缘层很薄时,

$$C_1 = \epsilon_r\epsilon_0 \frac{2\pi R_2}{R_2 - R_1} \quad (2)$$

当管线半径 R_1 越大时, 分流情况越多; 相反包裹的绝缘层 R_2 越厚分流的情况越少。通过分布电容分布到大地中的电流会形成分散的电场, 但通过电磁法可以使管线电场强度明显远高于非目标管线, 这样为探测器排除干扰源提供了支撑。

接地电阻 R 为覆盖在绝缘层上的土壤与无穷远处大地的电阻, 忽略外部因素影响, 其接地电阻为^[2]

$$R = \frac{\rho_3}{4\pi l} \ln \frac{2l}{R_2} \quad (3)$$

则单位长度的接地电阻为 $2lR$, 即:

收稿日期: 2020-08-13

作者简介: 陈旭(1990—), 男, 河北张家口人, 吕梁学院, 助教, 博士研究生, 研究方向: 控制工程与机械工程设计。

$$R_1 = \frac{\rho_3}{2\pi} \ln \frac{2l}{R_2} \quad (4)$$

利用数学模型分布电容与接地电阻 R_1 相当于串接在一起,乘积反映了分流的快慢情况,周围土壤介质的电阻率越大时接地电阻越大,而且绝缘层越后管线结构愈长接地电阻也越大,接地电阻越大分流越快,随着管线分布越长电场强度越弱,反之亦然。

上述可知管线中的电流密度远远大于土壤中的电流密度,可以忽略周围环境的电阻率,土壤中形成分散的电场趋近于零,被测管线相邻的管线也会存在微弱的电场,这样对定位被测管线精确点提供了必要理论依据。

2 三分量的磁场分析

球体在三维空间接收的磁场强度可以分为八个坐标轴分量,理想状态下剩余磁场强度为零,八分之一的空间如图 2 所示,令磁化强度为 M ,磁矩 $m = MV$,其中 $V = \frac{3}{4}\pi R^3$,球体的半径为 R ,球心坐标为 $(0,0,0)$,一般情况球心在 z 轴方向有纵向移

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{\mu_0 m \{ [2x^2 - y^2 - (z-D)^2] \cos I \cos A' + 3x(z-D) \sin I + 3xy \cos I \sin A' \}}{4\pi [\sqrt{x^2 + y^2 + (z-D)^2}]^{5/2}} \\ \Delta Y = \frac{\mu_0 m \{ [2y^2 - x^2 - (z-D)^2] \cos I \cos A' + 3x(z-D) \sin I + 3xy \cos I \sin A' \}}{4\pi [\sqrt{x^2 + y^2 + (z-D)^2}]^{5/2}} \\ \Delta Z = \frac{\mu_0 m \{ [2(z-D)^2 - x^2 - y^2] \cos I \cos A' + 3x(z-D) \sin I + 3xy \cos I \sin A' \}}{4\pi [\sqrt{x^2 + y^2 + (z-D)^2}]^{5/2}} \\ \Delta H = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中: I 为地磁倾角; A 为磁性能体与磁北的夹角; A' 为互余角^[3]。通过球体磁场分布,当取出一个很小的单位体时,可以继续演化成无限延伸的板状体磁场。

鉴于研究对象是地下金属管线,如果埋深程度较大可以认为测点的磁场只在接收器线圈的顶部作用,这里需要对斜层磁化板进行研究分析,其函数为

$$V = 2\lambda \ln \left(\cos \gamma \ln \sqrt{X^2 + Z^2} + \sin \gamma \arctan \frac{Z}{X} \right) \quad (7)$$

其中, $\lambda = 2bJ$, b 为薄板半宽度; J 为磁化强度。

由于薄板平行于地表面,在垂直走向的中心 y 分量为零,板倾角为 α ,有效磁化强度倾角为 ω ^[4],薄板倾角与磁化强度之间的差值为 γ ,此时 ΔH 、 ΔZ 、 ΔT 为

$$\begin{cases} \Delta Z = -2\lambda \sin \alpha \left(\frac{Z}{X^2 + Z^2} \cos \gamma + \frac{X}{X^2 + Z^2} \sin \gamma \right) \\ \Delta H = -2\lambda \sin \alpha \left(\frac{X}{X^2 + Z^2} \cos \gamma - \frac{Z}{X^2 + Z^2} \sin \gamma \right) \\ \Delta T = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta Z^2} \end{cases} \quad (8)$$

动。假设原点位置在 $(0,0,D)$,球心坐标到空间一点的距离为 $P(x,y,z)$, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-D)^2}$,其磁场可以由泊松公式求出。

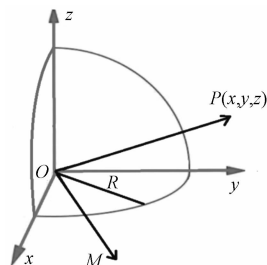


图 2 球面与坐标关系

球体的引力位置 V 为

$$V = \frac{G\sigma v}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-D)^2}} \quad (5)$$

其中, G 为引力常量, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$; σ 为球体密度; v 为球体体积。

对上述求二次导数,并带入泊松公式可得到任意剖面方向的球体磁场表达式:

如果把线圈基于金属管线一侧,可以 3 得不同倾斜方向下的磁场特性,如图 3 所示。可以看出在一点的中心位置电荷载量都没有成集中态势,趋近于发散状态,不同的倾斜方向都会改变 ΔT 的大小、方向,但成 60° 角时会有一个极大值点存在于线圈的顶部。

3 基于三分量的探测仪结构设计

3.1 结构设计

线圈位置依据球面磁场强度特性,每个线圈放置在坐标轴球面点上成 60° 角,如图 4 所示,通过分解空间一点 P 在该坐标内的磁场强度分量,以 z 轴方向为例,根据法拉第电磁感应定律,该轴方向上的电磁线圈得到感应电动势的大小为

$$E_z = \frac{ns u_0 I h}{2\pi r^2} f \cos 60^\circ \quad (9)$$

其中, z 轴线圈与分量之间成 60° 角,同理分别向其他轴作垂线求得另外两个分量的感应电动势,线圈面积、匝数均相同,再利用三角形法则得到总电动

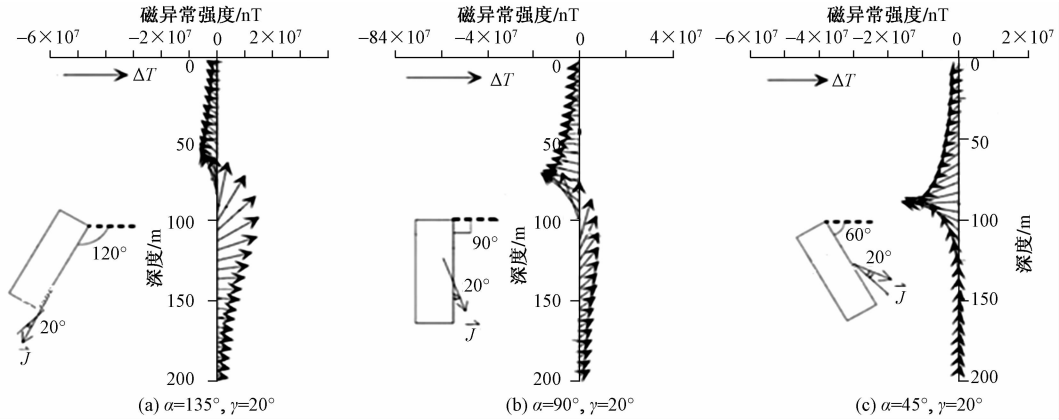


图3 斜层磁化不同方向的磁场特征

势 E 的磁场强度为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (10)$$

接收器在二维平面内接收电磁波强度的范围为 360° 角,而常用的接收器结构接受范围空间在 120° 之内,此接收器外部结构设计依据二维平面内球形磁场强度特性,伸缩杆长度相同且互成 120° 的三点式,每个伸缩杆端头均有一个传感器模块,利用信号处理模块连接三部分,最终设计成“Y”星型,如图5所示。

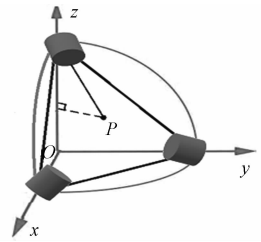


图4 线圈结构简易图

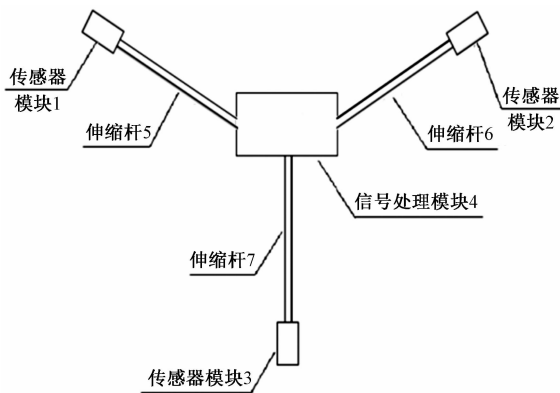


图5 接收器结构简易图

接收器和每个传感器模块里三个线圈组成双球面结构,并且三个线圈所有参数均相同,将“Y”星型接收器处于交变的磁场中,在每个传感器里的三

个线圈平面内得到的感应电动势 ϵ ,可以推得交变磁场的磁通最大值 B_m 为

$$\begin{cases} B = B_m \sin \omega t \\ \varphi = \varphi_m \sin \omega t \\ \epsilon = -N \frac{d\varphi}{dt} \\ \varphi_m = BS \\ \epsilon = \varphi' = -\omega BSN \cos \omega t \end{cases} \quad (11)$$

$$B_m = \frac{1}{NS \omega \sin \omega t \cos \omega t} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

3.2 结构工作原理

探测仪平行于地面接近信号源时,可能产生伸缩杆7垂直于管线,模块一、二中的线圈会接收电磁频率相同的波峰波谷(图6左),无论前后运动,两个模块接收的磁场信号大小均没有差值变化,此时应适当旋转接收器装置寻找到两模块之间的信号差值方向(图6右)。

当接收装置继续靠近地下管线,当模块一和模块二感应到的磁场信号强度差值为零时(图7左),接收器垂直于管线正上方,但此时管线走向方仍然不能确定,此时观察模块三的磁场强度,如果远小于其他两模块数值,以模块四为圆心旋转探测仪,使得模块三的磁场强度数值等于其他两模块值(图7右),依次判断出地下管线的走向方位,并利用两传感器模块梯度法测量出管线深度。

4 结论

1)可伸缩式拉杆结构不仅缩减因体积产生的占空面积和成本造价,而且增加了探测人员的便携性。

2)在三维空间建立的三个线圈和接收器整体构成的双层球面结构,不会因为线圈和磁场之间的角度不同而不能精确定位,这种“Y”星型结构解决

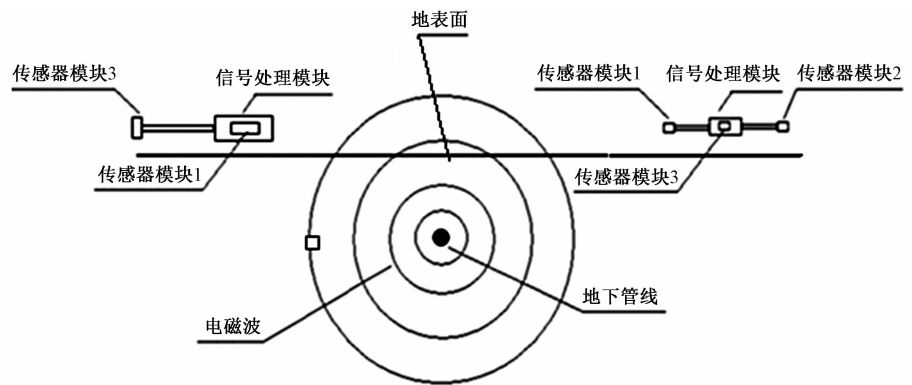


图 6 定位检测示意图

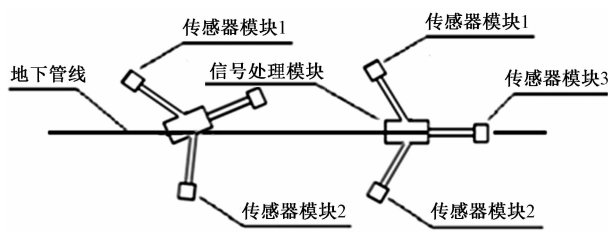


图 7 传感器线圈简易图

了三分量法接收磁场强度的不同,大大提高了定位的精确性。

3)相比传统的探测仪,本探测仪结构测得数据准确、检测效率高,减少了不必要的重复探测。

参考文献

[1] 鲁永康,杨越,汤型正. 地下金属管线的电性分布参数研究[J]. 工程地球物理学报,2004, 1(3):256—259.
[2] 丁文胜. 地下管线探测中测深精度的分析[J]. 测绘技术装备,2009,11(1):36—39.
[3] 姚静,潘和平,杨怀杰,等. 井中三分量磁测确定矿体方位和空间位置的方法[J]. 物探与化探,2017,41(1): 35—44.

[4] 潘和平,马火林,蔡柏林,等. 地球物理测井与井中物探[M]. 北京:科学出版社,2009
[5] 王庆乙,李学圣,徐立忠. 高精度井中三分量磁测是矿山深部找矿的有效手段[J]. 物探与化探,2009, 33(3): 235—244.
[6] 习宇飞,刘天佑,刘双. 井中磁测三分量联合反演[J]. 石油地球物理勘探,2012,47(2): 344—352.
[7] 欧洋,刘天佑,高文利,等. 井中三分量磁测的模量反演[J]. 物探与化探,2013,37(4): 664—668.
[8] 刘冬节. 利用井中三分量磁测异常垂直分量及水平分量模差对 旁侧异常进行二维拟合计算推断解释[J]. 物探与化探,2011,35(5): 617—619.
[9] SILVA J B C, HOHMANN G W. Interpretation of three component borehole magnetometer data[J]. Geophysics, 1981,46 (12): 1721—1731.
[10] 张科红,孙坚,徐红伟. 涡流检测探头校验装置的研制与应用[J]. 实验技术与管理,2009,26(9):56—58.
[11] 刘光鼎,程业勋,管志宁,等. 地磁场与磁法勘探[M]. 北京:地质出版社,2005.
[12] 李伟峰. 基于电磁感应的地下金属管线无损检测技术的研究[J]. 哈尔滨理工大学工学院学报,2011(3): 56—58.

Structure Design of Underground Metal Pipeline Detector Based on Three Component Method

CHEN Xu, KIM Gun-hoi

(Department of Mechanical & Automotive Engineering, Jeonju University, Jeonju 430074, Korea)

Abstract: At present, most of the working principles of the existing detectors are to receive electromagnetic wave signals through the excitation of electric field source. The distribution of electric field and magnetic field is the theoretical premise of structural design. Therefore, the function and influence of electrical distribution parameters and underground pipelines in detection technology were analyzed. A mathematical model was established to analyze the relationship between current carrying conductor and surrounding environmental electrical parameters, and the spatial three-dimensional vector magnetic field intensity distribution was adopted. The model of the coil and the structure design of the receiver in two-dimensional space were designed. In view of the imbalance of the distribution of the magnetic field strength, a new structure was put forward to compensate the imbalance with the mathematical model as the theoretical basis, so as to further improve the positioning accuracy.

Key words: underground metal pipeline; three component method; electrical distribution parameter; receiver; structural design