

基于六线圈的地下电力电缆定位技术研究^{*}

祝美灵 刘舒雨 韦 依 徐景晟 张 权 高宇杰 江 兵

(南京邮电大学 自动化学院人工智能学院 南京 210000)

摘 要: 针对现有地下电力电缆定位系统的不足,结合市场和检测现场的需求,介绍了一种地下电缆定位系统线圈排布的原理及实现方法。基于电磁感应原理设计一种具有6个感应线圈的信号接收器,针对待测现场电力电缆工作状态的未知性,对运行的电力电缆在不影响正常工作的情况下直接检测工频磁场信号,对没有运行的电力电缆则检测通过发射机注入的特定频率电流产生的磁场信号,建立了六线圈地下电缆路径和埋深判断的理论模型,推导了检测信号与电缆相应路径位置、埋深的理论公式,并用Maxwell仿真软件进行了仿真,实现了对地下电缆的路径走向的判定,避免了交叉电缆的误判,同时实现了对电缆埋深的探测,且地下电缆探测深度的相对误差 μ 仅为3.469%。

关键词: 地下电缆;电磁感应;定位;线圈布局

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

A novel underground cable positioning system based on six induction coils

Zhu Meiling Liu Shuyu Wei Yi Xu Jingsheng Zhang Quan Gao Yujie Jiang Bing

(College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210000, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the existing underground power cable positioning system, combined with the requirements of the market and the detection site, this paper introduces the principle and implementation method of the coil arrangement of the underground cable positioning system. Based on the principle of electromagnetic induction, a signal receiver with six induction coils is designed. In view of the unknown working state of the field power cable to be tested, the power frequency magnetic field signal can be directly detected without affecting the normal operation of the power cable, for the power cable without operation, the magnetic field signal generated by the current injected by the transmitter at a specific frequency is detected, and the induced electromotive force of each coil is compared and calculated to determine the distribution direction of the cable and calculate the buried depth and current of the cable. Finally, the path direction of the underground cable is determined, and the compass function can accurately determine the actual direction of the cable, avoid the wrong judgment of the cross cable, and realize the detection of the buried depth of the cable, the relative error of the detection depth of the underground cable is only 3.469%.

Keywords: underground cable; electromagnetic induction; positioning; coil layout

0 引 言

地下电缆定位系统是根据电磁感应原理,利用预处理电路和单片机对线圈所产生的电磁感应信号进行处理、计算、比较,实现对地下电缆的定位。

地下电力电缆定位系统的研究在西方一些发达国家已经进行了多年,随着现有检测技术的日渐成熟,检测的精度和快速性也得到相应的提高,很多国家都相继研发出了满足市场需求的电力电缆定位系统^[1-2]。就目前市场上存在

的电力电缆路径检测仪来看,按照它们的检测原理大致可以分为充电法、脉冲电磁法、电磁法^[3]3类。

目前国外厂家开发生产的地下电力电缆路径检测仪精度相对较高,检测的功能也很多。但是对于国内的大部分用户来说,国外的检测仪价格比较昂贵,且维护十分昂贵,售后十分麻烦,成本过高,无法作为日常使用。

而我国在研究地下电力电缆定位系统技术上的时间不长,从早期的电桥到近期的时域,现在已发展到二次脉冲、三次脉冲^[4],这些变化大多是解决测距的问题,现有的技术

收稿日期:2020-12-19

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(11604158)、国家创新训练计划(SYB2019021)项目资助

已经开始逐渐满足不了市场的需求了。

以往的电缆路径检测技术一般采用单线圈接收感应磁场信号,信号放大的经耳机或表头输出,通过判断信号幅值的大小来判断电缆的具体位置^[5-6]。这种方法不能直观地表示出电缆的位置,而必须靠操作者通过分析信号幅值的变化规律来判断,探测效率低,工作强度高,对操作者的实际操作经验有较高要求。

1 基于线圈的地下电力电缆定位基本原理

单根电缆在正常工作时都会产生一定频率的交流信号,根据电磁感应原理,变化的载流导线周围会产生变化的磁场,而变化的磁场又产生变化的电场,如图1所示。所以在电流频率不太高时,地下单根载流的电缆在地面上某点P产生的磁场强度可表示为:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi r} \quad (1)$$

式中:磁场 $\mathbf{B}$ 的单位为A/m; μ_0 为真空中介质的磁导率($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m); $\mathbf{I}$ 为导线中的电流强度; π 为圆周率; r 为电缆几何中心到点P的距离。

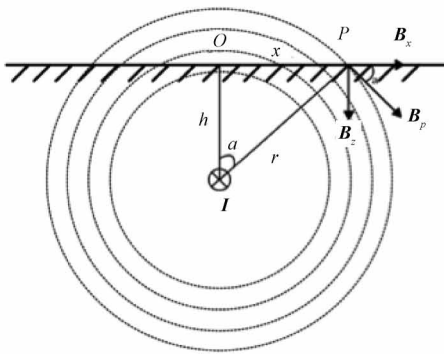


图1 地下电缆磁场分布

考虑到实际现场的电缆线路长度一般比较长,因此本文近似认为是无限长的载流直导线^[7-8],地下电缆也满足式(1)所示的磁场分布特性,则:

$$\mathbf{B}_x = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi} \times \frac{h}{x^2 + h^2} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{B}_x$ 为电缆在点P产生磁场的水平分量; h 为点P到电缆的垂直距离分量; x 为点P到电缆的水平距离分量。

目前,大部分智能型带电电缆路径检测仪的线圈结构由同一平面内的4个线圈组成^[9]。检测仪工作时,单片机根据4个线圈产生的感应电压的大小进行逻辑处理和比较,从而判断电缆路径的具体位置。多组合线圈根据各个线圈接收到的磁场大小计算埋地电缆的埋深和位置。四线圈布局如图2所示。

当4个线圈位于同一水平面时,采用峰值法进行位置探测。将该探测线圈平行放置于待测电缆上方,在1、3号线圈或者2、4号线圈分别作用时,可以根据线圈内感应电

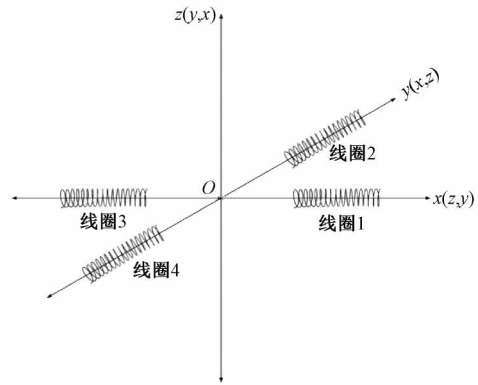


图2 四线圈布局

动势大小判定电缆与操作者的相对前后或左右位置,不断平移线圈使线圈内感应电动势达到最大值,此时探测线圈处于待测电缆正上方^[10-12]。此方法只能确定待测电缆大致的位置,精确度较低,且无法定深。

针对上述现状,本文提出了一种基于六组感应线圈的新型地下电缆定位系统,利用所设计的六组线圈构成的磁场检测模型可以快速确定地下待测电缆的敷设路径和埋深,具有较高的精度。

2 地下电缆定位线圈布局及工作原理

2.1 地下电缆定位系统线圈布局

本文系统所设计的感应线圈为6个,如图3所示,线圈1、2、3、4处于同一水平面,两两互相垂直,可共同工作完成对地下电缆走向的判定与指示,线圈5、6位于1、2、3、4所处平面上下位置,并且连线垂直于此平面,当线圈构成的接收器处于地下电缆正上方时,线圈5、6共同工作可完成地下电缆埋深的计算,这种构架设计可实现对地下电缆的路径走向、埋深、电流大小等的检测,具有检测精度较高、操作简单、成本较低等优点。

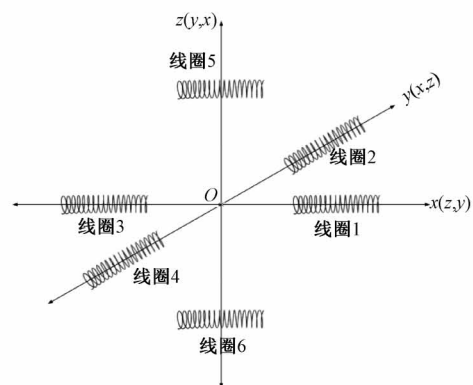


图3 地下电缆定位系统线圈结构

由式(1)可知,地下电缆在线圈中产生磁场 $\mathbf{B}$,使线圈带电,则线圈中产生感应电动势 $\mathcal{E}$,在1、3号线圈或者2、4号线圈分别作用时,操作人员可以根据线圈中感应电动

势大小判定电缆与操作者的相对位置。

在线圈 1、2、3、4 同时工作时,定位系统能够实现罗盘功能。由于本文系统设计采用四路通道同步采集的设计方案,因此,在开启罗盘功能时需通过单片机控制四路采集通道同时开启并计算各通道采集到的信号强度,根据各线圈感应电压可实现电缆 8 个方位的偏向指示。罗盘功能的实现可以准确地判定电缆实际走向,避免了交叉电缆的误判。

2.2 地下电缆定位方法

由式(2)可知,单个线圈接收磁场的水平分量 B_x , 当 $x=0$ 时,则:

$$B_{x\max} = \frac{\mu_0 I}{2\pi h} \quad (3)$$

即当检测仪位于待测电力电缆的水平地面正上方时,线圈接收到的磁场水平分量达到最大。当操作者处于电缆的正上方时,5、6 号线圈配合工作就可以探测电缆埋藏深度和电流大小。线圈 5、6 的空间距离为 d_1 , 设电力电缆的埋设深度为 h , 如图 4 所示。

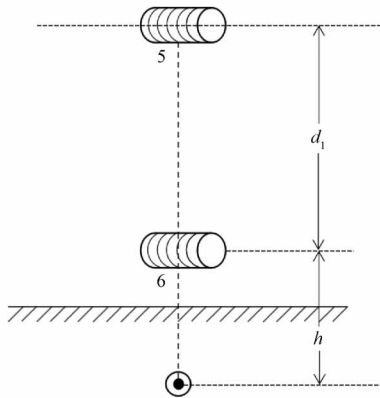


图 4 双线圈测量电缆深度和电流大小原理

假定待测电力电缆中输入的电流为:

$$i = I_0 e^{j\omega t} \quad (4)$$

从费曼物理学讲义中引用感应电动势瞬时表达式为:

$$\varepsilon = nBS\omega \cos\omega t \quad (5)$$

式中: n 为线圈匝数; B 为磁场强度; S 为线圈的截面积; ω 为电缆中信号的频率, 则当处于电缆正上方时, 6、5 号线圈中产生的电动势 ε_1 、 ε_2 分别为:

$$\varepsilon_1 = n \frac{\mu_0 I_0}{2\pi h} S\omega \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = n \frac{\mu_0 I_0}{2\pi(d_1 + h)} S\omega \quad (7)$$

式中: I_0 为待测电缆所载电流有效值, 当 6 号线圈与地面接触时, h 为电缆的埋藏深度。将式(6)、(7)联立, 得:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{d_1 + h}{h} \quad (8)$$

整理得:

$$h = \frac{d_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (9)$$

$$I_0 = \frac{2\pi h \varepsilon_1}{n \mu_0 S \omega \cos\omega t} \quad (10)$$

3 线圈电磁感应模型建立

本文通过 Maxwell 软件构建 6 个线圈组成的电磁感应的模型。在 xOy 平面以原点 O 为中心点放置 4 个感应线圈, 分别为编号为 1、2、3、4, 四个线圈两两垂直且相互之间距离相等, 在 z 轴方向上放置两个平行线圈, 分别编号为 5、6, 线圈 5 位于线圈 6 上方 $d_1=0.5$ m 处, 5、6 线圈中心点连线的中点与 xOy 平面的交于原点 O ; 再在平行于 xOy 平面上放置一个电流激励模拟待测的带电的电力电缆, 如图 5 所示。

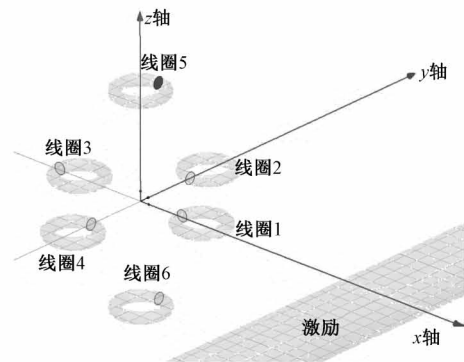


图 5 线圈电磁感应模型

4 线圈电磁感应模型仿真结果及分析

4.1 仿真结果及分析

运行所建立的模型, 即在待测电缆中注入交流电, 线圈中由电磁感应产生感应电动势, 分别放置线圈于 xOy 平面 4 个象限内、 x 轴正负方向、 y 轴正负方向这 8 个位置上, 分别导出 8 组感应线圈 1、2、3、4 中产生的感应电动势数据结果, 如表 1 所示。

表 1 判断地下电缆路径走向仿真结果

	线圈 4	线圈 3	线圈 2	线圈 1
实际位置	U_4/V	U_3/V	U_2/V	U_1/V
正左方	7.092	0.204	7.446	8.305
左后方	3.418	2.005	6.407	9.079
左前方	4.427	4.210	1.405	17.762
右后方	7.611	11.873	14.673	2.215
正右方	2.141 6	5.893 3	2.120 9	0.007 1
右前方	2.711 9	2.124 8	0.531 2	1.161 8
正后方	0.084 1	2.185 6	2.535 6	2.145 2
正前方	7.883 8	5.907 1	2.141 6	5.893 3

表 1 中, U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 分别为线圈 1、2、3、4 的感应电动势。

经过上述方向判断找到待测电缆的正上方, 即将感应

线圈模型放在电流激励的正上方,且线圈6置于水平地面,当线圈5、6的相对位置 $d_1 = 0.5$ m 不变时,即固定感应线圈模型的位置,此时不断向下平移电流激励的位置,相当于改变待测电缆的埋深,测试得到3组不同埋深时的数据结果,如表2所示。

表2 地下电缆埋深和电流大小仿真测试结果

编号	两线圈之间的 距离 d_1/m	U_6/V	U_5/V	待测电缆 埋深 $\bar{h}/\text{m}$	理论计算 深度 h_i/m ($h = \frac{d_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$)
1	0.5	8.092	3.407	0.35	0.364
2	0.5	9.446	4.425	0.40	0.441
3	0.5	8.673	4.531	0.50	0.550

表2中, U_5 、 U_6 分别为感应线圈5、6中的感应电动势。

由表1中数据分析可得,当激励模型(待测电缆)实际放置在第1象限内时:1号线圈的磁感应强度比3号线圈大,即 $U_1(11.873 \text{ V}) > U_3(2.215 \text{ V})$,1号线圈距离电缆更近,在图5感应模型中,电缆在 x 轴方向上位于线圈1的正方向;同样,2号线圈的磁感应强度比4号线圈大,即 $U_2(14.673 \text{ V}) > U_4(7.611 \text{ V})$,2号线圈距离更近,在图5感应模型中,电缆在 y 轴方向上位于线圈2的正方向;由此可以判定电缆位于平行于 x 轴且在线圈2的正方向、平行于 y 轴且在线圈1的正方向两个方向所围成的区域内,属于第1象限,由线圈感应电动势判断出来的相对位置与实际放置位置相同,可知系统判断方位的正确性。其余位置可由相同的方法判断出来,再与线圈模型放置的实际位置作比较,可以得出,仿真模型可以实现本文所述的罗盘功能。

4.2 建立 MATLAB 模型分析

为了验证仿真模型所得实验数据的正确性及可行性,使用仿真所得数据建立 MATLAB 相关模型。

当线圈1、2、3、4处于 xOy 平面,电缆激励位于 y 轴上,2、4线圈连线平行于 y 轴且远离 y 轴时,向靠近 y 轴方向平移2、4线圈,将感应线圈2、4的数据取绝对值后导入 MATLAB 中建立 y 轴方向模型如图6所示,线圈中的感应电压(三角形为线圈2感应电动势折线、圆形为线圈4感应电动势折线)可以反映模型中感应线圈相对于 y 轴的位置,同时可以发现线圈中感应电动势小时,线圈距电缆的距离较远,随着电动势增大,线圈距电缆距离越近(X形为距离折线),两者成反比关系。

线圈中的感应电动势由此可得出探测器下一步要走的方向以及大致距离,可以多次重复此过程以达到目标(y 轴),即感应电压达到最大值时停止,以此可以验证仿真得出的结论的正确性。

同样,建立 x 轴方向模型如图7所示,线圈中的感应电压(三角形为线圈1电动势折线、圆形为线圈3电动势折线)

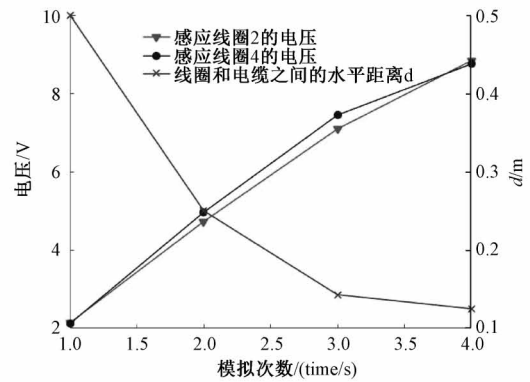


图6 y 轴方向模型

可以反映模型中感应线圈1、3相对于 x 轴的位置,同时可以发现线圈中感应电动势小时,线圈距电缆的距离较远,随着电动势增大,线圈距电缆距离越近(X形为距离折线),两者同样成反比关系。可以多次重复此过程以达到目标(x 轴)。

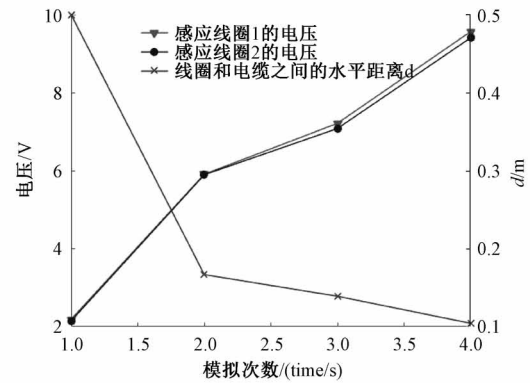


图7 x 轴方向模型

线圈1、2、3、4处于平行于 xOy 的平面,5、6线圈垂直于 xOy 平面置于 z 轴上且位置保持不变,向下平移待测电缆,将感应线圈5、6的数据导入 MATLAB 中建立指示深度误差模型如图8所示,线圈中的感应电压(圆形为模型仿真深度折线、方形为模型放置实际深度折线)可以反映电缆实际深度和模型仿真深度的偏离程度。可以观察到,两者变化趋势相同,误差在一定较小范围内。

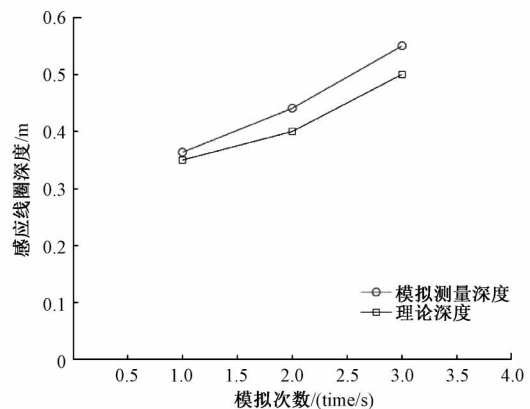


图8 深度误差模型(z 轴)

结合表 2 仿真结果及 MATLAB 深度误差模型分析, 可得相对误差 μ :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^3 |\bar{h} - h_i|}{3} \times 100\% = 3.469\% \quad (11)$$

所以本系统可以实现所设计的地下电缆定深功能, 且相对误差 μ 仅为 3.469%。

综上, 一方面, 普遍使用的单线圈和四线圈构成的探测仪只能定位而无法实现定深功能^[13], 本文系统相对这类探测仪增加了定深的新功能; 另一方面, 有部分探测仪也可以实现定深功能, 且主要是使用较为昂贵的 2 个三轴传感器组合^[14]的方法, 此方法在埋深不超过 2 m 时, 定深相对误差在 4%~5% 范围内^[15], 与本系统使用的双线圈定深比较, 在电缆埋深相同且不超过 2 m 的条件下, 相对误差要大 1%~2%, 便可以得出本系统使用双线圈法定深的优越性, 且本系统成本更低, 可在定位的同时实现更精确的定深, 还可以根据式(10)在定深时测出待测电缆中所载电流大小, 以方便后续开发使用。

5 结 论

提供了一种新型的由 6 个线圈构成的电磁信号感应接收端, 这种构架设计易于搭设, 具有罗盘功能及定深功能, 可实现对地下电缆的路径走向、埋深、电流大小等的检测。根据计算机的仿真结果分析可以看出, 本文提出的线圈排布形式所测量出的数据误差较小, 具有检测精度较高、操作简单、成本较低等优点, 可以为城市地下电缆的检测与管理提供很大的便利。

参考文献

- [1] DAVOUD A Z, BEHROOZ V. Hong point estimate method to analyze uncertainty in the underground cables temperature [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 124: 98-102.
- [2] WU H Z. Wireless power transfer experiment by using magnetic coupling resonance[J]. Journal of Electronic Research and Application, 2019, 3(1): 158-165.
- [3] UPADHYAY A. Underground cables: Complete solution of urban distribution network[J]. Electrical India, 2018, 58(4): 38-40, 42, 44.
- [4] SHARON R J, SWATHI S, SUBBASHINI S. Distance calculation for underground cable fault [J]. Programmable Device Circuits and Systems, 2019, 11(3): 858-865.
- [5] 董博, 李俊霞, 李海鹏, 等. 电磁感应法在地下管线探测中的具体应用[J]. 北京测绘, 2020, 34(8): 1095-1098.
- [6] 刘志宏, 秦钟, 陈红发. 高压电力电缆的故障类型与探测技术[J]. 集成电路应用, 2020, 37(10): 84-85.
- [7] 付国红, 李广, 黄良沛, 等. 水下金属管线探测仪电磁信号发送机设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 584-590.
- [8] 鲜敏, 李光耀. 铁路信号地下电缆路径识别系统研究[J]. 内燃机与配件, 2019(7): 180-181.
- [9] 邝帅, 颜国正, 王志武, 等. 无线胶囊内窥镜新型接收线圈结构设计与分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 58-66.
- [10] 俞红, 夏金鑫, 程林中. 10 kV 地下电力电缆路径检测方法研究[J]. 数码设计(下), 2019(10): 131-132.
- [11] 周洋. 地下电缆对环境的影响[J]. 中国科技投资, 2016, 28(2): 193-194.
- [12] 黄烜城, 王威, 吕泽鹏, 等. 基于磁场分量波形分析的地下电缆弱磁探测技术[J]. 南方电网技术, 2020, 14(6): 90-96.
- [13] 黄兴曼, 邬小玫, 方祖祥. 基于相位差的电磁定位系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 54-59.
- [14] 李映桥, 王学冬, 徐青龙, 等. 城市地下电缆路径检测系统的研究与设计[J]. 电气技术, 2020(8): 100-102.
- [15] 李新丽, 李建, 傅春明, 等. 基于微服务的电缆隧道综合状态监控系统[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 79-83.

作者简介

刘舒雨, 本科, 主要研究方向为电气工程。

E-mail: 1054649095@qq.com

江兵, 工学博士, 主要研究方向为智能仪器与测控系统。

E-mail: jiangbin_g@163.com