

# 基于工频磁场的电缆路径定位及其影响因素分析

王雪倩<sup>1</sup>, 聂一雄<sup>1</sup>, 李哲<sup>2</sup>, 邱浩荣<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 广东电网有限责任公司肇庆供电局, 广东 肇庆 526060)

**摘要:** 为避免城市施工过程中挖断电缆事故的频繁发生, 需要科学合理地对电缆路径实施定位。以三芯电缆为研究对象, 引入定位特征点和定位特征值  $K$  作为电缆上方磁感应强度判断依据, 并根据电缆周围磁场分布特性确定电缆敷设路径; 接着用该判据对影响检测点周围磁场环境变化的因素——线芯位置、电缆埋深、敷设间距和不同路径等进行分析论证。仿真结果表明: 定位特征值  $K$  能较好地反应电缆周围磁场环境变化, 定位特征点均出现在电缆正上方附近。最后, 通过有限元和实验验证该判据的准确性和可行性, 原理简单且可移植性强, 可以为实现智能化和现代化的电缆路径定位提供重要参考。

**关键词:** 电力电缆; 路径定位; 工频磁场; Maxwell; 电磁感应

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.011 中图分类号: TM726.4 文章编号: 1673-9140(2023)02-0096-09

## Analysis of cable path location and its influencing factors based on power frequency magnetic field

WANG Xueqian<sup>1</sup>, NIE Yixiong<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>2</sup>, QIU Haorong<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Zhaoqing Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhaoqing 526060, China)

**Abstract:** In order to avoid the frequent occurrence of cable cutting accidents in urban construction, the cable path should be located scientifically and reasonably. Taking three core cable as the research object, locating characteristic point and locating characteristic value  $K$  are introduced as the judgment basis of magnetic induction intensity above the cable, and the cable laying path is determined by the distribution characteristics of magnetic field around the cable. Then, the factors affecting the change of magnetic field around the detection points—wire core position, cable buried depth, laying spacing and different paths are analyzed by using this criterion. Simulation results show that the value of  $K$  can reflect the change of magnetic field environment around the cable well. The characteristic points appear near the top of the cable. Finally, the accuracy and feasibility of the criterion are verified by finite element and experiments. The principle of the proposed method is simple and portable, which provides an important reference for realizing intelligent and modern cable path positioning.

**Key words:** power cable; path location; power frequency magnetic field; Maxwell; electromagnetic induction

收稿日期: 2021-10-07; 修回日期: 2022-04-12

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM20210892)

通信作者: 聂一雄 (1964—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电工程理论新技术、电仪表的应用研究; E-mail: gduzdh997@163.com

近年来挖断电力电缆的事故仍频繁发生,严重影响人们的日常生活<sup>[1-3]</sup>。地下电缆发生故障的主要原因是早期对电缆敷设路径信息管理的相对落后以及近年来电缆线路的大规模改造,导致现存的路径图纸大多已不能正确反映电缆的实际路径,这种现象在老城区尤为突出<sup>[4]</sup>,相关部门在施工过程中往往不能准确定位电缆敷设路径而发生误挖断事故。

地下电缆及其相关设施是电力传输环节中的重点<sup>[5]</sup>,利用电缆路径定位技术准确定位电缆敷设路径是保障电力系统安全可靠运行的有效手段。文献[6]提出了一种基于相位差的电磁跟踪方法,搭建了采用C/S体系架构的电磁定位系统,该方法能确定电缆位置但无法确定埋深;文献[7]提出了一种适用于城市地下电缆的路径检测系统,应用信号接收与发射装置进行场强传导,推测电缆路径轨迹及埋深,该方法仅针对已知地下结构分布的电缆探测;文献[8]引入电子标识器技术对电缆路径探测进行改进,结合电缆深度数据与空间位置信息,获得电力设备的全方位信息,该方法需要在电缆敷设过程中安装较多的标识器;文献[9]提出了一种基于磁通门磁强计的地下电缆定位方法,采集并分析35 kV、500 A交流电缆附近的三轴磁场,利用波峰和波谷的位置实现电缆定位,该方法只有当采样率是电流频率的约数时才能得到较好的结果;文献[10]通过2个三轴磁场传感器所测量到的磁场信号分别与电缆构造一个平面,2个平面的交线即为电缆的位置,当有多回电缆同时存在时,该方法的定位效果不太理想。

本文在三芯电缆工频磁场环境的研究基础上,引入路径定位特征点和定位特征值 $K$ 作为电缆上方磁感应强度的判断依据,并根据电缆周围工频磁场特性确定电缆的敷设路径;接着使用该判据对影响检测点周围磁场检测的线芯位置、电缆埋深、敷设间距、不同路径等因素进行仿真分析,仿真结果表明,定位特征点和定位特征值 $K$ 能较好地反应电缆周围的磁场环境变化;最后,通过有限元仿真及实验验证该判据的准确性和可行性,原理简单、可移植性强,可以为电缆路径定位在配电网中的实用化提供较好的分析方法和理论依据。

## 1 电力电缆工频磁场计算模型

电力电缆结构主要分为导体、屏蔽层、绝缘层以及外护套等<sup>[11-12]</sup>,电缆的绝缘层外有一层金属材料(金属屏蔽、铠装)用于屏蔽电场或者增加机械强度。

当高压电缆的线芯通过交变电流时,电缆的金属屏蔽层两端会产生感应电压<sup>[13]</sup>。当线路发生短路或者是遭受操作过电压冲击时,屏蔽层会形成很高的感应电压,容易击穿护套绝缘,因此,屏蔽层要适当进行接地保护<sup>[14-15]</sup>。此时电缆的屏蔽层或铠装层组成一个封闭的导体壳,对电缆内部电荷起屏蔽作用,内部电荷受到工频电场的影响达到静电平衡,电缆的外部电场不受内部电荷的影响<sup>[16-17]</sup>。因此,工频磁场是其唯一的电磁环境评价因子<sup>[18]</sup>。

### 1.1 三芯电缆磁场计算模型

根据毕奥—萨伐尔定律可知<sup>[19]</sup>,当载流直导线视为无限长时,导线上各电流元在载流直导线外 $P$ 点处所产生的磁感应强度为

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

式中, $\mu_0$ 为真空磁导率; $I$ 为载流直导线中通过的电流强度的有效值; $r$ 为 $P$ 点到载流直导线的垂直距离。

在实际配电网中,电缆的导体结构多为多股绞线,每根导线在各自所在层内围绕电缆轴线旋转呈螺旋状,相邻层中的导体旋转方向相反,减少了邻近效应的影响<sup>[18]</sup>。所以在研究电缆周围工频磁场时,可以采用载流直导线模型来分析。三芯电缆磁场计算模型如图1所示, $P$ 点( $x, y$ )为三芯电缆外任意一点。

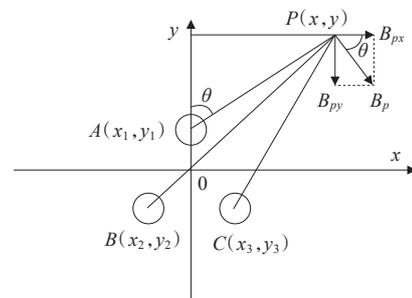


图1 三芯电缆磁场计算模型

Figure 1 Magnetic field calculation model of three-core cable

假设电流方向垂直纸面向外,各相通入的瞬时电流分别为 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ,则A相线芯在P点产生的磁感应强度 $B_A$ 以及沿 $x$ 、 $y$ 方向的分量为

$$\begin{cases} B_A = \frac{\mu_0 I_1}{2\sqrt{2}\pi r_1} \\ B_{Ax} = B_A \cos\theta = \frac{\mu_0 I_1 (y - y_1)}{2\sqrt{2}\pi r_1^2} \\ B_{Ay} = B_A \sin\theta = \frac{\mu_0 I_1 (x - x_1)}{2\sqrt{2}\pi r_1^2} \end{cases} \quad (2)$$

同理可得B、C相线芯在P点产生的磁感应强度及沿 $x$ 、 $y$ 方向的分量,再根据叠加定理,可知电缆外P点处的磁感应强度为

$$\begin{cases} B_{Px} = \frac{\mu_0}{2\sqrt{2}\pi} \sum_{i=1}^3 \frac{I_i (y - y_i)}{r_i^2} \\ B_{Py} = \frac{\mu_0}{2\sqrt{2}\pi} \sum_{i=1}^3 \frac{I_i (x - x_i)}{r_i^2} \\ B_p = \sqrt{B_{Px}^2 + B_{Py}^2} \\ r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \\ i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $r_i$ 为P点到各相线芯的垂直距离。

## 1.2 模型仿真分析

采用配电网中常用的YJV-8.7/10-3×240 mm<sup>2</sup>交联聚乙烯三芯电缆搭建计算模型(图1)。假设电缆的屏蔽层为非磁性材料,电缆的长度足够长。对三芯电缆施加有效值为300 A、相角互差120°的三相平衡电流,仿真计算 $t=0.02$  s时电缆正上方0.7 m、水平距离10 m处的磁感应强度分布情况,其中,负号表示仿真计算位置在电缆的左方(下同)。同时考虑双回、三回电缆呈水平一字形敷设,敷设间距为200 mm。

不同回数下三芯电缆磁感应强度分布曲线如图2所示,可知单回、双回、三回三芯电缆上方的磁感应强度均呈抛物线对称分布,从水平距离-5~5 m的磁感应强度先增大后减小,在电缆正上方取得最大值;随着电缆回数的增加,同一位置的磁感应强度也随之增大,在电缆正上方增加幅度最大。

以单回电缆为例,1个周期内的磁感应强度分布曲线如图3所示,不同时刻同一位置的磁感应强度分布规律不变,但幅值大小随电流而变;随着电

缆正上方水平距离的增大,磁感应强度变化幅度逐渐减小;在电缆正上方附近磁感应强度变化幅度最大,且在水平距离0处磁感应强度取得最大值。

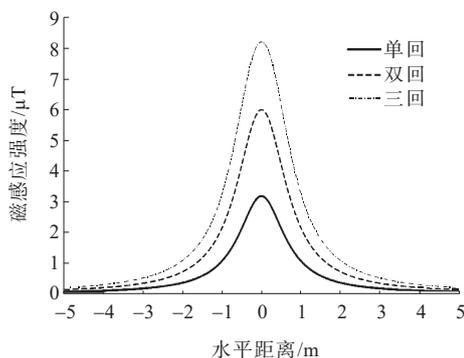


图2 三芯电缆磁感应强度分布曲线

Figure 2 Magnetic induction intensity distribution curve of three-core cable

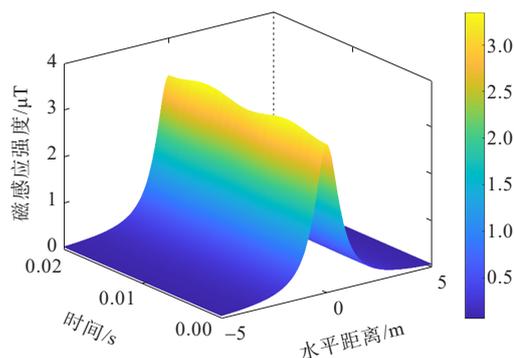


图3 三芯单回电缆磁感应强度分布曲线

Figure 3 Magnetic induction intensity distribution curve of three-core single-loop cable

## 1.3 基于工频磁场的电力电缆路径定位

分别对每个时刻三芯单回电缆上方水平距离为10 m处的磁感应强度进行一阶求导,得到三芯单回电缆的磁感应强度变化率分布曲线,如图4所示,其特点在于:

- 1) 磁感应强度变化率呈“波浪”分布,先增大后减小再增大的变化趋势;
- 2) 不同时刻同一位置的磁感应强度变化率的分布规律不变,但幅值大小随电流而变;
- 3) 随着电缆正上方水平距离的增大,磁感应强度变化率逐渐趋于零;
- 4) 曲线沿坐标原点中心对称分布,磁感应强度变化率最大的点出现在距离水平距离0处左右两侧同一位置,水平距离0处为电缆实际敷设位置。

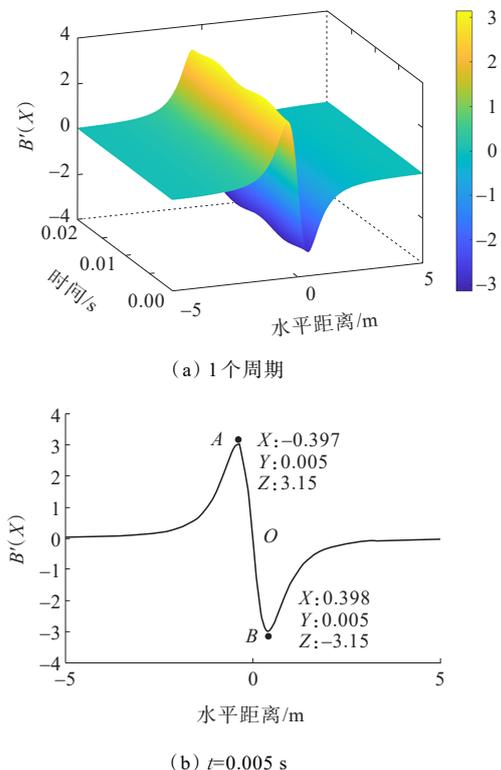


图 4 三芯单回电缆磁感应强度变化率分布曲线  
Figure 4 Magnetic induction intensity change rate distribution curve of three core single loop cable

为便于分析电缆上方工频磁场的磁感应强度变化幅度,提出以定位特征点和定位特征值  $K$  作为电缆上方磁感应强度的判断依据。定义定位特征点为电缆上方磁感应强度变化率最大的点  $(x, B'(x)_{\max})$ ,其相应横坐标的绝对值为定位特征值  $K$ ,即

$$B'(x) = \left( \frac{\Delta B}{\Delta x} \right)_{\max} \quad (4)$$

$$K = |x| \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $\Delta B$  为电缆上方单位磁感应强度变化值;  $\Delta x$  为电缆上方单位距离变化量;  $x$  为磁感应强度变化幅度最大值时对应的横坐标值。

由图 4 可知,1 个周期内的定位特征点随时间呈周期性变化,定位特征值的变化幅度很小。当  $t=0.005\text{ s}$  时,三芯单回电缆的定位特征点为  $A(-0.397, 3.150)$ ,其相应的横坐标的绝对值记为定位特征值  $K=0.397$ 。考虑磁感应强度分布的对称性和多回电缆之间的间距,当取得磁感应强度变化率最大的点时,定位特征值  $K$  减去多回电缆之间的间距即为定位特征点距离电缆的相对水平距离,约

为 0.388,即磁感应强度变化率最大的点出现在电缆正上方附近。

同理,分别对每个时刻双回、三回三芯电缆上方水平距离 10 m 处的磁感应强度进行一阶求导,也可以检测分析双回、三回三芯电缆上方的磁感应强度变化幅度。当  $t=0.005\text{ s}$  时,不同回数下三芯电缆的定位特征值  $K$  如表 1 所示。随着电缆回数的增加,定位特征值  $K$  随之增大;定位特征点距离电缆的相对水平距离较小,均出现在电缆正上方附近,定位特征点能很好地反映与电缆的相对位置。

表 1 不同回数下三芯电缆的定位特征值  $K$

Table 1 The locating characteristic value  $K$  of three-core cables under different cycles

敷设方式	$K$	相对水平距离/m
单回	0.397	0.388
双回	0.446	0.337
三回	0.525	0.307

因此,在实际电缆路径检测过程中,可以根据不同的电缆敷设方式确定定位特征值  $K$  的大致范围,再利用高精度的磁传感器检测分析,并比较定位特征值  $K$  附近的磁感应强度变化率,通过寻找定位特征点即可实现电缆的预警定位;再根据电缆上方工频磁场的磁感应强度变化率呈原点中心对称分布的特点,可以实现对电缆敷设路径的精准定位。单芯电缆与三芯电缆的磁感应强度分布规律基本相同,同样可以采用上述原理进行分析,本文主要以三芯电缆作为研究对象。

## 2 三芯电缆磁场分布规律影响因素分析

在实际敷设过程中,电缆的线芯摆放位置、埋深及敷设间距等参数均是未知的,且在检测过程中也不可能按照已知的电缆敷设路径进行检测,因此,本文提出判据的应用必须考虑这些因素对检测结果的影响。

### 2.1 线芯位置的影响

三芯电缆在封装后,其内部各相芯线的相对位置不易测定<sup>[20]</sup>,电缆线芯位于电缆内部具有随机

性,直接影响到观测点与电缆线芯之间的距离,从而影响磁场分布。分别将三芯电缆以电缆的中心点顺时针旋转 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ ,如图5所示,仿真分析 $t=0.02\text{ s}$ 、三芯电缆线芯位置不同时电缆上方磁感应强度的变化,如图6所示。



图5 线芯位置旋转示意

Figure 5 Schematic diagram of core position rotation

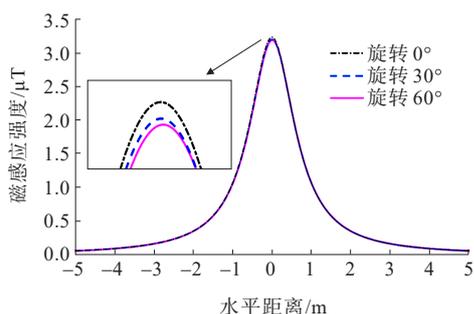


图6 线芯位置对三芯电缆磁场分布的影响

Figure 6 Influence of core position on magnetic field distribution of three-core cable

由图6可知,水平距离为 $-5\sim 5\text{ m}$ 时磁感应强度变化规律基本相同;随着旋转角度的增大,电缆正上方的磁感应强度逐渐减小,但变化幅度不大,可以忽略不计。这是由于三芯电缆的横截面积很小,电缆线芯位置的变化相较于电缆埋深来说可以忽略不计。因此,线芯位置的变化对电缆周围的磁场分布几乎没有影响,对定位特征点及定位特征值 $K$ 的变化没有影响。

## 2.2 电缆埋深的影响

电缆设计规范GB 50217规定,敷设过程中直埋电缆外皮至地面深度不得小于 $0.7\text{ m}$ <sup>[21]</sup>。在实际敷设过程中,直埋电缆的埋深一般为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 。改变电缆的埋深,仿真计算 $t=0.005\text{ s}$ 、电缆埋深为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 时单回电缆的磁感应强度变化率,如图7所示,可知当电缆埋深确定时, $B'(x)$ 呈“波浪”分布,先增大后减小再增大,在电缆正上方附近取得最值;随着电缆埋深的增加, $B'(x)$ 的取值逐渐减小,电缆正上方附近磁感应强度变化幅度逐渐减小。

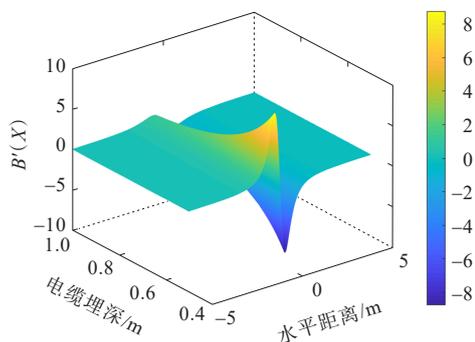


图7 埋深对三芯单回电缆磁感应强度变化率的影响

Figure 7 Influence of buried depth on change rate of magnetic induction intensity of single loop cable

考虑双回、三回电缆的情况,电缆间敷设间距为 $200\text{ mm}$ ,不同回数下电缆埋深对定位特征值 $K$ 的影响如图8所示,当电缆回数确定时,随着电缆埋深的增加,定位特征值 $K$ 随之增加;当电缆埋深为 $1\text{ m}$ 时,此时定位特征点距离单回、双回、三回电缆的相对水平距离分别为 $0.561$ 、 $0.491$ 、 $0.432\text{ m}$ ,定位特征点均出现在电缆正上方附近。

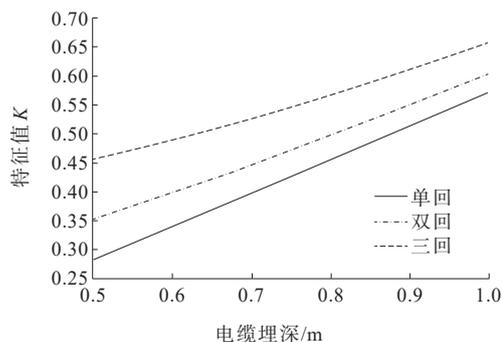


图8 埋深对定位特征值 $K$ 的影响

Figure 8 Influence of cable buried depth on locating characteristic value  $K$

## 2.3 敷设间距的影响

根据电缆设计规范GB 50217规定,多回直埋电缆在敷设过程中,两两间距不得小于 $100\text{ mm}$ <sup>[21]</sup>,在实际敷设过程中,多回电缆之间的间距大多为 $100\sim 200\text{ mm}$ 。改变电缆间的敷设间距,仿真计算 $t=0.005\text{ s}$ 、三回三芯电缆敷设间距为 $100\sim 200\text{ mm}$ 时磁感应强度变化率,如图9所示,可知当电缆敷设间距确定时, $B'(x)$ 仍呈“波浪”分布,在电缆正上方附近取得最值;随着电缆敷设间距的增大, $B'(x)$ 的取值逐渐减小,但变化幅度不大。这是由于电缆敷设间距的改变远小于电缆埋深,三芯电缆上方磁感应强度变化不明显。

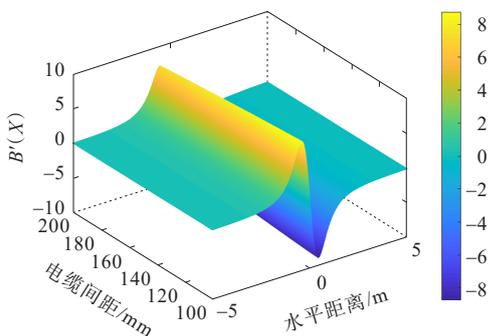


图 9 间距对三回电缆磁感应强度变化率的影响

Figure 9 Influence of spacing on change rate of magnetic induction intensity of three-loop cable

间距对定位特征值  $K$  的影响如图 10 所示,当敷设间距确定时,随着电缆回数的增加,定位特征值  $K$  也随之增加,增加幅度逐渐变大;当电缆回数确定时,定位特征值  $K$  随着敷设间距的增加而增加。当敷设间距为 200 mm 时,定位特征点距离双回、三回电缆的相对水平距离分别为 0.337、0.307,定位特征点出现在电缆正上方附近。

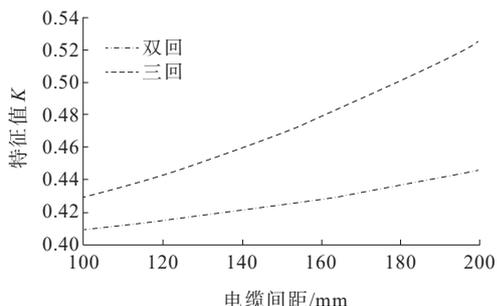


图 10 间距对定位特征值  $K$  的影响

Figure 10 Influence of laying spacing on locating characteristic value  $K$

### 2.4 不同检测路径的影响

前文分别仿真分析了线芯位置、电缆埋深以及敷设间距对检测结果的影响,但检测路径均是垂直于电缆。以三回三芯电缆为例,将检测路径顺时针依次旋转  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $80^\circ$ ,分别仿真计算  $t=0.005$  s 时电缆上方磁感应强度变化率,如图 11 所示,可知随着检测角度的依次增大,  $B'(x)$  的变化规律基本保持一致,所有曲线均经过原点呈中心对称分布,并且磁感应强度的变化幅度逐渐变小,  $B'(x)$  的取值逐渐减小,曲线逐渐平缓。

不同检测路径对定位特征值  $K$  的影响如表 2 所示,随着检测角度的增大,定位特征值  $K$  逐渐变大;

同一检测角度下随着电缆回数的增多,定位特征值  $K$  增大;不同敷设方式下定位特征值  $K$  的取值虽然不同,但均出现在电缆正上方附近;定位特征点与距离电缆的相对水平距离保持不变。

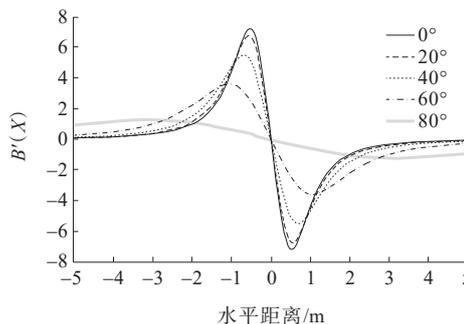


图 11 检测路径对电缆磁感应强度变化率的影响

Figure 11 The influence of detection path on the change rate of cable magnetic induction intensity

表 2 不同检测路径对定位特征值  $K$  的影响

Table 2 The influence of different detection paths on locating characteristic value  $K$

角度/ ( $^\circ$ )	单回		双回		三回	
	$K$	相对水平 距离/m	$K$	相对水平 距离/m	$K$	相对水平 距离/m
0	0.397	0.388	0.446	0.337	0.525	0.307
20	0.428	0.388	0.478	0.337	0.559	0.307
40	0.525	0.388	0.582	0.337	0.685	0.307
60	0.807	0.388	0.892	0.337	1.042	0.307
80	2.272	0.388	2.573	0.337	2.975	0.307

综上所述,在检测过程中,电缆埋深、敷设间距及不同检测路径等均会对电缆周围的工频磁场产生影响,但本文提出定位特征点及定位特征值  $K$  的判据仍然适用,定位特征值  $K$  的变化规律明显,定位特征点均出现在电缆正上方附近。因此,在实际检测过程中,通过设定定位特征值寻找定位特征点,可以实现电缆路径的预警定位;再根据磁感应强度变化规律可以实现对电缆路径的精准定位。

### 3 有限元仿真与实验验证

为验证本文提出判据的可行性,采用 Maxwell 进行有限元仿真验证,并选取美国 HOLADAY 公司生产的型号为 HI-3604 的工频电磁检测仪在较为空旷的场地进行实验验证。

### 3.1 有限元仿真验证

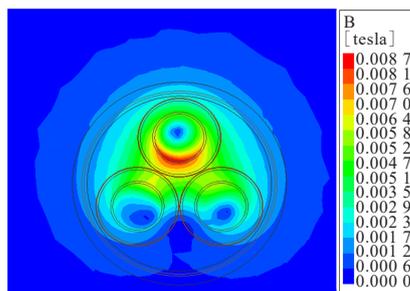
采用配电网中型号为 YJV-8.7/10-3×240 mm<sup>2</sup> 的交联聚乙烯三芯电缆为模型,搭建二维有限元仿真模型。整个求解域的水平距离为 3 m,电缆距离地表的垂直距离为 0.7 m,施加有效值为 300 A、相位互差 120° 的三相平衡电流,电缆结构参数如表 3 所示。

表 3 电缆结构参数

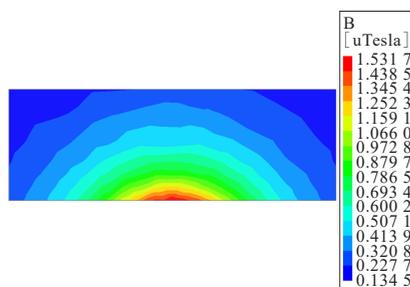
Table 3 Cable structure parameter

电缆结构	材料	尺寸/mm	相对磁导率
导体直径	铜	18.3	1
导体屏蔽厚度	半导体材料	0.8	1
绝缘厚度	交联聚氯乙烯	4.5	1
绝缘屏蔽厚度	半导体材料	0.8	1
金属屏蔽层	铜	0.2	1
包带厚度	半导体材料	0.2	1
内/外护套	PVC	2.0/3.5	1
铠装带	镀锌钢带	0.8	100

为提高仿真效率,将其他非金属材料均设置为真空,并默认土壤和空气中的相对磁导率为 1。选择瞬态求解器进行求解,设置 balloon 边界,仿真时间为 0.02 s(1 个周期)。当  $t=0.005$  s 时,三芯单回电缆附近及电缆地表上方磁感应强度分布云如图 12 所示。



(a) 电缆附近



(b) 电缆地表上方

图 12 三芯单回电缆磁感应强度分布云

Figure 12 Magnetic induction intensity distribution cloud of three-core single-loop cable

由图 12 可知,在地表水平方向,磁感应强度从电缆左方到电缆右方先增大再减小,在垂直方向,磁感应强度随着地面高度的增大而减小;磁感应强度主要集中在电流相位为 0 的 A 相电缆的线芯与绝缘层接触处,并沿径向逐渐较小;磁感应强度最大值约为 1.532  $\mu$ T,小于图 2 所示三芯单回电缆的磁感应强度的理论最大值,这是由于三芯电缆的铠装层为磁性材料,相对磁导率较大,对电缆周围磁场有屏蔽作用,但三芯电缆地表上方的磁感应强度总体变化规律与图 3 所示变化规律保持一致。同时考虑双回、三回电缆呈水平一字形敷设,敷设间距为 200 mm,其他仿真条件不变,随着电缆回数的增加,电缆上方的磁感应强度也随之增大,分别为 2.980、3.720  $\mu$ T,均小于理论值。

将  $t=0.005$  s 时的仿真结果进行数据后处理,得到三芯电缆不同回数下定位特征值  $K$  的有限元计算结果,将其与理论计算结果对比,如表 4 所示。考虑有限元计算网格划分所带来的系统误差,允许定位特征值  $K$  的有限元计算结果与理论计算结果之间的相对误差在 6% 以内。

表 4 有限元计算结果与理论计算结果对比

Table 4 Comparison of finite element calculation results and theoretical calculation results

敷设方式	$K$		相对误差/ %
	理论	有限元	
单回	0.397	0.418	5.28
双回	0.446	0.467	4.71
三回	0.525	0.543	3.43

### 3.2 实验验证

实验现场如图 13 所示,路径 1 是由五回电缆构成的电缆沟,在电缆井处分出两回电缆,由路径 2 以直埋敷设的方式(间距约为 100 mm)通往 10 kV 接线室,向整栋教学楼供电,利用工频磁场探测仪对路径 2 进行探测。具体实验步骤如下:

1) 将探测仪调至工频磁场探测(max)模式,以确保每次测量结果都在同一检测标准下;通过磁场探测仪寻找电缆上方磁感应强度最大点,实现对电缆路径的初步判定并进行标记;

2) 在标尺上以 5 cm 为间隔均匀地标记一系列的检测点,以标尺的中点建立检测坐标系,并把标

尺的中心点放置在地面磁感应强度最大处;

3) 将探测仪沿着标尺的中心点分别向左、右依次移动5 cm至标尺上所标记的点,测量并记录电缆上方水平距离3 m路径上共计61个探测点数据;

4) 重复步骤3),共记录3组数据。

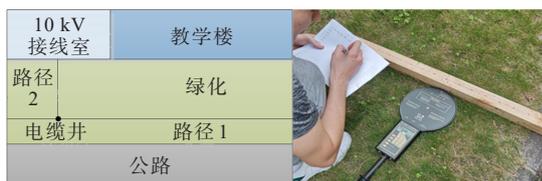


图13 实验现场

Figure 13 Schematic diagram of experiment site

考虑测量时用电负荷的波动以及仪器本身带来的误差,采用Fourier函数对数据进行拟合,磁感应强度变化率拟合曲线如图14所示, $B'(x)$ 呈“波浪”分布,在电缆正上方附近处取得最大值;随着水平距离的增大, $B'(x)$ 逐渐减小趋于零。定位特征值 $K$ 为0.37~0.42,考虑电缆敷设间距,此时定位特征点距离电缆的相对水平距离为0.27~0.32。实际定位特征点距离电缆的相对水平距离约为0.29 m,验证了本文提出判据的准确性和可行性,可以直接通过该判据实现对电缆周围磁场环境的判断。

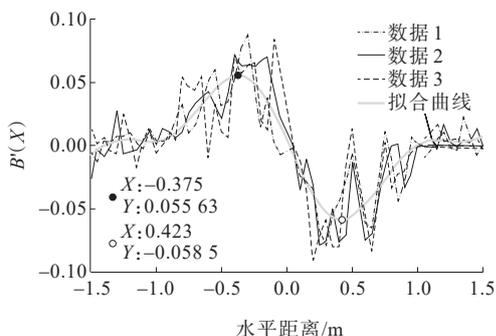


图14 磁感应强度变化率拟合曲线

Figure 14 Fitting curve of magnetic induction intensity variation

## 4 结语

本文以三芯电缆为研究对象,引入定位特征点及定位特征值 $K$ 作为电缆上方磁感应强度的判断依据,并利用该判据对可能影响检测点周围磁场变化的因素即线芯位置、电缆埋深、敷设间距以及不同路径等进行分析论证。仿真结果表明:改变不同

的影响因素,电缆上方磁感应强度变化规律不同,但定位特征值 $K$ 均能较好地反应电缆周围的磁场环境变化,定位特征点均出现在电缆的正上方附近,且定位特征值 $K$ 的有限元仿真结果与理论计算结果的相对误差在6%以内。因此,可以通过设定定位特征值 $K$ 、寻找定位特征点的方式实现电缆的预警定位,再根据电缆周围磁场分布特性实现电缆的精准定位。

单芯电缆与三芯电缆的磁感应强度分布规律基本相同,同样可以采用上述原理进行分析,得到普遍性规律,原理简单、可移植性强,为电缆路径定位在配电网中的实用化提供了较好的分析方法和理论依据。如何设计开发相应的检测装置,并且在噪声背景下提取出有效的工频弱磁信号,实现智能化的路径检测是今后需要进一步深入研究的方向。

## 参考文献:

- [1] 袁燕岭,周灏,董杰,等.高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J].高电压技术,2015,41(4):1194-1203.  
YUAN Yanling, ZHOU Hao, DONG Jie, et al. Sheath current in HV cable systems and its on-line monitoring for cable fault diagnosis[J].High Voltage Engineering,2015,41(4):1194-1203.
- [2] 惠宝军,傅明利,刘通,等.110 kV及以上电力电缆系统故障统计分析[J].南方电网技术,2017,11(12):44-50+67.  
HUI Baojun, FU Mingli, LIU Tong, et al. Statistical analysis on failures of 110 kV and above power cable system[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(12): 44-50+67.
- [3] SHAALAN E M, WARD S A, YOUSSEF A. Analysis of a practical study for under-ground cable faults causes[C]// 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Assiut, Egypt, 2021.
- [4] 林志超,吴旭灿,罗步升,等.非接触式低压线缆漏电故障定位技术[J].供用电,2022,39(10):44-50+74.  
LIN Zhichao, WU Xucan, LUO Busheng, et al. Non-contact technology of low-voltage cable leakage fault location[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(10): 44-50+74.
- [5] 李巍巍,白欢,吴惟庆,等.基于振荡波局部放电检测的电力电缆绝缘老化状态评价与故障定位[J].电测与仪表,2021,58(9):147-151.  
LI Weiwei, BAI Huan, WU Weiqing, et al. Evaluation and fault location of power cable insulation aging based on oscillation-wave partial discharge detection[J]. Electrical

- Measurement & Instrumentation,2021,58(9):147-151.
- [6] 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):73-79+86.  
LI Yingqiao,WANG Xuedong,XU Qinglong,et al.Research and design of urban underground cable path detection system[J].Electrical Technology,2020(8):73-79+86.
- [7] 黄兴曼,鄢小玫,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.  
HUANG Xingman,WU Xiaomei,FANG Zuxiang.Design of electromagnetic positioning system based on phase difference[J].Electronic Measurement Technology,2020,43(8):54-59.
- [8] 叶远红,邓兴虞,梁戟,等.电子标识器技术在电缆路径探测中的应用[J].自动化与仪器仪表,2019(9):238-240.  
YE Yuanhong,DENG Xingyu,LIANG Ji,et al.Application of electronic identifier in cable path detection[J].Automation and Instrumentation,2019(9):238-240.
- [9] HUANG X,WANG W,LÜ Z,et al.Precise positioning of the underground power cable by magnetic field detection[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP),East Rutherford,NJ,USA,2019.
- [10] 郭智刚,高健,闫峰,等.长距离330 kV电缆依频模型局放传输特性分析及信号定位试验验证[J].电网与清洁能源,2022,38(11):17-26.  
GUO Zhigang,GAO Jian,YAN Feng,et al. Partial discharge transmission characteristic analysis of the frequency-dependent model of the long distance 330 kV cable and experimental verification of signal positioning [J].Power System and Clean Energy,2022,38(11):17-26.
- [11] 张丹丹,苏小婷,景晓东,等.基于阻抗谱的同轴电缆故障及中间接头定位实验研究[J].高压电器,2021,57(7):92-97.  
ZHANG Dandan,SU Xiaoting,JING Xiaodong,et al. Experimental study on coaxial cable faults and intermediate joints location based on impedance spectrum [J].High Voltage Apparatus,2021,57(7):92-97.
- [12] 尹丽菊,于毅,咸日常,等.基于无监督学习的交叉互联电缆行波测距方法[J].智慧电力,2021,49(4):89-94.  
YIN Liju,YU Yi,XIAN Richang,et al.Traveling wave ranging method for cross-bonded cable based on unsupervised learning[J].Smart Power,2021,49(4):89-94.
- [13] 蔡少飞.高压及控制电缆屏蔽层接地方式探析[J].黑龙江电力,2019,41(4):324-328.  
CAI Shaofei.Analysis on grounding mode for shield layer of high-voltage cable and control cable[J].Heilongjiang Electric Power,2019,41(4):324-328.
- [14] 刘浩然,周凯,王昱皓,等.基于电磁耦合注入的电力电缆局部缺陷在线定位方法[J].中国电力,2021,54(12):177-185+194.  
LIU Haoran,ZHOU Kai,WANG Yuhao,et al.An online location method for local defects in power cables based on electromagnetic coupling injection[J].Electric Power,2021,54(12):177-185+194.
- [15] 刘炎,夏向阳,李明德,等.高压电力电缆轨迹法在线监测方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):202-210.  
LIU Yan,XIA Xiangyang,LI Mingde,et al.Research on online monitoring system based on locus method of HV power cable[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(3):202-210.
- [16] 徐逸民.35 kV海底光电复合缆的电磁环境研究[D].大连:大连理工大学,2018.  
XU Yimin.Research on electromagnetic environment of 35 kV submarine cables[D].Dalian:Dalian University of Technology,2018.
- [17] 董灵鹏,邹国平,杨仕友.电力巡检无人机电磁场测距及校准技术研究[J/OL].电测与仪表:1-6[2020-11-04].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201103.1807.002.html>.  
DONG Lingpeng,ZOU Guoping,YANG Shiyu.Research on electromagnetic field ranging and calibration technology of electric patrol UAV[J/OL].Electrical Measurement & Instrumentation,1-6[2020-11-04].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201103.1807.002.html>.
- [18] 李蓉,周凯,万航,等.基于输入阻抗谱的电力电缆本体局部缺陷类型识别及定位[J].电工技术学报,2021,36(8):1743-1751.  
LI Rong,ZHOU Kai,WAN Hang,et al.Identification and location of local defects in power cable body based on input impedance spectroscopy[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(8):1743-1751.
- [19] 冯慈璋.电磁场(第2版)[M].北京:高等教育出版社,1983:117-119.  
FENG Cizhang.Electromagnetic fields (second edition) [M].Beijing:Higher Education Press,1983:117-119.
- [20] 袁超,储海军,陈燕擎,等.考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):115-120.  
YUAN Chao,CHU Haijun,CHEN Yanqing,et al.Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling[J].Power System Protection and Control,2021,49(2):115-120.
- [21] GB 50217—2007.电力工程电缆设计规范[S].  
GB 50217—2007.Code for design of power engineering cables[S].