

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407704

矿用井下电缆故障感应电场-磁耦合谐振综合检测方法研究*

闫孝姮 颜志鹏 陈伟华 侯潇涵 赵亮

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘要:高瓦斯矿井下供电电缆发生故障导致采煤机等设备停工,严重影响生产效率和经济效益。当前,地面电缆故障检测常用的高压脉冲闪络法、行波反射测距法等均不适用于井下检测环境,因此提出了一种感应电场-磁耦合谐振式矿用电缆故障井下综合检测新方法。在低频正弦激励源条件下,建立感应电场-磁耦合谐振式电缆故障综合检测方法数学模型,采用多物理场仿真软件 COMSOL 对电缆开路短路故障情况下的电磁场量求解,得到电场强度、磁场强度的二维分布以及探测线圈感应电压的一维曲线,仿真及实验测定了所使用线圈开路和短路时的感应电压随提高高度的变化曲线。研究表明,基于低频感应电场-磁耦合谐振式综合方法进行矿用电缆故障井下检测具有可行性,在幅值 1~20 V、频率范围 1 kHz~20 MHz 的激励下,在同一提高高度下对电缆沿线检测,可以检测长度在激励波长十分之一内电缆的开路和短路故障。为煤矿电缆故障井下检测以及产品研发提供了一种行之有效的方法。

关键词: 矿用电缆;感应电压;磁耦合谐振;井下检测;感应电场-磁耦合谐振

中图分类号: TN06; TH85⁺3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1030

Research on comprehensive detection method of induced electric-magnetic coupling resonance for fault of mining underground cable

Yan Xiaoheng Yan Zhipeng Chen Weihua Hou Xiaohan Zhao Liang

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: A power cable failure in a mine with high-concentration gas has caused coal mining machines and other equipment to stop operating, severely affecting production efficiency and economic benefits. Currently, commonly used methods for detecting cable faults on the ground, such as the high-voltage pulse flash over method and the traveling wave reflection method, are not suitable for underground detection environments. Therefore, this paper proposes a comprehensive detection new method for underground mining cable faults based on induction electric field-magnetic coupling resonance. A mathematical model for a comprehensive cable fault detection method based on induction electric field-magnetic coupling resonance under low-frequency sinusoidal excitation conditions is established. Using multiphysics simulation software COMSOL, the electromagnetic field quantities are solved for open-circuit and short-circuit faults in the cable, resulting in the two-dimensional distribution of electric and magnetic field strengths, as well as the one-dimensional curve of the detection coil voltage. Simulation and experiments have determined the variation curves of the induced voltage with the lift-off height when the used coil is in open-circuit and short-circuit conditions. Research results show that the comprehensive method based on low-frequency induced electric field-magnetic coupling resonance is feasible for underground detection of mining cable faults. Under the excitation with an amplitude of 1 ~ 20 V and a frequency range of 1 kHz ~ 20 MHz, by detecting along the cable at the same lift-off height, open-circuit and short-circuit faults of the cable within one-tenth of the excitation wavelength in length can be detected. It provides an effective method for underground detection of coal mine cable faults and product development.

Keywords: mining cable; induced voltage; magnetic coupling resonance; underground detection; inductive electric field-magnetic coupling resonance

收稿日期: 2024-07-21 Received Date: 2024-07-21

* 基金项目:辽宁省教育厅科技创新团队项目(LJ222410147025)资助

0 引言

矿用电缆是煤矿生产平稳运行的保障^[1],一旦发生故障井下采煤设备将停止运行,严重影响生产效率和经济效益^[2-3]。当前,现场人员将故障电缆转移陆上采用常规方法检测,常规方法有阻抗法、行波法^[4]和高压闪络法等^[5],该方式费时费力。常规方法在煤矿井下应用困难,如阻抗法针对不同类型的电缆需要进行复杂的变换^[6];行波类故障检测技术存在色散和衰减问题^[7-10];高压闪络法存在点燃瓦斯气体并引发爆炸的风险,该方法过程涉及的高压,不符合煤矿本质安全标准 GB/T 3836.4-2021 中热点燃的符合性规定,长期以来,矿业生产都急需一种井下电缆故障检测方法^[11]。

电场感应中导电率高的物体易受外部电场影响,内部电荷会发生极化,从而形成耦合电容。1962 年首次提出基于电场耦合式的无线电能传输方案,但长期以来关于电场耦合的问题并不被学术界所关注,近代在同塔多回输电线路感应电压和电流的问题被提及,它被认为是一种静电感应与电磁耦合共同作用的结果^[12],未运行的输电线上容易被带电输电线创建的电场和磁场诱导产生电压和电流^[13],在高压或高频电场下,这种电场耦合不可忽视。2008 年奥克兰大学率先投入到电场耦合式无线电能传输的研究^[14]。2017 年,陈希有团队^[15]基于电场耦合谐振原理提出单线电力传输系统。2019 年,王黎明等^[16]基于电场感应提出了一种架空输电线路在线监测装置的供电技术。2023 年,钱林俊等^[17]提出一种电场耦合式的具有抗偏移能力的无线电能传输系统。此外,张国灿等^[18]基于电场耦合设计了一种高压输电线路谐波检测仪。

磁耦合谐振基于电磁感应原理,通过发射端和接收端线圈之间的磁场耦合传递能量。2007 年,麻省理工学院的 André Kurs 团队^[19]在 2 m 距离内以 40% 的效率传输了 60 瓦的电能。2020 年,哈尔滨工业大学任秉银团队^[20]研究了无线充电系统中小型金属异物引起的失谐现象,提出了金属异物检测时线圈电磁特性分析方法。2023 年,苏文博等^[21]对含金属异物的无线充电系统进行了等效建模分析;石治国等^[22]提出了基于磁耦合谐振技术的海水电导率测量方法。此外,Chen 等^[23]研究了检测接地网故障的磁耦合谐振方法,张淮清教授基于线圈的相频特性和磁耦合谐振技术的频率选择特性,提出了一种新的回路通断检测方法^[24]。将磁谐振技术在电缆故障检测中的应用也具有一定的可行性。

近年来,电缆故障检测领域关于时频域相结合及改进相关识别算法的研究众多^[25]。文献[8]为减小信号幅度衰减和杂波干扰,提出一种时频域瞬时滤波方法,进一

步提高时频域反射法的精度。Bang 等^[26]将 TFDR 与神经网络识别算法相结合应用于多芯电缆的故障诊断。Lin 等^[27]采用新的传输线实验设备测量,基于反射解耦比法改进时域反射法的介电光谱。此外,由于现有方法已能满足绝大多数场景需求,部分学者转而向更高级的在线式监测技术研究。文献[1]介绍了一种结合信号注入法和双端同步测量法的低频介电损耗角在线监测方法。Shafiq 等^[28]采用高频 Rogowski 线圈作为局放信号传感器,结合基于到达时间和波达方向定位技术,提出了一种应用于配电网中压电力线电气绝缘缺陷检测的在线系统。Wu 等^[29]考虑电缆老化过程中的绝缘电容和电导的变化,提出了一种基于 Chirp 信号注入谐振频率分析的地下电力电缆绝缘在线监测方法。Wang 等^[30]提出了一种基于动态状态估计的 MMC-HVDC 电网地下电缆的故障定位(DSEFL)方法。然而,迄今为止关于煤矿井下电缆故障的研究相对较少,当下众多方法由于多种因素在煤矿井下使用不便和受限,并未得到充分应用。

鉴于此,提出一种感应电场-磁耦合谐振式矿用电缆故障井下综合检测新方法,通过线间感应电和无线电能传输理论分析系统建立等效电路,得到线圈对电缆故障检测时的接收方程,仿真研究了电缆故障前后的电磁分布规律,分析了不同故障情况下线圈电压沿线接收曲线的变化,以及线圈电压在 0~6 cm 范围内提高变化曲线。实现在幅值 1~20 V、频率范围 1 kHz~1 MHz 的激励下,可以检测长度在激励波长 1/10 内电缆的开路和短路故障。为煤矿电缆故障井下检测以及产品研发提供了一种行之有效的办法。

1 感应电场-磁耦合谐振检测原理

感应电场-磁耦合谐振检测采用激励源激发电缆周围形成电磁场,使用线圈在电缆附近进行检测,由于电场耦合和磁场耦合作用,当激励频率在线圈自谐振状态下,线圈内部会产生明显的电压信号,当电缆内部存在断路故障点时,其感应电压会发生变化。其系统结构如图 1 所示。

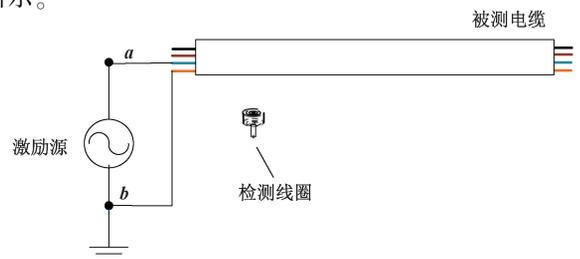


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure

1) 电缆另一侧悬空, 所激励线路存在断点或无故障时, 电缆内部属于开路状态, 此时通过线间感应电理论^[13]对系统进行建模, 线圈在检测过程其等效电路结构如图 2 所示。

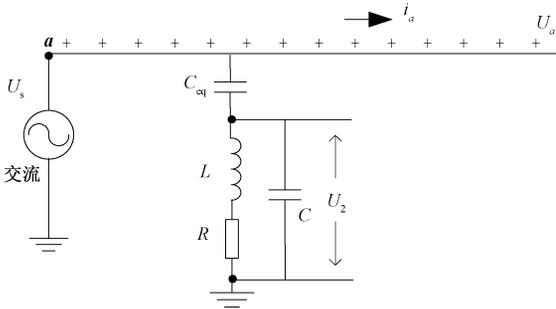


图 2 电缆内部开路检测时电路结构

Fig. 2 The circuit structure for detecting internal open-circuit faults in cables

图 2 中导线 a 通有 U_s 的交流激励源, 导线上的电压 $U_a = U_s = A \sin(\omega t)$, 场路耦合分析可得:

$$j\omega C_{eq}(U_s - U_2) = j\omega C U_2 + \frac{U_2}{j\omega L + R} \quad (1)$$

此时线圈上的感应电压 U_2 主要由电场耦合产生, 即 U_{2e} :

$$U_{2e} = \frac{j\omega C_{eq}}{j\omega(C_{eq} + C) + \frac{1}{j\omega L + R}} U_s \quad (2)$$

式中: L 为检测线圈的电感; R 为检测线圈及接收线路上其他元件的等效电阻; C 为线圈与导线间分布电容;

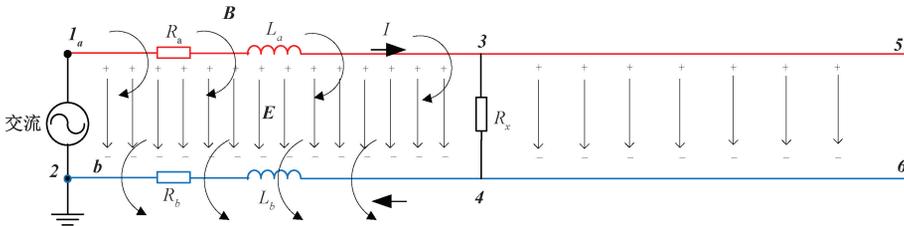


图 4 电缆一般故障情况

Fig. 4 Common cable faults

图 4 中 R_x 为过渡电阻, R_a 、 L_a 和 R_b 、 L_b 分别为导线 a 和导线 b 等效的分布电阻和自感, I 为故障电流, 线路 a 与 b 之间存在电场 E , 以及围绕各导线的磁场 B 。

一般故障情况下, 由于 R_x 不为 0, 点 3 和 4 之间必然存在电势差, 并且存在线电流, 线圈的感应电压应是电场和磁场共同作用的结果, 即线圈感应电压是由电场感应以及磁场感应共同作用, 如式 (4) 所示。

$$U_2 = U_{2e} + U_{2m} \quad (4)$$

C_{eq} 为线圈与导线间的耦合电容。

2) 电缆因故障内部产生回路, 其内部存在流动的电流, 从磁感应角度出发, 其部分空间结构可以等效为一种特殊结构的线圈, 此时系统结构与 WPT 系统结构类似^[31], 电缆作为发射端, 检测线圈作为接收端。等效电路如图 3 所示。

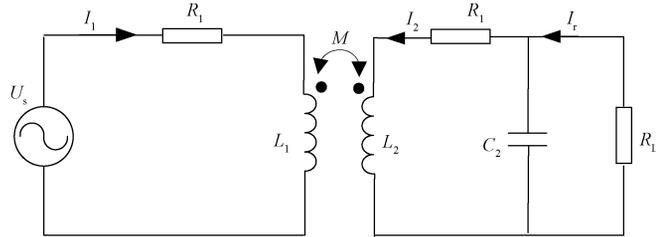


图 3 短路检测等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit for short-circuit detection

图 3 中 I_1 是故障电流, L_1 是一次侧电缆回路上的等效电感, R_1 是一次侧电缆回路上的等效电阻, 当系统稳定运行时, 且激励源为正弦激励, 根据无线电能传输理论, 求解得出检测线圈因磁感应产生的感应电压:

$$U_{2m} = \frac{M U_s}{Z_1 Z'_2 + (\omega M)^2 C_2} \quad (3)$$

式中: Z_1 为一次侧阻抗; Z'_2 为二次侧阻抗; C_2 为接收侧线圈的自身电容。

3) 然而, 现实不存在完全的短路和断路情况, 电缆在发生故障时故障点都存在过渡电阻, 过渡电阻的大小未知 R_x 较低可至 100Ω , 较高时可在 $1 \text{ k}\Omega$ 以上。此时系统的电路结构如图 4 所示。

$$\text{将式(3)、(4), 以及 } Z_1 = R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) Z'_2 =$$

$$R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \text{ 代入式(4), 最终得:}$$

$$U_2 = \frac{j\omega C_1 U_s}{j\omega(C_{eq} + C_2) + \frac{1}{j\omega L_2 + R_2}} +$$

$$\frac{MU_s}{C_2 \left[\left(R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2}) \right) \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) + (\omega M)^2 \right]} \quad (5)$$

式中： L_1 为一次侧的等效电感； L_2 为线圈电感； C_1 为线圈与电缆的分布电容； C_2 为线圈自身电容； R_1 为一次侧的等效电阻； R_2 为线圈电阻； U_s 为施加的激励； U_1 为故障点处电压； ω 为激励频率； M 为一次侧和二次侧互感系数。

2 仿真研究

为能够说明感应电场-磁耦合谐振检测方法用于电

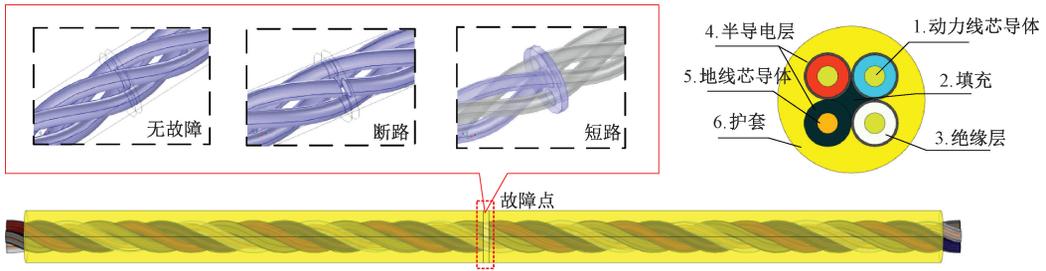


图 5 电缆模型结构

Fig. 5 Cable model structure

表 1 电缆结构及材料性能参数

Table 1 Cable structure and material performance parameters

电缆结构	电导率($S \cdot m^{-1}$)	相对磁导率	相对介电常数	半径/厚度(mm)
动力线芯导体(铜)	2.2	1	6.6	1.2
填充(半导体材料)	1	1	10	—
绝缘层(乙丙橡胶)	1.6×10^{-14}	1	3.25	1.6
半导体层(半导体材料)	1	1	10	0.7
地线芯导体(铜)	5.998×10^7	1	4	8
护套(氯丁橡胶)	129	1	129	4

2.2 电缆空间电磁分布规律

检测时电缆仅有两根芯线与激励源接触,研究关注其周围的电磁场分布及整体的变化规律。仿真中在电缆内芯的中间位置添加了连接物,用于模拟电缆的故障情况,其形状为圆环是为了仿真获取更好的收敛性能。当材料设置为空气时,则模拟的是理想的断路故障情况。当连接物的材料设置为铜时,模拟的是理想短路故障情况;在 20 V 的低频正弦激励下,电缆发生故障前后其周围电磁场变化情况如图 6 所示。

图 6 结果显示,通有低频正弦交流激励的电缆发生断路故障时,表面存在较强的电场,在其故障点后电场 E 强度骤然降低,发生短路故障时,表面存在较强的磁场,在故障点后磁场 B 强度骤然降低,由于电缆故障前后的

缆故障检测的可行性,本节首先采用 COMSOL 对电缆故障前后电磁情况进行仿真^[32],得出其分布规律,然后在仿真中添加检测线圈,通过所建立的接收模型,研究了在无故障电缆开路情况下线圈电压的接收情况,研究了不同故障情况下线圈沿线检测的电压情况。

2.1 仿真电缆模型结构

仿真中电缆模型结构如图 5 所示,电缆有 3 个带绝缘屏蔽的主线芯和 1 个包覆半导体层的地线组成,围绕半导体橡皮层垫芯按右向绞合成缆,节径比小于 12^[33]。外面挤包黑色氯化聚乙烯橡皮护套或黑色氯丁橡皮护套。仿真长度为 50 cm,线芯为铜线,绝缘层为乙丙橡胶,外部为氯丁橡胶材质^[34],其各项参数如表 1 所示。

电磁分布的改变,线圈感应信号会在故障点处会发生明显变化。

因此,为确保线圈信号沿线检测过程中不会因故障以外的原因而衰减,电缆上的电压和电流分布应是均匀的,据传输线理论,选择的激励频率应使电缆的长度在激励波长的 1/10 以内。

2.3 线圈电磁接收特性

本节在电缆无故障状态下,研究线圈随激励变化的接收特性,对所提出的线圈接收模型下进行仿真研究。

在仿真中添加检测线圈,线圈尺寸均为 40 mm × 23.66 mm,(直径×高度),铜线直径为 0.35 mm。基于感应电场-磁耦合谐振的接收模型,通过终端条件将线圈参数耦合到电路中。

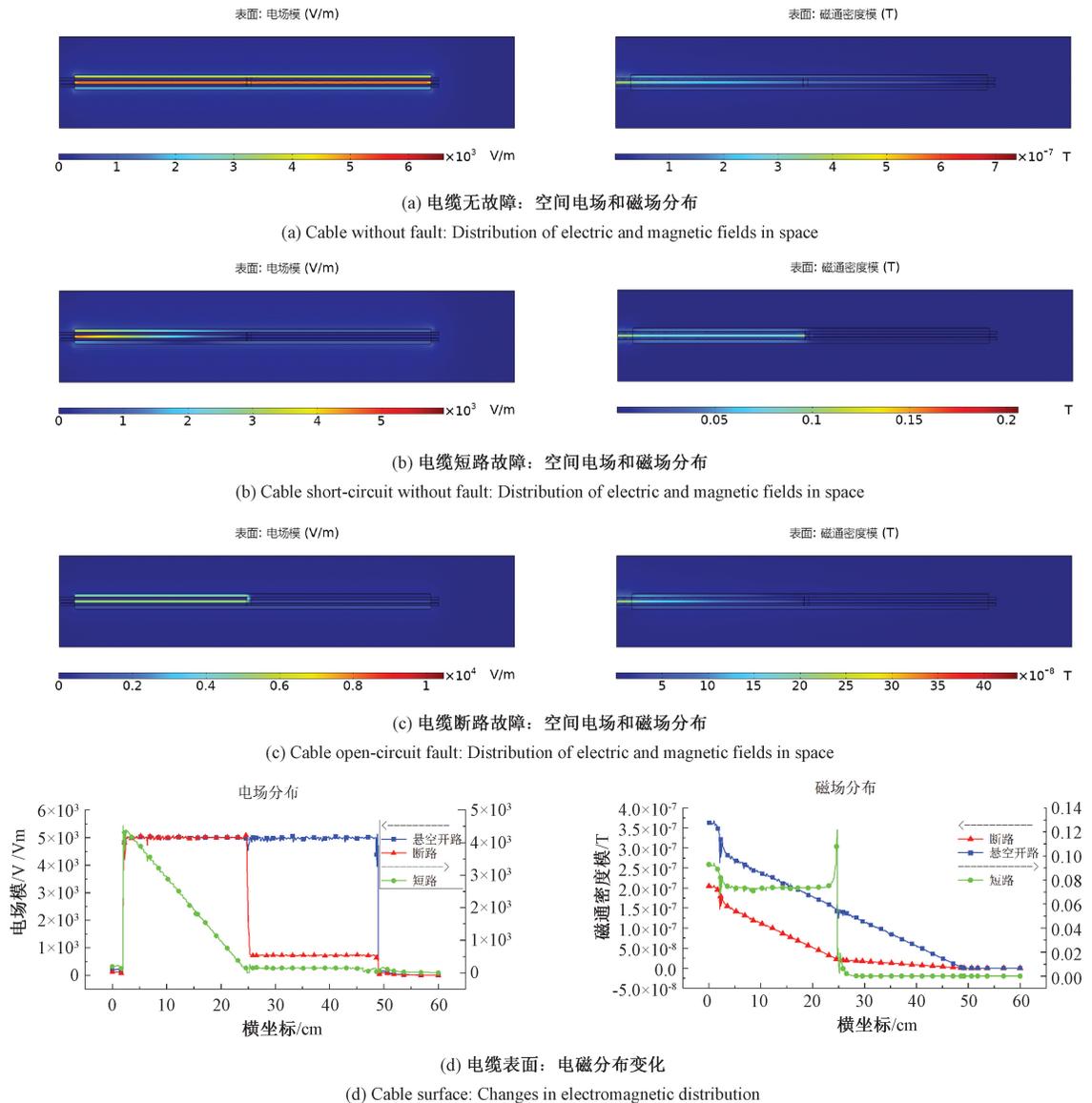


图 6 电缆故障前后空间电磁分布对比

Fig. 6 Comparison of spatial electromagnetic distribution before and after a cable fault

选择电缆其中一根导线,利用“终端”条件对电缆施加 0~20 V 的正弦交流激励,在 0~1 000 kHz 频率范围进行频率扫描,获取该线圈电压随不同激励的接收情况如图 7 所示。

图 7 结果显示,该线圈存在一个最佳接收频率,使得感应电压最大;在最佳频率前,随着激励频率的逐渐增加,线圈的感应电压会先增加,经过最佳频率后,线圈的感应电压会逐渐下降,但不为 0,该曲线关于谐振点不对称。在任意频率下,线圈电压与激励幅值均呈线性关系。

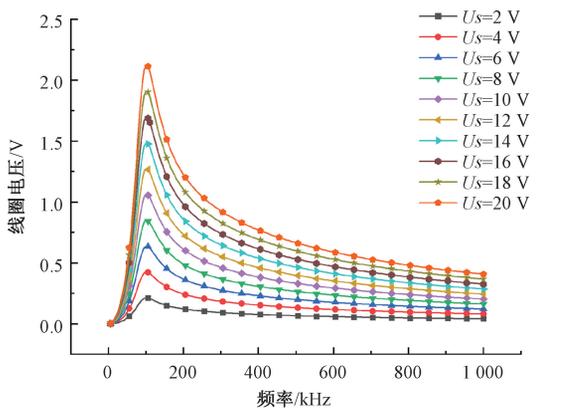
此外,在幅值为 20 V 正弦交流激励情况下,还进行了多个不同线圈的接收情况的仿真,仿真结果如图 8 所示,其参数情况如表 2 所示。

图 8 结果表明,不同线圈均存在一个最佳激励,随着

电感增加,该频率会逐渐减小,且其曲线趋势均表现相似。线圈电压相角与激励频率的关系,在较低的一段频率内,激励源与感应电压相位相差 180°,当频率接近谐振点时,相位角会迅速下降至 90°,感应电压的波形与激励源的波形之间存在 1/4 波长的偏移。经过谐振频率后,会迅速下降至 0°附近。

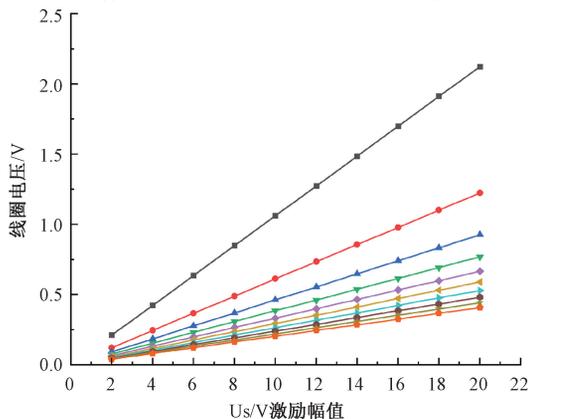
2.4 电-磁耦合谐振综合检测仿真

在电缆中间 25 cm 处设置故障点,通过令线圈位置沿电缆线路移动并进行扫描,该过程中选用的是最佳频率为 100 kHz 的线圈进行电缆故障检测仿真,使用频率 100 kHz,幅值为 0~20 V 的正弦激励。仿真故障检测曲线如图 9 所示。



(a) 线圈电压-激励频率

(a) Coil voltage variation with excitation frequency



(b) 线圈电压-激励幅值

(b) Coil voltage variation with excitation frequency

图 7 线圈电压随不同激励的接收情况

Fig. 7 Coil voltage reception with different excitation

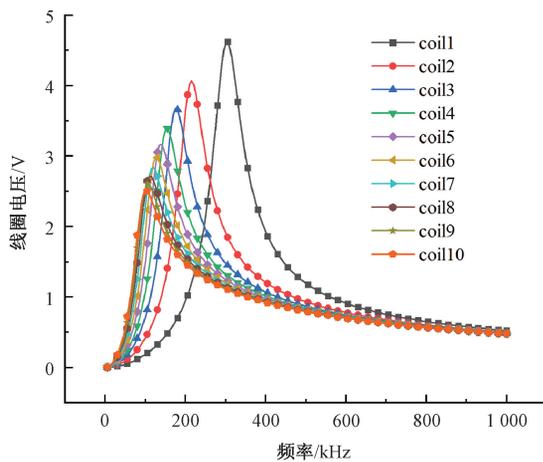
表 2 不同线圈参数

Table 2 Different coil parameters

线圈	R/Ω	L/mH	C/pF
Coil1	21.62	25.6	129
Coil2	18.20	24.29	129
Coil3	16.35	20.1	129
Coil 4	14.50	16.4	129
Coil 5	12.71	13.09	129
Coil 6	11.15	10.34	129
Coil 7	9.55	7.89	129
Coil 8	8.15	5.88	129
Coil 9	6.68	4.198	129
Coil 10	5.40	2.8	129

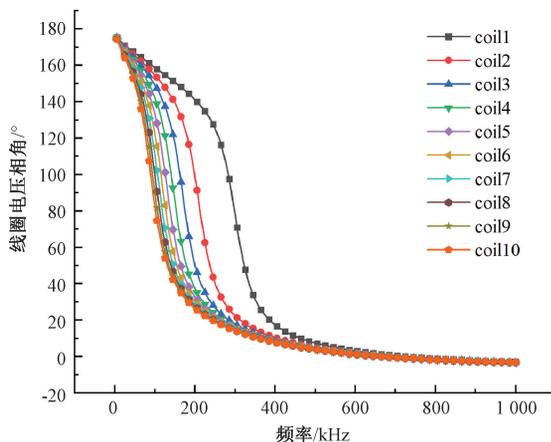
图 9 展示了线圈沿电缆线检测过程中的电磁响应。无故障和断路时,感应电压幅值均存在较小波动;短路故障波动强。故障点后,曲线骤降。

仿真设置故障点材料不同的电阻率来模拟不同的过



(a) 不同线圈随激励的幅频曲线

(a) Amplitude-frequency curves of different coils with excitation



(b) 不同线圈随激励相频曲线

(b) Coil voltage variation with excitation frequency

图 8 线圈电压随不同激励的接收情况

Fig. 8 Coil voltage reception with different excitation

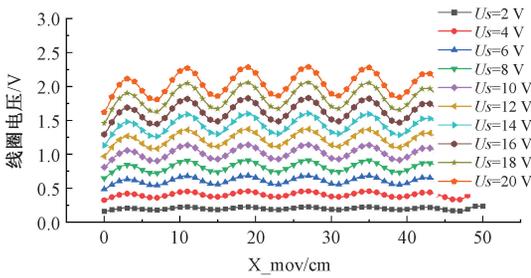
渡电阻,并观察过渡电阻参数对检测曲线的影响,过渡电阻分别为 100、200、1、20 kΩ。

图 10 仿真结果显示,对于一般故障情况,故障点前感应电压的强度仍然远大于故障点后的接收强度,该方法仍然可以有效检测出故障点。

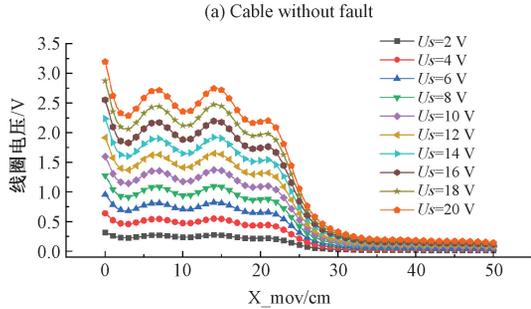
随着故障点过渡电阻增大,磁耦合作用的减小,电场耦合作用会逐渐增强。故障点前线圈的电压波动幅度逐渐减小,且其故障点后的检测曲线会变得更低。在高阻故障情况下,由于电场耦合的作用增强,故障点前后的检测曲线骤然降低的趋势将会变得更加明显。

2.5 检测线圈提高仿真

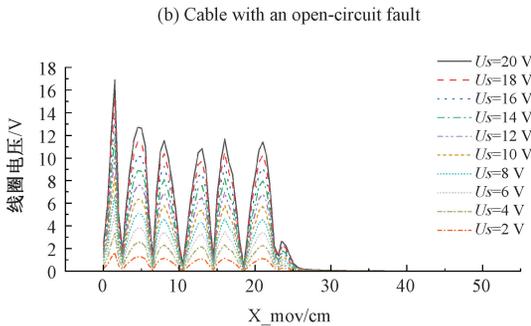
由于被激励电缆周围的电磁场在其横截圆周面上沿径向呈衰减态势,而检测线圈的感应电压会受到电磁场的影响,因此有必要对提高对检测线圈的影响进行分析。



(a) 无故障电缆



(b) 断路故障电缆



(c) 短路故障电缆

图9 沿线检测结果
Fig. 9 Along line test result

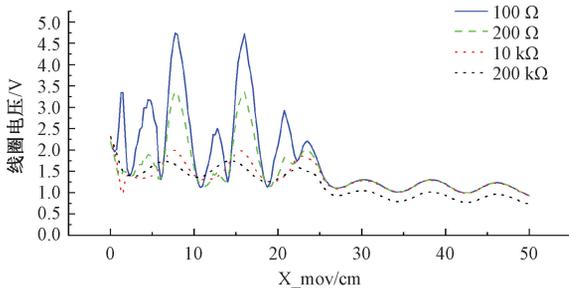


图10 不同过渡电阻故障曲线

Fig. 10 Fault curves of different transition resistors

在仿真中,将检测线圈的提离高度进行参数化设置,提离范围设定为0~6 cm,选取故障点及其前后几处坐标位置,以研究提离对短路检测和断路检测时线圈信号及故障检测曲线的影响。仿真结果如图11~14所示。

图11和12结果表明,随着提离高度的增加,线圈电

压逐渐减小。这是由于提离高度增加,导致线圈与被测物体之间的电磁耦合减弱。在故障点前,因提离高度变化引起的线圈电压波动较大。在断路情况下,当提离高度 $H < 1$ cm时,线圈电压的变化不超过0.4 V;而短路故障情况下,线圈电压对提离高度的变化更为灵敏,近距离内 ($H < 1$ cm),其变化电压范围在2 V以内。在故障点后,线圈电压对提离高度的变化不明显,波动保持在0.2 V以内。

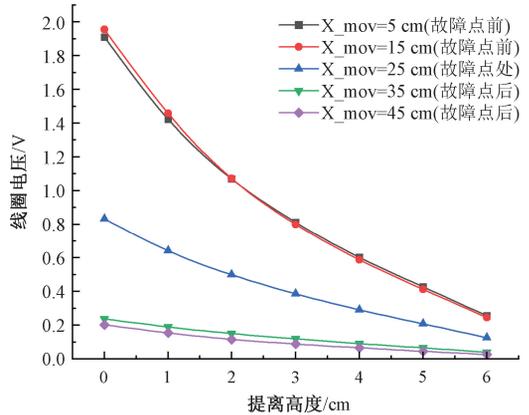


图11 断路故障 线圈电压与提离高度曲线

Fig. 11 Curve of coil voltage and lift-off height in open-circuit fault

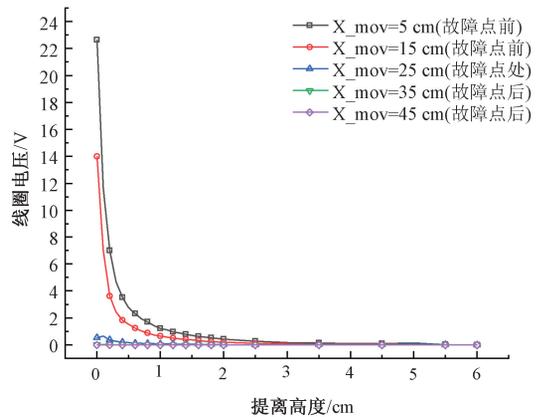


图12 短路故障 线圈电压与提离高度曲线

Fig. 12 Curves of coil voltage and lift-off height in short circuit faults

图13和14结果表明,在相同提离高度下,故障曲线的趋势基本一致,且在故障点处均出现骤降。与电耦合相比,磁耦合对提离高度变化的敏感性更高。

3 实验研究

为了验证感应电场-磁耦合谐振式电缆故障综合检

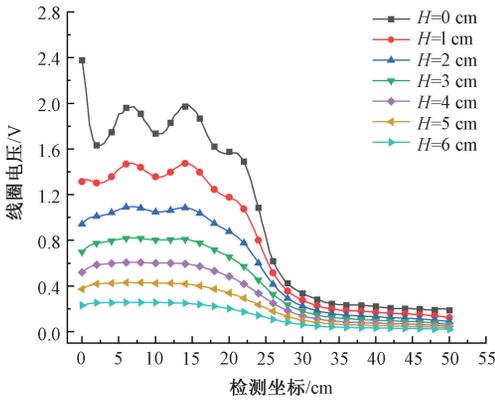


图 13 断路故障 不同提高高度下的故障曲线
Fig. 13 Fault curves under different lift-off heights in open-circuit faults

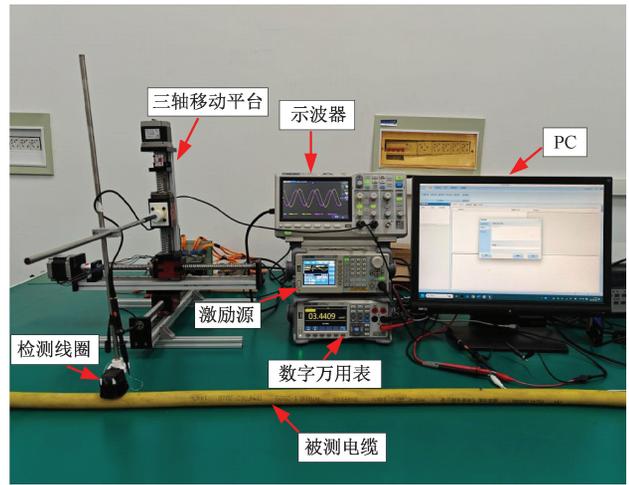


图 15 实验平台

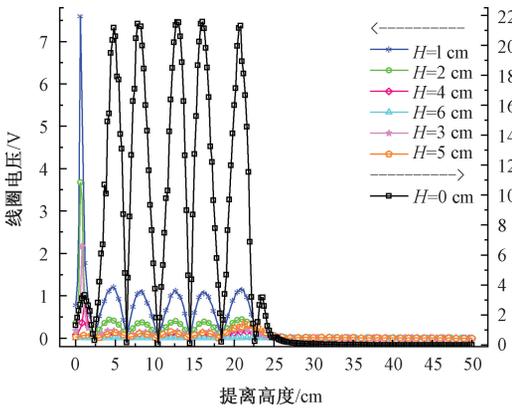
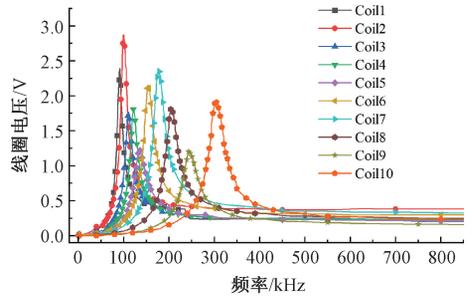
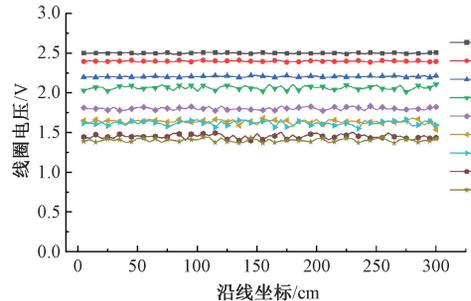


图 14 短路故障 线圈电压与提高高度曲线
Fig. 14 Curves of coil voltage and lift-off height in short-circuit faults

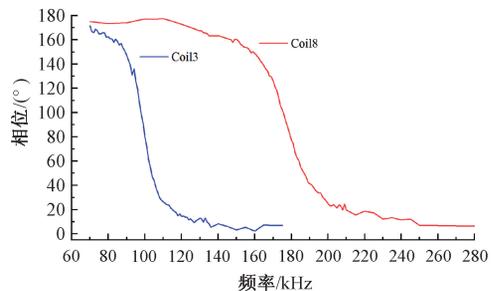
Fig. 15 Along line test result



(a) 线圈幅频接收曲线
(a) Coil amplitude-frequency response curve



(b) 线圈感应电压的沿线趋势
(b) Trend of induced voltage along the coil



(c) 线圈感应电压的相位图
(c) Phase diagram of the coil's induced voltage

测方法的可行性,搭建了矿用电缆故障检测实验平台,如图 15 所示,实验平台包含: MYP 矿用电缆、三维移动平台、信号源、示波器、数字万用表和 PC。信号源作为激励源,其频率范围为 0~20 MHz,输出幅值 0~20 V。所使用的线圈圆柱模具尺寸均为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 23.66 \text{ mm}$,内孔直径为 11.9 mm,线圈采用铜线,直径为 0.35 mm。

3.1 电缆无故障开路状态线圈接收实验

选用多种不同的线圈(骨架相同),对所提出的线圈接收模型进行实验验证。向无故障电缆施加 0~20 V 的低频正弦激励,进行悬空开路检测,移动扫描时,步进长度为 5 cm。

实验中,为确保实验结果的准确性和可比性,所有线圈与电缆的径向距离以及激励幅值都需保持相同,实验获取的线圈幅频接收曲线、感应电压沿线曲线以及相频曲线如图 16 所示。实验参数及相关结果如表 3 所示。

图 16 线圈接收实验结果

Fig. 16 Fault curves of different transition resistors

图 16(a) 中多个线圈的幅频接收曲线,与 2.3 节线圈接收仿真中幅频曲线规律一致。实验过程中,当对各线圈的激励幅值减半时,其接收幅值均会减半,满足理论和仿真分析中的线性关系。

图 16(b) 显示了感应电压沿线的趋势呈现水平线,

表明电缆在悬空开路状态下的电场沿线分布是均匀的,与仿真分析结果一致。

图 16(c) 显示了其中两个线圈的感应电压与激励源的相位差,与图 8(b) 仿真曲线规律一致。

表 3 实验参数及数据结果

Table 3 Experimental parameters and data results

线圈	匝数/ N	L/mH	R/Ω	最佳频率/ kHz	激励幅/ V	感应电压/ V	激励幅/ V	感应电压/ V
Coil1	1 400	25.6	21.62	75	20	2.50	10	1.25
Coil2	1 300	24.29	18.20	90	20	2.40	10	1.20
Coil3	1 200	20.1	16.35	99	20	2.21	10	1.15
Coil 4	1 100	16.4	14.50	109	20	2.04	10	1.02
Coil 5	1 000	13.09	12.71	119	20	1.80	10	0.9
Coil 6	900	10.34	11.15	135	20	1.64	10	0.82
Coil 7	800	7.89	9.55	153	20	1.62	10	0.81
Coil 8	700	5.88	8.15	175	20	1.44	10	0.72
Coil 9	600	4.198	6.68	206	20	1.40	10	0.7
Coil 10	500	2.8	5.40	243	20	1.32	10	0.66

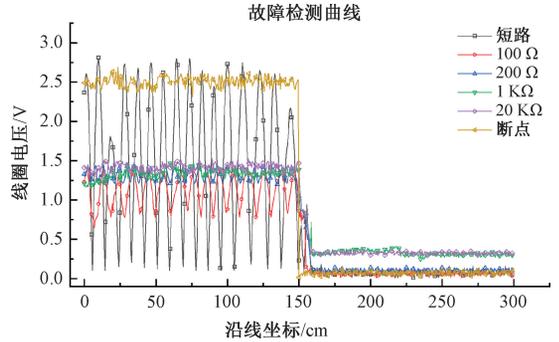
此外,实验过程中发现,线圈翻转或反接线圈的接线端子并不会改变感应电压的相位,这是电场感应电压的一个重要特性。相位变化与仿真曲线的趋势相似,而磁感应电压则不同,其相位会随着线圈翻转或接线端子反接而变化。

综上,所提出的接收模型仿真与实验结果表现一致。这一实验过程中由于电缆未闭合,传导电流几乎不存在,磁场的影响可以忽略,线圈中的感应电压此时主要受到变化电场的影响。在电缆开路状态下,线圈的感应电压是电场耦合产生的。

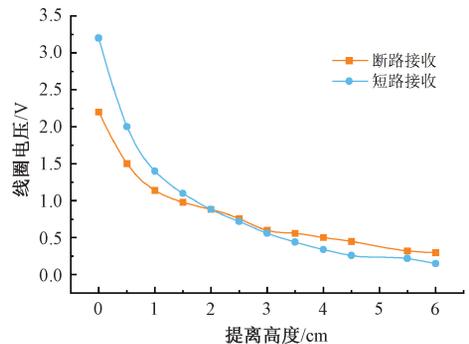
3.2 电缆故障检测实验

为验证所提出的方法是否能有效检测电缆的故障点,进行电缆故障检测实验。在一段长度为 3 m 的矿用电缆中间设置了不同类型的故障点,包括短路、100、200 Ω 、1、20 k Ω 和断路。实验中,三轴运动控制系统步进长度设定为 5 mm。

由图 17 可知,1) 短路故障时,故障点前的接收线圈检测到电缆幅值呈现规律性波动。接收线圈幅值的最大值达到 2.6 V,最小值接近于 0。过故障点后,感应电压幅值骤降,停止波动并趋于 0。2) 断路故障时,故障点前感应电压大小约为 2.5 V 左右,无明显的规律波动,经过故障点后接收幅值同样骤降接近 0。3) 当过渡电阻设为 100 Ω 时,曲线趋势与短路故障相似,同样呈现规律性波动,波动程度相较于短路时减小,接收线圈幅值的最大值约为 1.5 V,最小值接近 800 mV,经过故障点后,接收幅值同样骤降停止波动,并趋于 0。然而随着过渡电阻的增加,波动程度会逐渐减小。当过渡电阻为 200 Ω 时,接收线圈幅值的最大值约为 1.5 V,最小值接近 1.2 V,经过故障点后接收幅值接近 100 mV。当过渡电阻分别设



(a) 故障检测曲线
(a) Fault detection curve



(b) 检测线圈感应电压随提高高度变化曲线
(b) The curve of the induced voltage of the detection coil varying with the lift-off height.

图 17 检测曲线

Fig. 17 Fault curves of different transition resistors

为 1 和 2 k Ω 时,接收幅值稳定在 1.4 V 左右,并且规律性波动消失。经过故障点后,接收幅值迅速下降至约 300 mV。检测过程中出现的周期波动是磁场作用的结果。随着过渡电阻的增加,电流会逐渐减小,电磁感应的

作用会逐渐减弱,线圈沿线的感应电压周期波动也因此会逐渐减小,线圈因电场耦合的感应电压会逐渐增强,在其开路状态,线圈电压完全受电场耦合作用。总体而言,实验结果与仿真检测结果表现出相似的规律,故障点后检测曲线呈现明显下降的现象。该方法利用接收线圈经过故障点时接收幅值的变化,可以准确识别出故障点的位置。

此外,通过三维移动平台,将 z 轴设定在 0~6 cm 范围内进行扫描,实验测定了检测线圈在断路与短路故障两种情况下的感应电压随提高高度变化的曲线。其中,在短路状态下,检测线圈的位置处于接收峰值(波峰线圈位置点),结果如图 17(b)所示。该曲线变化趋势与仿真结果一致。随着提高高度的增加,线圈电压迅速降低。在近距离检测中,短路检测时线圈电压受提高高度的影响比断路检测更为显著,其电压下降速率也更快。如果能够精确测定该曲线,当已知检测过程中线圈的垂直抖动范围时,可进一步确定线圈感应电压的误差。从实验曲线来看,在近距离检测且抖动范围不超过 5 mm 时,断路情况下感应电压的波动小于 0.5 V,而短路情况下电压波动小于 1 V。

3.3 发射侧激励对接收侧的影响

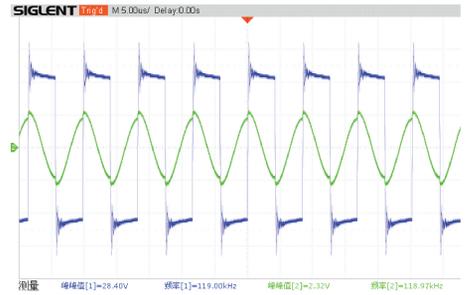
为探究该方法的适用情况,使用不同激励源,观察其对二次侧线圈感应电压的影响,在线圈的最佳接收频率情况下,使用了 4 种不同的激励源,所使用的线圈 (coil5) 接收到的信号波形如图 18 所示。



(a) 正弦激励
(a) Sine wave excitation



(b) 三角波激励
(b) Triangle wave excitation



(c) 方波激励
(c) Square wave excitation



(d) 窄波激励
(d) Narrow pulse excitation

图 18 不同激励下线圈的接收情况

Fig. 18 Reception of the coil under different excitation

线圈的接收电压 U_2 变化随激励源幅值 U_s 变化如图 19 所示。

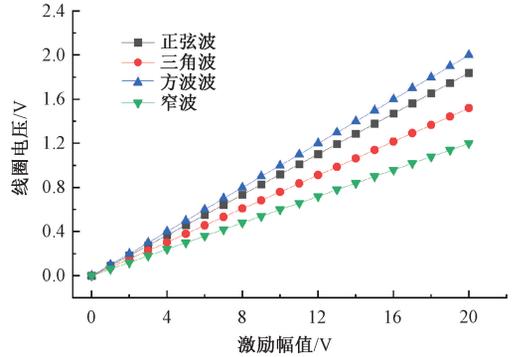


图 19 不同激励下线圈电压与幅值关系

Fig. 19 Relationship between coil voltage and amplitude under different excitation

结果表明,无论激励源是方波、正弦波、三角波还是窄波,线圈的感应电压在谐振接收情况下其波形都表现为近似的正弦波形,受激励源类别的影响较小,且接收侧幅值与激励源幅值仍然呈线性关系,在谐振接收状态下,该方法对于不同的激励源都具有较强的适用性。

4 结 论

针对当下煤矿井下电缆故障检测领域,传统常规检

测方式往往面临着程序繁琐复杂的困境。提出了一种感应电场-磁耦合谐振式电缆故障综合检测方法。首先建立了电缆故障检测过程中线圈的接收建模,通过仿真对电缆故障前后的电磁分布规律进行了研究,以及对线圈检测过程中的接收特性进行仿真分析,并模拟了多种不同故障状况,在激励频率为 1 kHz~20 MHz 和幅值为 1~20 V 的条件下,进行仿真和实验论证。研究结果表明,该方法检测过程中对于同一线圈存在一个最佳接收频率,能够精准检测出激励波长 1/10 内电缆的开路与短路故障。其中,短路故障检测的波动相较于断路更为显著,且检测精度可达 cm 级别,有效弥补了传统行波法在近距故障分辨率方面的短板。使用该方法在煤矿井下进行电缆故障检测时,可规避拆卸与重新铺设电缆的繁杂工序,大幅提升检测的安全性与效率,为矿用电缆故障检测研究提供了新思路。未来可以探索在电缆中注入不同频率的激励信号,或设计分布式的接收装置,以实现更加多样化和精确的故障检测。

参考文献

- [1] WANG Y W, CHEN P, FENG CH, et al. An online monitoring method for low-frequency dielectric loss angle of mining cables[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4273.
- [2] FENG CH, YE P F, SUN Y Y, et al. Decision-making method for mine cable insulation monitoring and grounding fault diagnosis[J]. *Processes*, 2023, 11(3): 795.
- [3] WANG Y W, CHEN P, SUN Y Y, et al. A comprehensive operation status evaluation method for mining XLPE cables[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7174.
- [4] 陈研,倪松,马天宇,等. 在役高压电缆缓冲层缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 82-90.
CHEN Y, NI S, MA T Y, et al. Detection of buffer layer defects of in-service high-voltage cables [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 82-90.
- [5] ALI K H, ABOUSHADY A A, BRADLEY S, et al. An industry practice guide for underground cable fault-finding in the low voltage distribution network[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 69472-69489.
- [6] MORA-FLÓREZ J, MELÉNDEZ J, CARRILLO-CAICEDO G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(4): 657-666.
- [7] GOVINDARAJAN S, MORALES A, ARDILA-REY J A, et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends [J]. *Measurement*, 2023, 216: 112882.
- [8] CATALDO A, DE BENEDETTO E, MASCIULLO A, et al. A new measurement algorithm for TDR-based localization of large dielectric permittivity variations in long-distance cable systems [J]. *Measurement*, 2021, 174: 109066.
- [9] LI J, WHISNER B, WAYNERT J A. Measurements of medium-frequency propagation characteristics of a transmission line in an underground coal mine[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, 49(5): 1984-1991.
- [10] CHI P, QIN Y X, TAO Y CH, et al. Research on condition assessment of XLPE cable based on signal propagation characteristics [J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 195: 107136.
- [11] WANG W F, HUO Y H, KANG F R, et al. Study on hazard of smoke generated by mining cable fires [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023: 1-11, DOI:10.1007/s10973-023-12136-x.
- [12] MA AI Q, CHEN J. Analysis of the three-dimensional hybrid electric fields and the related electrostatic induction effects of 800 kV DC and 500 kV AC parallel transmission lines considering environmental factors[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 163: 638-646.
- [13] HORTON R, WALLACE K. Induced voltage and current in parallel transmission lines; Causes and concerns[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4): 2339-2346.
- [14] 刘耀,肖晋宇,赵小令,等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. *电工电能新技术*, 2023, 42(2): 48-67.
LIU Y, XIAO J Y, ZHAO X L, et al. Development and application review on wireless power transmission technology [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2023, 42(2): 48-67.
- [15] 陈希有,陈建辉,牟宪民,等. 空间电场耦合单线电力传输:仿真、理解与构建[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(19): 5749-5758,5852.
CHEN X Y, CHEN J H, MOU X M, et al. Single-wire power transmission based on spatial electric field coupling: Simulation, understanding and construction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(19): 5749-5758,5852.
- [16] 王黎明,李宗,孟晓波,等. 基于电场感应的低功率在线监测传感器的供电技术[J]. *高电压技术*, 2019, 46(2): 538-545.
WANG L M, LI Z, MENG X B, et al. Power supply technology of low power on-line monitoring sensor based on electric field induction [J]. *High Voltage Engineering*,

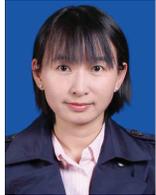
- 2019, 46(2): 538-545.
- [17] 钱林俊, 于博泉, 刘亚兵, 等. 具有抗偏移及漏电场屏蔽特性的 UUV 电场耦合无线电能传输系统[J]. 电源学报, 2023, 43(6): 2404-2412.
QIAN L J, YU B Q, LIU Y B, et al. Electric-field coupled wireless power transfer system for UUV with anti-offset and leakage field shielding characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2023, 43(6): 2404-2412.
- [18] 张国灿, 杨文陵, 连和, 等. 基于电场耦合的高压输电线路谐波检测方法的研究与设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(21): 18-23.
ZHANG G C, YANG W L, LIAN H, et al. Research and design of harmonic detection method for high voltage transmission line based on electric field coupling method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(21): 18-23.
- [19] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [20] 任秉银, 汤欣宁, 马云辉. 电动汽车无线充电金属异物检测线圈电磁特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(7): 35-42.
REN B Y, TANG X Y, MA Y H. Electromagnetic characteristics of metal foreign object detection coil in wireless charging system of electric vehicle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(7): 35-42.
- [21] 苏文博, 王维, 吕晓飞, 等. 含金属异物的无线充电系统场域等效建模分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 226-232, 249.
SU W B, WANG W, LYU X F, et al. Field equivalent modeling analysis of wireless charging system with metal foreign objects [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 226-232, 249.
- [22] 石治国, 王韬. 磁谐振海水电导率测量方法研究[J]. 海洋技术学报, 2023, 42(1): 61-68.
SHI ZH G, WANG T. Study on measurement method of magnetic resonance seawater conductivity[J]. Journal of Ocean Technology, 2023, 42(1): 61-68.
- [23] CHEN W H, WANG SH, YAN X H, et al. Research on magnetically coupled resonant detection method for breakpoint of four mesh grounding grid [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2023, 7(2): 218-228.
- [24] YIN CH A, LIU Q, CHEN L, et al. Loop open-closed detection based on magnetic resonance frequency splitting [C]. 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation, 2020.
- [25] ARMAN A S, GLASS S W, FIFIELD L S, et al. Non-conductor-contact surface wave reflectometry for cable insulation damage detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(11): 11065-11074.
- [26] BANG S S, SHIN Y J. Classification of faults in multicore cable via time-frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(5): 4163-4171.
- [27] LIN W T, LIN C P. New transmission line setup and improved TDR dielectric spectroscopy based on reflection-decoupled ratio method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-10.
- [28] SHAFIQ M, HUSSAIN G A, KÜTT L, et al. Electromagnetic sensing for predictive diagnostics of electrical insulation defects in MV power lines[J]. Measurement, 2015, 73: 480-493.
- [29] WU Y, YANG Y Y, LIN Q Q, et al. Online monitoring for underground power cable insulation based on resonance frequency analysis under chirp signal injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1961-1972.
- [30] WANG B L, LIU Y, LU D Y, et al. Multi-section frequency dependent line model enabled underground cable fault location in MMC-HVDC grids using dynamic state estimation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153: 109322.
- [31] MIRANDA C M, PICHORIM S F. A self-resonant 2-coil wireless power transfer system using open bifilar coils[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(6): 615-619.
- [32] 张安安, 何明光, 于璐, 等. 基于有限元法的海底电缆埋设深度实时预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 37(12): 18-28.
ZHANG AN AN, HE M G, YU L, et al. Real-time prediction of submarine cable embedment depth based on finite element method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 37(12): 18-28.
- [33] 煤炭行业煤矿安全标准化技术委员会. 煤矿用电缆第 5 部分: 额定电压 0.66/1.14 kV 及以下移动软电缆: MT/T 818. 5-2009[S]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2010: 7.
Coal Mine Safety Standardization Technical Committee of coal industry. Cables for coal mine Part 5: Movable flexible ofrated voltages up to and including 0.66/1.14 kV; MT/T 818. 5-2009 [S]. Beijing: State

Administration of Work Safety, 2010; 7.

[34] 张玮琪. 矿用 MYP 型号电缆的绝缘老化分析及寿命预测[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.

ZHANG W Q. Insulation aging analysis and life-time prediction of MYP model cables [D]. Xi'an: Xi'an University of Science, 2018.

作者简介



闫孝姮, 2005 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2008 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为无损检测和生物医学成像。

E-mail: xiaohengyan@163.com

Yan Xiaoheng received her B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2005, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2008 and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016, respectively. Now she is a professor at Liaoning Technical University. Her main research interests include nondestructive testing and biomedical imaging.



颜志鹏(通信作者), 2022 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: 1845216149@qq.com

Yan Zhipeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interest includes nondestructive testing.



陈伟华, 2002 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为电磁超声检测和无线电能传输技术。

E-mail: fxlgd@163.com

Chen Weihua received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2002, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2006 and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016, respectively. Now he is an associate professor at Liaoning Technical University. His main research interests include electromagnetic ultrasound detection and wireless energy transmission technology.



侯潇涵, 2022 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学博士研究生, 主要研究方向为电磁超声探测成像。

E-mail: hxx2022hxx@126.com

Hou Xiaohan received her B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. Now she is a Ph. D. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include electromagnetic ultrasonic testing and imaging.



赵亮, 2022 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: 511564560@qq.com

Zhao Liang received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interest includes nondestructive testing.