

材质对于非接触式行波传感器传变特性的影响

廖芳 汪志成

(东华理工大学机械与电子工程系 南昌 330013)

摘要:传感器的性能对准确高效地获取故障行波信号具有重要影响,为研究不同材质非接触式电压传感器的传变特性,首先对采集的信号用小波包能量谱法进行小波包分解,利用 MATLAB 软件拟合得到不同材质传感器采集信号的能量在相同频段的不同衰减规律,分析传感器传变特性;其次使用 MATLAB 工具编写入射波脉宽计算程序,根据脉宽值判断采集波形的明显程度以及原始信号幅值衰减速度判断信号采集的难易;最后从定位误差的角度分析定位的准确度;结果表明,镁材质金属片在行波测距中传变特性较好,可为传感器材质的选择及设计提供重要参考。

关键词:非接触;行波传感器;不同材料;故障测距;传变特性

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Effect of material on transmission characteristics of non-contact voltage sensors

Liao Fang Wang Zhicheng

(Department of Mechanical and Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Sensor performance has an important impact on accurate and efficient acquisition of traveling wave fault signals, to study the transmission characteristics of non-contact voltage sensors of different materials. Firstly, wavelet packet decomposition is performed on the acquired signal by wavelet packet energy spectrum method. Using matlab software to fit the different attenuation laws of the energy collected by different material sensors in the same frequency band to analyze sensor transfer characteristics; Secondly, using the matlab tool to write the calculation program of the incoming wave pulse width, judging the obvious degree of the acquired waveform according to the pulse width value and the attenuation of the original signal amplitude to judge the difficulty of signal acquisition; Finally, the accuracy of the positioning is analyzed from the perspective of positioning error; In summary, the magnesium metal sheet has good transfer characteristics in traveling wave ranging. This can provide an important reference for the selection and design of sensor materials.

Keywords: non-contact; travel wave sensor; different materials; fault location; transmission characteristics

0 引言

现今的配电网中,使用最为普遍的电力互感器为电磁式电压互感器与电磁式电流互感器,电磁式电压互感器^[1]由于其硅钢片铁芯材料的磁导率非线性特点,导致电磁式电压互感器的动态测量范围极大程度被限制,若工作在非线性区,则会造成极大误差。在更高的电压等级,使用电容互感器^[2]较多,虽无非线性铁芯结构且动态测量范围更大,但由于其储能元件的时间常数大而使互感器二次侧不能实时跟踪一次侧电压的变化。光学电压互感器^[3]具有线性良好、测量动态范围广、不存在磁滞饱和现象等优点,但其光学晶体易受外界因素影响,温度稳定性差,易导致误差。电

磁式电流互感器体积大,绝缘复杂,存在磁饱和现象,为弥补其缺陷诞生了电子式电流互感器,国内外最常使用电子式电流互感器即空心线圈,其优点是安全性高、不含铁芯,绝缘简单等,但也会由于其测量需要使测量线圈增加而变得笨重不堪^[4]。非接触式的电压测量一直以来都是电压测量领域研究的新方向,有大量学者进行了研究,尤其以基于电场耦合方式的电压传感器受到最多的关注^[5]。本文提出的非接触式电压传感器是基于电场感应原理,与高压导体无电气连接,可以避免波形畸变,但为了能够更加准确地获取雷电和故障信号,要求传感器具有较高的测量精度、较好的稳定性及良好的暂态响应特性^[6]。行波传播的过程中,由于高频分量衰减快,使得行波在沿输电线路传输的过程

中产生畸变,导致定位误差^[7-8],而材质的不同会引起传感器传变特性的改变,因此,找出传变性能最好的材质对于传感器准确获取过电压信号、提高测量精度具有重要意义。

1 非接触式行波传感器的理论分析

非接触式电压传感器的检测原理如图1所示,将金属板置于导线下方,导线与金属板之间形成一个电容耦合器^[9],空间电场在金属板上产生的电场感应电压 U_1 可以代表导线上行波的波形、极性等。建立其等效电路,则导线与金属板之间存在一个杂散电容 C_1 ,金属板与地之间存在一个对地电容 C_2 ,两者之间会形成一个电容性的分压电路,其关系如式(1)所示。

$$U_1 = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

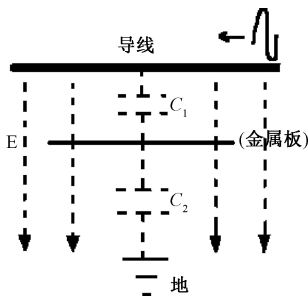


图1 非接触式电压传感器的检测原理

根据前两次从故障点反射回来的信号脉冲的特点,可定义寻找波头的方法,如图2所示,前两次从故障点反射回来的脉冲信号波谷到波峰及波峰到波谷的时间差为最小的两个,且幅值为最大,则可根据波头的两个特征定义波峰幅值的50%处,即a,b之间的时间差为 t_p ,即 t_p 最小且幅值最大的两个波峰即可认定为前两次从故障点反射回来的脉冲信号的波头。

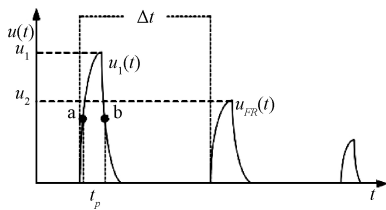


图2 故障行波故障波反射波形

根据故障行波的传输特点,故障脉冲信号会在传感器处至故障点处来回不断反射,随着能量的减小,反射波会随之消失,根据前两次从故障点反射回来脉冲信号的时间差即可计算故障点的距离。故障点的距离如式(2)所示。

$$S = \frac{1}{2} \times V \times \Delta t \quad (2)$$

式中: S 为故障距离; V 为波速; t 为前两次从故障点反射回来脉冲信号的时间差。

2 不同材质传感器传变特性分析

2.1 不同材质传感器测得信号的能量衰减特性分析

将行波信号进行小波包分解时,分解的层数视具体信号及采集仪器的采集频率而定,假定将信号分解到第 n 层, $S_{n,j}$ 对应的能量为 $E_{n,j}$,则:

$$E_{n,j} = \int |S_{n,j}|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2 \quad (3)$$

式中: $x_{j,k}$ ($j = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1; k = 1, 2, \dots, m, m$ 为信号的离散采用点数)为重构信号 $S_{n,j}$ 离散点的幅值。设分析信号的总能量为 E_0 ,则:

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^n-1} E_{n,j} \quad (4)$$

各频带的能量占被分解信号总能量的百分比为 E_j 。

$$E_j = \frac{E_{n,j}}{E_0} \times 100\% \quad (5)$$

由此可得到信号小波包分解后不同频带上的能量百分比^[10-11]。

采用小波包方法对采集的行波信号进行分析时,一个十分重要的问题就是小波基的选择,因为不同的小波基分析对于同一个信号会产生不同的结果。在已知的各种小波基函数中,db6小波支集长度为12,能量集中度高,具有最佳的局部特性,能够在各种瞬变波形中较好地提取有用信号成分,因此本文选择db6紧支集小波作为小波基函数。根据前面所述理论,用db6对采集的信号进行小波包分解,首先必须确定小波包分解的深度,测试设置的信号的采样频率为500 MHz/s,根据Shannon采样定理^[12-13],其奈奎斯特(Nyquist)频率为250 MHz,在小波包分解原理基础上,可以将信号分解到第4层,共有 $2^4 = 16$ 个小波包。对应的最低频带为0~15.625 MHz、对应的最高频带为234.375~250 MHz。表1所示为各材质传感器测得的行波信号部分小波包频带能量分布。

表1 各材质传感器测得行波信号部分频带能量分布 (%)

频率带/ MHz	0~ 15.625	15.625~ 31.25	31.25~ 46.875	46.875~ 62.5
黄铜片	0.686 1	0.047 8	0.040 8	0.093 5
钛片	0.669 7	0.040 7	0.050 2	0.089 5
碳纤维	0.702 5	0.044 0	0.029 5	0.068 8
不锈钢	0.509 6	0.080 6	0.080 2	0.142 6
镍片	0.691 3	0.046 4	0.034 8	0.082 4
铁片	0.651 6	0.053 9	0.042 4	0.103 5
铝片	0.731 5	0.049 3	0.027 8	0.061 9
镁片	0.528 3	0.070 7	0.070 1	0.141 3

根据8种材质传感器测得行波信号频带能量分布表,编写MATLAB程序,绘制8种材质频带能量在各频段的

衰减折线图,如图 3 所示。

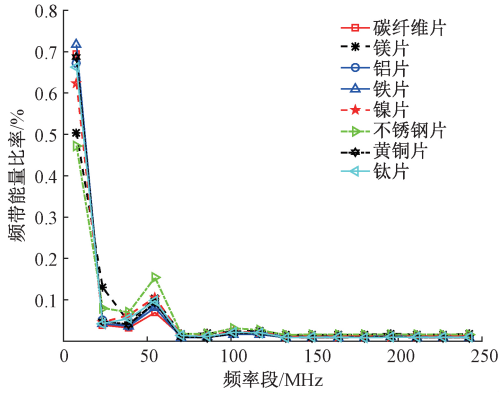


图 3 各频率范围能量比率衰减的拟合曲线

由图 3 可以看出,8 种材质的传感器所测波形的能量衰减变化的趋势趋于一致,衰减基本呈指数规律。不同频率段所含能量呈现显著差异,整体上为低频段>中频段>高频段,在 0~31.25 MHz 频率段,衰减强度大小分别是铁片>碳纤维片>黄铜片>铝片>钛片>镍片>不锈钢片>镁片;在 31.25~62.5 MHz 频率段,衰减强度大小分别是碳纤维片>镍片>铁片>钛片>不锈钢片>黄铜片>镁片>铝片;在 62.5~93.75 MHz 频率段,衰减强度大小分别是不锈钢片>镁片>铝片>黄铜片>铁片>钛片>镍片>碳纤维片;在 93.75~125 MHz 频率段,衰减强度大小分别是不锈钢>镍片>镁片>钛片>黄铜片>铝片>铁片>碳纤维片,由此可得不同材质传感器采集的行波信号在不同频段具有各自不同的响应规律。从能量衰减特性的角度分析,传感器采集的行波信号能量衰减速度越慢意味着越接近于采集到完整的行波故障信号,因此能量衰减越慢越好。由于故障行波信号的频率为 100 kHz~50 MHz,这里只分析表 1 划分的 0~62.5 MHz 频率段范围,由上述对应频段的衰减规律可看出,镁片采集行波信号的能量衰减速率相对较慢,因此镁片相对其他材质的行波传感器传变特性更好。

2.2 不同材质传感器测得信号的脉宽大小及幅值衰减速度比较

在 MATLAB 里编写计算脉宽程序,脉宽 t_p 的定义如图 2 所示,根据不同材质传感器测得的行波信号的脉宽大小的比较来分析不同材质传感器的传变特性,脉宽的大小可反映传感器采集波形的明显程度,脉宽越窄,频率越高,尖峰越陡,采集的波形越明显。MATLAB 计算的各脉宽值及采集信号的入射波与第一次反射波的幅值如表 2 所示。

由表 2 可知,脉宽由大到小排序为铁片>不锈钢片>钛片>碳纤维片>黄铜片>镍片>铝片>镁片,因此,从采集的行波信号的脉宽大小来分析,镁质传感器采集波形最明显;从信号幅值的衰减速度看,铁片=镍片>钛片>黄铜片>铝片>不锈钢片>镁片>碳纤维片,从信号采集的角度分析,由于行波信号为高频信号,反射波的幅值衰减太快

表 2 各材质脉宽值及信号的幅值

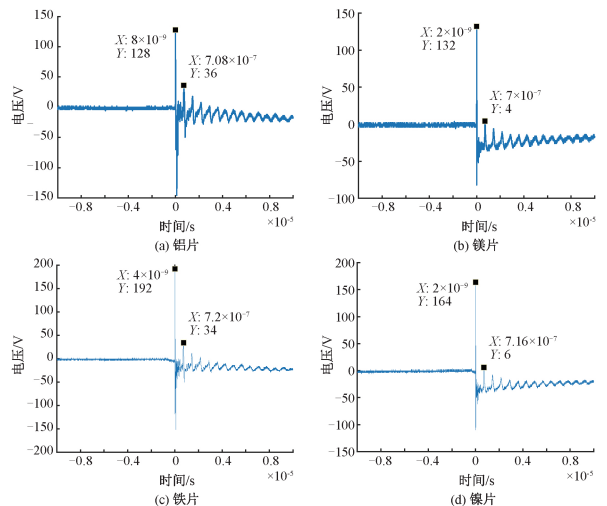
材料	脉宽值	入射波幅值/ V	第一次反射波幅值/ V	幅值之差/ V
镁片	9.958 3e-09	128	36	92
铝片	1.013 6e-08	132	4	128
镍片	1.014 7e-08	164	6	158
黄铜	1.018 7e-08	154	4	150
碳纤维片	1.020 5e-08	82	-2	84
钛片	1.049 0e-08	158	6	152
不锈钢片	1.075 9e-08	150	38	112
铁片	1.081 0e-08	192	34	158

易使信号淹没在噪声干扰信号中,因此衰减速度较缓有利于识别出反射波且有利于采集到完整的行波故障信号,由于不锈钢为磁性材料,在采集的信号中发现入射波附近噪声干扰较其他材质的多,而碳纤维为非金属材料,其导电性较金属材料弱,从表 2 中可看出其入射波与第一次反射波的幅值与其他金属材料的相比幅值明显小很多,因此不锈钢与碳纤维可能会不利于行波信号的采集,综合看镁材质传感器采集的波形脉宽最窄,波形最明显,镁质传感器采集的信号幅值衰减较慢,更有利于信号的采集。

2.3 不同材质传感器测得信号的定位准确性比较分析

根据非接触式行波传感器的理论模型,在金属板悬于导线相同的距离处,金属板的尺寸都为 10 cm×10 cm 等相同实验条件下分别用铝、碳纤维、镍、黄铜、钛、铁、镁、不锈钢等 8 种不同材质的金属板测得的信号如图 4 所示。从信号定位的准确度比较来反映不同材质传感器的传变特性。

根据波头 t_p 最小且幅值最高的特点选定初始波与反射波的波头,由于行波在传输过程中有很多噪声干扰,且故障行波在来回反射过程中会消耗能量,幅值降低,使得反射波的波头可能会淹没在噪声中而无法识别。从式(2)中可以看出,S 的准确计算与反射波波头的准确识别与波速的



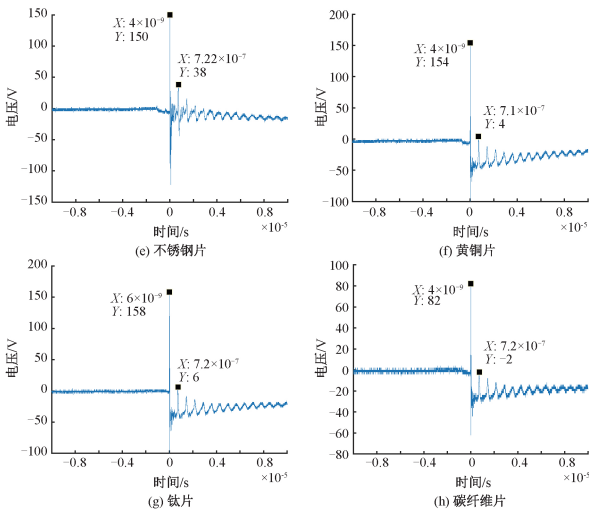


图4 8种材质实测波形

准确确定密切相关,从实验测得的波形来看,所有的波形的入射波的波头都非常明显,入射波、第一次反射波等波头都有规律地衰减,从实验波形都可以很好地分辨入射波与反射波,输电线路的行波波速与线路的实际参数有关,而输电线路的参数是随着频率变化的,精确计算行波波速存在困难^[14-15],其中一种为利用经验值即公式法计算行波波速;另一种为实时测量确定行波波速,在线实时测量波速在合适范围内的测距精度比公式法确定波速的测距精度高,行波波速以 $v = 2.85 \times 10^8$ m/s(由多次模拟实验取波速的平均值得出)进行分析,由表3中的数据可知,线路末端反射波波头和起始波波头的时间间隔 Δt ,本文中输电线路长度为 100 m,根据计算距离公式 $S = \frac{1}{2}v \times \Delta t$,可计算出故障距离。

由相对误差计算公式:

$$\text{相对误差} = \frac{|\text{计算距离} - \text{故障实际距离}|}{\text{实际线路长度}} \times 100\% \quad (6)$$

可得故障距离计算结果与实际距离的相对误差如表3所示。

表3 故障计算结果与相对误差

材质	起始点	反射点	$\Delta t /$ ns	计算 故障 距离/m	实际 故障 距离/m	相对 误差/ %
镁	8×10^{-9}	7.08×10^{-7}	700	99.75	100	0.25
铝	2×10^{-9}	7×10^{-7}	698	99.47	100	0.53
铁	4×10^{-9}	7.2×10^{-7}	716	102.03	100	2.03
镍	2×10^{-9}	7.16×10^{-7}	714	101.75	100	1.75
钛	6×10^{-9}	7.2×10^{-7}	714	101.75	100	1.75
黄铜	4×10^{-9}	7.1×10^{-7}	706	100.61	100	0.61
不锈钢	4×10^{-9}	7.22×10^{-7}	718	102.32	100	2.32
碳纤维	4×10^{-9}	7.2×10^{-7}	716	102.03	100	2.03

由表3可以看出,镁材质传感器测得的信号计算出的故障距离与实际故障距离最接近,相对误差最小,因此可认定镁材质传感器定位相对更准确,镁材质的传感器传变特性更好。

3 结 论

1)小波包变换多分辨和自适应的优良特性,可以对采集到的行波信号进行科学分析,根据不同材质传感器测得的行波信号的能量衰变规律,对于不同频段的信号,不同材质传感器具有不同的响应规律,根据这规律分析可以为不同故障类型、放电类型等对应的不同频段信号的检测选择传感器提供参考。

2)从能量衰减特性的角度分析,在(0~62.5 MHz)行波故障信号频段,镁片的能量衰减速率相对较慢,镁片相对于其他材质的传感器传变特性更好;从脉宽计算的角度及采集的信号幅值衰减的速度分析,镁片采集的信号脉宽最小,镁质传感器采集的波形较其他材质的传感器明显,镁质传感器采集的信号幅值衰减较慢,更有利于信号的采集;从定位准确度的角度分析,镁材质传感器定位准确度较其它材质传感器高。综合上述,镁片在行波故障测距中的传变特性最好,因此,镁材质可优先考虑为非接触式行波传感器的选材。

参考文献

- [1] 董兴华.基于电子式互感器的智能行波测距系统[D].济南:山东大学,2013.
- [2] 毛艳,李庆峰,李毅,等.1 000 kV 直流高压分压器的比对与不确定度评定[J].电网技术,2012,36(7):38-42.
- [3] 董恒.基于一次电光效应的非接触式过电压监测传感器研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [4] 何俊宏.基于非接触测量传感器的配电网在线监测和故障识别研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [5] 姜林言,朱革,昌驰,等.时栅位移传感器行波产生新方法[J].仪器仪表学报,2015,36(2):210-215.
- [6] 简讯.基于电场感应的非接触式行波传感技术的研究[D].抚州:东华理工大学,2016.
- [7] 王绍部,舒乃秋,龚庆武,等.计及TA传变特性的输电线路行波故障定位研究[J].中国电机工程学报,2006(2):88-92.
- [8] 刘亮,曾祥君,邓名高,等.基于线路归一和网络解耦的配网故障测距方法[J].仪器仪表学报,2018,39(1):243-249.
- [9] SUN Q, WU J, LV H P, et al. Analysis of coupling characteristics of hybrid electric field in the 750 kV HVAC and ± 800 kV HVDC parallel transmission lines [C]. The 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2017.
- [10] ZHAO M S, ZHANG J H, YI C P. Time-frequency characteristics of blasting vibration signals measured in

- milliseconds[J]. Mining Science and Technology (China), 2011, 3(21):349-352.
- [11] LI Q, LI D. Structure damage identification under ambient excitation based on wavelet packet analysis[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 842:012023.
- [12] 宁瑞峰,张世平.小波包分析在爆破震动信号能量衰减规律中的应用[J].爆破,2014,(1):1-4,37.
- [13] XUE F LIN M, CAI P, et al. Frequency spectrum analysis on micro-seismic signal of rock bursts induced by dynamic disturbance[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2010, 20(5): 682-685.
- [14] 曾志明,凌志勇,袁宜真,等.应用于输电线路故障测距的行波波速仿真分析[J].湖南工业大学学报,2017, 31(4):32-38.
- [15] 黄雄,王志华,尹项根,等.高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J].电网技术,2004,28(19):34-37.

作者简介

廖芳,1993年出生,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统与自动控制。

E-mail:2292880501@qq.com

汪志成,1982年出生,博士、副教授,主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。