引用格式:刘凤,吴雨沼,李肖博,等.基于改进光学电压互感器的故障行波波头标定方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(4):38-49.
Citation: LIU Feng, WU Yuzhao, LI Xiaobo, et al. Method for fault wavefront calibration of faults based on the improved optical voltage transformer [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(4):38-49.

基于改进光学电压互感器的故障行波波头标定方法

刘 凤[1,2],吴雨沼[3],李肖博[3],蔡田田[3],陈军健[3],邝 野[3],
王玉姬[3],张巧惠[3],张 颖[1],曾家琛[1]

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114;2.湖南生物机电职业技术学院,湖南 长沙 410127;
3.南方电网数字研究院有限公司,广东 广州 510670)

摘 要:针对现有电磁式互感器传变故障行波信号频带受限与故障行波波头标定易受噪声干扰的问题,提出一种基于改进光学电压互感器的故障行波波头标定方法。先改进了光学电压互感器解调电路与调理电路,在放大故障行波信号的同时,降低双折射干扰信号的影响,提高行波信号的传变精度;再引入改进自适应噪声完备集合经验模态分解(improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, ICEEMDAN)来分解传变的故障行波信号,降低故障行波信号中的噪声干扰;然后,结合最小熵解卷积(minimum entropy deconvo-lution, MED)算法,增强分解后的故障行波信号的故障脉冲陡度,突出故障行波波头特征,实现故障行波波头标定;最后,进行了仿真与试验。研究结果表明,所改进的光学电压互感器电路传变频带可达 10 kHz~1 MHz,满足故障行波信号的传变精度要求;所提的故障行波波头标定方法不受强噪声的干扰,可精确标定行波波头。

关 键 词:光学电压互感器;故障行波;波头标定;噪声干扰
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.04.004 **中图分类号**:TM773 **文章编号**:1673-9140(2025)04-0038-12

Method for fault traveling wavefront calibration based on improved optical voltage transformer

LIU Feng[1,2], WU Yuzhao[3], LI Xiaobo[3], CAI Tiantian[3], CHEN Junjian[3], KUANG Ye[3],
WANG Yuji[3], ZHANG Qiaohui[3], ZHANG Ying[1], ZENG Jiachen[1]

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University & Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Hunan Biological and Electromechanical Polytechnic, Changsha 410127, China; 3. Digital Grid Research
Institute Co., Ltd., China Southen Power Grid, Guangzhou 510670. China)

Abstract: To address the restricted frequency band of existing electromagnetic potential transformers in transmitting fault traveling wave signals and the susceptibility of fault traveling wavefront calibration to noise interference, a fault traveling wavefront calibration method based on an improved optical voltage transformer is proposed. Firstly, the demodulation and conditioning circuits of the optical voltage transformer are improved to amplify fault traveling wave signals while reducing the influence of birefringence interference signals, thereby enhancing the transmission accuracy of traveling wave signals. Subsequently, the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (ICEEMDAN) is introduced to decompose the transmitted fault traveling wave signals, reducing noise interference in the fault traveling wave signals. Combined with the minimum entropy deconvolution (MED) algorithm, the decomposed fault traveling wave signals are enhanced to sharpen the fault pulse steepness, highlighting the characteristics of the fault traveling wavefront and achieving its calibration. Finally, simulation and experiment are

收稿日期:2024-06-17;**修回日期**:2024-11-18
基金项目:国家自然科学基金(52407078);湖南省自然科学基金(2022JJ30043);中国南方电网公司数字研究院有限公司科技项目(210002KK52222011)
通信作者:刘 凤(2000—),女,研究生,主要从事电力系统保护与控制等方面的研究;E-mail:1184568215@qq.com

conducted. The results show that the improved optical voltage transformer circuit can transmit signals in the frequency band from 10 kHz to 1 MHz, meeting the requirements for the transmission accuracy of fault traveling wave signals. The proposed method for fault traveling wavefront calibration is not affected by strong noise and can accurately calibrate the traveling wavefront.

Key words: optical voltage transformer; fault traveling wave; wavefront calibration; noise interference

当配电网线路发生故障时，基于行波的故障定位方法具有不受电网系统参数、故障类型及线路不对称等影响的优点，得到了广泛使用[1-2]。故障行波信号频带范围宽一般为 10 kHz～1 MHz[3-4]。作为配电网故障行波的传变途径之一[5]，电磁式电压互感器的传变特性对挖掘故障行波信号的高频宽频带信息、实现故障行波波头标定至关重要。

解决故障行波信号的传变的传统电磁式电压互感器（phase voltage transformers，PT）主要存在安全隐患、宽频带传变性能较差与抗干扰能力较差这 3 个问题。就安全隐患而言，传统电磁式电压互感器测量方式基于电磁感应，本质上属于“介入”式测量，属于双向“互感”式，必须采用复杂的结构消除自身引入电磁感应的影响，其可靠性低，输出端不能短路，其在高压测量方面还面临着绝缘、爆炸等危险，可能对人身安全造成威胁[6-7]。就宽频带传变性能而言，电磁式电压互感器在电传感器测量过程中，其铁磁谐振与过电压、过电流的磁路容易饱和等限制了其动态范围；其暂态过程长，容易产生的大量谐波噪声[8]。就抗干扰能力而言，其传变过程容易受到配电网复杂环境中电磁场的干扰，导致传变精度降低[9-10]。因此，传统的电磁式电压互感器不能满足传变宽频高频故障行波信号的要求。新型光学电压互感器（optical voltage transformer，OVT）利用晶体的光电效应来实现电压的测量，通过光纤传输信号，实现故障行波信号宽频带传变，具有体积小、绝缘性好、传变特性好与抗干扰强等诸多优点[11]，弥补了电磁式电压互感器的缺陷，有利于配电网故障行波信号传变，具有广阔的应用前景[12-13]。

针对故障行波波头标定问题，许多学者从时域和频域方面展开了大量研究。文献[14]对测量的离散信号进行差分求导，以增强波头信号的突变特征，其原理简单，方法易于施行，但该方法对噪声非常敏感，在实际工程中的应用效果并不理想。小波变换具有良好的时频联合分析特性，故其在波头信号的检测得到了大量运用[15]。虽然小波变换具有一定的抗噪能力，通过小波分析后模极大值的标定即可确定行波波头，但分解尺度和选择的基函数不同都会对行波波头的检测精度带来影响，故这类方法缺乏自适应性。

基于希尔伯特–黄变换（Hilbert-Huang transform，HHT）的一系列的信号处理方法利用行波信号，具有丰富的频域信息，可从频域着手进行行波波头的标定。这类方法先把行波信号转换为频域形式，再对频域中的奇异点进行检测，以此实现时域内的行波波头标定[16]。但该方法经验模态分解（empirical mode decomposition，EMD）算法引起的模态分量混叠现象会对行波波头的标定带来严重不利影响，且 EMD 在强噪声环境下的提取效果不佳。文献[17-20]对 EMD 算法的混叠现象进行改进，提出了集合经验模态分解（ensemble empirical mode decomposition，EEMD）和总体局域均值分解（ensemble local mean decomposition，ELMD）算法，取得了一定的效果，但该方法仍然不能彻底消除模态分量混叠现象。文献[21]进一步对类 EMD 算法进行改进，提出了自适应噪声完备集合经验模态分解（complementary ensemble empirical mode decomposition，CEEMD）算法，该方法在对混叠现象的抑制和减少计算量上均取得了良好的效果，但仍存在噪声干扰和伪模态的问题。文献[22]采用了基于变模态分解（variational mode decomposition，VMD）算法和 S 变换的信号提取方法，避免了在强噪声下 EMD 方法的提取问题，并利用兼顾连续小波变换的 S 变换，结合单频率独立分析的短窗傅里叶变换，得到了行波信号在奈奎斯特频率分量下的时域信息，从而精确地标定波头，但该方法仍存在 VMD 算法参数和奈奎斯特频率分量的选取问题。文献[23]从故障信号能量的角度，提出了采用 Teager 能量算子（Teager energy operation，TEO）二次增强小波变换后的故障特征的方法，该方法对行波波头的标定效果更好，但 Teager 能量算子依然对噪声较敏感。

针对这些问题，本文提出一种基于改进光学电压互感器的故障行波波头标定方法。先改进了光学电压互感器解调电路和调理电路，在放大故障行波信号的同时，减少了双折射干扰信号的影响，

提高行波信号的传变精度；再提出基于改进自适应噪声完备集合经验模态分解（improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise，ICEEMDAN-MED）的故障行波波头标定方法，降低故障行波信号的噪声含量，突出故障行波波头特征；最后，进行仿真和试验验证。仿真和试验结果均表明，所提出的改进的光学电压互感器相较于电磁式电压互感器具有更宽的传变频带与更高的传变精度，且该方法准确性颇佳，在噪声干扰下仍能精确标定行波波头。

1 光学电压互感器传变行波设计

1.1 光学电压互感器传变原理

针对宽频带故障行波信号，光学电压互感器不仅具有较高的灵敏度，且在快速传变故障行波时频宽频带信息方面具有明显优势[24]。光学电压互感器的主要原理为 Pockels 电光效应[25]，其传变过程如图 1 所示。

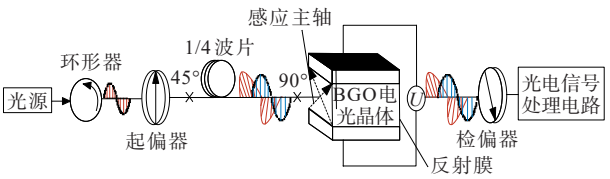


图 1 基于 Pockels 电光效应的传变过程

Figure 1 Transmission process based on Pockels effect

在图 1 中，入射光通过传感光纤进入起偏器后，变为线偏振光，该入射光在锗酸铋晶体（$Bi_4Ge_3O_{12}$，简称 BGO）表面分裂成初相相同、振动方向相互垂直的 2 束光。这 2 束光在相互垂直方向的晶体折射率不同，导致其在出射 BGO 电光晶体时产生了相位差。此相位差与外加电场的强度成正比[26]，与输出光强成正弦平方关系[27]。据此，可得输出光强与外加电压的关系，即

$$I_o = I_i \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = I_i \sin^2\left(\frac{\pi U}{2U_\pi}\right) \tag{1}$$

式中，I_o 为输出光强电流；I_i 为入射光强电流；δ 为出射光强相位差；U 为晶体上的外加电场电压；U_π 为晶体上半波电压。

当晶体上的外加电压 $U = U_m \sin \omega t$ 时，输出光强电流为

$$I_o = I_i \sin^2\left(\frac{\pi U_m}{2U_\pi} \sin \omega t\right) \tag{2}$$

式中，U_m 为外加电压的峰值。

由式（2）可得，输出光强随外加电压变化曲线，如图 2 所示。

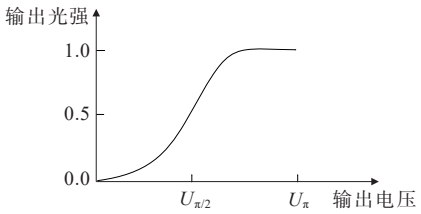


图 2 输出光强随外加电压变化曲线

Figure 2 Variation curve of output light intensity with applied voltage

从图 2 中可以看出，输出光强随着外加电压的变化可获得近线性的响应。

1.2 改进光学电压互感器解调电路和调理电路

解调模块的作用是将光学电压互感器输出的光强信号转换为幅度适宜的电信号，便于后续继续分解故障行波信号。故障行波信号频带范围较宽，故本文针对故障行波信号特性改进了解调电路。该改进的解调电路示意如图 3 所示。

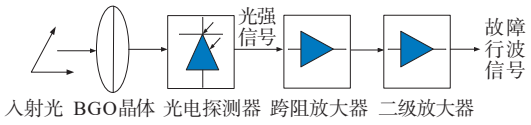


图 3 改进的解调电路示意

Figure 3 Schematic diagram of improved demodulation circuit

在图 3 中，改进的解调模块在光电探测器的后端设计了跨阻放大器和二级放大器，经两级放大后直接输出，避免使用电容电感等元器件，降低故障行波信号的高频分量损失，也减少了故障信息的缺失。

光学电压互感器输出光强电流通过解调电路输出直流分量信号和交流分量信号。其中，交流分量信号为有效故障行波信号。但 BGO 晶体内部存在双折射，导致交流分量信号中同时存在直流分量信号干扰[28]。针对这些问题，本文改进了调理电路，结果如图 4 所示。

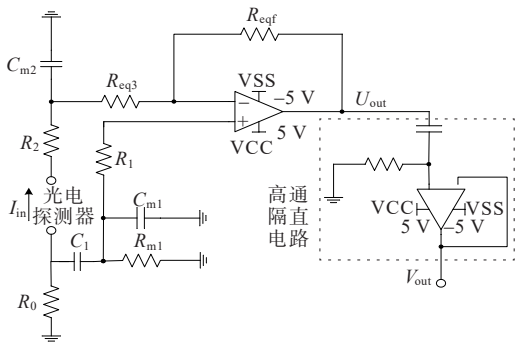


图 4 改进的调理电路

Figure 4 Improved conditioning circuit

在图 4 中，电阻 R_0 为限流电阻，R_1 为分压电阻，R_2 为负载电阻，R_{eqf} 为反馈电阻，R_{m1} 为限流电阻，R_{eq3} 为输入电阻，C_{m1} 为耦合电容，C_{m2} 为滤波电容，I_{in} 为输入电流，U_{out} 为经放大器输出的电压，V_{out} 为经高通隔直电路输出的电压。其中，R_0、R_1、R_2、R_{eqf}、R_{m1}、R_{eq3} 均为固定值。电阻 R_1、R_{m1} 和电容 C_{m1} 组成第一级滤波网络，电阻 R_{eqf} 并联在运放的负极与输出两端。交流信号与直流信号在不同频率下对应的等效电路不同，故其信号放大倍数也不同。因此，该调理电路在放大交流信号的同时，还可以降低直流信号的含量。利用高通隔直通路滤除直流信号。交、直流信号经过图 4 所示的电路。则电压 U_{out}（分为直流电压 V_{dc} 和交流电压 V_{ac}）为

$$V_{dc}=-I_{in}R_2\left(1+\frac{R_0+R_{eq3}+R_{eqf}}{R_2}\right) \tag{3}$$

$$V_{ac}=I_{in}R_2\left(1+R_{eqf}/R_{eq3}\right) \tag{4}$$

由式(3)、(4)可知，为提高交流信号的含量和行波传变的精度，可通过数据处理单元控制不同开关调节电阻 R_{eq3}。该等效电阻示意如图 5 所示。

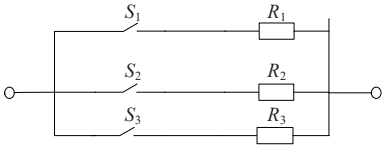


图 5　等效电阻示意

Figure 5　Schematic diagram of equivalent resistance

1.3　光学电压互感器宽频传变特性分析

光学电压互感器结构主要包括光电探测器、信号解调、信号调理，A/D 转换，相位调制等环节。光学电压互感器的传变过程如图 6 所示。

从图 6 中可以看出，该传变过程前向通道主要为光电探测器、信号解调、信号调理，A/D 转换。光电探测器等效为比例环节 G_0，该环节的比例系数 K_1 由光源功率和光率损耗共同决定。同时，该过程经历传输光纤延迟，该延迟环节等效为 z^{-1}；信号解调对信号产生一个延迟，等效为一个延迟环节 z^{-1}。其中，Z 为复变量，$Z=e^{sT}$，s 为拉普拉斯域变量，T 为采样周期。信号经过解调后，须进行一次积分才可得到电信号。在解调过程中，信号在离散域的表达式为 $D(z)=K_2(1-z^{-1})$。信号调理环节作用是放大解调后的信号，该环节相当于比例环节。设信号调理环节比例系数为 K_3；调理后的故障行波信号经过 A/D 转换为数字信号，近似将该过程等效为比例系数为 K_4 的比例环节，K_4 与 A/D 转换器位数均与输入电压有关。

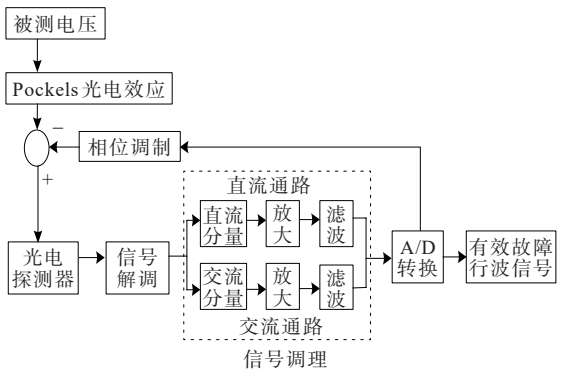


图 6　光学电压互感器的传变过程

Figure 6　Transmission process of optical voltage transformer

反馈通道主要由 D/A 转换器信号处理环节产生的反馈数字量，将其转化为模拟阶梯波来驱动相位调制器，产生反馈补偿相移。由于每隔一段时间反馈一次，故 D/A 转换的输出到比较点经历一个延迟环节 z^{-1}。设相位调制环节的增益为控制系数 K_5。

前向增益 $K_F=K_1K_2K_3K_4$，反馈回路增益 $K_B=K_5$。因此，光学电压互感器闭环控制系统的离散传递函数 $G(z)$ 为

$$G(z)=\frac{K_FK_B}{z^2-z+K_BK_F} \tag{5}$$

根据传递函数，得到光学电压器传变的伯德图，结果如图 7 所示。

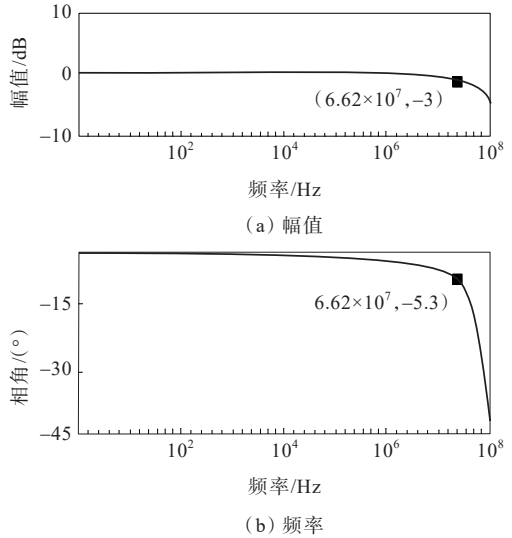


图 7　光学电压器传变的伯德图

Figure 7　Bode plot of optical voltage transformer

从图 7 中可以看出，当信号频率低于 10^7 Hz 时，光学电压互感器在传变过程中几乎不存在幅值和

相位差；当信号频率高于10^7 Hz时，光学电压互感器在传变过程中会出现幅值差和相位差。因此，应针对频率范围为10 kHz～1 MHz的故障行波信号，改进光学电压互感器，满足其传变要求。

2 基于ICEEMDAN-MED故障行波波头标定方法

2.1 基于ICEEMDAN的故障行波信号分解方法

线路发生故障时，故障行波信号从故障点往线路两端传播。其中，故障行波波头易受到噪声干扰，故障行波波头湮没在噪声信号中导致故障行波波头无法标定[29]。滤除噪声信号时，可能会出现波头陡度降低的情况，导致较大的波头标定误差。

噪声下小波分解的高频行波信号如图8所示。在图8中，故障电阻为500 Ω。

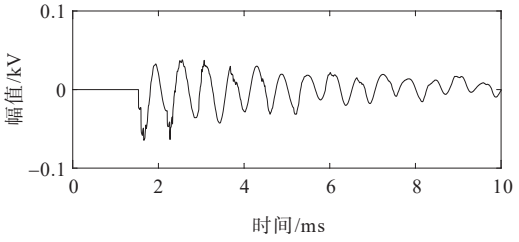


图8 原始电压行波信号

Figure 8 Original voltage traveling wave signal

不同噪声信号下小波分解的高频信号分量如图9所示。从图9中可以看出，行波信号中高频分量湮没在噪声中，故障行波信号与噪声信号混合，行波波头难以精确标定。

ICEEMDAN算法是一种广泛应用于机械故障诊断领域中的噪声分析处理算法[30-32]。其利用ICEEMDAN算法分解故障行波信号，确保分解后的故障行波信号在最大程度保留故障信息的同时，去除其他噪声干扰，从而优化故障行波信号分解效果，便于后续故障行波波头的精确标定。

ICEEMDAN算法分解故障行波信号的步骤共分6步。

1）根据原始信号经EMD分解后不同的IMF，依据自适应策略添加高斯白噪声。

$$\boldsymbol{X}_1^{(i)}=\boldsymbol{x}+e_1E_1(\boldsymbol{w}^{(i)})\quad i=1,2,3,\cdots,n \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{X}_1^{(i)}$为第一次经EMD分解得到的行波信号；$\boldsymbol{x}$为实际信号；e_1为信噪比；$E_1(\boldsymbol{w}^{(i)})$为EMD分解后的第一个本征模态函数（intrinsic mode functions，IMF），$\boldsymbol{w}^{(i)}$为第i次添加高斯白噪声；n为信号$\boldsymbol{X}_1^{(i)}$总采集点个数。

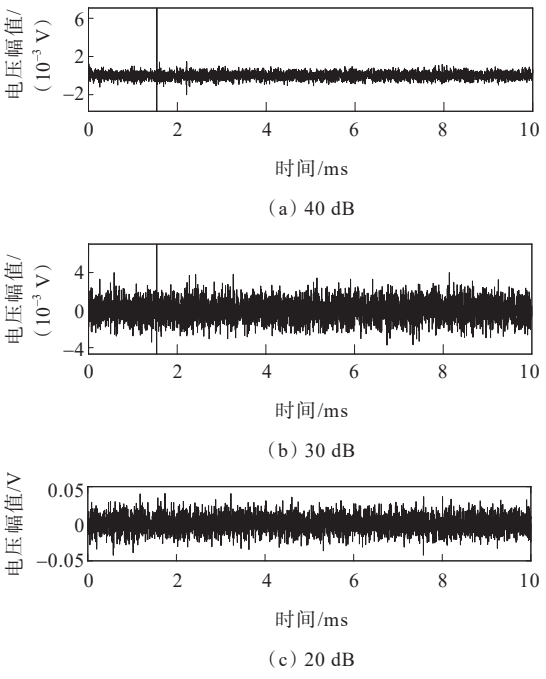


图9 不同噪声下小波分解的高频行波信号分量

Figure 9 High frequency traveling wave signal component decomposed by wavelet under different noises

2）计算信号第一次分解的残差。

$$\boldsymbol{r}_1=\left(\boldsymbol{X}_1^{(i)}-E_1\left(\boldsymbol{X}_1^{(i)}\right)\right) \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{r}_1$为第一次分解后的残差向量；$E_1\left(\boldsymbol{X}_1^{(i)}\right)$为EMD分解$\boldsymbol{X}_1^{(i)}$得到的IMF分量。

3）计算第一模态分量$\boldsymbol{I}_{\mathrm{IMF},1}$，即

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{IMF},1}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{r}_1 \tag{8}$$

4）计算第二模态分量$I_{\mathrm{IMF},2}$，即

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{IMF},2}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{r}_2 \tag{9}$$

式中，r_2为第二次分解后的残差向量。其计算式为

$$\boldsymbol{r}_2=\left(\boldsymbol{X}_2^{(i)}-E_2\left(\boldsymbol{X}_2^{(i)}\right)\right) \tag{10}$$

5）同理，可计算第k阶模态分量$\boldsymbol{I}_{\mathrm{IMF},k}$，即

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{IMF},k}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{r}_k \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{r}_k=\left(\boldsymbol{X}_k^{(i)}-E_k\left(\boldsymbol{X}_k^{(i)}\right)\right)$。

6）直到计算出所有IMF分量及其对应的残差。

经过这6个步骤，得到所有IMF分量。各分量依据瞬时频率由大至小依次排列，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{IMF},1}$具有最高的瞬时频率。每个分量都为原始信号的一部分，依据各分量总和可重构原始信号。

2.2 基于MED的故障行波波头标定方法

对行波波头标定而言，ICEEMDAN分解后的IMF分量均包含有效的故障信息，但这些IMF分量函数都是在零附近的振荡函数[33]，无法直接标定行波波头所对应的时刻。因此，引入最小熵解卷积

(minimum entropy deconvo-lution，MED)算法，强化IMF分量中的故障行波波头特征，确定行波波头到达时刻[34]。

MED是一种通过寻找最优滤波器参数重建输入的IMF分量信号的算法。重建后的IMF分量信号特征为有效故障信号的峭度极高，而其噪声信号的峭度极低[35]。由于有效故障信号与噪声信号之间存在峭度差，突出了故障特征，所以该算法可实现对故障行波波头的标定。

MED算法的输入信号IMF分量经过线性系统后的卷积结果为

$$z(n)=x(n)*h(n) \tag{12}$$

式中，$z(n)$为线性系统输出的IMF分量信号；$x(n)$为输入的IMF分量信号；$h(n)$为线性系统；$*$为卷积运算符号。

通过长度为L、参数为$w(n)$的逆滤波器，反卷积重建输入信号，降低经逆滤波器输出IMF分量信号$y(n)$的噪声含量，从而最大化其故障脉冲特征，最小化熵值。采用Varimax norm范数最大化方法，衡量其熵值[36]，即

$$\boldsymbol{y}(n)=\sum_{i=1}^{L}\boldsymbol{w}(i)z(n-i) \tag{13}$$

在输入IMF分量信号$\boldsymbol{x}(n)$的均值为0的情况下，最大化$\boldsymbol{x}(n)$的峭度，即

$$O_r\big(\boldsymbol{w}(n)\big)=\frac{\sum_{n=1}^{N}\boldsymbol{y}(m)^r}{\left[\sum_{m=1}^{M}\boldsymbol{y}(m)^2\right]^{\frac{r}{2}}} \tag{14}$$

式中，$O_r\big(\boldsymbol{w}(n)\big)$为$r$阶的累积量；$M$为信号$\boldsymbol{x}(n)$的总点数；$m$为信号$\boldsymbol{x}(n)$的某个点；$\boldsymbol{y}(m)$为信号$\boldsymbol{x}(n)$的某个点的幅值。

根据经验，令$r=4$。若令$O_4\big(\boldsymbol{w}(n)\big)$一阶导数为0，可得熵值最小值点，即

$$\frac{\partial\big(O_4\big(\boldsymbol{w}(n)\big)\big)}{\partial\big(\boldsymbol{w}(n)\big)}=0 \tag{15}$$

整理式(14)、(15)，则有

$$\left[\sum_{n=1}^{M}\boldsymbol{y}^2(n)/\boldsymbol{y}^4(n)\right]\cdot\left(\sum_{n=1}^{M}\boldsymbol{y}^3(n)\cdot z(n-1)^{\mathrm{T}}\right)=\boldsymbol{w}\boldsymbol{A} \tag{16}$$

式中，$\boldsymbol{w}$为逆滤波器的参数矩阵；$\boldsymbol{A}$为逆滤波输入信号$\boldsymbol{x}(n)$的自相关矩阵。

在经过逆滤波器处理输出IMF分量信号中，其陡度最大处的故障特征最明显，即为故障行波波头，陡度最大处对应的时间即为故障行波波头到达时间。故障行波波头标定流程如图10所示。

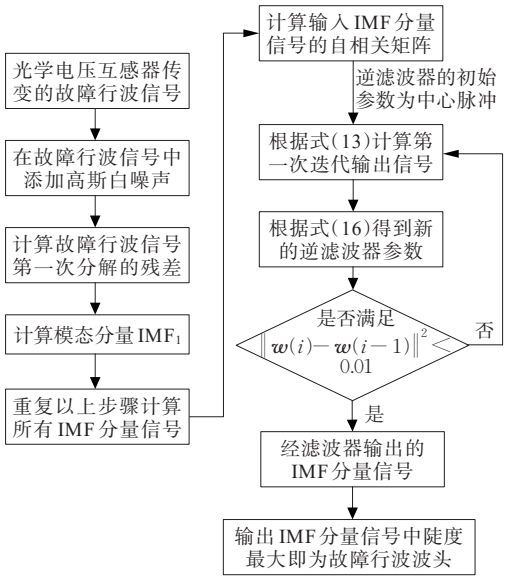


图10　故障行波波头标定流程

Figure 10　Flowchart for fault traveling wavefront calibration

3　仿真与试验验证

3.1　光学电压互感器传变特性仿真与试验验证

本文针对宽频带故障行波研制了适用于故障行波定位的光学电压互感器，其主要由光学电压互感器高压传感头、连接光缆、二次采集器等构成。该光学电压互感器如图11所示。

通过图11所示的光学电压互感器传变雷电波波形，进行线性度、输出响应和输出结果延迟测试。测试结果分别如图12～14所示。

一般来说，线性拟合度越高，光学电压互感器的传变特性越好。从图12中可以看出，光学电压互感器的输出结果线性度较好。

从图13中可以看出，光学电压互感器的响应输

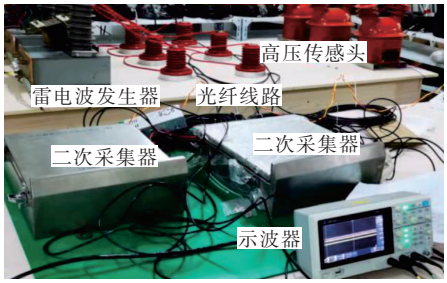


图11　光学电压互感器

Figure 11　Optical voltage transformer

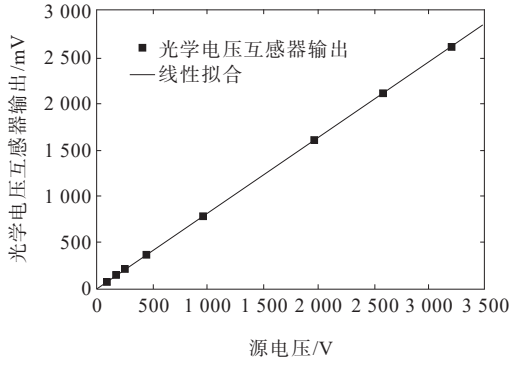


图 12 线性度测量结果

Figure 12 Linearity measurement results

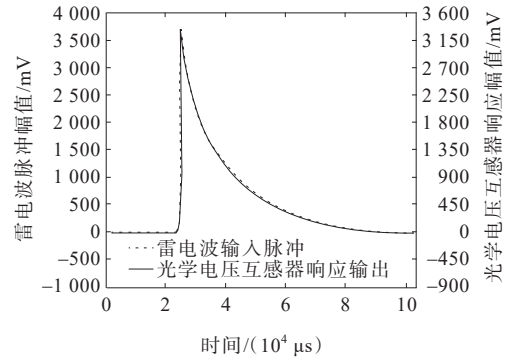


图 13 输出响应测试结果

Figure 13 Output response test results

出与输入的雷电波脉冲信号吻合程度较好,可以较好地响应雷电波脉冲。从图 14 中可以看出,光学电压互感器的输出信号与雷电波信号的吻合程度较好,时间延迟低于 100 ns,这个时间延迟还包含了信号在光缆中传输时的固有延迟。

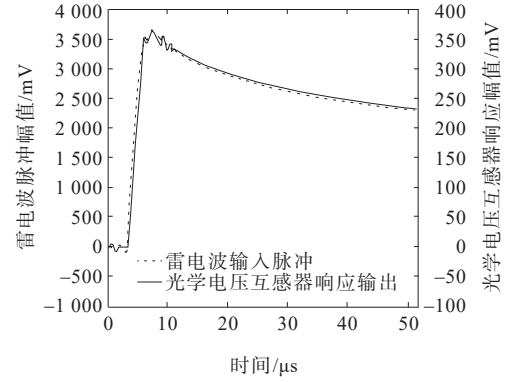


图 14 输出延迟测试结果

Figure 14 Output delay test results

3.2 光学电压互感器与电磁式电压互感器传变特性对比仿真分析

本文在 PSCAD 中搭建改进了光学电压互感器模型和电磁式电压互感器模型,进行两者传变特性的仿真对比。

3.2.1 幅频特性对比

根据光学电压互感器模型和电磁式电压互感器模型的传递函数,电磁式互感器与光学电压互感器频率特性如图 15 所示。

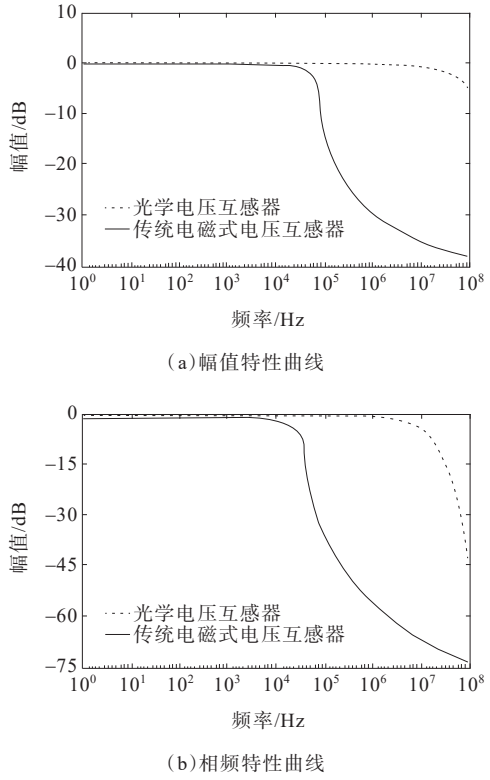


图 15 电磁式互感器与光学电压互感器频率特性

Figure 15 Frequency characteristics of electromagnetic transformer and optical voltage transformer

从图 15 中可以看出,当信号频率低于 10 kHz 时,光学电压互感器和电磁式电压互感器在传变过程中均无幅值差和相位差;当信号频率高于 10 kHz 时,电磁式电压互感器在传变中的幅值和相位出现断崖式下降,即电磁式电压互感器已不能很好保留其频率在 10 kHz 以上的高频特征信息,而光学电压互感器在高频带的性能明显优于传统电磁式电压互感器的,光学电压互感器能无幅值差和相位差地传变高达 1 MHz 的信号,其在对故障线路高频行波信号的获取上具有明显的优势。

3.2.2 故障行波波形传变对比分析

不同互感器的传变对比结果如图 16 所示。图 16 分别展示了通过改进的光学电压互感器和电磁式电压互感器传变故障波形与暂态高频信号的传变效果。

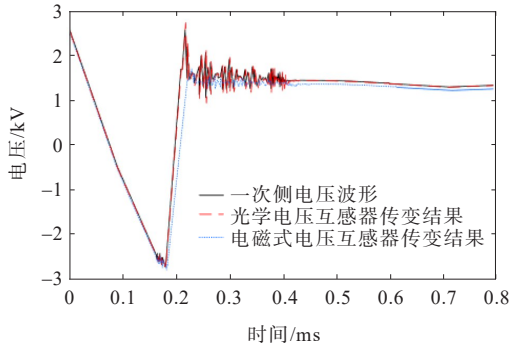


图 16　不同互感器的传变对比结果

Figure 16　Comparison of transmission results of different transformers

从图 16 中可以看出，正常运行时，光学电压互感器和电磁式电压互感器传变电压信号均能够很好地响应一次侧电压信号；但发生故障时，故障时刻突变的信号中包含高频分量，电磁式电压互感器的传变存在延迟，且其高频信号衰减严重，对波头标定产生很大的误差；但光学电压互感器能准确地响应故障产生的高频信号，更有利于行波波头的标定。

3.3　故障行波波头标定方法实验验证

在 PSCAD 中，搭建如图 17 所示的 10 kV 配电线路系统。

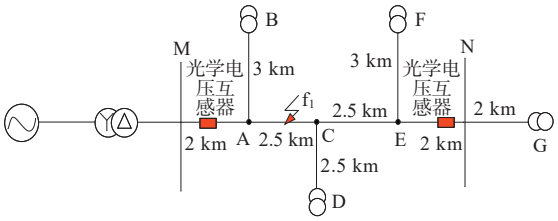


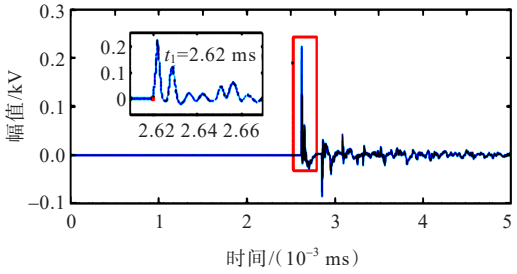
图 17　10 kV 配电线路系统

Figure 17　10 kV distribution line system

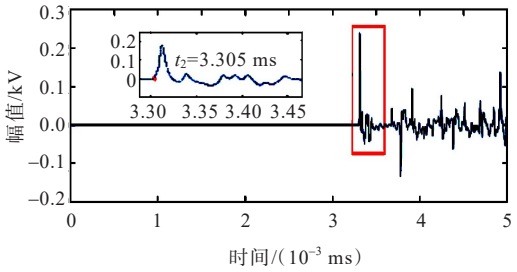
从图 17 中可以看出，故障点 f_1 的故障类型为 A 相接地故障，其故障电阻为 500 Ω，设故障点距离 M 段的距离为 3 km。当故障点 f_1 发生时，光学电压互感器输出的 M 端和 N 端的行波波形如图 18 所示。

利用 ICEEMDAN 分别分解 M 端和 N 端的线模分量，选取分解后的 $I_{\mathrm{IMF},1}$ 分量进行行波波头的标定，分别采用 TEO 和 MED 算法标定行波波头，M、N 端的结果如图 19～20 所示。在图 19、20 中，MED 算法中取滤波器长度为 1 000，循环次数设置为 30，收敛误差为 0.01。

从图 19、20 中可以看出，当采用 ICEEMDAN-



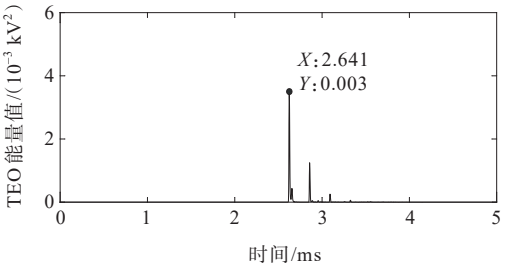
（a）M 端光学电压互感器输出行波波形



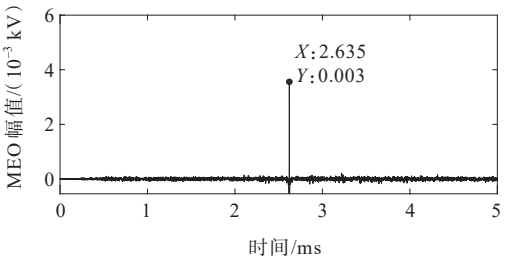
（b）N 端光学电压互感器输出行波波形

图 18　光学电压互感器输出的 M 端和 N 端的行波波形

Figure 18　M-terminal and N-terminal traveling waveforms of optical voltage transformer



（a）ICEEMDAN-TEO 波头标定结果

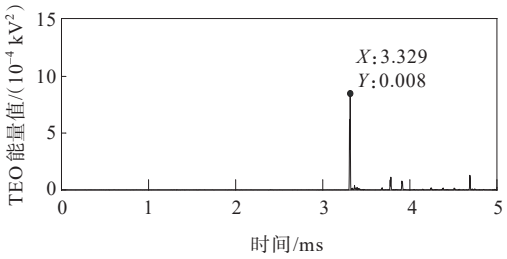


（b）ICEEMDAN-MED 波头标定结果

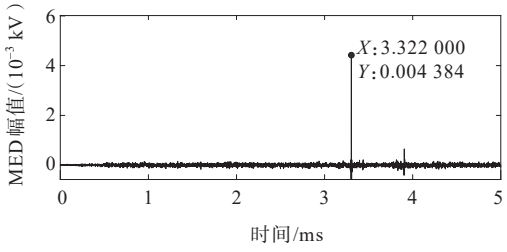
图 19　M 端的不含噪声的不同算法标定结果

Figure 19　Calibration results of different algorithms without noise at terminal M

TEO 方法时，行波到达时刻 t_1 为 2.641 ms，t_2 为 3.329 ms，标定误差 Δt_1 为 0.021 ms，Δt_2 为 0.024 ms；当采用 ICEEMDAN-MED 方法时，行波到达时刻为 t_1 为 2.635 ms，t_2 为 3.322 ms，标定误差 Δt_1 为 0.015 ms，Δt_2 为 0.017 ms。



(a) ICEEMDAN-TEO波头标定结果



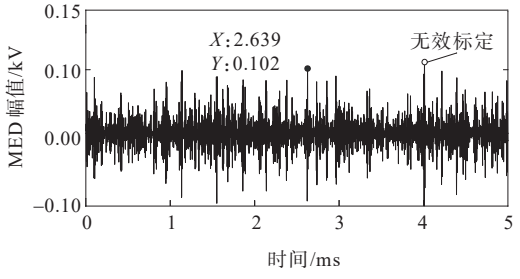
(b) ICEEMDAN-MED波头标定结果

图 20 N端的不含噪声的不同算法标定结果

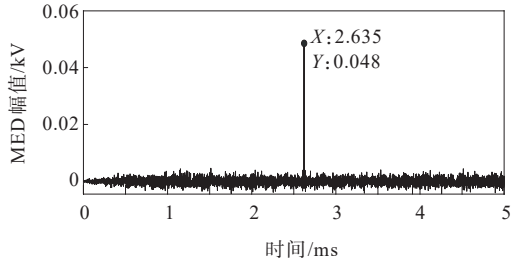
Figure 20 Calibration results of different algorithms without noise at terminal N

3.4 噪声对故障行波波头检测方法影响

配电线路运行实际情况复杂,容易受各种噪声影响。为应对实际情况,增加 20 dB 的白噪声来模拟各种噪声的干扰,对含噪的M端和N端行波分别通过 EEMD-MED 和 ICEEMDAN-MED 算法标定行波波头,M、N端的行波波头标定结果分别如图 21、22所示。



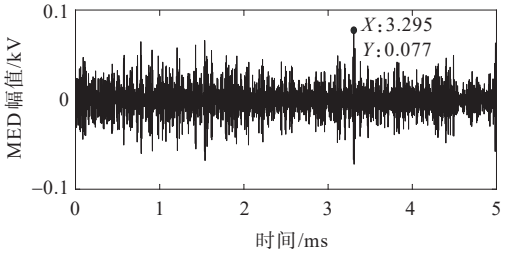
(a) EEMD-MED



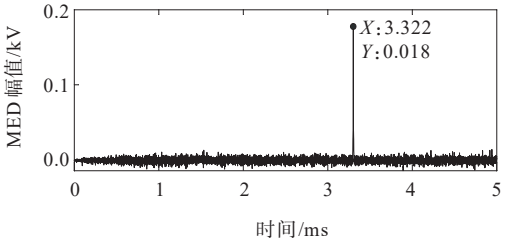
(b) ICEEMDAN-MED

图 21 M端的不同算法标定结果

Figure 21 Calibration results of different algorithms at terminal M



(a) EEMD-MED



(b) ICEEMDAN-MED

图 22 N端的不同算法标定结果

Figure 22 Calibration results of different algorithms at terminal N

从图 21、22 中可以看出,在加入白噪声后,EEMD-MED算法不能去除噪声造成的影响,会出现波头被其他脉冲掩盖的情况,导致无法使用行波波头进行定位。而ICEEMDAN-MED算法不存在有其他脉冲的情况,只突出单一故障脉冲,并能使其波形表现出尖锐的特性,且 ICEEMDAN-MED在高噪声下的定位结果与未加入白噪声时的定位结果一致。与EEMD-MED算法相比,所提方法更适合在实际情况下进行行波波头标定。

4 结语

本文针对故障行波信号传变频带受限、传变精度不高和故障行波波头精确标定的问题,提出了一种基于改进光学电压互感器的故障行波波头标定方法,得出以下结论:

1) 所提方法改进了光学电压互感器解调电路和调理电路,放大故障行波信号的同时减少了双折射干扰信号的影响,从而提高行波信号的传变精度,降低了有效故障行波高频信号的损失。

2) 所提方法引入ICEEMDAN算法对传变后的故障行波信号进行分解,减少故障行波信号中的噪声含量;利用MED算法增强行波故障信号的陡度,将陡度最大处标定为故障行波波头。相比于ICEEMDAN-TEO标定方法,该法具有更准确的波头标定结果。

3）仿真试验表明，相较于电磁式电压互感器，本文改进的光学电压互感器在故障行波传变频带及传变精度方面具有更好的表现，不受噪声的影响，其故障行波波头标定绝对误差不超过0.017 ms，满足配电网故障行波波头标定要求。

参考文献：

[1] 曾举鹏，曾祥君，白浩，等．基于时–频行波全息映射的有源配电网故障定位方法[J/OL]．上海交通大学学报，2024: 1-23. (2024-05-07) [2024-12-07]. https://link. cnki. net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.063.
ZENG Jupeng, ZENG Xiangjun, BAI Hao, et al. Fault location method for active distributionnetworks based on holographic-mapping oftime-frequency traveling waves [J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024: 1-23. (2024-05-07) [2024-12-07]. https://link. cnki. net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.063.

[2] 季 亮，殷佳明，姜恩宇，等．基于混合量测状态估计的配电网故障定位方法[J]．电力系统保护与控制，2024,52(12):58-68.
JI Liang,YIN Jiaming,JIANG Enyu,et al.A fault location method based on hybrid measurement state estimation for a distribution network[J]. Power System Protection and Control,2024,52(12):58-68.

[3] 邓丰，徐帆，冯思旭，等．基于行波全波形能量分布特征的高阻接地故障检测方法[J]．中国电机工程学报，2022, 42(22): 8177-8190.
DENG Feng,XU Fan,FENG Sixu,et al.Research on high impedance fault detection method based on energy distribution characteristics of traveling wave full waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8177-8190.

[4] 许守东，潘馨钰，李世伟，等．基于光伏自适应注入量的配电网单相接地故障保护方法[J]．电网与清洁能源，2023,39(9): 140-150.
XU Shoudong, PAN Xinyu, LI Shiwei, et al. A single phase grounding fault protection method for distribution networks based on photovoltaic adaptive injection amount[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 140-150.

[5] 李其莹，尹东，刘祥国，等．电子式电压互感器的建模与传变特性仿真分析[J]．山东电力技术，2022,49(10): 44-52.
LI Qiying,YIN Dong,LIU Xiangguo,et al.Modeling and transfer characteristics simulation analysis of electronic voltage transformer[J].Shandong Electric Power,2022,49 (10): 44-52.

[6] 李艳，刘树林，王颖．基于超级电容器的电网短路故障监测系统自供电电源研究[J]．电工技术学报，2020,35 (S2): 569-576.
LI Yan, LIU Shulin, WANG Ying. Research on self-powered power supply of short-circuit faultmonitoring system applied in grid based on supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (S2): 569-576.

[7] 王凯亮，曾远方，李家淇，等．基于希尔伯特–黄变换的新型配电系统行波故障定位仿真研究[J]．供用电，2023,40 (9): 43-49.
WANG Kailiang, ZENG Yuanfang, LI Jiaqi, et al. Simulation study on traveling wave fault location of new distribution network system based on Hilbert-Huang transform[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 43-49.

[8] 丁瑞，徐楠，朱佳佳．电磁式电压互感器铁磁谐振的消谐措施[J]．电工技术，2023(18): 192-194.
DING Rui, XU Nan, ZHU Jiajia. Harmonic elimination measures for ferromagnetic resonance of electromagnetic voltage transformers[J]. Electric Engineering, 2023(18): 192-194.

[9] 胡轶波，吕佳佳，彭翰川，等．基于空间电场探针的输电线路故障行波检测[J]．电力科学与技术学报，2020,35 (4): 27-32.
HU Yibo,LV Jiajia,PENG Hanchuan,et al.Fault detection of transmission line based on space electric field probes [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020,35(4): 27-32.

[10] 李景丽，袁豪，徐铭铭，等．小电阻接地系统高阻接地故障检测技术综述[J]．电测与仪表，2023,60(6): 10-18+51.
LI Jingli, YUAN Hao, XU Mingming, et al. Overview of high impedance fault detection technology in small resistance grounding system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(6): 10-18+51.

[11] 沈泽亮，汪金刚，王谦，等．一种基于低频窄带扫描的电磁式电压互感器杂散电容测量与精确建模方法[J]．电工技术学报，2023,38(8): 2211-2221.
SHEN Zeliang, WANG Jingang, WANG Qian, et al. A method for stray capacitance measuring and refined modeling of potential transformer based on low frequency and narrow band scanning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(8): 2211-2221.

[12] 蒋愈勇，王军龙，李俊一，等．人工神经网络在光学电压互感器故障诊断中的应用[J]．电力系统及其自动化学报，2018,30(6): 134-139.
JIANG Yuyong, WANG Junlong, LI Junyi, et al. Application of artificial neural network to fault diagnosis for optical voltage transformer[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2018,30(6): 134-139.

[13] 黄悦华，陈照源，陈庆，等．基于边缘计算和改进

YOLOv5s算法的输电线路故障实时检测方法[J].电力建设,2023,44(1): 91-99.
HUANG Yuehua, CHEN Zhaoyuan, CHEN Qing, et al. Real-time detection method for transmission line faults applying edge computing and improved YOLOv5s algorithm[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 91-99.

[14] 邓丰,李鹏,曾祥君,等.基于D-PMU的配电网故障选线和定位方法[J].电力系统自动化,2020,44(19): 160-167.
DENG Feng, LI Peng, ZENG Xiangjun, et al. Fault line selection and location method based on synchrophasor measurement unit for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 160-167.

[15] 刘丰,谢李为,蔡军,等.基于信号频谱特性的配电网故障行波检测方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(9): 59-69.
LIU Feng, XIE Liwei, CAI Jun, et al. A fault traveling wave detection method based on signal spectral characteristics for a distribution network[J]. Power System Protection and Control,2024,52(9): 59-69.

[16] 马晓锋,安军,高志强,等.基于CEEMDAN和TEO的配电网行波故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(6): 87-95.
MA Xiaofeng, AN Jun, GAO Zhiqiang, et al. A traveling-wave fault location method based on CEEMDAN and NTEO for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(6): 87-95.

[17] 郭亮,王建平,郭鑫.基于VMD-TEO与全信号采集的配电网接地故障测距方法[J].哈尔滨理工大学学报,2023,28(6): 57-66.
GUO Liang, WANG Jianping, GUO Xin. Distribution network ground fault location method based on VMD-TEO and full signal acquisition[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology,2023,28(6): 57-66.

[8] 刘展,包琰洋,李大字.基于重采样降噪与主成分分析的宽卷积深度神经网络风机故障诊断方法[J].发电技术,2023,44(6): 824-832.
LIU Zhan, BAO Yanyang, LI Dazi. Fault diagnosis method of wind turbines based on wide deep convolutional neural network with resampling and principal component analysis[J]. Power Generation Technology,2023,44(6): 824-832.

[19] 徐启峰,黄奕钒,谢楠,等.基于条形铝金属偏振光栅实现的线性光学电压互感器[J].中国电机工程学报,2021,41(7): 2556-2565.
XU Qifeng, HUANG Yifan, XIE Nan, et al. Linear optical voltage transformer based on strip aluminum polarization grating[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(7): 2556-2565.

[20] 张晓新,董灵斌,林峰,等.自取电的电缆故障类型及故障分段定位的研究[J].高压电器,2024,60(11): 116-122.
ZHANG Xiaoxin, DONG Lingbin, LIN Feng, et al. Research on fault types and fault segment location of self-feeding cable[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 116-122.

[21] 张亮,凌同华,陈增辉,等.基于改进CEEMDAN方法确定微差爆破实际延期时间[J].振动与冲击,2020,39(20): 274-280.
ZHANG Liang, LING Tonghua, CHEN Zenghui, et al. Identification of the real delay time of millisecond blasting based on an improved CEEMDAN method[J]. Journal of Vibration and Shock,2020,39(20): 274-280.

[22] 谢李为,柳祎璇,曾祥君,等.基于VMD和S变换的多端输电线路故障定位[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(2): 126-134.
XIE Liwei, LIU Yixuan, ZENG Xiangjun, et al. Fault location of multi-terminal transmission lines based on VMD and S transform[J].Proceedings of the CSU-EPSA, 2019,31(2): 126-134.

[23] 李泽文,张一鸣,夏翊翔,等.基于动态虚拟故障行波定位原理的配电网故障定位装置优化配置[J].电力系统及其自动化学报,2025,37(3): 129-138.
LI Zewen, ZHANG Yiming, XIA Yixiang, et al. Optimal configuration of distribution network fault localization devices based on principle of dynamic virtual travelling wave-based fault localization[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2025,37(3): 129-138.

[24] ZHANG Y, ZENG J C, JIANG Z, et al. Research on traveling wave detection performance based on optical voltage transformer[J]. Journal of Physics: Conference Series,2023,2479(1): 012049.

[25] 陈波,李俊一,王军龙,等.高精度光学电压互感器技术及应用[J].电网与清洁能源,2017,33(6): 7-13.
CHEN Bo, LI Junyi, WANG Junlong, et al. Technology and its application of high precision optical voltage transformer[J].Power System and Clean Energy,2017,33(6): 7-13.

[26] 张宾.Pockels效应电光传感机理建模与实验研究[D].北京:华北电力大学,2017.
ZHANG Bin. Modeling of Pockels effect electro-optic sensor mechnism and experimental study[D]. Beijing: North China Electric Power University,2017.

[27] 谢榕芳,徐启峰,谢楠,等.一种改善光学电压互感器电光晶体内电场分布的方法[J].电力系统自动化,2016,40(6): 91-95+147.
XIE Rongfang, XU Qifeng, XIE Nan, et al. A method for improving electric field distribution of OVT's electro-optical crystal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(6): 91-95+147.

[28] 尹东,李其莹,刘祥国,等.基于电容式电压互感器的暂态过电压光学监测方法研究[J].山东电力技术,2023,50(2): 58-64.
YIN Dong, LI Qiying, LIU Xiangguo, et al. Study on optical monitoring method of transient overvoltage based on capacitive voltage transformer[J]. Shandong Electric Power,2023,50(2): 58-64.

[29] 李成信,刘国威,玉聪,等.基于行波的高压输电线路故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(2): 179-185.
LI Chengxin, LIU Guowei, YU Cong, et al. A fault location method for high-voltage transmission lines based on traveling wave[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(2): 179-185.

[30] 李篪,陈长征.基于ICEEMDAN的滚动轴承声信号故障诊断方法[J].沈阳工业大学学报,2023,45(6): 672-679.
LI Chi, CHEN Changzheng. Acoustic signal diagnosis method based on ICEEMDAN for rolling bearing fault [J].Journal of Shenyang University of Technology,2023,45(6): 672-679.

[31] 吕凤霞,缪益,别锋锋,等.ICEEMDAN和GS-SVM算法在滚动轴承声发射故障诊断中的应用研究[J].噪声与振动控制,2022,42(6): 92-97+129.
LYU Fengxia,MIAO Yi,BIE Fengfeng,et al.Application of ICEEMDAN and GS-SVM algorithms for fault diagnosis of rolling bearings based on acoustic emission [J].Noise and Vibration Control,2022,42(6): 92-97+129.

[32] 吴泳恩,王宾.基于改进经验模态分解的直流串联电弧故障检测[J].济南大学学报(自然科学版),2024,38(1): 106-114.
WU Yongen, WANG Bin. Direct current series arc fault detection based on improved empirical mode decomposition[J].Journal of University of Jinan (Science and Technology),2024,38(1): 106-114.

[33] 管一臣,童攀,冯志鹏.基于ICEEMDAN方法和频率解调的行星齿轮箱故障电流信号特征分析[J].振动与冲击,2019,38(24): 41-47.
GUAN Yichen, TONG Pan, FENG Zhipeng. Planetary gearbox fault diagnosis via current signature analysis based on ICEEMDAN and frequency demodulation[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(24): 41-47.

[34] 于李鹏,吕勇,易灿灿,等.基于改进ACCUGRAM的滚动轴承故障诊断方法[J].机床与液压,2020,48(22): 172-177.
YU Lipeng, LV Yong, YI Cancan, et al. Rolling bearing fault diagnosis method based on improved ACCUGRAM [J].Machine Tool & Hydraulics,2020,48(22): 172-177.

[35] 程旭,江星星,石娟娟,等.广义稀疏解卷算法研究及其轴承故障诊断应用[J].电子测量与仪器学报,2018,32(5): 182-187.
CHENG Xu, JIANG Xingxing, SHI Juanjuan, et al. Generalized sparse deconvolution algorithm and its application of bearing fault diagnosis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5): 182-187.

[36] 刘峰,任丽佳.基于最大相关峭度解卷积行星齿轮箱微弱故障诊断[J].噪声与振动控制,2022,42(5): 154-158.
LIU Feng, REN Lijia. Weak fault diagnosis of planetary gearboxes based on maximum correlation kurtosis deconvolution[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(5): 154-158.