

结合 TSVD 正则化和离散反卷积的电压行波精确检测方法

李泽文¹, 钱雪社¹, 唐迪¹, 穆利智¹, 王梓糠¹, 贺鸣²

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114; 2.广西电网有限责任公司桂林供电局, 广西桂林 541000)

摘要:为解决行波传感器传变过程中的衰变及噪声干扰等因素影响而导致的电网一、二次侧行波波形不一致问题, 提出一种结合截断奇异值分解(TSVD)正则化和离散反卷积的电网故障电压行波精确检测方法。该方法选择集中参数传递函数模型构建电压行波传感器的正演模型; 然后利用反卷积原理建立行波反演模型; 针对行波波形反演过程中产生的病态问题, 提出结合 TSVD 正则化理论的波形反演方法, 实现电网故障电压行波的精确检测。仿真分析表明, 该检测方法能够实现二次行波信号的精确反演, 反演一次行波信号波形特征可以反映真实的故障波形特征。

关键词:截断奇异值分解正则化; 奇异值分解; 行波检测; 波形反演; 离散反卷积

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.007 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2023)04-0065-10

An accurate detection method for fault voltage traveling wave based on a combination of TSVD regularization and discrete deconvolution

LI Zewen¹, QIAN Xueshe¹, TANG Di¹, MU Lizhi¹, WANG Zikang¹, HE Ming²

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Guilin Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guilin 541000, China)

Abstract: In order to solve the inconsistency of the traveling wave waveforms between primary and secondary sides in the power grid caused by the decay and noise interference in transmission process of the traveling wave sensor, an accurate detection method of fault voltage traveling wave combining the truncated singular value decomposition (TSVD) regularization and discrete deconvolution is proposed. This method adopts the transfer function model based on lumped parameters to construct a forward model of voltage traveling wave sensor, and the principle of deconvolution is used to establish the inversion model of traveling waves. Aiming at the ill conditions generated during the inversion of traveling wave waveforms, a waveform inversion method combined with TSVD regularization theory is proposed to realize the accurate detection of fault voltage traveling wave. The simulation shows that the detection method can realize the accurate inversion of the secondary traveling wave signals, and the waveform characteristics of the primary traveling wave signal obtained by the inversion can reflect the real fault waveform characteristics.

Key words: truncated singular value decomposition regularization; singular value decomposition; traveling wave detection; waveform inversion; discrete deconvolution

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(51877012); 湖南省教育厅双一流重点项目(18A121)

通信作者: 李泽文(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统保护与控制的研究; E-mail: lzw0917@163.com

行波技术作为基于高频暂态量分析而产生的继电保护技术被广泛应用,然而由于高频行波信号在电网中的传播机理和不同频段行波信号间的相互作用机理尚不明确,现有的行波信号检测手段无法准确测量电网故障产生的真实的故障行波信号,因此,有必要进行有效检测真实故障行波信号的新方法研究。

近年来一系列行波保护原理得到深入研究,文献[1-2]研究了行波方向保护在高压输电线路中的应用;文献[3]研究了利用初始行波信号频率差异进行故障判别的保护技术;文献[4]将广域行波信息应用于线路保护,促进了行波保护的发展;文献[5]提出了以暂态能量为特征量的暂态量保护方法;文献[6]提出了利用时频谱相似度保护判据对线路进行保护的方法;文献[7]提出了一种基于行波波形相关性分析的直流输电线路的保护方案。但这些依赖于真实故障行波信号的新型行波保护方案目前无法真正实用化。

随着现代传感器技术、数字技术和计算机技术的进步,各种互感器的实际应用越来越广泛^[8-9]。文献[10-12]发现可以通过测量故障行波波头,采用突变量更显著的电容式电压互感器(capacitor voltage transformers, CVT)入地电流来反映一次侧故障电压的暂态特征,故障检测的效果更好,但是传统CVT仍然存在电容分压器分压、一次行波电压的传变特性较差等问题;文献[13]利用电磁式电压互感器检测线路末端故障电压行波信号,获得多种故障暂态行波信号一、二次侧传变特性,并用于系统的故障类别判断和快速故障定位,但其传变性能受行波信号的频率大小制约,有效传变频带较窄;文献[14]发现常规的电磁式电流互感器能有效传变10 kHz及以上的暂态电流行波信号并应用于行波测距,但是由于电磁电流互感器自身特性的不足,会导致传变所获得的二次电流行波信号发生畸变,并且电流检测装置受线路结构和现场配置方式的制约,会极大地影响行波故障定位的精度;文献[15]针对电子式电压互感器设计了在线校准系统,利用改进的Rife频移算法进行信号处理,在不对电网造成干扰的情况下完成数据校正,提升互感器测量的精度,但是受到采用频率的限制,相较于行波

信号的检测要求仍有一段距离,难以支撑行波保护和行波测距的实际应用;文献[16]通过对Rogowski线圈原理进行深入研究,研制出了一种新型行波传感器,该传感器能够用于提取高频行波信号,能真实反映输电线路故障行波信号波形特征,实现故障精确定位。由于互感器非线性特性、传输色散及变电站入射波与反射波的混叠等因素影响,会导致传变获得的二次行波信号发生畸变,使得行波信号采集装置难以应用于工程现场。因此,需要实现故障行波信号的精确检测,真实反映输电线路故障行波信号波形特征,实现故障精确定位。

波形反演在1984年由Tarantola提出,最先应用于地球物理与遥感等领域。文献[17-18]利用波形反演进行了地质勘探与地震数据方面的研究。而在电力系统应用中,文献[19]提出了大功率整流系统直流大电流波形反演与计算方法;文献[20]应用离散Fourier变换反演计算高压母线上的过电压,相关研究都为本文行波波形反演提供了大量理论依据和实践方法。

针对现有方法检测的二次行波与电网一次行波波形特征不一致问题,本文提出一种结合截断奇异值分解(truncated singular value decomposition, TSVD)正则化和离散反卷积的电压行波精确检测方法,对仿真二次行波信号进行反演,能准确有效得到反演一次行波信号,通过应用反演技术得到的一次行波与原有二次行波的波形特征信息差异很小,该方法对工程应用具有一定实际意义。

1 电压行波传感器正演模型构建

1.1 电压行波传感器信号检测原理

在故障发生后,CVT等容性设备接地线上产生的入地电流突变信号能够反映线路上的电压行波突变特征,并且其突变特征更显著^[21]。基于此,课题组前期研制了专用电压行波传感器,套接在CVT接地线上,实现电网故障后电压行波信号的检测。整套行波信号检测装置如图1所示,其中 u 为线路对地电压,即电网一次电压行波, i 为CVT接地线电流, c 为CVT等效电容。

课题组使用的专用行波传感器以罗氏线圈

(Rogowski coil)为基本结构,当线路故障时,由于 CVT 接地线上非线性变化电流导致其周围磁场发生相应变化,使得线圈骨架内磁通量发生突变,线圈输出端口会产生突变的感应电动势,可通过该感应电动势的变化特征反映 CVT 接地线上的电流突变情况。专用电压行波传感器测量等效电路如图 2 所示。

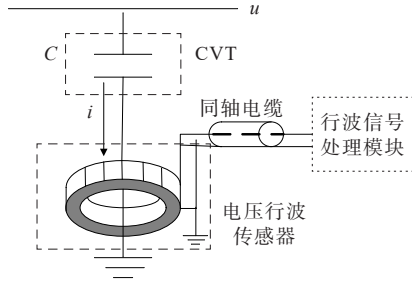


图 1 行波检测示意

Figure 1 Diagram of traveling wave measuring

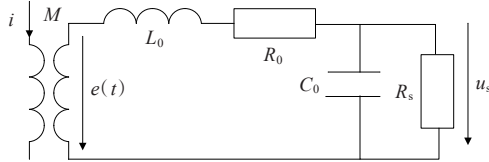


图 2 专用电压行波传感器测量等效电路

Figure 2 Equivalent circuit of voltage traveling wave sensor

图 2 中 i 为 CVT 接地线上的电流信号, M 为罗氏线圈与载流导线之间的互感系数, $e(t)$ 为罗氏线圈输出端口产生的感应电动势, L_0 、 R_0 、 C_0 分别为专用电压行波传感器的自感、内阻、分布电容, R_s 为采样电阻, 该电阻上的电压即为二次行波信号 u_s 。为了验证行波信号经由电压行波传感器传变之后会产生一定程度的波形畸变, 导致部分暂态信号缺失, 实验中进行了相关测试, 并随机选取其中一组测试结果进行分析, 如图 3 所示。

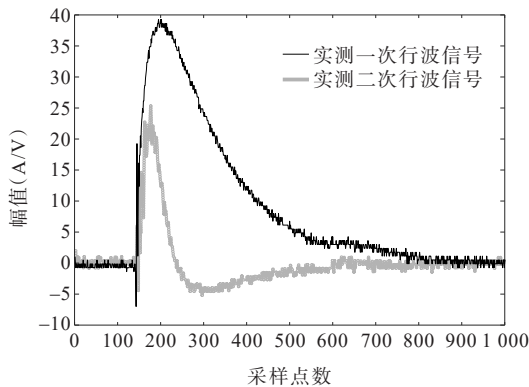


图 3 实测一、二次侧行波信号

Figure 3 Measured primary and second side traveling wave

由图 3 及多组测试结果分析可知, 一次侧行波信号经过专用电压行波传感器传变后, 所得到的二次侧行波信号发生了较严重的波形畸变, 尤其表现在幅值衰减严重, 一、二次侧波形特征有明显差别。在工程现场进行行波信号测量时, 由于外界干扰信号的增多, 使得波形畸变现象也会更加严重。

1.2 电压行波传感器模型建立

为充分了解电压行波传感器的高频特性, 建立电压行波传感器的集中式电路模型和分布式电路模型, 分别如图 4、5 所示。

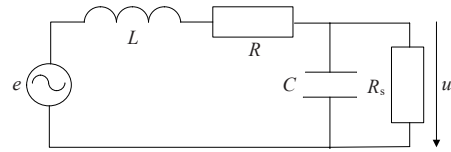


图 4 集中式电路模型

Figure 4 Lumped parameter circuit mode

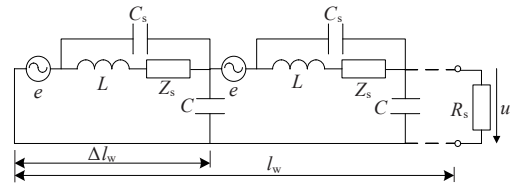


图 5 分布式电路模型

Figure 5 Distributed parameter circuit mode

对以上所建立的 2 种等效电路模型进行分析, 可以推导出 2 种模型所对应的传递函数式数学模型, 分别为

$$H_1(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{-M_1 R_s s}{R_s L C s^2 + (L + R R_s C) s + R + R_s} \quad (1)$$

$$H_2(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{s M_2 R_s Z_0 \sinh(\gamma l w)}{Z(Z_0 \sinh(\gamma l w) + R_s \cosh(\gamma l w))} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, M_1 为集中参数下行波传感器的互感系数; R 、 L 、 C 分别为行波传感器内阻、自感、杂散电容, R_s 为采样电阻; M_2 为分布参数下行波传感器的互感系数; l_w 为绕线长度; Δl_w 为单位绕线长度; Z 为单位绕线长度下自感 L 、阻抗 Z_s 、匝间电容 C_s 的总阻抗; Z_0 、 γ 分别为绕线波阻抗、传播常数; C 为单位长度线圈等效电容。

1.3 电压行波传感器高频传变特性分析

为了研究行波传感器传变差异,对行波传感器的传变特性进行分析。根据推导出的电压行波传感器的集中式和分布式2种传递函数,利用Matlab进行处理,可以绘制出其传递函数的频率特性曲线,并与实测电压行波传感器的频率特性进行比较,如图6所示。

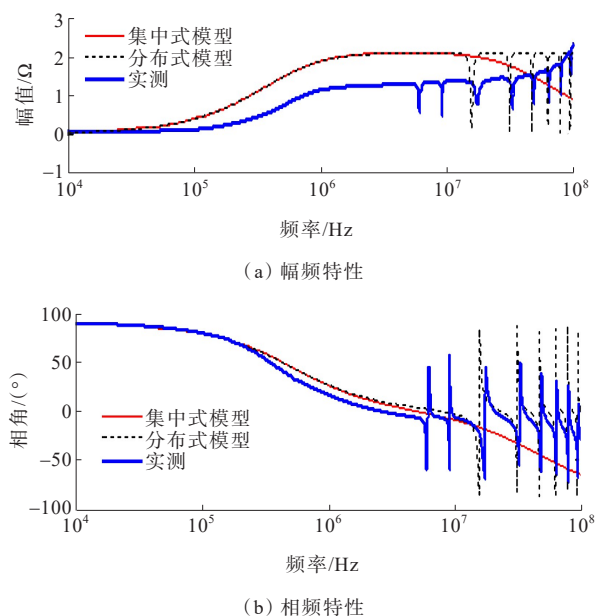


图6 电压行波传感器频率特性曲线

Figure 6 Frequency characteristic curve of traveling wave sensor

通过分析图6所示幅、相频特性曲线可以发现,在10 kHz~5 MHz的频率范围内(包含行波特征频段),行波传感器集中式与分布式2种传递函数模型的频率特性与实测频率特性基本一致。为了便于波形反演过程中的数值运算,以集中式传递函数模型作为电压行波传感器的正演模型。

2 基于离散反卷积的电压行波反演

2.1 反卷积理论

当用仪器进行物理过程观测时,记录的观测数据不但会体现该现象和过程,还会表征出观测仪器(包括传输线路和记录介质)自身的特征。这个观测过程实际上是一个卷积的概念,由于仪器系统的非理想特性,使得观测结果可能出现降质。反卷积与卷积过程相反,它可以补偿被抑制的高频信号,从而完成信号的复原,因此本文对卷积的反过程进行研究。

2.2 电压行波反演模型构建

模拟量行波信号通过A/D高速采样装置进行模数转换后变成数字量行波信号,便于数值计算与分析,由此本文对离散系统的反卷积算法进行分析。在离散系统中,有线性卷积和循环卷积2种卷积运算,由于同样的有限序列进行卷积运算时循环卷积的运算结果长度较短,出于实际数值运算的考虑,选取离散循环卷积方法计算。离散循环卷积定义为

$$y[n] = x[n] \otimes h[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k]h[n-k] \quad (3)$$

式中, $x[n]$ 为离散系统输入信号; $h[n]$ 为单位脉冲响应; $y[n]$ 为两者循环卷积结果。

式(3)可用矩阵表示为

$$y = Ax \quad (4)$$

针对本文行波反演问题, x 为一次行波信号, y 为二次行波信号, A 为行波传感器的单位脉冲响应所产生的Toeplitz矩阵,具体形式为

$$A = \begin{bmatrix} h[0] & h[N-1] & \cdots & h[1] \\ h[1] & h[0] & h[N-1] & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h[N-1] & h[N-2] & \cdots & h[0] \end{bmatrix} \quad (5)$$

对式(4)求取反运算即可得到一次行波信号:

$$x = A^{-1}y \quad (6)$$

本文行波波反演问题属于反问题。针对此类反问题的求解,通常可利用离散反卷积算法的反演法由二次行波信号反演得到一次行波信号,但是由于反运算具有很强的病态性,往往不能获得真实的故障一次行波波特征,因此,本文提出利用截断奇异值分解正则化方法来修正直接反卷积反演时的病态问题。

3 基于TSVD正则化的反演病态修正

3.1 TSVD正则化

为了快速求取反问题的数值解,通常将连续算子方程 $Az = u$ 进行离散化,转变成有限维的线性方程组的形式:

$$Ax = b \quad (7)$$

式中, A 为观测系统系数矩阵, $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$; x 为待估参数, $x \in \mathbf{R}^{n \times 1}$; b 为观测数据, $b \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 。

考虑实际问题中存在的误差, 可将式(7)写为

$$Ax = b_{\text{true}} + e_{\text{r}} \quad (8)$$

式中, b_{true} 为理想状态下的输出结果; e_{r} 为误差。

对系数矩阵 A 作奇异值分解, 记为

$$A = U \text{diag}(\sigma_i) V^T = \sum_{i=1}^n u_i \sigma_i v_i^T \quad (9)$$

式中, $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$; u_i 为系数矩阵 A 的左奇异向量; $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$; v_i 为系数矩阵 A 的右奇异向量; σ_i 为系数矩阵 A 的奇异值, 其数值依次减小, 即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$ 。它们满足:

$$\begin{cases} u_i^T u_j = \delta_{ij}, v_i v_j^T = \delta_{ij} \\ A v_i = \sigma_i u_i, A u_i = \sigma_i v_i \end{cases} \quad (10)$$

其中, δ_{ij} 为 Kronecker 的 δ 函数, $i, j = 1, 2, \dots, n$, 若 $i = j$, 则 $\delta_{ij} = 1$; 否则 $\delta_{ij} = 0$ 。利用式(10)对式(7)求解, 可以得到:

$$x = V \text{diag}(\sigma_i^{-1}) U^T b = \sum_{i=1}^n \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (11)$$

由式(11)可知, 当直接求解方程 $Ax = b$ 时, 数值求解的病态性是由系数矩阵 A 的小奇异值引起的。针对此问题, 利用 TSVD 正则化方法构造一个滤波函数 f_λ^i 与逆奇异值 σ^{-1} 相乘, 使得当小奇异值 $\sigma \rightarrow 0$ 时, $f_\lambda^i / \sigma \rightarrow 0$, 因此可以求得真解 x_{true} 的一个近似解:

$$x_{\text{similar}} = V \text{diag}(f_\lambda^i \sigma_i^{-1}) U^T b = \sum_{i=1}^n f_\lambda^i \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (12)$$

为了求取原问题的近似最优解, 需要利用滤波函数过滤掉小奇异值的同时而保留较大的奇异值, 即当 σ 较大时, 应使 $f_\lambda^i \sim 1$ 。令滤波函数取值为

$$f_\lambda^i = \begin{cases} 1, \sigma_i \geq \lambda \\ 0, \sigma_i < \lambda \end{cases} \quad (13)$$

其中, λ 为设定的阈值。上述取滤波函数形式的方法即为 TSVD 方法, 即 λ 满足: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k \geq \lambda \geq \sigma_{k+1} = \sigma_n = 0$ 。因此, 采用 TSVD 方法对行波反演问题 $Ax = b$ 进行正则化处理, 再结合离散反卷积算法得到的近似最优解为

$$x_k = \sum_{i=1}^k \frac{u_i^T b}{\sigma_i} v_i \quad (14)$$

截断数 k 为待定的正则化参数。 k 的取值对近似最优解与真实解之间的相似程度影响非常大, 取

值过大会使得解的范数偏大, 取值过小会使得数据拟合度太差, 因此要合理选择正则化参数。

3.2 正则化参数选取

行波波形反演中的病态修正效果取决于所选取的正则化参数, 因此本文对 L 曲线法进行分析, 并利用基于三角形方法的二次样条差值函数确定 L 曲线法中的 L-corner^[22], 求取近似最优化正则化参数。L 曲线法的数值意义: 在对数坐标轴 $\log\text{-}\log$ 中, 选取 $(\|Ax_k - b\|_2, \|x_k\|_2)$ 作为点坐标, 其中横坐标表示近似最优解的残差范数, 纵坐标表示近似最优解的范数, 都与正则化参数 k 相关联, 通过一系列相应坐标点构成曲线, 求取曲线中使得残差范数和范数数值都较小的平衡点, 该平衡点对应的 k 值即为近似最优正则化参数。本文所分析的 L 曲线如图 7 所示。

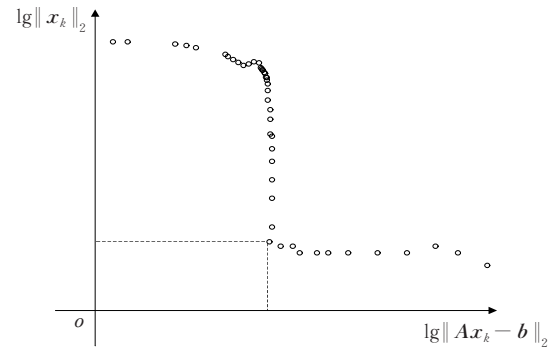


图7 TSVD 正则化的 L 曲线

Figure 7 Schematic diagram of TSVD regularized L curve

一般而言, 曲线上曲率最大的点即为 L-corner, L-corner 对应的正则化参数为近似最优正则化参数, 但是由于本文研究的 TSVD 法其正则化参数为不连续变化, 因此不能直接求得曲率大小。于是本文利用基于三角形方法的二次样条差值函数确定 L 曲线法中的 L-corner, 其具体求取方法如下。

从图 7 中 L 曲线上取 3 个位置点 A 、 B 、 C , 其坐标为

$$\begin{cases} P_A = (x_A, y_A) = (\|r_k^2\|_2, \|x_k^2\|_2) \\ P_B = (x_B, y_B) = (\|r_k^1\|_2, \|x_k^1\|_2) \\ P_C = (x_C, y_C) = (\|r_k^p\|_2, \|x_k^p\|_2) \end{cases} \quad (15)$$

其中, r_k 为残差范数, r_k^n 和 x_k^n 的右上标代表着该点为 L 曲线上的第 n 个点, $n = 1, 2, \dots, p$ 。 P_A 、 P_B 、 P_C 按照相对位置关系组成三角形, 定义该三角形的方向面积 (oriented area), 即

$$S_{\text{oa}} = \frac{1}{2} [(x_B - x_A)(y_A - y_C) - (x_A - x_C)(y_B - y_A)] \quad (16)$$

若 $S_{\text{oa}} < 0$, 则表示该三角形的3个顶点 A 、 B 、 C 所在曲线段具有L曲线特征, 顶点 A 也被标记为可能的L-corner, 如图8所示。

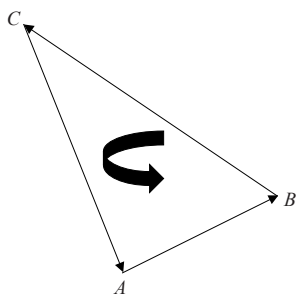


图8 A为顶点的逆时针三角形

Figure 8 A counterclockwise triangle with vertex

对图7中L曲线上的所有点都进行类似计算, 获得多个潜在的L-corner, 记为 A_1, A_2, \dots 。对固定点为 B 、 C 、顶点为 A_1, A_2, \dots 的离散点作二次样条差值曲线, 如图9所示。

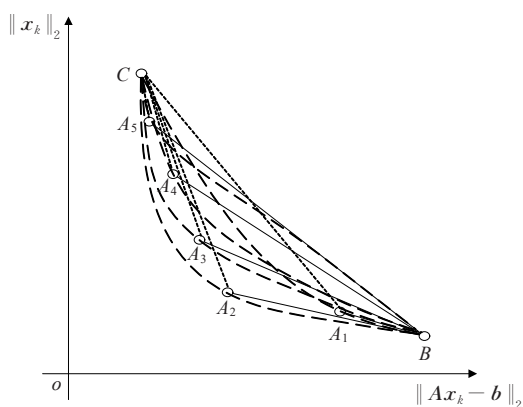


图9 L曲线上的固定点 B 、 C 与潜在L-corner分别构造二次样条插值曲线

Figure 9 The fixed points B and C on the L curve and the potential L-corner respectively construct a quadratic spline interpolation curve

以 B 、 A_1 、 C 这3点构造二次样条差值曲线, 记为 L'_1 , 其中

$$\begin{cases} P_B = (x_B, y_B) = (\|r_k^1\|_2, \|x_k^1\|_2) \\ P_{A_1} = (x_{A_1}, y_{A_1}) = (\|r_{k_1}^2\|_2, \|x_{k_1}^2\|_2) \\ P_C = (x_C, y_C) = (\|r_k^p\|_2, \|x_k^p\|_2) \end{cases} \quad (17)$$

对 L'_1 进行曲率计算, 得到其曲率表达式为

$$\kappa(k_1) = \frac{\rho'\eta'' - \rho''\eta'}{[(\rho')^2 + (\eta')^2]^{3/2}} \quad (18)$$

其中, $\rho = \|Ax_{k_1} - b\|_2$, $\eta = \|x_{k_1}\|_2$, “'”表示对 k_1 求导。对图9中所有的二次样条插值函数进行曲率计算, 得到 $\kappa(k_1), \kappa(k_2), \dots$ 。选取其中曲率最大的二次样条插值曲线, 记为曲线 BAC , 则顶点 A 为L-corner点, 相应地可以求得近似最优正则化参数 k 。

3.3 结合TSVD正则化和离散反卷积的电压行波反演

线路发生故障后可通过电压行波传感器测量得到二次行波信号, 但该信号不能反映真实的故障一次行波信号。因此, 通过构建电压行波传感器的正演模型, 结合反卷积理论获得行波信号的反演模型, 并利用TSVD正则化方法对反演过程中的病态进行修正, 最后对离散二次行波信号进行反卷积处理, 得到反演一次行波信号, 完成对故障行波信号的检测。具体的信号反演流程如图10所示。

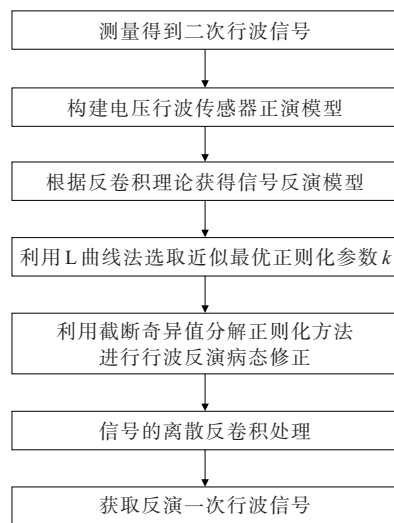


图10 结合截断奇异值分解正则化—离散反卷积的行波信号反演流程

Figure 10 Traveling wave signal inversion process combined with truncated singular value decomposition regularization-discrete deconvolution

4 仿真分析

4.1 仿真模型建立

为了验证本文提出的结合TSVD正则化和离散反卷积的电压行波反演方法的有效性, 利用

Pscad/Emtc 搭建输电线路仿真模型,如图 11 所示。利用图 11 测试系统模拟某 220 kV 输电网络,设置采样频率为 1 MHz;选取节点 7、8 之间的线路作为故障区段, M 、 N 为故障区段两端行波信号检测点, $l_{MN} = 200 \text{ km}$; K 为故障发生位置。

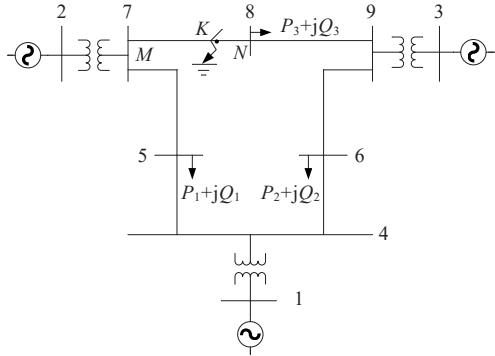


图 11 IEEE 9 节点标准测试系统

Figure 11 IEEE 9 node standard test system

对图 11 线路模型进行仿真试验,设置故障区域 MN 段 K 点发生单相接地故障,从 Pscad 输电线路仿真模型中输出仿真一次行波信号,将仿真一次行波信号导入 Simulink 的传递函数式仿真模型中,获得仿真二次行波信号。最后,通过由 Matlab 编写的截断奇异值分解正则化—离散反卷积反演算法,可实现对仿真二次行波信号波形的反演,得到反演一次行波信号。本文进行各种故障情况下的仿真试验,随机选取其中的几组反演结果,如图 12~14 所示。

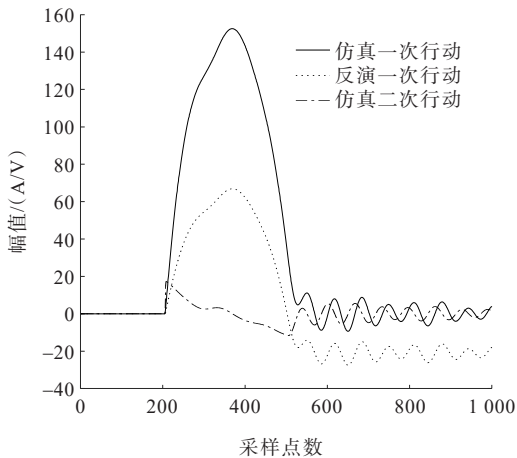


图 12 无噪声干扰下的直接反演结果

Figure 12 Direct inversion result without noise interference

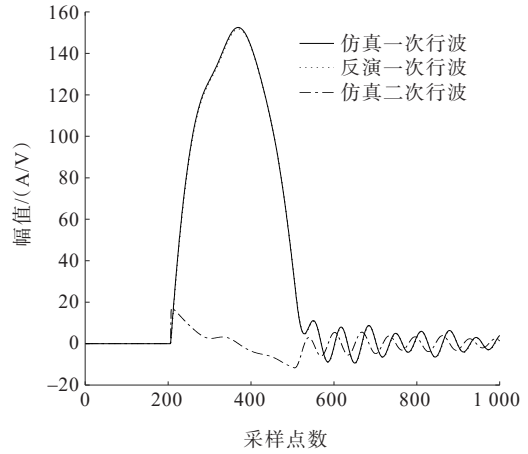


图 13 无噪声干扰下近似最优正则化参数 $k=768$ 时的反演结果

Figure 13 The inversion result when the approximate optimal regularization parameter $k=768$ without noise interference

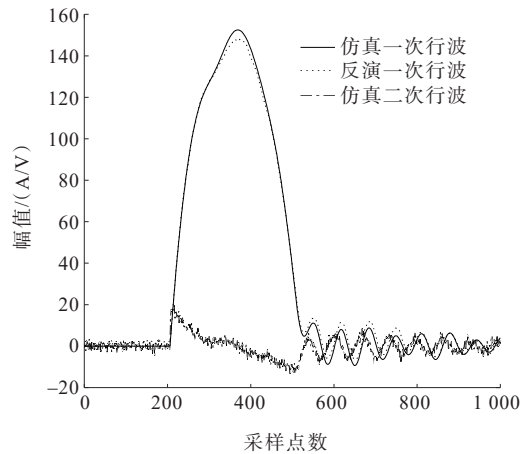


图 14 噪声干扰下近似最优正则化参数 $k=750$ 时的反演结果

Figure 14 The inversion result when the approximate optimal regularization parameter $k=750$ under noise interference

由图 12 可知,当直接对仿真二次行波信号进行反演计算时,所得到的反演一次行波信号仍然偏离仿真一次行波信号;由图 13 可知,利用本文提出的行波反演方法得到的反演一次行波与仿真一次行波相似度很高;由图 14 可知,当存在噪声干扰时,可以通过调节近似最优正则化参数 k ,弱化噪声干扰的影响,使得反演结果接近于真实值。

4.2 波形反演结果分析

为了能够直观地对行波信号反演结果进行分析,本文从波形特征量比较和波形相似度分析 2 个方面对反演一次行波信号和仿真一次行波信号进

行对比论证。

1) 波形特征量比较。

电网故障后产生的故障行波信号具有独特的波形特征量,包括初始行波波头起始时间 t_s 、半峰值时间 t_m 、峰值时间 t_h 、峰值 I_m 等。因此,可以对反演一次行波和仿真一次行波的波形特征量进行差值计算,得到 Δt_s 、 Δt_m 、 Δt_h 、 ΔI_m ,论证反演一次行波的反演效果。随机选取几组仿真试验结果,计算反演一次行波和仿真一次行波的波形特征量差值 Δt_s 、 Δt_m 、 Δt_h 、 ΔI_m ,如表1所示。

表1 不同故障条件下的行波波形特征量对比

Table 1 Comparison of traveling wave waveform characteristics under different fault conditions

SNR/ dB	R_g/Ω	$\theta/$ ($^\circ$)	$\Delta t_s/$ μs	$\Delta t_m/$ μs	$\Delta t_h/$ μs	$\Delta I_m/$ %	
-10	15	30	0.6	0.5	0.6	1.5	
		90	0.5	0.5	0.6	1.1	
		100	30	0.9	0.9	0.8	2.3
			90	0.8	0.7	0.7	1.8
		500	30	1.4	1.4	1.5	4.8
			90	1.2	1.0	1.1	4.2
	0	15	30	0.4	0.6	0.6	1.0
			90	0.3	0.4	0.3	0.9
		100	30	0.6	0.7	0.6	1.4
			90	0.5	0.6	0.5	1.2
		500	30	0.7	0.8	0.8	3.4
			90	0.7	0.7	0.8	2.8
10	15	30	0.3	0.2	0.3	0.6	
		90	0.1	0.2	0.2	0.4	
	100	30	0.4	0.5	0.5	0.9	
		90	0.3	0.4	0.3	0.6	
	500	30	0.7	0.6	0.6	2.4	
		90	0.5	0.6	0.6	1.7	

对表1中的数据分析可知,在不同信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、过渡电阻 R_g 、故障初相角 θ 的影响下,反演一次行波与仿真一次行波的波形特征量差异很小,反演得到的故障信息与真实故障信息非常接近。

2) 波形相似度分析。

通过在线路上设置不同的故障点 d_M 、过渡电阻 R_g 、故障初相角 θ ,可以计算出线路两端(M、N)反演一次行波和仿真一次行波的相关系数 ρ ,结果

如表2所示。故障一次行波信号经由传感器传变后得到的仿真二次行波信号会发生畸变,经过多次仿真计算一、二次侧行波信号的相关系数,两者波形相关系数 ρ 大都小于0.3,在数学上称为无相关性。而由表2结果可知,反演一次行波信号与仿真一次行波信号的相关系数 ρ 均在0.92以上,称为高度相关。

表2 不同故障情况的M、N端行波波形相似度

Table 2 Similarity between M and N terminal traveling wave waveforms under different fault conditions

d_M/km	R_g/Ω	$\theta/(^\circ)$	ρ_M	ρ_N	
50	15	30	0.973	0.965	
		60	0.983	0.972	
		90	0.986	0.975	
		100	30	0.965	0.951
			60	0.955	0.967
		90	0.971	0.969	
	500	15	30	0.936	0.927
			60	0.924	0.949
		100	90	0.947	0.943
			30	0.975	0.978
		500	60	0.969	0.972
			90	0.982	0.989
120	15	30	0.938	0.941	
		60	0.964	0.961	
	100	90	0.952	0.943	
		30	0.923	0.921	
	500	60	0.943	0.942	
		90	0.935	0.937	

由表1、2分析可知,利用本文提出的反演方法得到的反演一次行波信号的波形特征与仿真一次行波信号的波形特征非常接近,两者的波形高度相关,验证了结合截断奇异值分解正则化和离散反卷积的电压行波反演方法能实现不同故障条件下的行波信号的精确检测。

5 结语

本文提出了一种结合截断奇异值分解正则化和离散反卷积的电压行波反演方法,可以有效解决因反演过程自身的病态而导致反演结果不精确的问题,实现线路故障电压行波信号的精确检测。

利用该方法所得到的反演一次行波与故障一次行波进行比较,二者波形特征量差异很小,波形相似度高度相关,而且该波形反演方法能实现不同故障情况下的行波信号精确检测,具有很强的鲁棒性。

本文所提出的结合TSVD正则化和离散反卷积的电压行波精确检测方法目前主要处于理论研究阶段,其相关理论与技术还有待深入研究:

1) 所提出的检测方法以传感器的传变特性为基础,研究发现各频段信号经传感器传变的差异是不同的,因此,需要根据应用需求对宽频带行波信号进行分频段处理;

2) 所提出的算法需要对传感器进行精确的建模,一旦传感器模型参数设置有偏差,会影响最终求解结果的精度。

参考文献:

- [1] 牟大林,林圣,李小鹏,等.白鹤滩—江苏特高压混合直流输电线路行波保护适应性分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):88-98.
MU Dalin, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Adaptability analysis of traveling wave protection for the Baihetan-Jiangsu serial hybrid LCC-MMC UHVDC transmission line [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 88-98.
- [2] 李泽文,曾祥君,夏翊翔,等.高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):104-121.
LI Zewen, ZENG Xiangjun, XIA Yixiang, et al. Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2022, 19(3): 104-121.
- [3] 李练兵,孙腾达,曾四鸣,等.基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):140-147.
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 140-147.
- [4] JAFARIAN P, SANAYE-PASAND M. A traveling-wave-based protection technique using wavelet/PCA analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 588-599.
- [5] 武建卫,邵剑峰.计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J].中国电力,2021,54(5): 121-128.
WU Jianwei, SHAO Jianfeng. Fault location of DC transmission lines based on backward waves considering wave speed changes[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 121-128.
- [6] 陈田田,李银红.基于电压折射波幅值正负差异的柔性直流电网两段式行波保护[J].电力系统自动化,2022,46(3):129-136.
CHEN Tiantian, LI Yinong. Two-section traveling wave protection for flexible DC grid based on positive and negative difference of voltage refractive wave amplitude[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 129-136.
- [7] 孔飞,张保会,王艳婷.基于行波波相关性分析的直流输电线路纵联保护方案[J].电力系统自动化,2014,38(20):108-114.
KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 108-114.
- [8] 黄梓欣,林湘宁,马啸,等.含风电继电保护应用中的电流互感器饱和和电流重构方法[J].电工技术学报,2022,37(19):4823-4834.
HUANG Zixin, LIN Xiangning, MA Xiao, et al. Reconstruction method of saturation current of current transformer in relay protection application related to wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4823-4834.
- [9] 王雪莉,牛博,赵山川,等.GIS分布式特高频传感器的现场行波标定方法[J].高压电器,2021,57(1):165-170.
WANG Xueli, NIU Bo, ZHAO Shanchuan, et al. Calibration method of distributed UHF sensors of GIS by on-site travelling wave[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 165-170.
- [10] 梁栋,徐丙垠,刘洋,等.基于差分方向行波的脉冲电流电缆故障测距方法[J].电测与仪表,2021,58(7):150-156.
LIANG Dong, XU Bingyin, LIU Yang, et al. Impulse current cable fault location method based on differential directional traveling waves[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 150-156.

- [11] 乔文,师琛,李舟,等.基于行波折反射特征和网络拓扑的配电网单相接地故障定位方法[J].供用电,2022,39(1):65-73.
QIAO Wen, SHI Chen, LI Zhou, et al. Single-phase ground fault location method of distribution network based on traveling wave refraction and reflection characteristics and network topology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 65-73.
- [12] 李舟,乔文,谈震,等.基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法[J].电网与清洁能源,2021,37(5):33-42+51.
LI Zhou, QIAO Wen, TAN Zhen, et al. Fault location method for hybrid lines based on traveling wave characteristic frequency in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 33-42+51.
- [13] 季涛.利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J].电工技术学报,2012,27(8):172-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [14] 许飞,董新洲,王宾,等.考虑二次回路暂态传变特性的单端组合测距算法及其应用[J].中国电机工程学报,2015,35(20):5210-5219.
XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Single-ended assembled fault location method and application considering secondary circuit transfer characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5210-5219.
- [15] LI Z H, YU C Y, ABU-SIADA A, et al. An online correction system for electronic voltage transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106611.
- [16] LI Z W, DENG T F, ZENG X J, et al. Theoretical modeling and implementation of traveling wave sensor based on PCB coils[J]. Journal of Sensors, 2015, 9(5): 1-8.
- [17] 秦宁,王延光,杨晓东,等.时域全波形反演影响因素分析及井数据约束探索[J].地球物理学进展,2015,30(1):210-216.
QIN Ning, WANG Yanguang, YANG Xiaodong, et al. Analysis of influencing factors and exploration of well constrained for full waveform inversion in time domain[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 210-216.
- [18] 张子良,李振春,张凯,等.地质模型约束的全波形速度建模反演及在复杂断块区的应用[J].石油地球物理勘探,2020,55(3):599-606+471.
ZHANG Ziliang, LI Zhenchun, ZHANG Kai, et al. Research of geological model-constrained FWI and application in complex fault-block zones[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(3): 599-606+471.
- [19] 束洪春,张广斌,朱子钊.±800 kV直流输电线路雷电绕击电流波形反演恢复研究[J].电力科学与技术学报,2014,29(2):3-13.
SHU Hongchun, ZHANG Guangbin, ZHU Zizhao. Inversion and restoration of lightning current waveform for shielding failure in ±800 kV UHVDC transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(2): 3-13.
- [20] LONG Y, YAO C, MI Y, et al. Preliminary full-waveform inversion of lightning current using differential-integral loop measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1534-1545.
- [21] 辛明勇,徐长宝,田兵,等.基于阵列式磁传感器的电力设备接地网定位方法研究[J].智慧电力,2022,50(8):95-101.
XIN Mingyong, XU Changbao, TIAN Bing, et al. Power equipment grounding grid location method based on array magnetic sensor[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 95-101.
- [22] 夏超男.基于L曲线的正则化参数选取研究[D].广州:暨南大学,2016.
XIA Chaonan. Study on regularization parameter choice-based on the L-curve[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.