第 50 卷 第 12 期：5357-5368 高电压技术 Vol.50, No.12: 5357-5368
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240088

基于主特征量的全并联 AT 牵引网故障定位方法

刘国胜，李泽文，夏翊翔，吴国瑞，冯译萱
（长沙理工大学电气与信息工程学院，长沙 410114）

摘　要：针对现有全并联 AT 牵引网单端故障定位方法存在故障区段识别灵敏度低、单端定位第二波头辨识难的问题，提出了一种基于主特征量的全并联 AT 牵引网故障定位方法。首先，分析了自耦变压器的边界特性，论证了利用主频差异度判据识别故障区段的可行性。然后，基于全并联 AT 牵引网上下行线路并联的结构，分析了电流行波突变幅值与两端母线出线数的关系，并根据突变幅值最大原则识别上下线路各自的行波主波头。最后，提出了一种基于主波头时差的全并联 AT 牵引网故障定位方法，利用主波头时差与故障距离的固定映射关系实现故障点的精确定位。仿真结果表明，所提方法无须识别易受过渡电阻影响的行波第二波头，能灵敏识别故障区段并精准定位故障点。

关键词：全并联 AT 牵引网；自耦变压器；主频量；故障主波头；行波故障定位

Fault Localization Method for All-parallel AT Traction Network Based on Dominant Eigenquantities

LIU Guosheng, LI Zewen, XIA Yixiang, WU Guorui, FENG Yixuan
(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To address the issues of low sensitivity in fault section identification and difficulty in identifying the second traveling wave head in single-ended fault location in existing all-parallel AT traction network (APATTN), a new fault location method based on the dominant characteristic quantities is proposed. Firstly, the boundary characteristics of the auto-transformer are analyzed, demonstrating the feasibility of using the dominant frequency difference criterion to identify fault sections. Then, based on the parallel structure of the up-and-down lines in the APATTN, the relationship between the current traveling wave mutation amplitude and the number of outgoing lines at both ends of the bus is analyzed. The dominant traveling wave head on each of the up-and-down lines is identified according to the principle of maximum mutation amplitude. Finally, a fault location method based on the dominant traveling wave head time difference in the APATTN is proposed. The precise fault point location can be achieved by utilizing the fixed mapping relationship between the dominant traveling wave head time difference and the fault distance. Simulation results show that the proposed method can be adopted to sensitively identify fault sections and accurately locate fault points without needing to identify the second traveling wave head, which is easily affected by transition resistance.

Key words: all parallel AT traction network; auto-transformer; dominant frequency component; dominant traveling wave head; traveling wave fault localization

0　引言

全并联自耦变压器(auto-transformer，AT)供电系统具有供电功率高、供电可靠性强的特点[1]，在我国的高速铁路中得到了广泛的应用。考虑全并联 AT 牵引网复杂的接线形式，准确、可靠定位故障可保障高速铁路运行的安全性。现阶段牵引网定位方法主要基于稳态时的工频信号[2-3]，其易受运行工况和过渡电阻的影响，这极大地提高了故障辨识的难度。而故障产生的暂态行波分量有着突变特性明显、不依赖系统参数的特点，利用其特征识别故障区段、定位故障点已成为国内外的研究重点[4-7]。

现阶段的全并联 AT 牵引网行波定位方法主要包括单端行波法[8-9]和双端行波法[10-11]，这些方法对波头检测、标定的准确性有着严格要求，因此大量

基金资助项目：国家自然科学基金(51877012)；湖南省科技创新人才计划科技创新团队项目(2021RC4061)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51877012), Science and Technology Innovation Program of Hunan Province(2021RC4061).

现代数字信号处理方法及其改进形式被广泛运用到行波检测当中[12-13]。相较于双端行波法，单端行波法无须全球定位系统(global positioning system，GPS)协助，能有效降低硬件成本，应用前景广阔。单端行波法需要辨识第二波头(对端母线反射波或故障点反射波)，其突变特性易受过渡电阻影响，存在被噪声信号湮没的可能，第二波头辨识难度大，尤其是在噪声干扰严重的牵引供电系统。

针对上述问题，许多学者进行了大量研究。文献[14]提出一种改进希尔伯特-黄变换算法，提高了波头标定准确性，并通过安装多测点来消除波速，以提高定位准确性。但该方法设备成本高，对同步时钟也有着严格的要求。文献[15]分析了自耦变压器对行波波形特性的影响，并根据初始波头形态识别故障区段，理论上可以识别故障区段，但该方法未考虑近端故障和远端故障下反射波将在极短时间内与初始行波混叠，初始行波波头特性无法得到完整体现。同时该方法将故障点反射波作为单端定位第二波头，未考虑高阻故障下故障点反射波无法辨识的问题。文献[16]针对上下行线路参数的对称性，基于上下线路电流行波波形相似度实现故障区段定位，并根据幅值特性辨识对端母线反射波，提高了单端定位的精度。但该文章提出的故障定位方法抗噪声干扰能力弱，难以适应干扰源多的全并联 AT 牵引网。文献[17]将基于改进的卷积神经网络(transformer-based CNN，TCNN)和记忆注意力解耦长短期记忆神经网络(memory attended decoupled LSTM，MADLSTM)的深度学习算法运用到全并联 AT 牵引网故障定位，通过引入注意力机制和残差链接来增加电流幅值与故障距离的非线性函数关系，提高了故障定位精度。但该方法训练时使用了大量的仿真数据，缺乏现场的真实数据支撑，工程应用价值有限。

综合上述，本文基于自耦变压器对高频信号的衰减特性，分析不同区段发生故障时电流行波主频在频域上分布存在差异性，利用该差异可识别故障区段。针对单端定位第二波头难以辨识的问题，本文基于全并联 AT 牵引网上下行线路并联的环路结构，将上下并联线路在测量端拆解为 2 段串联线路，并利用上下线路电流行波主波头时差与故障距离的对应关系实现故障定位。该故障定位方法不受过渡电阻折反射的影响，无须双端通信便可实现双端定位法的功能。

1 全并联 AT 牵引网故障行波特征分析

1.1 全并联 AT 牵引网线路相模变换

全并联 AT 牵引网导线包含钢轨 R、保护线 PW、正馈线 PF、接触线 CW、承力索 MW、综合接地线 CGW[18]，表 1 为各导线参数。

根据导线合并原则[19]，全并联 AT 牵引网可等效为六相导线，图 1 为全并联 AT 牵引网供电系统。图 1 中的元素包括牵引变电所的交流电源(E_s)和内阻抗(Z_s)、上下行接触线($T_{Ⅰ}$和 $T_{Ⅱ}$)、上下行钢轨($R_{Ⅰ}$和 $R_{Ⅱ}$)以及上下行正馈线($F_{Ⅰ}$和 $F_{Ⅱ}$)；T 为牵引变压器，TS 为牵引变电所，AT1 和 SP 分别代表 AT 所和分区所；S1 为 TS—AT1 段，S2 为 AT1—SP 段。

全并联 AT 牵引网相与相、线与线之间均存在电磁耦合，且各相间无法进行交叉换位，因此传统输、配电线路的三相解耦方法无法用于全并联 AT 牵引网线路的解耦。本文基于多导体传输线模型，推导了牵引网线路的相模变换矩阵[16,20]，并对牵引网线路电流进行相模变换得到各电流行波模量，表达式为：

表 1 牵引网导线参数

Table 1 Parameters of traction network conductors

导线名称	型号	导线等效半径/mm	电阻/(Ω·km^{-1})
R	P60	12.79	0.135
PW	LGJ-120	7.22	0.255
PF	LGJ-185	9.03	0.163
CW	TCG-100	4.60	0.179
MW	TJ-95	6.50	0.315
CGW	DH70 TB/T3479	4.06	0.280

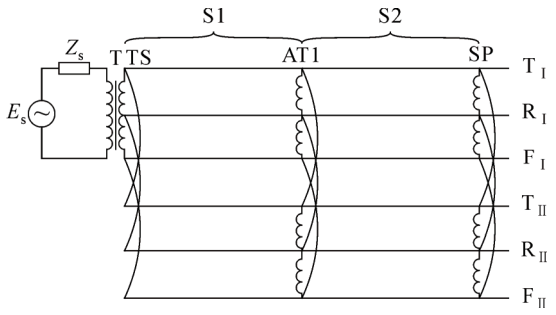


图 1 全并联 AT 牵引网供电系统

Fig.1 All parallel AT traction power supply system

$$\begin{bmatrix} i_{m1} \\ i_{m2} \\ i_{m3} \\ i_{m4} \\ i_{m5} \\ i_{m6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.128\,7 & -0.047\,7 & 0.374\,4 & -0.274\,0 & 0.550\,1 & -0.665\,5 \\ 0.692\,4 & -0.704\,5 & -0.353\,5 & 0.134\,5 & -0.151\,0 & 0.058\,5 \\ 0.063\,8 & -0.037\,1 & 0.484\,7 & -0.628\,9 & -0.417\,9 & 0.231\,6 \\ 0.128\,7 & 0.047\,7 & 0.374\,4 & 0.274\,0 & 0.550\,1 & 0.665\,5 \\ 0.692\,4 & 0.704\,5 & -0.353\,5 & -0.134\,5 & -0.151\,0 & -0.058\,5 \\ 0.063\,8 & 0.037\,1 & 0.484\,7 & 0.628\,9 & -0.417\,9 & -0.231\,6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{TI} \\ i_{RI} \\ i_{FI} \\ i_{TII} \\ i_{RII} \\ i_{FII} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：i_{TI}、i_{RI}、i_{FI}为上行 T、R、F 线的电流；i_{TII}、i_{RII}、i_{FII}为下行 T、R、F 线的电流；模 1 分量 i_{m1}为零模分量；模 2—6 分量 i_{m2}、i_{m3}、i_{m4}、i_{m5}、i_{m6}为线模分量。

1.2 自耦变压器对行波信号的影响

在全并联 AT 牵引网中，自耦变压器会对行波信号的幅值及波形造成一定的影响。分析高频信号时，自耦变压器绕组的对地电容不能忽略，为此本文采用 π 电容+BCTRAN 模型表示自耦变压器的高频模型[15,21-22]，模型如图 2 所示。其中，自耦变压器 π 电容的等效参数[15, 21]C_1、C_2、C_{12}分别为 0.005、0.01、0.01 μF，P 为高压绕组端子，S 为中压绕组端子，N 代表公共端子。

为研究自耦变压器的并入对电流行波的影响，以区段 S1 中的上行线路发生 T-R 故障为例，依据彼得逊法则绘制线模故障分量等效电路见图 3。

图 3 中，L_{TS}为牵引变压器绕组的等效电抗，Z_{c1}为线路波阻抗，ΔI_F为起始电流行波，C_{AT}为自耦变压器绕组的等效对地电容，I_f为故障线路线模电流行波，$I_{non\text{-}f}$为非故障线路线模电流行波。推导出对地电容两侧线路线模电流行波时域表达式为：

$$\begin{cases} I_f = 2\Delta I_F - \dfrac{2Z_2}{Z_1+Z_2}\Delta I_F\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_c}}\right) \\ I_{non\text{-}f} = \dfrac{2Z_1}{Z_1+Z_2}\Delta I_F\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_c}}\right) \\ \tau_c = \dfrac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}C_{AT} \end{cases} \tag{2}$$

式中：τ_c为回路的时间常数；Z_1为进线波阻抗；Z_2为出线波阻抗。Z_1=Z_2=Z_{c1}。行波电流经对地电容后波形会发生改变，令 ΔI_F=100 A，C_{AT}=0.01 μF，根据式(2)绘制 I_f、$I_{non\text{-}f}$波形图如图 4 所示。

由图 4 可知，故障区段线路与非故障区段线路侧的电流行波波形差异明显，理论上可以根据行波波头的波形特性识别故障区段。但是对于近端故障和远端故障而言，故障点反射波和对端母线行波将在极短时间内与初始行波混叠，波头特性无法得到完整体现，同时牵引网线路长度较短，出现近端、远端故障的比例较大，因此利用波头的波形特征识别故障区段局限性较大。

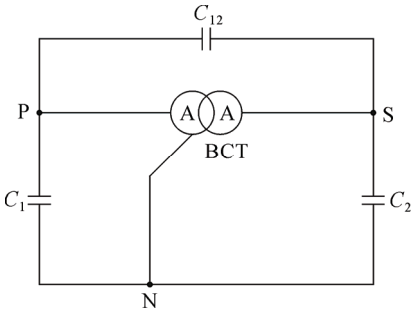


图 2 自耦变压器模型

Fig.2 Modeling of auto-transformers

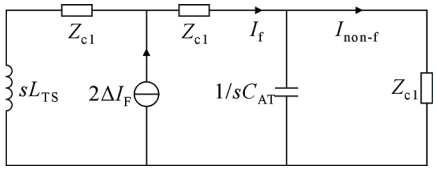


图 3 故障发生在区段 S1 时线模故障分量等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of line mode fault components when the fault occurs in section S1

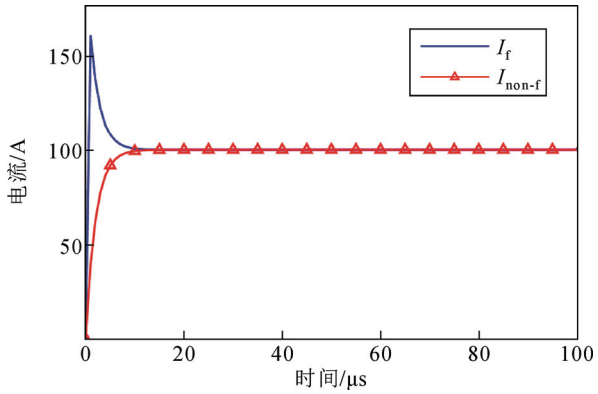


图 4 对地电容两侧线路线模电流行波波形

Fig.4 Line mode current traveling waveform on both sides of the ground capacitor

根据图 3 计算得到与 AT1 相连故障线路和非故障线路上的折射系数 α_f、$\alpha_{non\text{-}f}$表达式为：

$$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{f}}=\dfrac{2Z_{\mathrm{c1}}}{(1/sC_{\mathrm{AT}})//Z_{\mathrm{c1}}+Z_{\mathrm{c1}}}\\ \alpha_{\text{non-f}}=\dfrac{2/sC_{\mathrm{AT}}}{2/sC_{\mathrm{AT}}+Z_{\mathrm{c1}}}\end{cases}\tag{3}$$

为研究自耦变压器绕组的等效对地电容和频率分量对 α_{f}、$\alpha_{\text{non-f}}$的影响，分别将等效对地电容取值为 0.001、0.005、0.01 μF，得到 α_{f}、$\alpha_{\text{non-f}}$的依频特性，绘制 α_{f}、$\alpha_{\text{non-f}}$的幅频曲线如图 5 所示。

由图 5 可知，α_{f}、$\alpha_{\text{non-f}}$的数值随着频率的改变有着相反变化趋势，具体表现为频率越大，α_{f}越大，$\alpha_{\text{non-f}}$越小。说明流经自耦变压器绕组对地电容的电流行波信号会存在明显的衰减，且衰减作用随着频率、电容值增大而愈发明显。

1.3 电流行波传播特性分析

为分析电流行波在牵引网的传播过程，以上行线路发生故障为例，绘制故障分量网络如图 6 所示。Z_{TS} 为牵引变电所常规变压器绕组的等效波阻抗，$\mathrm{CT_{I}}$、$\mathrm{CT_{II}}$分别为上下行线路行波检测装置。

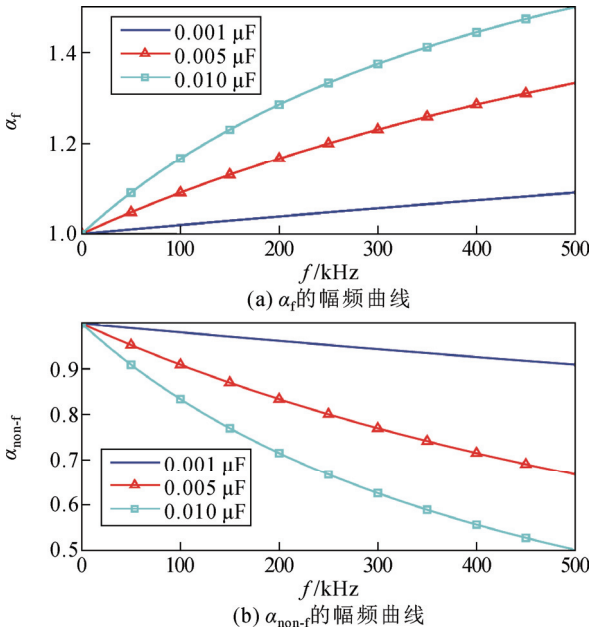
由图 6 可知，除故障线路之外，TS 端有 1 条出线，AT1 端有 3 条出线，且线路参数相同。对于行波高频分量而言，Z_{TS} 数值极大，可将其近似视为开路[19]，因此计算折、反射系数时可以将其忽略。电流行波在 TS 端、AT1 端和故障点的折、反射系数表达式见附录 A1。其中，α_{TS}、β_{TS}，α_{AT1}、β_{AT1}，α_{f}、β_{f}分别为电流行波在 TS 端、AT1 端和故障点的折、反射系数。

全并联 AT 牵引网具有上下行线路并联的结构特点，上下行线路具有相同首端和末端，行波传播过程复杂。为直观地体现行波在上下行线路并联的结构的传播过程，可将并联线路在 AT1 端拆解成 $\mathrm{TS_{I}}$-AT1、AT1-$\mathrm{TS_{II}}$这 2 段线路。以半线长内发生上行线路故障为例，绘制的行波网格图见图 7。图中 l 为区段 S1 的长度，x 为故障点到测量端的距离，I 为上行线路，II 为下行线路，t_1、t_2、t_3、t_4 分别为第 1、第 2、第 3、第 4 行波的到达时间。

令上行线路 I 发生故障，其从故障点传播到 AT1，行波路径为 F-AT1，并在 AT1 端折射到下行线路 II，得到上、下行线路的初始行波电流 $\Delta I_{\text{CTI-1}}$、$\Delta I_{\text{CTII-1}}$表达式为：

$$\begin{cases}\Delta I_{\text{CTI-1}}=-(1+\beta_{\mathrm{AT1}})\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_1)<0\\ \Delta I_{\text{CTII-1}}=\alpha_{\mathrm{AT1}}\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_1)>0\end{cases}\tag{4}$$

将式(A2)中的折反射系数代入式(4)，得到 $\Delta I_{\text{CTI-1}}$ 的幅值为起始电流行波幅值的 1.5 倍，而 $\Delta I_{\text{CTII-1}}$ 的幅值为起始电流行波幅值的一半。



(a) α_{f}的幅频曲线

(b) $\alpha_{\text{non-f}}$的幅频曲线

图 5 不同电容参数下 α_{f}、$\alpha_{\text{non-f}}$的幅频曲线

Fig.5 Amplitude-frequency curves of α_{f} and $\alpha_{\text{non-f}}$ with different capacitance parameters

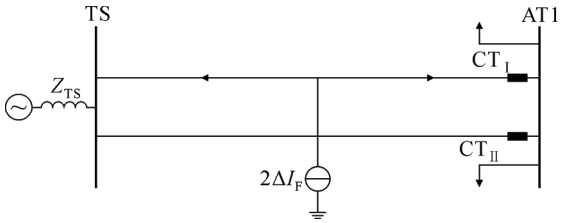


图 6 故障分量网络示意图

Fig.6 Fault component network schematic

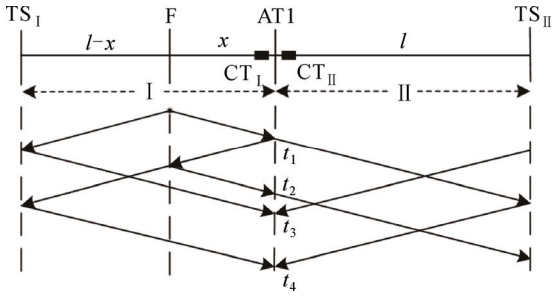


图 7 上行线路半线长内故障的行波网格图

Fig.7 Traveling wave grid plot for faults within half line length of upper line

同时，由于故障发生在半线长内，故障点反射波先于对端母线反射波到达 AT1 端，式(5)中的 $\Delta I_{\text{CTI-2}}$、$\Delta I_{\text{CTII-2}}$ 为上、下行线路的故障点反射波电流。

$$\begin{cases}\Delta I_{\mathrm{CTI}-2}=-(1+\beta_{\mathrm{AT1}})\beta_{\mathrm{AT1}}\beta_{\mathrm{f}}\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_2)<0\\ \Delta I_{\mathrm{CTII}-2}=\alpha_{\mathrm{AT1}}\beta_{\mathrm{AT1}}\beta_{\mathrm{f}}\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_2)>0\end{cases} \tag{5}$$

式(5)中 $\Delta I_{\mathrm{CTI}\text{-}2}$、$\Delta I_{\mathrm{CTII}\text{-}2}$ 的幅值分别为起始电流行波幅值的 $3\beta_{\mathrm{f}}/4$、$\beta_{\mathrm{f}}/4$ 倍，其值随着过渡电阻的变化而变化，但均小于起始行波的幅值。

由图 7 可知，上、下行线路的对端母线反射波是由 TS 端的反射波经线路 I 和 TS 端的折射波经线路 II 叠加而来，考虑到 TS 端出线数为 1，在忽略牵引变压器绕组对电流行波影响下，$\beta_{\mathrm{TS}}=0$，因此可以忽略经 TS 端反射到线路 I 的行波。计算得到上、下行线路的对端母线反射波电流 $\Delta I_{\mathrm{CTI}\text{-}3}$、$\Delta I_{\mathrm{CTII}\text{-}3}$ 如式(6)所示。

$$\begin{cases}\Delta I_{\mathrm{CTI}-3}=\alpha_{\mathrm{AT1}}\alpha_{\mathrm{TS}}\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_3)>0\\ \Delta I_{\mathrm{CTII}-3}=-(1+\beta_{\mathrm{AT1}})\alpha_{\mathrm{TS}}\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_3)<0\end{cases} \tag{6}$$

式(6)中 $\Delta I_{\mathrm{CTI}\text{-}3}$、$\Delta I_{\mathrm{CTII}\text{-}3}$ 的幅值分别为起始电流行波幅值的 0.5、1.5 倍。同理可以得出上、下行线路第 u 个行波表达式为：

$$\begin{cases}\Delta I_{\mathrm{CTI}-u}=f(\alpha_{\mathrm{TS}},\beta_{\mathrm{TS}},\alpha_{\mathrm{f}},\beta_{\mathrm{f}},\alpha_{\mathrm{AT1}},\beta_{\mathrm{AT1}})\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_u)\\ \Delta I_{\mathrm{CTII}-u}=f(\alpha_{\mathrm{TS}},\beta_{\mathrm{TS}},\alpha_{\mathrm{f}},\beta_{\mathrm{f}},\alpha_{\mathrm{AT1}},\beta_{\mathrm{AT1}})\Delta I_{\mathrm{F}}(t-t_u)\end{cases} \tag{7}$$

式中：$f(\alpha_{\mathrm{TS}}$，β_{TS}，α_{f}，β_{f}，α_{AT1}，$\beta_{\mathrm{AT1}})$为各个折反射系数的加减乘除运算；t_u 为第 u 个行波的到达时刻。基于式(7)可以得到上、下行线路电流行波到达时刻-幅值矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}t_1 & t_2 & t_3 & \cdots & t_u\\ A_{\mathrm{I}-1} & A_{\mathrm{I}-2} & A_{\mathrm{I}-3} & \cdots & A_{\mathrm{I}-u}\\ A_{\mathrm{II}-1} & A_{\mathrm{II}-2} & A_{\mathrm{II}-3} & \cdots & A_{\mathrm{II}-u}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：$A_{\mathrm{I}\text{-}u}$、$A_{\mathrm{II}\text{-}u}$ 分别上、下行线路第 u 个电流行波幅值。在上述推导中，故障线路的初始行波突变幅值最大，非故障线路的对端母线反射波突变幅值最大，考虑到故障点半线长内外只影响故障点反射波和对端母线反射波的到达时间，并不影响其幅值，因此当故障点在半线长外时，可以得到相同的结论。同样，由于牵引网关于 AT1 呈中心对称，故障发生在区段 S2 亦可得到相同结论。

结合 1.2 和 1.3 节的分析，可以得到以下结论：

1）自耦变压器绕组的等效对地电容对电流行波存在阻碍作用，并随着频率增大，行波分量衰减越明显。当故障发生在不同区段时，AT1 左侧测量的电流行波在频域分布具有明显的差异。具体表现为当故障点位于区段 S1 时，行波在频域上的最大值将会落在相对高频段；而故障发生在区段 S2 时，行波在频域上的最大值将会落在相对低频段。利用该特征可以识别故障区段。

2）在确定故障区段后，分析电流行波的传播特征发现 AT1 端故障线路上测得的初始电流行波、非故障线路上测得的对端母线反射波幅值最大，且不受故障点折反射的影响，易于识别，加之这 2 个行波传播距离相差 $2(l–x)$，据此可计算出故障点的精确位置。

2 基于主特征量的全并联 AT 牵引网故障定位原理

针对全并联 AT 牵引网上、下行线路并联和自耦变压器绕组对地电容不能忽略的特点，由上述分析可知，当故障点位于不同区段时，主频量在频域上有着显著差异；在时域上，测量端上、下行线路测得的主波头时差可以反映故障点位置。该定位方法不受故障过渡电阻的影响，具有更强的鲁棒性。

2.1 故障分量主频

鉴于 S 变换在提取暂态信号时频信息的优越性能[23-25]，其在电力系统暂态信号挖掘中得到了广泛应用。考虑到行波测量装置采集的信号为离散信号，通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform，FFT)运算得到 S 变换的离散表达式，详见附录 A2。

考虑行波信号的能量主要集中在低频，会导致利用主频量识别故障区段判据的整定值阈值较小。为此，须引入频率信息进行暂态能量表征[9,26]，即用 $\boldsymbol{S}$ 矩阵元素的绝对值 S_i^j 乘上频率的 n 次方 f_i^n 表征暂态能量，表达式为：

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}S_1^1 f_1^n & \cdots & S_1^j f_1^n & \cdots & S_1^N f_1^n\\ \vdots & & \vdots & & \vdots\\ S_i^1 f_i^n & \cdots & S_i^j f_i^n & \cdots & S_i^N f_i^n\\ \vdots & & \vdots & & \vdots\\ S_{\frac{N}{2}+1}^1 f_{\frac{N}{2}+1}{}^n & \cdots & S_{\frac{N}{2}+1}^j f_{\frac{N}{2}+1}{}^n & \cdots & S_{\frac{N}{2}+1}^N f_{\frac{N}{2}+1}{}^n\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 为暂态信号的能量谱矩阵；N 为采样点数。E_i^j 为第 j 个采样点、第 i 个频率下暂态行波信号的能量幅值，主频为能量谱矩阵最大元素对应的频率，其数值与信号波形有关。

2.2 故障线路的识别

本文方法在进行故障点精确定位之前，须进行故障线路的辨识。电流行波模量是由各线电流乘以不同权重系数后求和得到，根据式(1)可以推导出电流行波模 4、模 6 分量 i_{m4}、i_{m6} 表达式为：

$$\begin{bmatrix} i_{\mathrm{m4}} \\ i_{\mathrm{m6}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.230\,8 & -0.051\,2 & 0.676\,2 \\ 0.642\,4 & -0.027\,4 & -0.306\,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\mathrm{TII}} - i_{\mathrm{TI}} \\ i_{\mathrm{RII}} - i_{\mathrm{RI}} \\ i_{\mathrm{FII}} - i_{\mathrm{FI}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

由式(10)可知，F 线电流对 i_{m4} 起主导作用，T 线电流对 i_{m6} 起主导作用，R 线电流对 i_{m4}、i_{m6} 几乎无影响。一般而言，故障线路上测的电流行波幅值很大，而非故障线路上测的电流行波幅值很小。当发生 TR 故障时，$|i_{\mathrm{m6}}|>|i_{\mathrm{m4}}|$；发生 FR 故障时，$|i_{\mathrm{m4}}|>|i_{\mathrm{m6}}|$；对于 TF 故障，T、F 线均为故障线路，且它们的电流行波极性相反，计算发现$|i_{\mathrm{m6}}|>|i_{\mathrm{m4}}|$，为此，将 TR、TF 故障划分为 T 线故障，FR 故障划分为 F 线故障。分析发现，$|i_{\mathrm{m4}}|$、$|i_{\mathrm{m6}}|$积分值的比值 δ 可作为辨识 T 线故障、F 线故障的依据，判别式为：

$$\delta = \frac{\int |i_{\mathrm{m4}}| \mathrm{d}t}{\int |i_{\mathrm{m6}}| \mathrm{d}t} \tag{11}$$

当 δ>1 时为 F 线故障；δ<1 时为 T 线故障。

2.3 故障分量主波头

将上下行线路 $\mathrm{CT_I}$、$\mathrm{CT_{II}}$ 测得突变幅值最大的电流行波波头定义为主波头，在 1.3 节的分析中，故障线路的主波头为初始电流行波波头，非故障回线的主波头为对端反射波波头，两者的时差反映的距离为 2(l–x)。根据式(8)分别对第 2、3 列求最大值即可辨识主波头，表达式为：

$$\begin{aligned} A_{\text{dom-I}} &= \max\left(A_{\mathrm{I}-1}, A_{\mathrm{I}-2}, A_{\mathrm{I}-3}, \cdots, A_{\mathrm{I}-u}\right) \\ A_{\text{dom-II}} &= \max\left(A_{\mathrm{II}-1}, A_{\mathrm{II}-2}, A_{\mathrm{II}-3}, \cdots, A_{\mathrm{II}-u}\right) \end{aligned} \tag{12}$$

式中：$A_{\text{dom-I}}$、$A_{\text{dom-II}}$ 别表示上、下行线路的主波头幅值，其对应的时间差为主波头时差。依托上、下行线路并联的结构，主波头时差仅利用了单端信息便可以实现双端定位的功能。

Teager 能量算子是一种差分算子，其具有凸显行波信号突变幅值的功能，在行波波头标定中有着广泛的应用。其离散表达式 $f(x(h))$为：

$$f(x(h)) = x^2(h) - x(h+1)x(h-1) \tag{13}$$

式中：$x(h)$为离散行波信号。利用 Teager 能量算子可提高上、下行线路主波头的突变特性，有望实现主波头的准确标定。

2.4 故障定位方案设计

不同区段故障时，AT1 左侧线路测得的线模行波电流主频在频域上分布差异显著；而测量端上、下行线路电流行波主波头不受过渡电阻的影响，极易辨识，加之主波头时差与故障距离有着固定的对应关系。综合上述，故障定位方案步骤如下所述。

1）将图 1 中 AT1 左侧线路测得的电流行波进行相模变换，提取线模电流 5 分量 i_{m5}。

2）对线模电流 5 分量 i_{m5} 进行 S 变换得到时频矩阵，并依据式(9)得到具有频率信息的能量谱矩阵。

3）选取能量谱矩阵最大元素对应的频率为主频，根据不同区段故障下主频的差异性构建区段定位判据为：

$$f_{\mathrm{dom}} > f_{\mathrm{th}} = k_{\mathrm{rel}} f_{\mathrm{g}} \tag{14}$$

式中：f_{dom} 为信号主频；f_{th} 为信号主频的整定阈值；在区段 S2 中设置最严重故障并得到其主频为 f_{g}; 为保障区段识别的可靠性，引入可靠系数 k_{rel}=1.2。

4）确定故障区段后，依据式(11)比较$|i_{\mathrm{m4}}|$、$|i_{\mathrm{m6}}|$的积分值大小来辨识故障线路(T 线或 F 线)。

5）提取 T 线或 F 线的上、下行线路行波电流，并根据式(12)、(13)分别辨识和标定故障线路电流行波主波头到达时间 $t_{\text{dom-f}}$、健全回线电流行波主波头到达时间 $t_{\text{dom-s}}$。

6）利用两者时差与故障距离固定的映射关系可以实现故障点定位。

图 8 为故障定位方案流程图。

3 仿真分析

为验证基于主特征量的全并联 AT 牵引网故障定位方法的可靠性，在 EMTP 暂态仿真软件中搭建了如图 1 所示的全并联 AT 牵引网供电系统仿真模型。仿真系统中，牵引变压器、自耦变压器的电气参数[27]如表 2 所示。

区段 S1、S2 线路长度均为 15 km，采样频率为 1 MHz。

3.1 故障区段定位分析

在图 1 所示的仿真模型的区段 S1、S2 中设置上行线路 T-R 故障，分别距 AT1 端 6 km、14.5 km，过渡电阻为 10 Ω，AT1 左侧线路的电流行波模 5 分量 i_{m5} 如图 9 所示。

由图 9 可知，当故障发生线路中间位置时(6 km)，测量端可以测得完整的电流行波波头，因此根据波头的波形特征可以识别故障区段；而发生远端故障时(14.5 km)，由于对端母线反射波与初始行波的混叠，导致测量端测不到完整行波波头，此时利用波头的波形特征无法做到区段识别，近端故障亦如此。综合上述，利用波形特征识别故障区段存在一定的局限性。

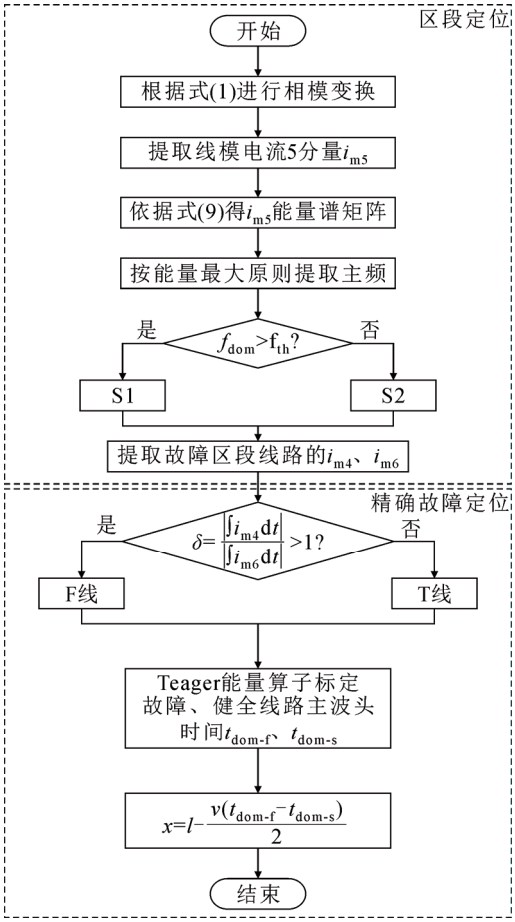


图 8 故障定位方案流程图

Fig.8 Fault localization scheme flowchart

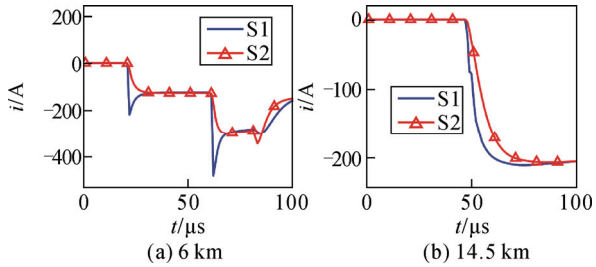


图 9 AT1 左侧线路的电流行波模 5 分量

Fig.9 Current wave mode 5 component of the left line of AT1

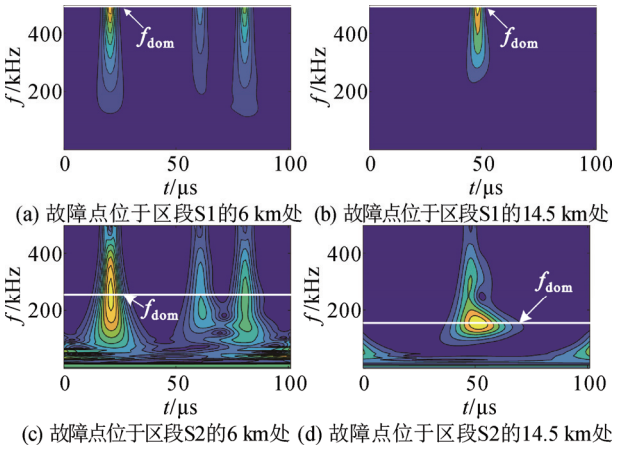


图 10 不同故障位置下的暂态电流能量谱图

Fig.10 Transient current energy spectrum at different fault locations

表 2 牵引变压器、自耦变压器参数

Table 2 Parameters of traction transformers, auto-transformers

类型	额定容量/MVA	空载损耗/kW	空载电流/%	短路电压/%	负载损耗/kW
牵引变压器	40	31.9	0.31	10.58	121.31
自耦变压器	10	5.0	0.45	0.59	23.00

由 1.2 节分析可知，当电流行波流过自耦变压器时，会存在大量的高频分量损失，因此不同故障区段发生故障时主频在频域上的分布具有差异性，为了直观展示该差异，分别在牵引网不同故障位置设置故障点，加入 30 dB 噪声，绘制暂态电流能量谱图如图 10 所示。

通过改变式(9)的 n 值，使故障发生在 S1 区段的电流行波主频落在暂态电流能量谱的绝对高频段，而故障发生在 S1 区段电流行波主频落在暂态电流能量谱的相对低频段。由图 10 可以看出，不同区段发生故障时，主频在频域中分布差异显著，故障区段识别判据灵敏性高。

3.2 故障线路辨识仿真分析

在分别在上、下行线路 6 km 处设置 TR、TF 和 FR 故障，过渡电阻为 10 Ω，将采集的电流行波根据式(1)进行相模变换得到各行波模量，绘$|i_{m4}|$、$|i_{m6}|$模值的波形图如图 11 所示。

由图 11 可知，对于 T 线故障(TR、TF)，$|i_{m4}|$的积分值小于$|i_{m6}|$的积分值；反之，F 线故障(FR)时，$|i_{m4}|$的积分值大于$|i_{m6}|$的积分值。说明根据行波模量积分值的幅值大小辨识故障线路是可行的。

3.3 故障定位仿真分析

分别在区段 S1 上、下行线路的半线长内外(6 km、9 km)设置上行线路 T-R 故障，采集 AT1 左侧上行线路 I、下行线路 II 的电流，加入 30 dB 噪声，并根据式(13)获取上、下行线路电流的 Teager 能量值，仿真结果如图 12 所示。

当故障点位于半线长内时，故障线路测得的电流行波的主波头为第一波头，非故障测的电流行波的主波头为第三波头；当故障点位于半线长外时，故障线路测得的电流行波的主波头为第一波头，而

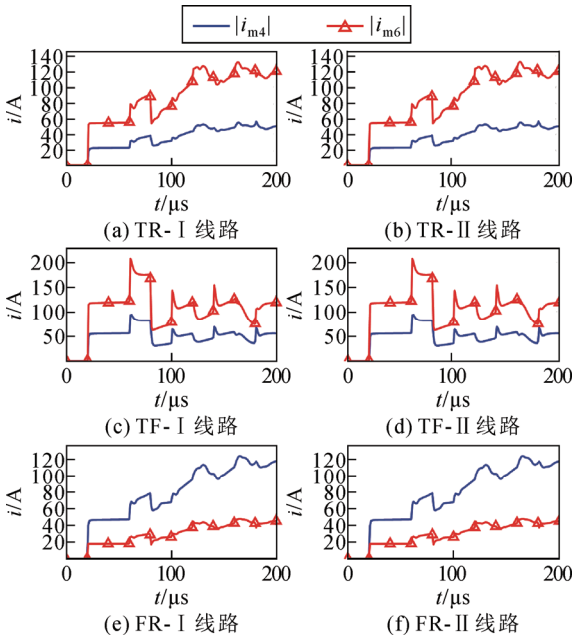


图 11 不同故障线路下$|i_{m4}|$、$|i_{m6}|$模值

Fig.11 Modal values of $|i_{m4}|$ and $|i_{m6}|$ for different fault lines

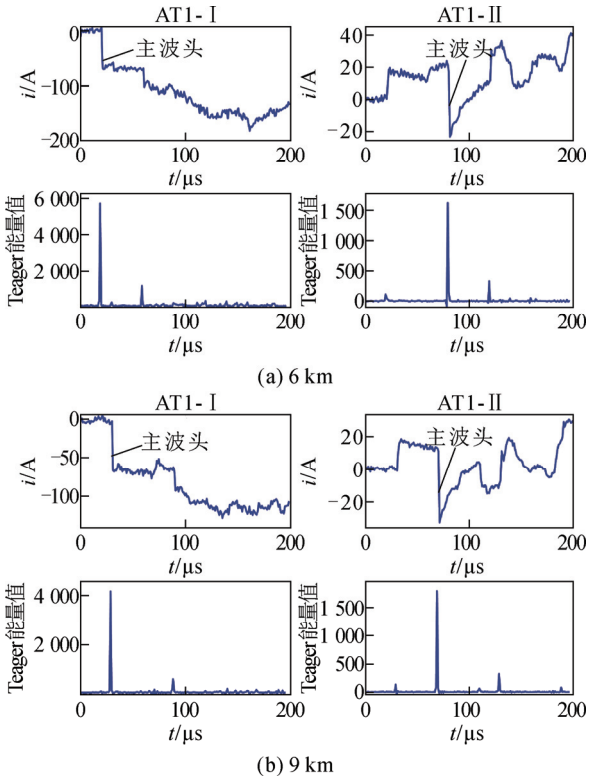


图 12 AT1 左侧上、下行线路电流行波及 Teager 能量值

Fig.12 Upper and lower line current waves and Teager energy values

非故障测的电流行波的主波头为第二波头。故障发生于半线长内外时，故障线路电流行波的主波头为初始电流行波，尽管非故障线路电流行波的主波头到达次序不同，但其均属于对端母线反射波电流，因此两者的时差与故障距离对应关系是确定的。由图 12 可知，根据幅值特征能很好地辨识上、下行线路电流行波的主波头，加之上、下行线路电流行波的主波头不受过渡电阻的影响，基于主波头时差故障定位法具有极高的准确性和鲁棒性。

分别在全并联 AT 牵引网仿真模型中区段 S1、S2 线路不同位置设置不同故障类型、不同过渡电阻下的故障，以此结果验证本文提出的故障定位方案的灵敏性和可靠性，仿真结果见表 3。

由表 3 的仿真结果可知，对于发生在区段 S1 线路上的故障，f_{dom} 为绝对高频，而在区段 S2 线路上发生故障时，f_{dom} 均远小于整定阈值。故障发生在同一位置，改变过渡电阻只会行波幅值，并不会改变行波分量在频域上的分布，即主频并不受过渡电阻影响。因此在不同故障情形下，本文故障定位方法均能准确且灵敏识别故障区段；由上文分析可知，在全并联 AT 牵引网中，上、下行线路电流行波主波头突变特性明显，波头标定难度低，故障定位准确。由定位结果看出，最大的定位误差仅为 136 m，且同一位置定位结果相同，与过渡电阻数值、故障类型无关。说明本定位方法波头标定准确，定位方法稳定性高。

3.4 抗噪声能力分析

在距离 AT1 端 3 km 的两侧线路设置 T-R 短路故障，将采集的信号分别加入 50、40、30 dB 的噪声，过渡电阻为 10 Ω。在不同噪声信号干扰下计算得出的 f_{dom} 和定位误差见表 4。

由仿真结果可知，当噪声信号增大时，区段 S1 发生故障时 f_{dom} 始终为绝对高频，区段 S2 发生故障时 f_{dom} 小于阈值 f_{th}，说明本文的故障定位方法在噪声干扰下依旧能灵敏识别故障区段；由 1.3 节分析可知，上、下行线路测得行波电流主波头不受过渡电阻干扰，且牵引网线路长度较短，行波在线路上的衰减较小，因此电流行波主波头突变幅值大，不易被噪声信号湮没。由定位误差结果可知，在 30 dB 噪声干扰下，误差<150 m，定位精度高。

3.5 故障定位方法的适用性

现阶段的全并联 AT 牵引网的行波定位方法假定上下线路绝对等长，并将上、下行线路合并之后再进行定位，但事实上当高速轨道发生拐弯时，上、下行线路的拐弯半径是不一样，对应上、下行线路长度会存在一定的差异。令区段 S1 的上、下行线

表 3　故障定位结果

Table 3　Fault localization results

故障点位置		TR 短路故障				FR 短路故障			TF 短路故障		
		过渡电阻 R_f/Ω	f_{dom}/kHz	故障区段	绝对误差/m	f_{dom}/kHz	故障区段	绝对误差/m	f_{dom}/kHz	故障区段	绝对误差/m
S1	2 km	10	500	S1	136	500	S1	136	500	S1	136
		100	500	S1	136	500	S1	136	500	S1	136
		1 000	500	S1	136	500	S1	136	500	S1	136
	6 km	10	500	S1	60	500	S1	60	500	S1	60
		100	500	S1	60	500	S1	60	500	S1	60
		1 000	500	S1	60	500	S1	60	500	S1	60
	14 km	10	500	S1	106	500	S1	106	500	S1	106
		100	500	S1	106	500	S1	106	500	S1	106
		1 000	500	S1	106	500	S1	106	500	S1	106
S2	1 km	10	163.12	S2	80	56.74	S2	80	163.12	S2	80
		100	163.12	S2	80	56.74	S2	80	163.12	S2	80
		1 000	163.12	S2	80	56.74	S2	80	163.12	S2	80
	12 km	10	170.21	S2	43	63.83	S2	43	248.23	S2	43
		100	170.21	S2	43	63.83	S2	43	248.23	S2	43
		1 000	170.21	S2	43	63.83	S2	43	248.23	S2	43

表 4　不同噪声干扰下的仿真结果

Table 4　Simulation results under different noise disturbances

信噪比/dB	故障点位置		f_{dom}/kHz	故障区段	绝对误差/m
50	S1	3 km	500	S1	80
	S2	3 km	226.95	S2	132
40	S1	3 km	500	S1	80
	S2	3 km	226.95	S2	132
30	S1	3 km	500	S1	80
	S2	3 km	198.58	S2	132

路长度分别为 l_1=15 km 和 l_2=16 km，在上行线路 6 km 处设置 TR 故障验证本文方法的适用性。不等长线路的故障行波网格图如图 13 所示。图中 $t_{I\text{-}1}$、$t_{I\text{-}2}$、$t_{I\text{-}3}$ 分别为上行线路第 1、第 2、第 3 行波的到达时间，$t_{II\text{-}1}$、$t_{II\text{-}2}$、$t_{II\text{-}3}$ 分别为下行线路第 1、第 2、第 3 行波的到达时间。

由图 13 可知，当 l_2>l_1 时，上、下行线路的初始行波、故障点反射波到达时间相同，上行线路对端母线反射波到达时间将滞后于下行线路对端母线反射波到达时间。此时将上、下行线路合并后再进行定位显然会导致较大的误差。由 1.3 节分析可知，上、下线路的主波头分别对应的时间为 $t_{I\text{-}1}$、$t_{II\text{-}3}$，利用两者的时差可以实现定位，仿真波形图见图 14。

由图 14 可知，上行线路主波头时间 $t_{I\text{-}1}$=19 μs，下行线路主波头时间 $t_{II\text{-}3}$=82 μs，故障点距离为：(15 000+16 000−298×(82−19))/2 m=6 113 m，其中 v 取经验波速，其值为 298 m/μs。由计算结果可知，

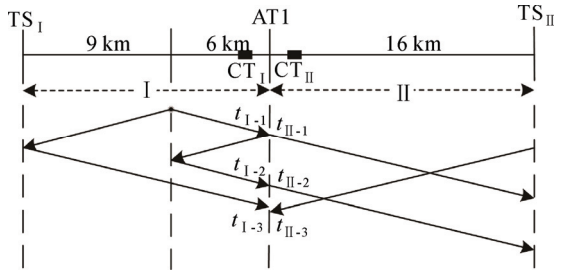
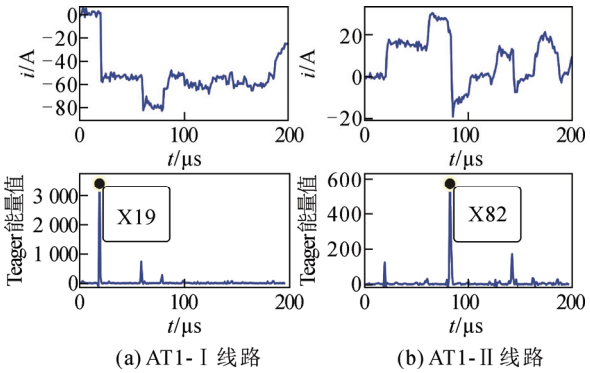


图 13　不等长线路的故障行波网格图

Fig.13　Fault traveling wave mesh diagram for unequal length lines



(a) AT1-Ⅰ线路　(b) AT1-Ⅱ线路

图 14　不等长线路上下行线路电流行波及 Teager 能量值

Fig.14　Current traveling wave and Teager energy values for up-and-down lines of unequal-length lines

误差仅为 113 m，因此本文方法适用于上、下行线路长度不等的全并联 AT 牵引网。

4 结论

1）基于自耦变压器绕组对地电容的边界特性，不同区段故障下测得的电流行波主频差异显著，易于辨识，区段定位灵敏度高。

2）本故障定位方案将上、下并行线路在测量点处拆解成 2 段串联线路，将每段线路上侧的突变幅值最大行波波头定义主波头，推导出上、下线路电流行波主波头时差与故障距离存在固定映射关系，因此该定位方法仅利用单端电气量即可实现双端定位的功能。同时，该定位方法不受过渡电阻折反射的影响，能实现上、下行线路不等长的全并联 AT 牵引网的故障定位，适用性强。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 钱清泉，高仕斌，何正友，等. 中国高速铁路牵引供电关键技术[J]. 中国工程科学，2015，17(4)：9-20.
QIAN Qingquan, GAO Shibin, HE Zhengyou, et al. Study of China high-speed railway traction power supply key technology[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(4): 9-20.

[2] 李 岗，林国松，韩正庆. 新型 AT 供电牵引网故障测距方案[J]. 电力系统及其自动化学报，2013，25(3)：31-34.
LI Gang, LIN Guosong, HAN Zhengqing. Fault location of novel AT power traction network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(3): 31-34.

[3] 王继芳. 全并联 AT 供电牵引网故障测距研究[D]. 成都：西南交通大学，2006.
WANG Jifang. Research on fault location of all-parallel AT traction system[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2006.

[4] 尚博阳，罗国敏，茹嘉昕，等. 基于有限量测信息的多分支配电线路故障定位方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2308-2317.
SHANG Boyang, LUO Guomin, RU Jiaxin, et al. Fault location method of multi-branch distribution lines based on limited measurement information[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2308-2317.

[5] 郝治国，谢 凡，张雨宁，等. 远海风电直流汇集送出系统直流线路继电保护技术现状与展望[J]. 高电压技术，2023，49(1)：1-18.
HAO Zhiguo, XIE Fan, ZHANG Yuning, et al. Status and prospects of relay protection technology for DC lines in distant offshore wind DC collection and transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 1-18.

[6] 和少寅，谢彦召，宋 宇，等. 基于电磁时间反演传递函数相关性的传输线网络故障定位方法[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1851-1859.
HE Shaoyin, XIE Yanzhao, SONG Yu, et al. Fault location method in transmission line network based on transfer function correlation of electromagnetic time reversal[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1851-1859.

[7] 张腾跃，韩昆仑，陈锋元，等. 基于行波高频分量互相关函数离散度的高压直流线路双端保护方法[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1254-1262.
ZHANG Tengyue, HAN Kunlun, CHEN Fengyuan, et al. Two-terminal protection method for HVDC transmission lines based on high-frequency cross-correlation function dispersion of traveling wave[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1254-1262.

[8] MORALES-ESPAÑA G, MORA-FLÓREZ J, VARGAS-TORRES H. Elimination of multiple estimation for fault location in radial power systems by using fundamental single-end measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1382-1389.

[9] 邓 丰，黄懿菲，祖亚瑞，等. 基于行波全波形主频分量衰减特性的高压输电线路快速保护方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(24)：8864-8875.
DENG Feng, HUANG Yifei, ZU Yarui, et al. High-speed protection method for transmission line based on the dominant frequency component attenuation characteristics of traveling-wave full waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8864-8875.

[10] SANSEVERINO E R, VIGNI V L, DI STEFANO A, et al. A two-end traveling wave fault location system for MV cables[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 1180-1188.

[11] 闫宁宁，王 健，秦诚意，等. 基于双端行波频率变化特性的中低速磁浮交通供电轨故障定位方法[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1526-1537.
YAN Ningning, WANG Jian, QIN Chengyi, et al. Fault location method for power supply rails in low and medium-speed magnetic levitation traffic based on double-ended traveling wave frequency variation characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1526-1537.

[12] 张小丽，曾祥君，马洪江，等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化，2008，32(8)：64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.

[13] 鲍廷义，汪志成，吴仲朗. 基于小波变换自适应匹配的高速铁路牵引网故障单端行波定位法[J]. 科学技术与工程，2012，12(25)：6384-6389.
BAO Tingyi, WANG Zhicheng, WU Zhonglang. Method of high-speed railway traction nets fault single-ended traveling-wave positioning based on wavelet transform adaptive matching[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(25): 6384-6389.

[14] 熊列彬，吴高华，王志洋. 基于 IHHT 的多测点行波法故障测距在全并联 AT 牵引网中的研究[J]. 电工技术学报，2019，34(15)：3244-3252.
XIONG Liebin, WU Gaohua, WANG Zhiyang. Study on fault location of multi measuring points traveling wave method based on IHHT in all parallel AT traction network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3244-3252.

[15] 傅钦翠，陈剑云，钟汉华，等. 全并联 AT 牵引网行波传播特性研究及单端故障测距算法[J]. 铁道学报，2021，43(7)：66-76.
FU Qincui, CHEN Jianyun, ZHONG Hanhua, et al. Research on traveling wave propagation characteristics of all-parallel at traction network and single terminal fault location algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(7): 66-76.

[16] 舒新星，陈剑云，华 敏，等. 基于时频谱相似度全并联 AT 牵引网行波测距方法[J]. 铁道学报，2022，44(6)：37-45.
SHU Xinxing, CHEN Jianyun, HUA Min, et al. Traveling wave ranging method for all parallel at traction network based on time spectrum similarity[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(6): 37-45.

[17] 周 欢，陈剑云，万若安，等. 基于 TCNN-MADLSTM 的全并联 AT 牵引网多元信号融合故障定位[J]. 中国铁道科学，2023，44(4)：206-218.
ZHOU Huan, CHEN Jianyun, WAN Ruoan, et al. Multi-signal fusion

fault location of all parallel at traction network based on TCNN-MADLSTM[J]. China Railway Science, 2023, 44(4): 206-218.

[18] 刘思然，陈剑云，乐　果. 考虑钢轨铁磁特性的牵引网阻抗频变参数矩阵计算[J]. 华东交通大学学报，2018，35(4)：97-105.
LIU Siran, CHEN Jianyun, YUE Guo. Calculation of impedance parameter matrix of traction network impedance considering steel rail ferromagnetic properties[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(4): 97-105.

[19] 戴　攀，刘　田，周　浩. 高速铁路接触网行波传播特性研究[J]. 铁道学报，2014，36(2)：25-30.
DAI Pan, LIU Tian, ZHOU Hao. Characteristics of travelling wave propagation in catenary of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2): 25-30.

[20] 何金良. 时频电磁暂态分析理论与方法[M]. 北京：清华大学出版社，2015.
HE Jinliang. Theory and methods for time and frequency domain electromagnetic transient analysis[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2015.

[21] ZHONG H H, CHEN J Y, FU Q C, et al. Lightning strike identification algorithm of an all-parallel auto-transformer traction power supply system based on morphological fractal theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 2119-2132.

[22] BORGHETTI A, MORCHED A, NAPOLITANO F, et al. Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 24(1): 360-372.

[23] 曲中党，吴　蔚，贺日政，等. 基于 S 变换的软阈值滤波在深地震反射数据处理中的应用[J]. 地球物理学报，2015，58(9)：3157-3168.
QU Zhongdang, WU Wei, HE Rizheng, et al. Soft threshold filter based on S transform and its application to data processing of deep seismic reflection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3157-3168.

[24] 郭谋发，徐丽兰，缪希仁，等. 采用时频矩阵奇异值分解的配电开关振动信号特征量提取方法[J]. 中国电机工程学报，2014，34(28)：4990-4997.
GUO Moufa, XU Lilan, MIAO Xiren, et al. A vibration signal feature extraction method for distribution switches based on singular value decomposition of time-frequency matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4990-4997.

[25] 饶显杰，徐忠林，龙　林，等. 基于广义 S 变换与数学形态学的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 电网技术，2023，47(3)：1299-1307.
RAO Xianjie, XU Zhonglin, LONG Lin, et al. Narrowband interference suppression of partial discharge based on generalized S transform and mathematical morphology[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1299-1307.

[26] 郑　涛，宋祥艳. 基于故障暂态行波高低频能量比值的交流输电线路快速保护方案[J]. 电网技术，2022，46(12)：4616-4624.
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Fast protection scheme for AC transmission lines based on ratio of high and low frequency energy of transient traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4616-4624.

[27] 铁道部. 电气化铁路自耦变压器：TB/T 2888—2010[S]. 北京：中国铁道出版社，2010.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Auto-transformer for AC electrified railway: TB/T 2888—2010[S]. Beijing, China: China Railway Publishing House, 2010.



刘国胜
2000—，男，硕士生
主要从事电力系统保护与控制方面的研究工作
E-mail: 17775771934@163.com

LIU Guosheng



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

LI Zewen
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-01-15　修回日期　2024-06-24　　编辑　曾文君

附录 A

A1 折反射系数推导

TS 端折反射系数与出线数的计算关系为：

$$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{TS}}=\dfrac{2}{n_{\mathrm{TS}}+1}=1\\ \beta_{\mathrm{TS}}=\dfrac{n_{\mathrm{TS}}-1}{n_{\mathrm{TS}}+1}=0\end{cases}\tag{A1}$$

式中：n_{TS}为除故障线路外 TS 端连接的出线数。

同理可以计算出 AT1 端电流行波的折反射系数为：

$$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{AT1}}=\dfrac{2}{n_{\mathrm{AT1}}+1}=\dfrac{1}{2}\\ \beta_{\mathrm{AT1}}=\dfrac{n_{\mathrm{AT1}}-1}{n_{\mathrm{AT1}}+1}=\dfrac{1}{2}\end{cases}\tag{A2}$$

式中：n_{AT1}为除故障线路外 AT1 端连接的出线数；Z_{T}为线路的等效波阻抗；R_{f}为故障发生时的过渡电阻。计算得到电流行波在故障点折反射系数为：

$$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{f}}=\dfrac{2R_{\mathrm{f}}}{Z_{\mathrm{T}}+2R_{\mathrm{f}}}\\ \beta_{\mathrm{f}}=\dfrac{Z_{\mathrm{T}}-Z_{\mathrm{T}}//R_{\mathrm{f}}}{Z_{\mathrm{T}}+Z_{\mathrm{T}}//R_{\mathrm{f}}}\end{cases}\tag{A3}$$

A2 S 变换公式推导

S 变换的离散表达式为：

$$S\left[qT,\frac{w}{NT}\right]=\sum_{m=0}^{N-1}X\left[\frac{m+w}{NT}\right]\mathrm{e}^{\frac{-2\pi^2m^2}{w^2}}\mathrm{e}^{\frac{j2\pi qm}{N}}\tag{A4}$$

式中：T为采样时间间隔；N为采样点数；q为时间参数；m为位移参数，q, m=0, 1, 2, …, N−1；w为频率参数，w=1, 2, …, N/2，X为离散信号的快速傅里叶变换。

依据式(A4)对线模行波电流进行 S 变换得到 S 矩阵，暂态信号的频域特征由 S 矩阵的行元素表征，而暂态信号的时域特征由 S 矩阵的列元素表征。式(A5)为 S 矩阵相邻两行间的频率差 Δf。

$$\Delta f=\frac{f_{\mathrm{b}}}{N}\tag{A5}$$

第 i 行的频率 f_i 为：

$$f_i=\frac{f_{\mathrm{b}}}{N}i\tag{A6}$$

式中：f_{b}为采样频率。