

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221913

## 基于沿线电流故障分量差值的交叉互联电缆故障测距

杨明嘉<sup>1,2</sup>, 夏成军<sup>1,2</sup>, 池梓斌<sup>1,2</sup>, 赖胜杰<sup>1,2</sup>, 陈晓儒<sup>3</sup>, 黄龙毅<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东 广州 510663; 3. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001)

**摘要:** 为解决长距离高压电缆采用交叉互联接地方式时故障测距较为复杂的问题, 提出基于沿线电流故障分量差值分布的交叉互联电缆故障测距方法。首先, 通过故障发生前后护层环流判断电缆故障区段。其次, 考虑线芯与护层之间的耦合关系, 基于双 $\pi$ 模型推导电缆不同区段发生故障时的沿线电压、电流方程。在此基础上, 通过求解电流故障分量差值函数零点得到故障距离, 并结合切线方程对所得故障距离进行修正。最后, 搭建电缆故障模型对测距方法进行仿真验证。结果表明, 所提方法测距误差为1%左右, 具有较高的准确性, 对采用交叉互联接地方式的电缆实现故障测距具有一定的参考意义。

**关键词:** 高压电缆; 交叉互联; 双 $\pi$ 模型; 故障分量; 故障测距

### Fault location of cross connecting cable based on fault component difference of along current

YANG Mingjia<sup>1,2</sup>, XIA Chengjun<sup>1,2</sup>, CHI Zibin<sup>1,2</sup>, LAI Shengjie<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaoru<sup>3</sup>, HUANG Longyi<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Province New Energy Power System Intelligent Operation and Control Enterprise Key Laboratory, Guangzhou 510663, China; 3. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Huizhou 516001, China)

**Abstract:** In order to solve the complicated fault location problem for long distance high voltage cables using cross interconnection grounding method, a fault location method for cross interconnection cables based on the fault components difference distribution along the current is proposed. First, the cable fault section is determined by the sheath circulation before and after the fault occurs. Second, considering the coupling relationship between the core and the sheath, the voltage and current equations along the cable when faults occur in different sections are derived based on the double  $\pi$  model. On this basis, the fault distance is obtained by solving the fault component difference function zero, and the fault distance is modified by the tangent equation. Finally, a cable fault model is built to verify the ranging method. The results show that the proposed method location error is about 1%, which has a high accuracy, and has a certain reference significance for the fault location of cables using the cross-connected grounding mode.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2403500).

**Key words:** high voltage cable; cross connecting; double  $\pi$  model; fault component; fault distance

## 0 引言

随着城市用电量的与日俱增和城市电网建设要求的进一步提高, 电力电缆得到越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。与此同时, 由于电缆敷设施工质量不高和城市电网管理不善导致的电缆故障也时常出现, 其中故障类型以单相故障为主, 包括线芯-护层对地故

障、线芯-护层故障和护层对地故障。电缆发生故障后, 电缆护层环流增大, 引起电缆损坏, 甚至引起电缆绝缘破坏, 导致事故发生<sup>[4-6]</sup>。为了确保电网正常运行, 快速准确地定位电缆故障对维护电网安全具有重要意义<sup>[7]</sup>。

目前的输电线路在线测距方法主要有行波法和阻抗法<sup>[8-12]</sup>。行波法通过电缆故障时的暂态行波特性确定故障点距离, 尽管在理论上不受故障类型和过渡电阻的影响, 但如何提取暂态行波信号的初始波头始终是一个难点, 且容易受到环境干扰影响准

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2022YFB2403500); 南方电网公司科技项目资助(031300KK52200003)

确率, 用于电缆故障测距始终存在可靠性问题<sup>[13]</sup>。阻抗法根据线路长度与阻抗成正比的原理, 测量故障时产生的电压和电流, 计算出故障距离与检测到的电压、电流的关系, 从而计算出故障点与线路两端的距离。阻抗法具有原理简单、可靠, 对采样精度要求不高的优点, 在电缆故障测距中得到相对较多的应用, 不少学者根据实际情况提出了不同的阻抗法应用方式, 取得了良好的测距效果。

文献[14]提出基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法, 用配电网单相故障零模等效网络作为辨识模型, 建立时域测距方程求解故障距离。文献[15]提出了一种基于 RLC 模型的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法, 利用配网电缆单相接地故障后的暂态信息并结合故障状态网络与零模网络建立时域测距方程实现故障测距。文献[16]提出一种考虑金属护层耦合的电缆故障定位方法, 通过双  $\tau$  分布参数模型建立电缆导芯和金属护层耦合关系, 根据首末端电气量确定导芯电压瞬时值差值求解故障精确位置。文献[17]考虑电缆和线芯之间的电容效应, 提出通过电缆首末两端电压和电流搜索整个电缆长度以确定故障位置的方法, 但只适用于直接接地的电缆。文献[18-19]在考虑电缆金属护层结构的基础上, 推导了电缆金属护层首端单端接地和双端接地方式下首端、故障点和末端之间的电气量关系, 迭代实现了电缆单端测距, 但电缆金属护层的单端接地方式主要适用于电缆输电线路较短的情况, 两端直接接地方式在线路较短且传输容量较小时才会考虑。当电缆长度超过 1500 m 时, 通常采用交叉互联接地方式<sup>[20]</sup>, 采用交叉互联接地方式的电缆和采用单端或双端接地方式的电缆相比, 护层连接方式不同, 发生故障时的电气量分布情况也不同, 原有的故障测距方法已不适用于交叉互联接地方式下的电缆, 有必要进一步研究新的故障测距方法。

本文考虑电缆采用交叉互联接地方式下线芯和护层的耦合关系, 以  $\pi$  型等效电路为基础建立电缆发生短路故障时的阻抗模型。基于电缆线芯和护层首末两端电气量, 计算故障相和非故障相线芯和护层的沿线电流故障分量, 利用非故障相对应故障点处前、后电流故障分量相等的特征, 建立关于故障距离的一元测距方程, 求解零点作为测距结果, 结合切线方程迭代修正测距结果实现故障测距。通过仿真讨论了不同故障距离、故障类型、故障电阻、故障初相角对故障测距的影响, 结果验证了该方法的准确性和可靠性。

## 1 电缆交叉互联接地方式

本文对单芯结构的高压电缆进行研究, 高压单芯电缆一般由线芯、半导体屏蔽、XLPE 主绝缘、绝缘屏蔽、金属护套、外护套等部分组成, 其截面如图 1 所示。

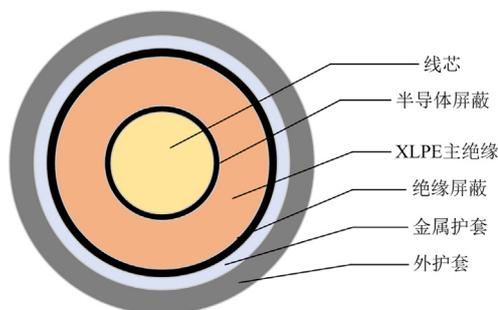


图 1 电缆截面结构示意图

Fig. 1 Cable section structure diagram

当高压电缆线路大于 1500 m 时, 为了降低护层中的感应电压和感应电流, 电缆金属护层通常采用交叉互联的连接方式, 即将高压电缆线路分为若干大段, 每一大段分为 3 小段, 每一小段长度可根据实际情况设定; 每一小段电缆的金属护层在交叉互联箱中进行换位并装设护层保护器; 每一大段电缆并联后接地<sup>[21]</sup>。高压电缆交叉互联接地方式如图 2 所示。

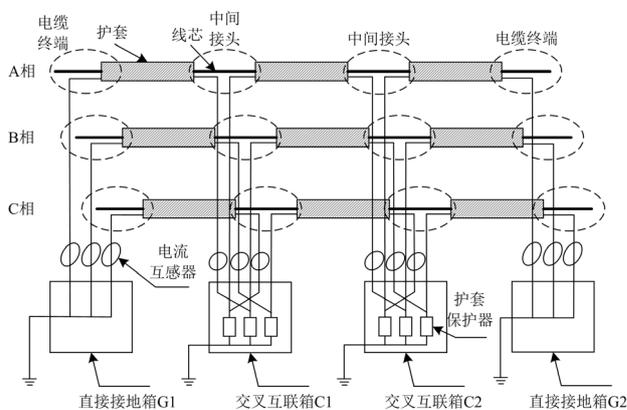


图 2 高压电缆交叉互联接地方式

Fig. 2 High-voltage cable cross-interconnection grounding method

相较于单端接地和双端接地等接地方式, 电缆采用交叉互联方式接地时故障相和非故障相的线芯与护层之间的耦合关系更为紧密, 故障电流同时流过三相, 使得故障测距更为困难<sup>[22]</sup>。为了准确表示线芯与护层之间的耦合关系, 本文采用双  $\pi$  集中参数模型对其进行等效<sup>[23]</sup>, 如图 3 所示, 每个护层回路都由 3 个  $\pi$  型等效电路组成, 整个交叉互联结构

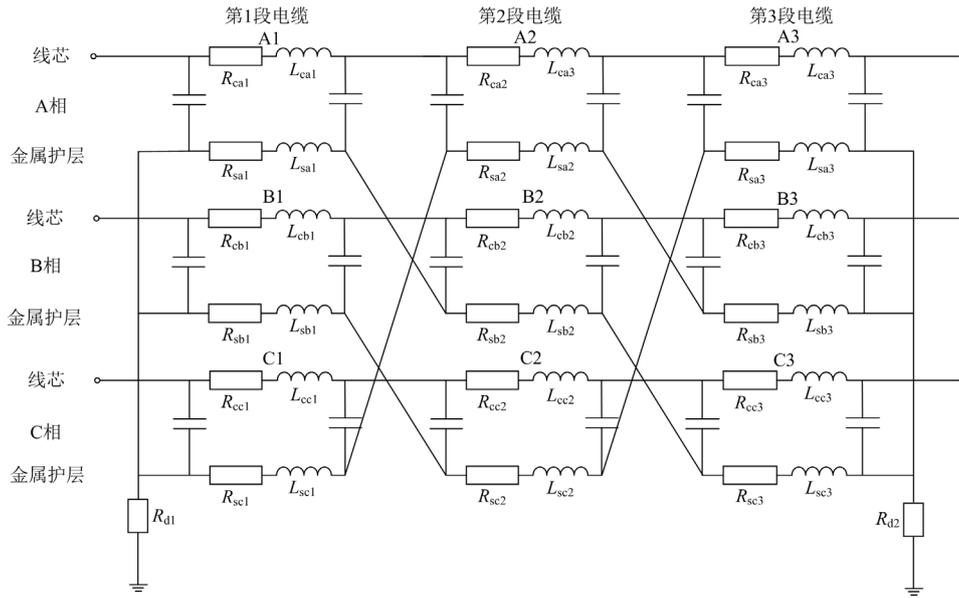


图 3 电缆交叉互联接地等效模型图

Fig. 3 Equivalent grounding model of cable cross interconnection

可划分为 A1~A3、B1~B3、C1~C3 共 9 个电缆区段和 A1-B2-C3、B1-C2-A3、C1-A2-B3 这 3 个回路。

正常运行情况下的电缆护层环流和感应电压变化不大，但发生故障后，金属护层与电缆线芯或大地之间的绝缘遭到破坏，将引起电压和电流产生较大变化，此时电缆线芯和金属护层中的电气量将包含有故障信息，可通过故障时的电气量实现电缆故障测距<sup>[24]</sup>。

## 2 基于电流故障分量差值分布的故障测距方法

### 2.1 基于护层环流幅值的故障区段定位方法

在图 2 中，采用交叉互联接地方式的电缆可通过直接接地箱和交叉互联箱连通护层上的电流传感器监测护层环流，当发生不同类型的故障时，电缆护层的拓扑结构均会发生变化，分析发生故障前后电缆护层环流的变化，可确定发生故障的电缆区段。本文提出采用电缆护层环流故障分量幅值作为判断电缆故障区段的依据。直接接地箱和交叉互联箱共有 12 个测量电流  $I_{1a} \sim I_{1c}$ 、 $I_{2a} \sim I_{2c}$ 、 $I_{3a} \sim I_{3c}$ 、 $I_{4a} \sim I_{4c}$ ，每一电缆区段护层首末两端各有两个测量电流，两个测量电流的差值可反映该区段的故障发生情况<sup>[25]</sup>，以护层环流从左往右为正方向，其中一条回路的测量电流分布如图 4 所示，将两个测量电流的差值作为特征电流，得到不同电缆区段对应的特征电流如表 1 所示。

当某一电缆区段发生故障时，其故障前后的特

征电流变化最大，通过求取故障前后特征电流幅值，幅值变化量最大的特征电流对应的电缆区段即为故障所在区段。

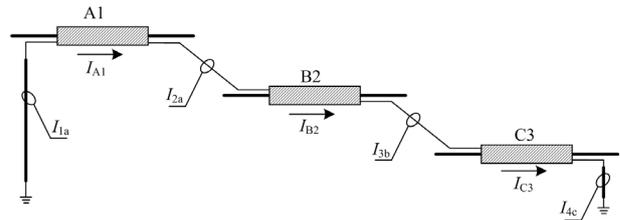


图 4 电缆护层 A1-B2-C3 回路测量电流分布  
Fig. 4 Current distribution measured in A1-B2-C3 loop of cable sheath

表 1 电缆区段护层特征电流和测量电流差值对应关系  
Table 1 Corresponding relationship between characteristic current of cable section sheath and the difference of measured current

电缆区段	特征电流名称	测量电流差值
A1	$I_{A1}$	$I_{1a} - I_{2a}$
A2	$I_{A2}$	$I_{2c} - I_{3a}$
A3	$I_{A3}$	$I_{3c} - I_{4a}$
B1	$I_{B1}$	$I_{1b} - I_{2b}$
B2	$I_{B2}$	$I_{2a} - I_{3b}$
B3	$I_{B3}$	$I_{3a} - I_{4b}$
C1	$I_{C1}$	$I_{1c} - I_{2c}$
C2	$I_{C2}$	$I_{2b} - I_{3c}$
C3	$I_{C3}$	$I_{3b} - I_{4c}$

### 2.2 基于线芯-护层耦合模型的电压、电流故障分量计算

图 3 将交叉互联接地方式的三相电缆划分为 9 个电缆区段, 每一个电缆区段均可视为电缆线芯与护层平行的导体。对任意一个区段用双  $\pi$  模型进行分析, 设该区段电缆长度为  $L_i (i=1,2,3)$ , 距离该区段首端  $x_i (i=1,2,3)$  处发生故障时, 故障点前后的电气量将不再连续。虽然每个回路的 3 个电缆区段两两之间通过交叉互联箱相连, 但发生短路故障时,

图 2 中的护层保护器不满足导通条件, 仍然处于高阻阻断状态, 不会在两段电缆之间形成新的支路, 同一线芯电流或护层环流流过的回路电气量在相邻两段电缆间依旧保持连续。如图 5 所示为 A1 区段电缆发生故障时各电缆区段电气量示意图, 上标表示 A、B、C 三相, 下标 h、t 分别表示首端和末端, 下标 f 表示故障点, 下标 c、s 分别表示电缆线芯和电缆护层, 如  $\Delta I_{fc}^{A1}$  和  $\Delta I_{flc}^{A1}$  分别表示 A1 区段电缆线芯故障点前、后的电流故障分量。

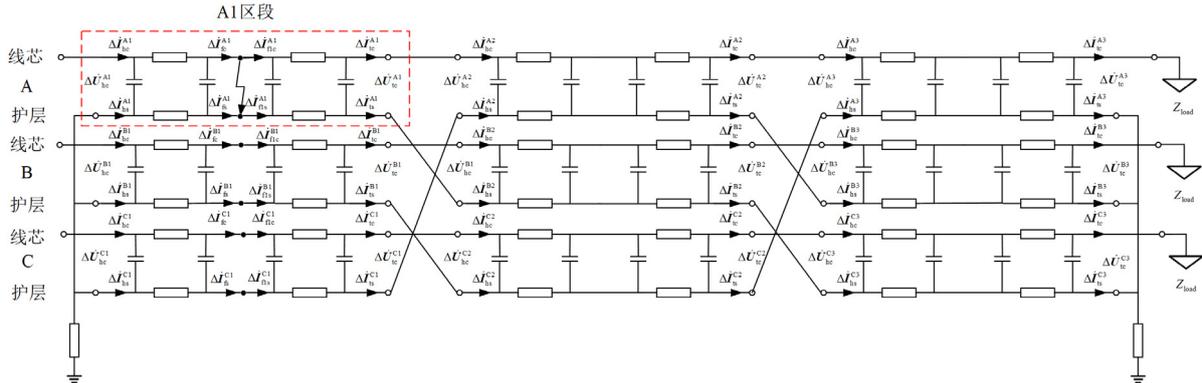


图 5 三相电缆 A1 区段故障时各区段电气量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the electrical volume in each section when the A1 section of the three-phase cable fails

由图 5 结合电缆的电气特征分析可知, 故障点所在位置将电缆故障相(以 A1 区段发生故障为例)划分为前、后两段, 无论故障位置在该区段何处, 故障点前后两段电缆的电流故障分量均存在差异, 但正常相(B1、C1 区段)故障点对应位置前后的电流故障分量仍然相等。

以第 1 段电缆为例, 故障情况下的三相电缆线芯和护层之间的耦合关系如图 6 所示, 图 6 所示仅为 A1 区段电缆对应的互感关系, 其余 8 个区段同理可得。其中,  $y_{cs}$  为线芯与护层之间单位长度导纳;  $y_{sg}$  为护层与地之间单位长度阻抗;  $z_{cc}$  为线芯单位长度阻抗;  $z_{ss}$  为护层单位长度阻抗;  $m$  为单位长度互阻抗, 其上标代表 A、B、C 相, 下标代表线芯或护层(如  $m_{cs}^{AB}$  表示 A 相线芯与 B 相护层之间的互阻抗, A1 区段和 A2、A3 区段相同, B1 区段和 B2、B3 区段相同, C1 区段和 C2、C3 区段相同)。

以 A1 区段电缆为例, 其故障时故障分量分布关系如图 7 所示, 其余 8 个区段均可得到类似关系。根据基尔霍夫定理可列出回路 1—4 的电压故障分量及节点 1—8 的电流故障分量关系, 进而可计算得到电流故障分量和电压故障分量之间的关系如附录 A 所示。

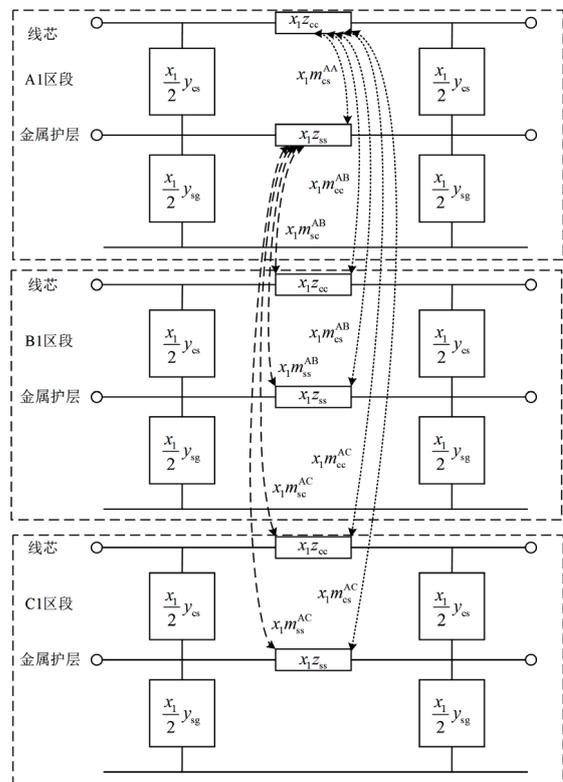


图 6 三相电缆故障时线芯与护层耦合关系

Fig. 6 Coupling relationship between core and sheath in case of three-phase cable failure

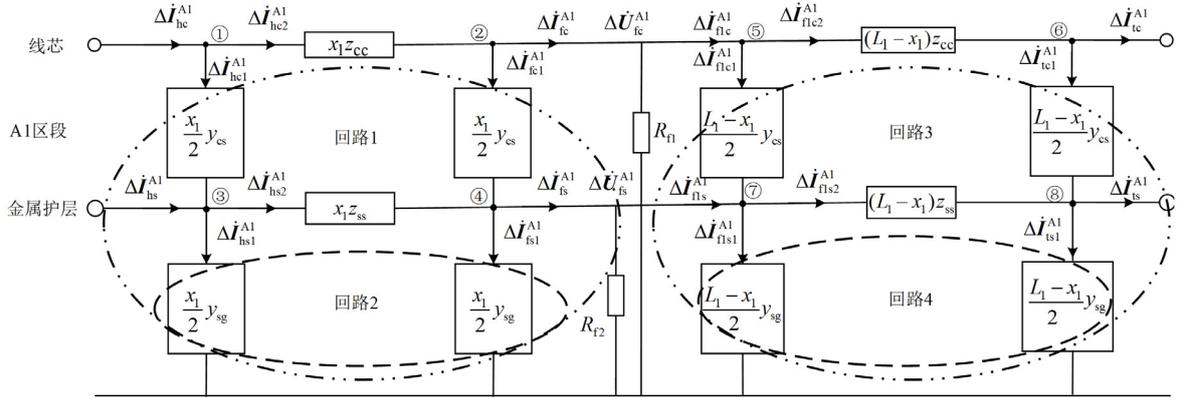


图7 A1 区段电缆故障时故障分量分布

Fig. 7 Fault component distribution in case of cable failure in section A1

A1 区段电缆发生故障时，故障点前的电压、电流故障分量可通过采集电缆首端的电压、电流故障分量得到。A1 区段首端与电缆首端的电压、电流故障分量关系用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hc}^{A1} \\ \Delta \dot{U}_{hc}^{B1} \\ \Delta \dot{U}_{hc}^{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hc}^A \\ \Delta \dot{U}_{hc}^B \\ \Delta \dot{U}_{hc}^C \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hs}^{A1} \\ \Delta \dot{U}_{hs}^{B1} \\ \Delta \dot{U}_{hs}^{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hs}^A \\ \Delta \dot{U}_{hs}^B \\ \Delta \dot{U}_{hs}^C \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hc}^{A1} \\ \Delta \dot{j}_{hc}^{B1} \\ \Delta \dot{j}_{hc}^{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hc}^A \\ \Delta \dot{j}_{hc}^B \\ \Delta \dot{j}_{hc}^C \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hs}^{A1} \\ \Delta \dot{j}_{hs}^{B1} \\ \Delta \dot{j}_{hs}^{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hs}^A \\ \Delta \dot{j}_{hs}^B \\ \Delta \dot{j}_{hs}^C \end{bmatrix}。$$

其中  $\Delta \dot{U}_{hc}^A$ 、 $\Delta \dot{U}_{hc}^B$ 、 $\Delta \dot{U}_{hc}^C$  表示电缆首端的线芯电压故障分量，其余可依此类推。

$$\text{令 } \Delta \dot{U}_{hc}^{L1} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hc}^{A1} \\ \Delta \dot{U}_{hc}^{B1} \\ \Delta \dot{U}_{hc}^{C1} \end{bmatrix}, \quad \Delta \dot{U}_{hs}^{L1} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hs}^{A1} \\ \Delta \dot{U}_{hs}^{B1} \\ \Delta \dot{U}_{hs}^{C1} \end{bmatrix}, \quad \Delta \dot{j}_{hc}^{L1} =$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hc}^{A1} \\ \Delta \dot{j}_{hc}^{B1} \\ \Delta \dot{j}_{hc}^{C1} \end{bmatrix}, \quad \Delta \dot{j}_{hs}^{L1} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hs}^{A1} \\ \Delta \dot{j}_{hs}^{B1} \\ \Delta \dot{j}_{hs}^{C1} \end{bmatrix}。$$

A1 区段故障点前与电缆首端的电压、电流故障分量关系用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{fc}^{L1} \\ \Delta \dot{U}_{fs}^{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hc}^{L1} \\ \Delta \dot{U}_{hs}^{L1} \end{bmatrix} - x_1 \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} \\ Z_{cc} & Z_{ss} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hc}^{L1} \\ \Delta \dot{j}_{hs}^{L1} \end{bmatrix} - \frac{x_1}{2} \begin{bmatrix} Y_{cs} & -Y_{cs} \\ -Y_{cs} & Y_{cs} + Y_{sg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hc}^{L1} \\ \Delta \dot{U}_{hs}^{L1} \end{bmatrix} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{fc}^{L1} \\ \Delta \dot{j}_{fs}^{L1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{hc}^{L1} \\ \Delta \dot{j}_{hs}^{L1} \end{bmatrix} - \frac{x_1}{2} \begin{bmatrix} Y_{cs} & -Y_{cs} \\ -Y_{cs} & Y_{cs} + Y_{sg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{hc}^{L1} + \Delta \dot{U}_{fc}^{L1} \\ \Delta \dot{U}_{hs}^{L1} + \Delta \dot{U}_{fs}^{L1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， $\Delta \dot{a}_{xx}^{Ly} = [\Delta \dot{a}_{xx}^{Ay} \quad \Delta \dot{a}_{xx}^{By} \quad \Delta \dot{a}_{xx}^{Cy}]$ ，其中  $a$  可分别代表  $U$  和  $I$ ，上标  $y$  分别表示 1、2、3，下标  $xx$  分别代表  $hc$ 、 $hs$ 、 $tc$ 、 $ts$ 、 $fc$ 、 $fs$ 、 $f1c$ 、 $f1s$ ， $x_1$  表示电缆首端到 A1 区段故障点的距离，且有

$$Z_{cc} = \begin{bmatrix} z_{cc} & m_{cc}^{AB} & m_{cc}^{AC} \\ m_{cc}^{BA} & z_{cc} & m_{cc}^{BC} \\ m_{cc}^{CA} & m_{cc}^{CB} & z_{cc} \end{bmatrix}; \quad Z_{cs} = \begin{bmatrix} m_{cs}^{AA} & m_{cs}^{AB} & m_{cs}^{AC} \\ m_{cs}^{BA} & m_{cs}^{BB} & m_{cs}^{BC} \\ m_{cs}^{CA} & m_{cs}^{CB} & m_{cs}^{CC} \end{bmatrix};$$

$$Z_{ss} = \begin{bmatrix} z_{ss} & m_{ss}^{AB} & m_{ss}^{AC} \\ m_{ss}^{BA} & z_{ss} & m_{ss}^{BC} \\ m_{ss}^{CA} & m_{ss}^{CB} & z_{ss} \end{bmatrix}; \quad Y_{cs} = \begin{bmatrix} y_{cs} & 0 & 0 \\ 0 & y_{cs} & 0 \\ 0 & 0 & y_{cs} \end{bmatrix};$$

$$Y_{sg} = \begin{bmatrix} y_{sg} & 0 & 0 \\ 0 & y_{sg} & 0 \\ 0 & 0 & y_{sg} \end{bmatrix}。$$

故障点后的电压、电流故障分量可通过采集电缆末端的电压、电流故障分量得到。A3 区段末端与电缆末端的电压、电流故障分量关系用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{tc}^{A3} \\ \Delta \dot{U}_{tc}^{B3} \\ \Delta \dot{U}_{tc}^{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{tc}^A \\ \Delta \dot{U}_{tc}^B \\ \Delta \dot{U}_{tc}^C \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{ts}^{A3} \\ \Delta \dot{U}_{ts}^{B3} \\ \Delta \dot{U}_{ts}^{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{ts}^A \\ \Delta \dot{U}_{ts}^B \\ \Delta \dot{U}_{ts}^C \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{tc}^{A3} \\ \Delta \dot{j}_{tc}^{B3} \\ \Delta \dot{j}_{tc}^{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{tc}^A \\ \Delta \dot{j}_{tc}^B \\ \Delta \dot{j}_{tc}^C \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{ts}^{A3} \\ \Delta \dot{j}_{ts}^{B3} \\ \Delta \dot{j}_{ts}^{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{j}_{ts}^A \\ \Delta \dot{j}_{ts}^B \\ \Delta \dot{j}_{ts}^C \end{bmatrix}。$$

其中  $\Delta \dot{U}_{tc}^A$ 、 $\Delta \dot{U}_{tc}^B$ 、 $\Delta \dot{U}_{tc}^C$  表示电缆末端的线芯电压故障分量，其余可依此类推。

$$\text{令 } \Delta \dot{U}_{tc}^{L3} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{tc}^{A3} \\ \Delta \dot{U}_{tc}^{B3} \\ \Delta \dot{U}_{tc}^{C3} \end{bmatrix}, \quad \Delta \dot{U}_{ts}^{L3} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{ts}^{A3} \\ \Delta \dot{U}_{ts}^{B3} \\ \Delta \dot{U}_{ts}^{C3} \end{bmatrix}, \quad \Delta \dot{j}_{tc}^{L3} =$$



上述式中,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别表示电缆三个区段的长度。

其余 8 个区段发生故障时的故障点前、后的电压、电流故障分量关系同理可得。

### 2.3 基于零点求解的故障测距

根据上述电缆发生故障时不同区段的电气量关系式可知: 当电缆总长度和电缆参数矩阵确定时, 已知电缆首末两端的电气量, 可得到故障点前、后的电流故障分量和故障距离  $x_i$  ( $i=1,2,3$ ) 之间的函数关系。

由输电线路发生短路故障时的边界条件可知, 当 A 相发生短路故障时, B、C 相故障点前、后的电流故障分量在故障距离计算取值  $x$  为实际故障距离  $d$  时相等, 在  $x$  不为实际故障距离  $d$  时不相等, 即以 A1 区段发生故障为例

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{fc}^{B1}(x) - \Delta \dot{I}_{flc}^{B1}(x) = \Delta \dot{I}_{fs}^{B1}(x) - \Delta \dot{I}_{fls}^{B1}(x) = 0 \\ \Delta \dot{I}_{fc}^{C1}(x) - \Delta \dot{I}_{flc}^{C1}(x) = \Delta \dot{I}_{fs}^{C1}(x) - \Delta \dot{I}_{fls}^{C1}(x) = 0 \end{cases}, x = d \quad (9)$$

其中  $\Delta \dot{I}_{fc}^{B1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{fc}^{C1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{fs}^{B1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{fs}^{C1}$  分别为故障点前的 B 相和 C 相线芯和护层电流故障分量, 可通过式(2)求得,  $\Delta \dot{I}_{flc}^{B1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{flc}^{C1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{fls}^{B1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{fls}^{C1}$  分别为故障点后的 B 相和 C 相线芯和护层电流故障分量, 可通过式(8)求得。

对式(9)两边取绝对值并移项可得

$$\begin{aligned} & |\Delta \dot{I}_{fc}^{B1}(x)| + |\Delta \dot{I}_{fs}^{B1}(x)| + |\Delta \dot{I}_{flc}^{B1}(x)| + |\Delta \dot{I}_{fls}^{B1}(x)| = \\ & |\Delta \dot{I}_{fc}^{C1}(x)| + |\Delta \dot{I}_{fs}^{C1}(x)| + |\Delta \dot{I}_{flc}^{C1}(x)| + |\Delta \dot{I}_{fls}^{C1}(x)|, x = d \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)等号左边为非故障相故障点前线芯与护层电流故障分量之和, 等号右边为非故障相故障点后线芯与护层电流故障分量之和, 由式(1)、式(2)和式(7)、式(8)可知, 故障点前、后电流故障分量可表示为以故障距离  $x$  为未知数的多项式的形式, 即

$$f_q(x) = c_1 x^3 + c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \quad (11)$$

$$f_h(x) = c_5 x^3 + c_6 x^2 + c_7 x + c_8 \quad (12)$$

式中:  $f_q$  为非故障相故障点前线芯和护层电流故障分量绝对值之和;  $f_h$  为非故障相故障点后线芯和护层电流故障分量绝对值之和;  $c_1 - c_8$  为各项常系数。

计算式(11)和式(12)的差值有

$$f_q(x) - f_h(x) = (c_1 - c_5)x^3 + (c_2 - c_6)x^2 + (c_3 - c_7)x + (c_4 - c_8) \quad (13)$$

分析式(9)一式(13)可知, 该差值在  $x = d$  时等于 0, 即有

$$\begin{cases} f_q(x) - f_h(x) = 0, x = d \\ f_q(x) - f_h(x) \neq 0, x \neq d \end{cases} \quad (14)$$

求解故障距离即可转化为式(13)的零点求解问题, 式(13)的分布曲线可能有图 8 所示的 3 种情况。

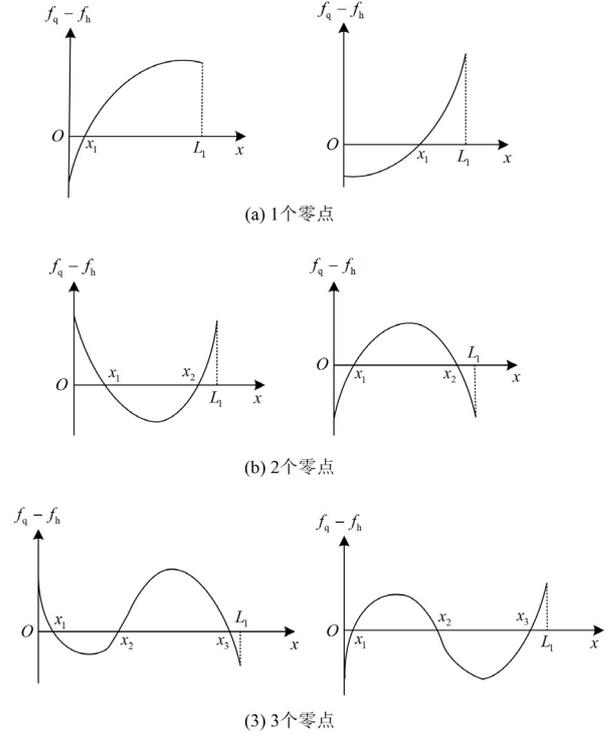


图 8 3 种情况下的曲线零点分布

Fig. 8 Zero-point distribution of curves in three cases

如图 8 所示, 曲线在电缆故障区段可能最多有 3 个零点, 为了更准确地求解曲线零点并判别其真伪, 可通过极值点对曲线进行分区, 以确保每一个区间保持单调且只有一个零点。寻找极值点可通过以下方法: 令  $f(x) = f_q(x) - f_h(x)$ , 设  $a_1$ 、 $b_1$  为故障区段初始的首末两端, 即  $[a_1, b_1] = [0, L_1]$  (以 A1 区段发生故障为例),  $c_{11} = a_1 + (a_1 - b_1)/3$ ,  $c_{12} = b_1 - (a_1 - b_1)/3$ , 计算  $f(c_{11})$  和  $f(c_{12})$  并比较大小, 若  $f(c_{11}) > f(c_{12})$ , 取  $[a_2, b_2] = [c_{11}, b_1]$ ; 若  $f(c_{11}) < f(c_{12})$ , 取  $[a_2, b_2] = [a_1, c_{12}]$ ,  $c_{21} = a_2 + (a_2 - b_2)/3$ ,  $c_{22} = b_2 - (a_2 - b_2)/3$ 。依次类推, 最终找到故障区段范围内的极值点。

确定故障区段的极值点后, 通过零值定理求解曲线零点: 设  $g_1$ 、 $h_1$  为根据极值点划分的区间首末两端,  $j_1 = (g_1 + h_1)/2$ , 计算  $f(g_1) \cdot f(j_1)$  和  $f(j_1) \cdot f(h_1)$ , 若  $f(g_1) \cdot f(j_1) < 0$ , 取  $[g_2, h_2] = [g_1, j_1]$ ; 若  $f(j_1) \cdot f(h_1) < 0$ , 取  $[g_2, h_2] = [j_1, h_1]$ ,  $j_2 = (g_2 + h_2)/2$ 。依次类推, 最终找到故障区段范围内的零点。

求解得到零点后, 若所得零点不止一个, 需要去除伪根。由输电线路发生短路故障时的边界条件

可知,故障相的故障点前后电压故障分量差值最小,因此可通过式(1)和式(7)求解故障点前、后电压故障分量,构造如下判据:

$$\varepsilon(x) = \left\{ \left| \Delta \dot{U}_{fc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{fc}^{A1} \right| + \left| \Delta \dot{U}_{fs}^{A1} - \Delta \dot{U}_{fs}^{A1} \right| \right\} / 2 \quad (15)$$

将求解得到的零点分别代入式(15),得到式(15)值最小的零点  $x_0$  作为所求故障距离解。

### 2.4 基于切线方程的测距结果迭代修正

通过求解零点和式(15)的判据得到初始故障距离  $x_0$  后,为了得到更为精确的测距结果,采用迭代修正法对测距结果加以修正。首先,求解  $x_0$  处、后的非故障相电流故障分量分布曲线的斜率为

$$K(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (16)$$

式中,  $\Delta x$  为迭代修正步长(数值不宜太大,因为初始结果已趋近实际故障距离,可按照计算结果的1%选取),本文取  $\Delta x = 0.1 \text{ m}$ 。将  $x_0$  分别代入式(11)和式(12)得到故障点前、后电流故障分量幅值曲线在  $x_0$  处的值为  $f_q(x_0)$  和  $f_h(x_0)$ 。

然后,分别求出两幅值曲线在  $x_0$  处的切线,得到两切线方程为

$$\begin{cases} y - f_q(x_0) = \frac{f_q(x_0 + \Delta x) - f_q(x_0)}{\Delta x} \cdot (x - x_0) \\ y - f_h(x_0) = \frac{f_h(x_0 + \Delta x) - f_h(x_0)}{\Delta x} \cdot (x - x_0) \end{cases} \quad (17)$$

求解式(17)中的二元一次方程,得到两切线交点  $(x_1, y_1)$ , 横坐标即为修正后的故障距离。判断两次求解的故障距离是否满足收敛条件式(18)。

$$|x_i - x_{i-1}| < \lambda \quad (18)$$

若满足,则  $x_1$  即为故障距离最终解,否则,将  $x_1$  继续代入式(17),重复迭代修正过程,直至得到满足精确度的测距结果。其中,  $i$  为迭代次数,  $\lambda$  为阈值,本文取 0.001。

## 3 故障测距流程

本文在电缆采用交叉互联接地方式下,分析电缆线芯和护层结构,利用双  $\pi$  模型考虑电缆线芯和护层耦合关系,结合故障时电缆电气量信息,提出基于电流故障分量差值的故障测距方法,流程如图 9 所示。

计算流程具体如下。

1) 通过交叉互联箱和直接接地箱测量得到故障发生前后的护层环流,计算同一电缆区段首末电缆护层环流差值作为反映电缆不同区段是否发生故障的特征电流,根据特征电流的幅值是否最大判断故障发生区段,幅值最大的特征电流对应的电缆区

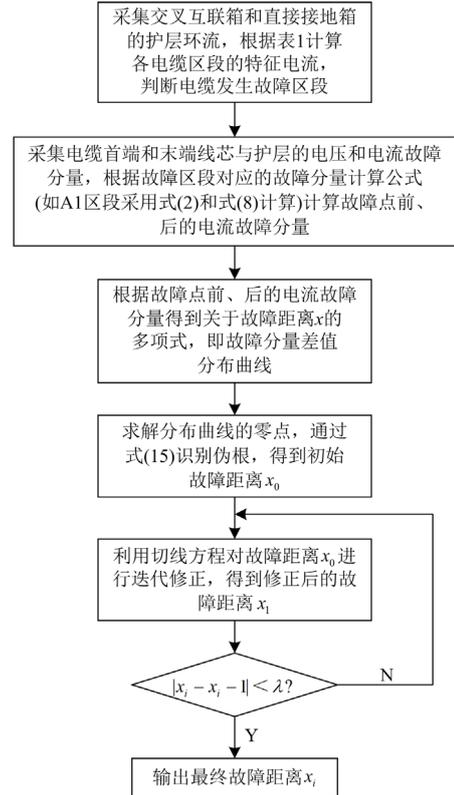


图 9 基于电流故障分量差值的交叉互联电缆故障测距流程  
Fig. 9 Fault location process of cross-connected cable based on current fault component difference

段即为故障发生区段。

2) 采集电缆首端和末端线芯与护层的电压、电流故障分量,根据 1) 判断得出的电缆故障发生区段,采用该故障区段对应公式计算故障点前的电流故障分量(如 A1 区段采用式(2)计算)和故障点后的电流故障分量(如 A1 区段采用式(8)计算)。

3) 根据 2) 计算得到的故障点前、后的电流故障分量,构造电流故障分量差值在故障区段的分布曲线多项式,求解曲线的零点,通过式(15)的判据识别伪根,得到故障距离初值。

4) 通过式(16)和式(17)求解切线方程的方法迭代修正故障距离初值,得到更为精确的故障距离。

5) 按式(18)对两次求解的故障距离进行收敛判断。如两次求解的故障距离满足收敛条件,则迭代结束,将最后一次求解的故障距离作为最终测距结果输出;否则,迭代过程继续。

## 4 仿真实验

### 4.1 仿真模型

为验证本文所提故障测距方法的有效性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 5 所示的仿真系统模

型, 分别进行线芯-护层接地故障、线芯-护层短接故障和护层接地故障的仿真测试。本文所提方法不受电压等级限制, 以 110 kV 电压等级为例进行仿真验证, 选用 YJLW03-64/110-1×800 型电缆, 其参数如表 2 所示, 按照表 2 中的参数搭建电缆仿真模型; 排列方式为品字形, 电缆总长度为 1.8 km, 交叉互联方式接地的三段电缆长度分别为 0.5 km、0.6 km、0.7 km; 采用频率相关(相位)模型, 采用傅里叶变换算法提取工频相量。

表 2 电缆仿真参数

Table 2 Cable simulation parameters

电缆参数	数值	电缆参数	数值
线芯外径/mm	34.2	金属护层内径/mm	78.6
半导体屏蔽层厚度/mm	2.0	金属护层外径/mm	82.6
绝缘厚度/mm	16.0	XLPE 相对介电常数	2.3
电缆外径/mm	94.0	大地电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	100
线芯电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	$1.68 \times 10^{-8}$	护层电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	$2.8 \times 10^{-8}$

4.2 算例验证

以 A1 区段发生单相接地故障为例, 对本文所提出故障测距方法进行验证, 在如下故障情况进行测距: 故障发生在电缆 A1 区段, 故障距离为 230 m, 故障类型为线芯-护层接地故障, 故障电阻为 0.5  $\Omega$ , 故障初相角为 0°。

通过图 9 的故障测距流程得到的测距结果如表 3 和图 10 所示。故障区段判断结果为 A1 区段, 通

表 3 A1 区段电缆发生故障判断结果

Table 3 Cable fault judgment results in section A1

特征电流名称	$I_{A1}$	$I_{A2}$	$I_{A3}$	$I_{B1}$	$I_{B2}$	$I_{B3}$	$I_{C1}$	$I_{C2}$	$I_{C3}$	故障区段判断结果
幅值/A	62.41	0.051	0.01	0.036	0.0062	0.104	0.23	0.74	0.014	A1

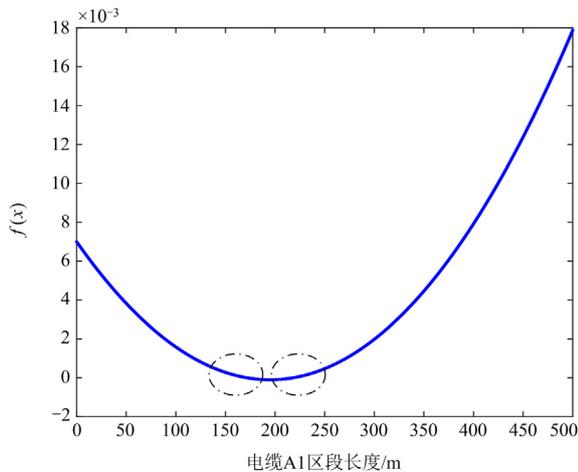


图 10 电缆 A1 区段故障时零点求解结果  
Fig. 10 Zero point solution results of cable A1 section failure

过求解零点得到的故障距离有两个值, 分别为 170.21 m 和 224.86 m, 通过图 11 所示的沿线电压故障分量差值判断认为第二个值更接近实际故障距离, 进一步通过切线相交的方法对所得故障距离进行修正, 得到最终故障测距结果为 230.34 m。综上可知, 所提方法具有较高的准确度, 能够准确判断故障发生区段和故障距离。以上仿真算例所用电缆长度仅为一个交叉互联大段长度, 工程中采用交叉互联方式接地的电缆线路可由多个交叉互联大段组合连接而成, 当任意一个交叉互联段发生短路故障时, 均可采用图 9 所示的故障测距流程得到故障距离, 测距方法使用并不受电缆长度限制。

4.3 适应性分析

取故障类型为线芯-护层对地故障、线芯-护层故障、护层对地故障, 故障电阻为 0.5  $\Omega$ , 故障初相角为 0°, 分别得到不同故障类型和故障距离下的测距结果如表 4 所示。以下如无特别说明, 表中故障距离为距离电缆首端的故障距离。

由表 4 可知, 在不同故障距离下, 电缆发生不同故障类型均可实现较为准确的定位, 相对误差最大不超过 0.8%。

当电缆故障类型为线芯-护层对地故障、故障初相角为 0°时, 不同故障电阻下的测距结果如表 5 所示。

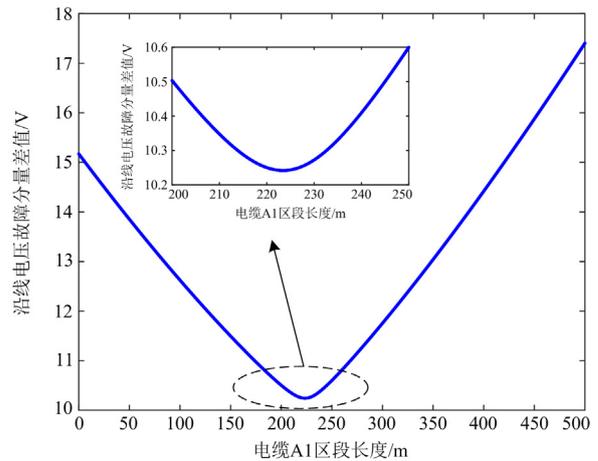


图 11 电缆 A1 区段故障时沿线电压故障分量差值  
Fig. 11 Difference value of fault components of voltage along the cable when A1 section fails

表 4 不同故障类型和故障距离下的测距结果

Table 4 Location results under different fault types and fault distances

故障类型		故障距离/m									
		130	210	370	430	570	630	770	810	970	1030
线芯-护层接地故障	测距结果/m	129.69	210.66	366.74	430.6	571.08	532.41	775.1	806.16	470.17	1030.58
	测距误差/%	0.017	0.036	0.18	0.033	0.06	0.13	0.69	0.21	0.0093	0.032
线芯-护层故障	测距结果/m	132.41	213.27	372.15	434.72	573.85	630.48	769.23	807.94	970.51	1035.02
	测距误差/%	0.13	0.18	0.11	0.26	0.21	0.027	0.042	0.11	0.028	0.28
护层接地故障	测距结果/m	130.24	223.19	370.93	428.72	575.45	637.34	772.01	817.66	973.42	1030.99
	测距误差/%	0.013	0.73	0.051	0.071	0.3	0.41	0.11	0.43	0.19	0.055

表 5 不同故障电阻下的测距结果

Table 5 Ranging results under different fault resistances

故障电阻/ $\Omega$		故障距离/m									
		170	290	330	470	540	670	710	870	930	1070
20	测距结果/m	178.37	290.54	334.95	462.38	548.97	670.04	709.83	869.01	928.51	1070.1
	测距误差/%	0.46	0.03	0.27	0.42	0.49	0.0022	0.0089	0.055	0.082	0.006
50	测距结果/m	175.18	293.41	331.44	474.98	549.56	669.67	710.05	870.55	930.16	1068.33
	测距误差/%	0.28	0.19	0.08	0.27	0.53	0.01	0.0031	0.03	0.0093	0.092
80	测距结果/m	174.93	290.08	338.96	470.18	540.35	668.47	711.3	868.98	930.12	1068.91
	测距误差/%	0.27	0.0044	0.49	0.01	0.019	0.084	0.072	0.056	0.0067	0.06
100	测距结果/m	178.44	290.87	339.03	472.14	540.15	668.44	708.73	869.02	929.82	1070.15
	测距误差/%	0.47	0.048	0.5	0.12	0.0086	0.086	0.07	0.054	0.0098	0.0085
150	测距结果/m	165.39	290.11	339.03	475.19	545.45	670.31	708.43	870.06	930.12	1068.92
	测距误差/%	0.85	0.0061	0.5	0.29	0.3	0.017	0.087	0.0032	0.0067	0.059

由表 5 可知,当故障电阻在 0~150  $\Omega$  之间变化时,随着故障点阻值的变化,测距方法受到的影响较小,具有较好的定位准确度,相对误差最大为 0.85%。

当电缆故障为线芯-护层对地故障、故障电阻为 20  $\Omega$  时,得到不同故障初相角下的测距误差如图 12 所示。

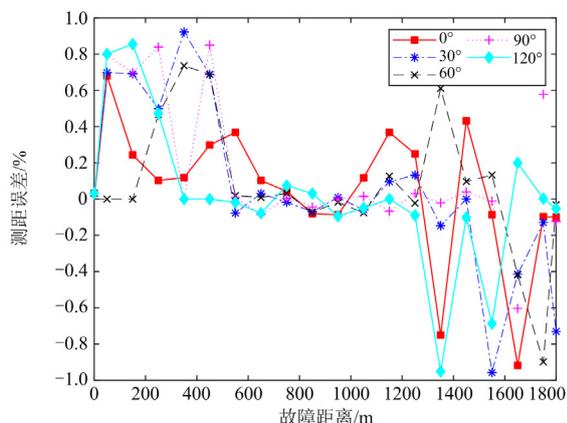


图 12 不同初相角下的测距误差

Fig. 12 Error of ranging results under different initial phase angles

由图 12 可知,当故障位置靠近线路两端时,故障初相角对故障定位准确度影响较大,但最大测距误差不超过 1%。

当电缆故障类型为线芯-护层对地故障、故障电阻为 15  $\Omega$ 、故障初相角为 0°时,不同噪声条件下故障测距误差如图 13 所示。

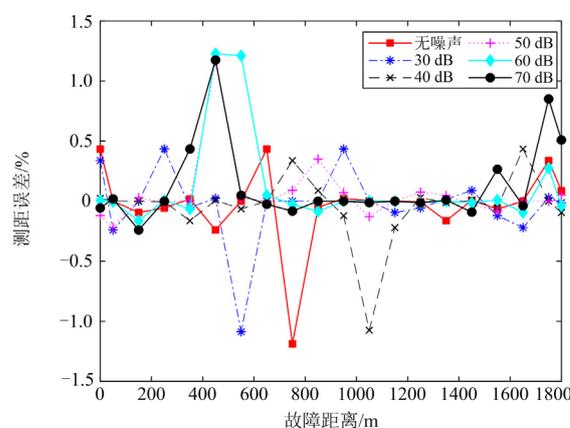


图 13 不同噪声下的测距误差

Fig. 13 Error of ranging results under different noises

由图 13 可知,在考虑噪声干扰的情况下,噪声对测距算法的精度存在一定的影响,但大多数情况下,测距结果误差为 1%以下,最大测距误差不超过 1.2%,依旧能满足测距需求。为了避免噪声的影响,可考虑在采集故障信号进行故障测距前对信号进行去噪处理以减小噪声的影响,提高测距的准确度。

#### 4.4 模型对比

本文采用的方法是考虑护层对线芯影响的测距方法(方法三),分别与仅考虑电缆线芯的测距方法(方法一)和仅考虑电缆线芯与护层阻抗而忽略线芯与护层间电容的测距方法(方法二)进行对比,采用 3 种方法在电缆故障类型为线芯-护层对地故障、电缆护层接地方式为电阻接地、故障电阻为  $5 \Omega$ 、故障初相角为  $0^\circ$  时进行故障测距,其测距误差对比如表 6 所示。

表 6 不同电缆测距方法结果对比  
Table 6 Comparison of results of different cable ranging methods

故障 距离/m	方法一		方法二		方法三	
	计算 距离/m	计算 误差/%	计算 距离/m	计算 误差/%	计算 距离/m	计算 误差/%
50	417.3	20.41	234.7	10.26	50.78	0.043
100	410.8	17.27	232	7.33	100.23	0.013
150	450.84	16.71	260	6.11	150.56	0.031
250	554.96	16.94	319.2	3.84	252.67	0.14
350	605.3	14.18	403	2.94	350.98	0.054
450	685.6	13.09	484.9	1.93	455.78	0.32
550	785.03	13.06	578	1.56	550.09	0.0049
650	694.16	2.44	658.6	0.48	651.46	0.081
750	765.6	0.87	766.8	0.93	750.45	0.025
850	866	0.89	862.4	0.69	852.67	0.15
950	964.5	0.8	962	0.67	950.25	0.013
1050	1135.6	4.75	1075.07	1.39	1056.7	0.37
1150	1303.5	8.52	1174.2	1.34	1154.78	0.26
1250	1403.87	8.54	1277.8	1.54	1256.7	0.37
1350	1614	14.67	1382.87	1.83	1350.56	0.031
1450	1790	18.89	1704.6	14.14	1453.87	0.21
1550	2104.5	30.8	1806	14.22	1550.6	0.033
1650	2376	40.33	2050	22.22	1654.7	0.26
1750	2544	44.11	2154.6	22.48	1754.52	0.25
1790	2766	54.22	2227	24.28	1798.26	0.45

由表 6 可知,方法一的计算误差最大,误差多在 10%~30%之间,其中故障距离在线路中间位置时测距误差相对较小;方法二的误差相对方法一要小,最大误差在 10%~25%之间;方法三的误差最小,基本在 1%以下。方法一在计算故障距离时,没有考虑护层结构的影响,而 3 种短路故障都和护层有关,

与实际情况不符。方法二考虑了护层阻抗的互感影响,但忽略了电容泄漏电流分量,当电缆长度较长时,故障点前后电流故障分量差值的计算值和真实值相差较大,不能准确定位故障距离。方法三在不同故障距离下均有较为准确的测量结果,验证了本文所提故障测距方法的准确性。

## 5 结论

本文考虑电缆交叉互联接地方式下线芯与护层间耦合关系,基于电缆双  $\pi$  集中参数模型提出了适用于电缆交叉互联接地方式下的故障测距方法,并通过仿真计算验证了该方法的正确性,具有较高的测距精度。

1) 该方法利用了交叉互联电缆不同测量点的护层环流特征作为判据实现对电缆故障区段的判定,缩短了故障测距范围,提高了故障测距的精确度。

2) 该方法考虑电缆交叉互联接地方式下线芯与护层之间的耦合作用建立了短路故障测距模型,推导了电缆发生故障时的电气量求解公式;采用非故障相对应故障点的故障分量特征作为测距依据,构造电流故障分量差值函数,将故障测距问题转化为零点求解问题,并通过切线方程对测距结果进行迭代修正,计算结果具有较好的准确性。

3) 经过仿真试验结果验证了该方法基本不受故障距离、故障类型、故障电阻、故障时刻等因素的影响,具有较高的测距精度;该方法在一定程度上会受到噪声影响,但也能取得较好的测距结果,能满足实际应用需求。

## 附录 A

由回路 1、2 和节点 1—4 可得式(A1)和式(A2)。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{fc}^{A1} &= \Delta \dot{I}_{hc}^{A1} - \Delta \dot{I}_{hc1}^{A1} - \Delta \dot{I}_{fc1}^{A1} = \\ \Delta \dot{I}_{hc}^{A1} - \frac{x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{hc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{hs}^{A1}) - \frac{x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{fc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{fs}^{A1}) = \\ \Delta \dot{I}_{hc}^{A1} - \frac{x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{hc}^{A1} + \Delta \dot{U}_{fc}^{A1}) + \frac{x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{hs}^{A1} + \Delta \dot{U}_{fs}^{A1}) \end{aligned} \quad (A1)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{fs}^{A1} &= \Delta \dot{I}_{hs}^{A1} - \Delta \dot{I}_{hs1}^{A1} + \Delta \dot{I}_{hc1}^{A1} + \Delta \dot{I}_{fc1}^{A1} - \Delta \dot{I}_{fs1}^{A1} = \\ \Delta \dot{I}_{hs}^{A1} - \frac{x}{2} y_{sg} \Delta \dot{U}_{hs}^{A1} + \frac{x}{2} y_{sg} (\Delta \dot{U}_{hc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{hs}^{A1}) + \\ \frac{x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{fc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{fs}^{A1}) - \frac{x}{2} y_{sg} \Delta \dot{U}_{fs}^{A1} = \\ \Delta \dot{I}_{hs}^{A1} + \frac{x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{hc}^{A1} + \Delta \dot{U}_{fc}^{A1}) - \frac{x}{2} (y_{cs} + y_{sg}) (\Delta \dot{U}_{hs}^{A1} + \Delta \dot{U}_{fs}^{A1}) \end{aligned} \quad (A2)$$

由回路 3、4 和节点 5—8 可得式(A3)和式(A4)。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{flc}^{A1} &= \Delta \dot{I}_{tc}^{A1} + \Delta \dot{I}_{tcl}^{A1} + \Delta \dot{I}_{flc1}^{A1} = \\ \Delta \dot{I}_{tc}^{A1} + \frac{L_1 - x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{tc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{ts}^{A1}) + \\ \frac{L_1 - x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{flc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{fls}^{A1}) &= \Delta \dot{I}_{tc}^{A1} + \frac{L_1 - x}{2} \end{aligned} \quad (A3)$$

$$\begin{aligned} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{tc}^{A1} + \Delta \dot{U}_{flc}^{A1}) - \frac{L_1 - x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{ts}^{A1} + \Delta \dot{U}_{fls}^{A1}) \\ \Delta \dot{I}_{fls}^{A1} = \Delta \dot{I}_{ts}^{A1} + \Delta \dot{I}_{ts1}^{A1} - \Delta \dot{I}_{tcl}^{A1} + \Delta \dot{I}_{fls1}^{A1} - \Delta \dot{I}_{flc1}^{A1} = \\ \Delta \dot{I}_{ts}^{A1} + \frac{L_1 - x}{2} y_{sg} \Delta \dot{U}_{ts}^{A1} - \frac{L_1 - x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{tc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{ts}^{A1}) + \\ \frac{L_1 - x}{2} y_{sg} \Delta \dot{U}_{fls}^{A1} - \frac{L_1 - x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{flc}^{A1} - \Delta \dot{U}_{fls}^{A1}) = \\ \Delta \dot{I}_{ts}^{A1} - \frac{L_1 - x}{2} y_{cs} (\Delta \dot{U}_{tc}^{A1} + \Delta \dot{U}_{flc}^{A1}) + \\ \frac{L_1 - x}{2} (y_{cs} + y_{sg}) (\Delta \dot{U}_{ts}^{A1} + \Delta \dot{U}_{fls}^{A1}) \end{aligned} \quad (A4)$$

## 参考文献

- [1] 田野, 郭金明, 傅明利, 等. 超高压交流 XLPE 电缆输电工程应用现状综述[J]. 南方电网技术, 2016, 10(9): 30-36.  
TIAN Ye, GUO Jinming, FU Mingli, et al. Review on power transmission projects with UHVAC XLPE cables[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(9): 30-36.
- [2] 王雪菲, 李京, 陈平, 等. 基于行波波综合相似度比较的电缆故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 51-59.  
WANG Xuefei, LI Jing, CHEN Ping, et al. Cable fault line selection based on comprehensive similarity comparison of traveling wave waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 51-59.
- [3] 李盛涛, 王诗航, 杨柳青, 等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能与基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4247-4255.  
LI Shengtao, WANG Shihang, YANG Liuqing, et al. Important properties and fundamental issues of the crosslinked polyethylene insulating materials used in high-voltage cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4247-4255.
- [4] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.  
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [5] 任乐朋, 王志强, 李国锋, 等. 基于首端护层电流的海底电缆故障诊断方法[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 31-39, 46.  
REN Lepeng, WANG Zhiqiang, LI Guofeng, et al. Fault diagnosis method of submarine cable based on head end sheath current[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 31-39, 46.
- [6] 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.
- [7] 黄泽华, 李锰, 刘裕涵, 等. 智能配电网自愈控制方案研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 492-496.  
HUANG Zehua, LI Meng, LIU Yuhan, et al. Research of smart distribution network self-healing scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 492-496.
- [8] 陈玉林, 龚庆武, 陈允平, 等. 高压电缆护层交叉互联时的行波故障测距[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 799-803.  
CHEN Yulin, GONG Qingwu, CHEN Yunping, et al. Traveling wave fault location for crossbonded HV cables[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 799-803.
- [9] 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.
- [10] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 29-40.  
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 29-40.
- [11] 许飞, 董新洲, 王宾, 等. 新型输电线路单端电气量组合故障测距方法及其试验研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 37-42.  
XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Combined single-end fault location method of transmission line and its experiments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 37-42.
- [12] 林芳雯, 吴俊勇, 郝亮亮. 基于视在伪阻抗辨识的直

- 流配电电缆单端在线故障定位方法[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2555-2561.
- LIN Fangwen, WU Junyong, HAO Liangliang. One-terminal on-line fault location method for DC distribution cable based on apparent pseudo-impedance identification[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2555-2561.
- [13] 索南加乐, 许文宣, 何世恩, 等. 基于双端电气量的串补输电线路故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 157-164.
- SUONAN Jiale, XU Wenxuan, HE Shi'en, et al. A fault location algorithm for series compensated transmission lines based on two-end information[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 157-164.
- [14] 赵铁军, 王秀斌, 虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 83-91.
- ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue. A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 83-91.
- [15] 唐昆明, 唐辰旭, 罗建, 等. 基于 RLC 模型参数辨识的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 54-60.
- TANG Kunming, TANG Chenxu, LUO Jian, et al. A single-ended time domain fault location method for distribution network cable single-phase earth fault based on RLC model parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 54-60.
- [16] 袁超, 储海军, 陈燕擎, 等. 考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 115-120.
- YUAN Chao, CHU Haijun, CHEN Yanqing, et al. Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 115-120.
- [17] REZAEI M, ABDOOS A A, FARZINFAR M. A precise analytical method for fault location in HVAC cables[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196.
- [18] XU Zhihan, SIDHU T S. Fault location method based on single-end measurements for underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2845-2854.
- [19] 唐进, 张妹, 林圣, 等. 计及金属护层结构的电缆单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1748-1756.
- TANG Jin, ZHANG Shu, LIN Sheng, et al. Single-terminal fault locating method of cables considering the metal sheath structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1748-1756.
- [20] 王华楠, 王霞, 余栋, 等. 110 kV 电缆中间接头的合闸过电压仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 127-134.
- WANG Huanan, WANG Xia, YU Dong, et al. Study on closing overvoltage simulation of 110 kV cable intermediate joint[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 127-134.
- [21] 吴志祥, 周凯, 何珉. 高压电缆交叉互联系统的 3 种优化接地方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 135-140.
- WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min. Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 135-140.
- [22] 尹丽菊, 于毅, 咸日常, 等. 基于无监督学习的交叉互联电缆行波测距方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(4): 89-94.
- YIN Liju, YU Yi, XIAN Richang, et al. Traveling wave ranging method for cross-bonded cable based on unsupervised learning[J]. Smart Power, 2021, 49(4): 89-94.
- [23] 赖胜杰, 夏成军, 池梓斌, 等. 考虑泄漏电流及层间耦合的高压电缆金属护套环流计算与分析[J/OL]. 高压电压技术: 1-12[2023-08-24]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220762>.
- LAI Shengjie, XIA Chengjun, CHI Zibin, et al. Calculation and analysis of circulating current in metal sheath for HV cable considering leakage current and interlayer coupling[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-12[2023-08-24]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220762>.
- [24] 林军, 程传玲. 平行/同杆双回线的单线故障精确测距算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 69-72.
- LIN Jun, CHENG Chuanling. Single-line fault locating for double circuits on same pole or in parallel[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 69-72.
- [25] ZHOU Chengke, YANG Yang, LI Mingzhen, et al. An integrated cable condition diagnosis and fault localization system via sheath current monitoring[C] // 2016 International Conference on Condition Monitoring & Diagnosis (CMD), September 25-28, 2016, Xi'an, China.

收稿日期: 2022-12-08; 修回日期: 2023-03-06

作者简介:

杨明嘉(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制; E-mail: gxudqgcxyymj@163.com

夏成军(1974—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析运行与控制、HVDC 和 FACTS。E-mail: cjxia@scut.edu.cn

(编辑 魏小丽)