

# 蚁群算法在同塔四回线故障测距中的应用

吴彪<sup>1</sup>, 于仲安<sup>1</sup>, 邹浩<sup>1</sup>, 邵能灵<sup>2</sup>

(1. 江西理工大学电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对同塔四回线故障测距方程难以求解的问题, 通过将优化算法引入测距方程, 提出一种基于蚁群算法的故障测距新方法。该算法基于分布参数模型, 利用线路参数解耦后得到的两端同向正序基频故障分量, 依据从线路两端分别推算至故障点电压幅值相等的原理列出故障测距方程。最后构造一元单峰值函数, 引入蚁群算法对函数进行优化求解。通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了该算法的可靠性和精确性。仿真结果表明该算法不受线路故障类型、系统电源功角差、过渡电阻、故障位置等因素的影响, 具有很强的工程实用价值。

**关键词:** 同塔四回线; 同向正序基频故障分量; 蚁群算法; 故障测距

## Fault location for four-parallel transmission lines on same tower based on ant colony algorithm

WU Biao<sup>1</sup>, YU Zhongan<sup>1</sup>, ZOU Hao<sup>1</sup>, TAI Nengling<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Through combining the ranging equation and optimization, a new method of fault location based on ant colony algorithm is presented to resolve the difficult ranging equation. Based on the distributing parameter transmission line model, the common positive sequence fundamental frequency fault component is obtained after decoupling the line parameters, the fault location function is deduced according to the principle that the amplitude of fault point's voltage calculated from the two ends of a line is equal, then one unknown number and single peak function is constructed, and the ant colony algorithm is introduced to resolve the function. PSCAD/EMTDC proved it is reliable and accurate, the results of simulation indicate the algorithm is immune to the effect of fault type, power phase shift, fault impedance, fault position and other factors on locating precision, which has very strong practical value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177066).

**Key words:** four-circuit lines on the same tower; common positive sequence fundamental frequency fault component; ant colony algorithm; fault location

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)20-0045-06

## 0 引言

随着我国经济建设的发展,土地资源日益紧缺,采用同塔架设多回输电线路已成为我国高压主干网发展的必然趋势,同塔四回线输电容量大,能有效减少线路走廊宽度,较大地节约工程投资,具有极大的经济效益和社会效益<sup>[1-3]</sup>。目前我国已有相当规模的同塔四回输电线路投入使用,对于发生故障后保护所采用的测距算法按原理不同可分为单端测距法<sup>[4]</sup>和双端测距法<sup>[5]</sup>。双端测距算法能充分利用线路信息,有效减少过渡电阻和负荷扰动对测距精度

的影响。

近年来,遗传算法<sup>[6]</sup>、神经网络<sup>[7]</sup>、最小二乘法<sup>[8]</sup>等智能优化算法逐步应用于各领域的函数优化中,但是这些算法都比较复杂,迭代初值对函数优化结果的影响较大。相对以上算法,蚁群算法<sup>[9]</sup>(Ant Colony Algorithm, ACA)对初始群体不敏感,且引入正反馈并行机制,拥有优良的分布式计算机制以及全局寻优能力<sup>[10]</sup>。本文提出了一种应用蚁群算法的同塔四回线故障测距新算法。首先根据同塔四回线分布参数模型,使用十二序分量法对同塔四回线进行解耦<sup>[11-12]</sup>,依据同向正序网图中两端电压量分别推算到故障点的电压幅值相等的原理构造测距方程,再将故障测距方程转化为蚁群算法所适用的一元函数优化寻优问题,

实现精确故障测距。PSCAD/EMTDC 仿真验证了该算法的有效性和精确性。

### 1 同塔四回线模型及相序变换

本文所研究的同塔四回线线路模型如图 1 所示。

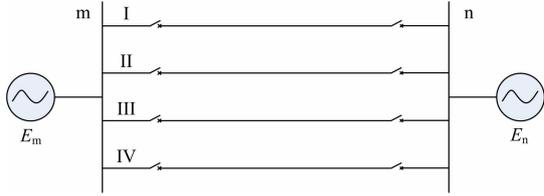


图 1 同塔四回线系统结构

Fig. 1 Structure of four jointed parallel lines

模型采用双侧电源供电，m 端、n 端电源电动势分别为  $E_m$  和  $E_n$ ，线路参数对称，四条输电线路从上到下分别标注为 I、II、III、IV，线路全长为  $L$ 。

利用十二序分量法可将同塔四回线线路任意一点处的电压和电流相量解耦为十二序电压、电流量。以 m 端电压、电流为例，其关系可以表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_{mefgh012} = \mathbf{R}^{-1} \times \dot{U}_{mABC} \\ \dot{I}_{mefgh012} = \mathbf{R}^{-1} \times \dot{I}_{mABC} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mABC} &= [\dot{U}_{mIA} \quad \dot{U}_{mIB} \quad \dot{U}_{mIC} \quad \dot{U}_{mIIA} \quad \dot{U}_{mIIB} \quad \dot{U}_{mIIC} \\ &\quad \dot{U}_{mIIIA} \quad \dot{U}_{mIIIB} \quad \dot{U}_{mIIIC} \quad \dot{U}_{mIIVA} \quad \dot{U}_{mIIVB} \quad \dot{U}_{mIIVC}]^T \\ \dot{I}_{mABC} &= [\dot{I}_{mIA} \quad \dot{I}_{mIB} \quad \dot{I}_{mIC} \quad \dot{I}_{mIIA} \quad \dot{I}_{mIIB} \quad \dot{I}_{mIIC} \\ &\quad \dot{I}_{mIIIA} \quad \dot{I}_{mIIIB} \quad \dot{I}_{mIIIC} \quad \dot{I}_{mIIVA} \quad \dot{I}_{mIIVB} \quad \dot{I}_{mIIVC}]^T \\ \dot{U}_{mefgh012} &= [\dot{U}_{me0} \quad \dot{U}_{mf0} \quad \dot{U}_{mgo} \quad \dot{U}_{mh0} \quad \dot{U}_{me1} \quad \dot{U}_{mf1} \\ &\quad \dot{U}_{mg1} \quad \dot{U}_{mh1} \quad \dot{U}_{me2} \quad \dot{U}_{mf2} \quad \dot{U}_{mg2} \quad \dot{U}_{mh2}]^T \\ \dot{I}_{mefgh012} &= [\dot{I}_{me0} \quad \dot{I}_{mf0} \quad \dot{I}_{mgo} \quad \dot{I}_{mh0} \quad \dot{I}_{me1} \quad \dot{I}_{mf1} \\ &\quad \dot{I}_{mg1} \quad \dot{I}_{mh1} \quad \dot{I}_{me2} \quad \dot{I}_{mf2} \quad \dot{I}_{mg2} \quad \dot{I}_{mh2}]^T \end{aligned}$$

式(1)中： $\mathbf{R}$  为十二序分量法的变换矩阵，具体形式参见文献[11]； $\dot{U}_{mABC}$ 、 $\dot{I}_{mABC}$  分别为同塔四回线变换前的电压、电流相量； $\dot{U}_{mefgh012}$ 、 $\dot{I}_{mefgh012}$  分别为变换后的电压、电流量。对于 n 端电气量，上述关系同样成立。

利用线路 m(或 n)端的电压、电流量，建立线路均匀传输线方程，计算线路上任意故障点 K 处的电压序分量

$$\dot{U}_{Kefgh012} = \dot{U}_{mefgh012} \times \mathbf{R}_{ch} - \dot{I}_{mefgh012} \times \mathbf{R}_{zc} \times \mathbf{R}_{sh} \quad (2)$$

由文献[11]可知，利用十二序变换矩阵  $\mathbf{R}$  可将同塔四回线的阻抗矩阵和导纳矩阵完全解耦为对角矩阵， $\mathbf{R}_{ch}$ 、 $\mathbf{R}_{sh}$ 、 $\mathbf{R}_{zc}$  分别为

$$\mathbf{R}_{ch} = \text{diag} \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{e0}x) & \cosh(\gamma_{f0}x) & \cosh(\gamma_{g0}x) \\ \cosh(\gamma_{h0}x) & \cosh(\gamma_{e1}x) & \cosh(\gamma_{f1}x) \\ \cosh(\gamma_{g1}x) & \cosh(\gamma_{h1}x) & \cosh(\gamma_{e2}x) \\ \cosh(\gamma_{f2}x) & \cosh(\gamma_{g2}x) & \cosh(\gamma_{h2}x) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{sh} = \text{diag} \begin{bmatrix} \sinh(\gamma_{e0}x) & \sinh(\gamma_{f0}x) & \sinh(\gamma_{g0}x) \\ \sinh(\gamma_{h0}x) & \sinh(\gamma_{e1}x) & \sinh(\gamma_{f1}x) \\ \sinh(\gamma_{g1}x) & \sinh(\gamma_{h1}x) & \sinh(\gamma_{e2}x) \\ \sinh(\gamma_{f2}x) & \sinh(\gamma_{g2}x) & \sinh(\gamma_{h2}x) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{zc} = \text{diag} \begin{bmatrix} Z_{ce0} & Z_{cf0} & Z_{cg0} & Z_{ch0} & Z_{ce1} & Z_{cf1} \\ Z_{cg1} & Z_{ch1} & Z_{ce2} & Z_{cf2} & Z_{cg2} & Z_{ch2} \end{bmatrix}$$

式(2)中： $\gamma_{ij} = \sqrt{Z_{ij} \times Y_{ij}}$ ， $Z_{cij} = \sqrt{Z_{ij} / Y_{ij}}$  ( $i=e, f, g, h, j=0, 1, 2$ ) 分别为各序分量的传播常数和波阻抗； $Z_{ij}$ 、 $Y_{ij}$  ( $i=e, f, g, h, j=0, 1, 2$ ) 分别为线路的十二序分量阻抗和导纳； $x$  为线路故障点到 m 端的距离。

考虑线路电容参数对测距的影响，采用分布参数线路模型，通过序分量解耦后，得到一组 e 序同向序分量和三组 f、g、h 序反向序分量。当线路发生单回线对称故障时同向负序和零序电流为 0，发生对称型跨线故障时反向电流为 0，而同向正序包含了各类线路故障时的故障电压电流信息，适用于同塔四回线各类故障测距。

### 2 故障测距方程

当同塔四回线发生单回线故障(假设故障类型为 IAG)，故障点 K 距 m 端距离为  $d$ 。

同向正序故障序网图如图 2 所示。

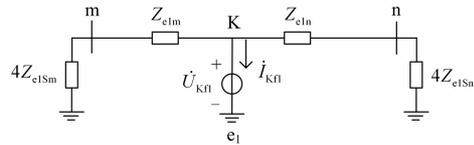


图 2 e 正序故障序网图

Fig. 2 Faulting component network of e sequence and positive sequence

考虑到使用双端电气工频量测距，测距精度将受负荷电流的影响，因此本文采用系统两端电气工频故障分量进行测距，以消除负荷电流对测距精度的影响。同塔四回线故障前的同向正序电压、电流量分别为  $\dot{U}'_{me1}$ 、 $\dot{U}'_{ne1}$ 、 $\dot{I}'_{me1}$ 、 $\dot{I}'_{ne1}$ ；故障后的同向正序电压、电流量分别为  $\dot{U}_{me1}$ 、 $\dot{U}_{ne1}$ 、 $\dot{I}_{me1}$ 、 $\dot{I}_{ne1}$ 。由此可得同向正序电压电流故障分量为

$$\Delta \dot{U}_{me1} = \dot{U}_{me1} - \dot{U}'_{me1}$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{nel} &= \dot{U}_{nel} - \dot{U}'_{nel} \\ \Delta \dot{I}_{me1} &= \dot{I}_{me1} - \dot{I}'_{me1} \\ \Delta \dot{I}_{ne1} &= \dot{I}_{ne1} - \dot{I}'_{ne1}\end{aligned}$$

利用线路 m 端和 n 端的工频电气故障分量, 建立线路方程, 可计算得线路上故障点的同向正序电压故障分量如下:

$$\Delta \dot{U}_{mK} = \Delta \dot{U}_{me1} \cosh(\gamma_{e1} d) - \Delta \dot{I}_{me1} Z_{ce1} \sinh(\gamma_{e1} d) \quad (3)$$

$$\Delta \dot{U}_{nK} = \left[ \Delta \dot{U}_{ne1} \cosh \gamma_{e1} (L-d) - \Delta \dot{I}_{ne1} Z_{ce1} \sinh \gamma_{e1} (L-d) \right] e^{j\sigma} \quad (4)$$

式(4)中,  $\sigma$  为线路两端数据采样的不同步角, 当同塔四回线线路发生故障后, 故障点的电压不能突变, 由 m 端建立的 e 序正序电压故障分量幅值和 n 端建立的同向正序电压故障分量幅值相等。由于采样不同步角  $\sigma$  只改变故障点电压分量的相位, 不影响幅值。据此可建立测距方程:

$$\begin{aligned}& \left| \Delta \dot{U}_{me1} \cosh(\gamma_{e1} d) - \Delta \dot{I}_{me1} Z_{ce1} \sinh(\gamma_{e1} d) \right| = \\ & \left| \Delta \dot{U}_{ne1} \cosh \gamma_{e1} (L-d) - \Delta \dot{I}_{ne1} Z_{ce1} \sinh \gamma_{e1} (L-d) \right|\end{aligned} \quad (5)$$

式(5)是一个超越方程, 到目前为止还没有完美的求解方法能求出精确的解析解, 一般只能靠迭代法求得满足精度的近似解, 但是一般的近似解法和迭代法都难以在迭代次数、初值选择、求解精度上有所突破, 尤其是在迭代初值的选择上, 对求解精度有较大影响。对于电力系统现场要求, 若由于迭代初值选择不当和迭代次数过多, 必将对继电保护的动作和效果造成一定影响, 虽然目前有梯度下降法<sup>[13]</sup>和拟牛顿法<sup>[14-15]</sup>等一系列改进型的迭代算法出现以降低迭代初值对最终求解精度的影响, 但同时也影响到了迭代次数和迭代速度。

采用对连续函数优化的蚁群算法, 能在搜索过程中避开局部极值点, 全局寻优能力强, 并且该算法对初始群体不敏感, 即蚁群算法的求解结果不依赖初始路线的选择, 而且在搜索过程中不需要进行人工的调整, 具有较强的鲁棒性, 寻优精度高。

### 3 蚁群算法应用

#### 3.1 测距方程优化模型

由式(5), 令

$$\begin{cases} A_1(d) = \left| \Delta \dot{U}_{me1} \cosh(\gamma_{e1} d) - \Delta \dot{I}_{me1} Z_{ce1} \sinh(\gamma_{e1} d) \right| \\ A_2(d) = \left| \Delta \dot{U}_{ne1} \cosh \gamma_{e1} (L-d) - \Delta \dot{I}_{ne1} Z_{ce1} \sinh \gamma_{e1} (L-d) \right| \end{cases}$$

得

$$A_1(d) = A_2(d) \quad (6)$$

将式(6)的变量  $d$  归一化为  $[0, 1]$  区间上的变量

$x_g$ , 并将式(6)平方可得

$$\begin{cases} A_1(x_g)^2 = a + jb \\ A_2(x_g)^2 = c + jg \end{cases} \quad (7)$$

式中

$$\begin{cases} a = \text{real} \left[ \left| \Delta \dot{U}_{me1} \cosh(\gamma_{e1} x_g) - \Delta \dot{I}_{me1} Z_{ce1} \sinh(\gamma_{e1} x_g) \right|^2 \right] \\ b = \text{imag} \left[ \left| \Delta \dot{U}_{me1} \cosh(\gamma_{e1} x_g) - \Delta \dot{I}_{me1} Z_{ce1} \sinh(\gamma_{e1} x_g) \right|^2 \right] \\ c = \text{real} \left[ \left| \Delta \dot{U}_{ne1} \cosh(\gamma_{e1} (1-x_g)) - \Delta \dot{I}_{ne1} Z_{ce1} \sinh(\gamma_{e1} (1-x_g)) \right|^2 \right] \\ g = \text{imag} \left[ \left| \Delta \dot{U}_{ne1} \cosh(\gamma_{e1} (1-x_g)) - \Delta \dot{I}_{ne1} Z_{ce1} \sinh(\gamma_{e1} (1-x_g)) \right|^2 \right] \end{cases}$$

则可将测距方程转化为如下二元函数优化寻优问题:

$$\begin{cases} F(x_g) = |a + jb - c - jd| \\ \min |F(x_g)| \quad 0 \leq x_g \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

应用连续函数寻优的蚁群算法, 即可准确得出故障距离  $d = x_g L$ 。

#### 3.2 用于测距方程优化的蚁群算法原理

设测距函数优化要求自变量精确到小数点后  $s$  位, 则  $x_g$  可由  $s$  个十进制数表示, 并构造  $s+2$  个层次, 共  $s \times 10 + 2$  个城市, 其中首末两层各一个城市, 中间  $s$  层从左至右分别表示自变量的十分位、百分位……这些城市中有连接通路的只有  $k-1$  层和  $k$  层 ( $k \in [2, s+2]$ )。蚂蚁  $n_1$  在一次循环中第  $m_1$  步所在城市记为  $T(n_1, m_1)$ , 蚂蚁总数为  $N_0$ 。

用于测距方程优化的蚁群算法步骤如下:

1) 初始化  $\tau_{vl}^k$  ( $\tau_{vl}^k$  为  $k-1$  层中代表  $v$  的城市与  $k$  层代表十进制数  $l$  的城市之间的残留信息量) 为一个较小值  $\tau_0$ 。

2) 将蚂蚁置于初始城市, 即  $T(n_1, 1) = 0$  ( $n_1 = 1, 2, 3, \dots, N_0$ )。

3) 对所在  $k-1$  层到  $k$  层的蚂蚁执行如下步骤 4)~8)。

4) 对蚂蚁执行如下步骤 5)~6)。

5) 计算每只蚂蚁在第  $k$  层到达的城市。

计算式如下:

$$T(n_1, k) = \begin{cases} \arg \max \{ \tau_{vl}^k \} & q < Q_0 \\ S_r \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $q$  为随机数;  $Q_0$  为  $[0, 1]$  上用于确定伪随机选择概率的常数;  $S_r$  表示用伪随机选择下一个城市。所谓伪随机是根据式(10)

$$p(v, l) = \tau_{vl}^k / \left( \sum_0^9 \tau_{vl}^k \right) \quad (10)$$

计算选择下一层中每一个城市的概率, 并按此概率

用遗传算法中的转盘式选择法确定要选择的的城市,这是本文蚁群算法与普通蚁群算法转移概率计算的不同之处。当蚂蚁在  $s+1$  层时唯一转移到  $s+2$  层。

6) 当蚂蚁到达新城市后,按式(11)进行局部更新:

$$\tau_{T(n_1, k-1), T(n_1, k)}^k \leftarrow (1-\rho)\tau_{T(n_1, k-1), T(n_1, k)}^k + \rho\tau_0 \quad (11)$$

式中,  $\rho \in (0,1)$  为城市连接处信息素蒸发系数,表示信息减弱的速度。

7) 由式(12)计算每只蚂蚁对应的函数值,选择最优函数值所对应蚂蚁,并由式(13)进行全局更新。

计算蚂蚁  $n$  对应的自变量值如下:

$$x(n_1) = \sum_{k=2}^{s+1} T(n_1, k) \times 10^{1-k} \quad (12)$$

选择函数最优解所对应蚂蚁为  $n_{\min} = \arg \min \{f(x(n_1))\}$ 。对最优蚂蚁所经过的路径做全局更新。

$$\tau_{ij}^k \leftarrow (1-\alpha)\tau_{ij}^k + \alpha f(n_{\min})^{-1} \quad (13)$$

式中:  $i = T(n_{\min}, k-1)$ ;  $j = T(n_{\min}, k)$ ;  $k \in [2, s+2]$ ;  $\alpha$  为  $(0, 1)$  上的常数。

8) 判断是否满足测距函数优化目标,若达到要求便输出结果。

该算法建立在普通蚁群算法的基础上,在求解测距函数优化问题上能在搜索过程中避开局部极值点,且对初始群体不敏感,即不论蚁群的初始分布是否对应较好的解,也不论蚁群是否初始分布在局部极值点上,蚁群都会不断地逼近全局最优解。

#### 4 PSCAD/EMTDC 仿真验证

模型如图 1 所示,为验证本文所提出的测距方法的正确性,利用 PSCAD/EMTDC 对线路发生的各种类型故障进行仿真实验。系统电压等级为 330 kV, m 端系统和 n 端系统正序阻抗为  $j25 \Omega$ , 系统零序阻抗为  $j40 \Omega$ 。线路全长为 200 km。线路参数经过解耦后各序网阻抗参数和导纳参数如表 1 所示。

表 2 为同塔四回线发生各类型故障后分别经 0.01  $\Omega$ 、50  $\Omega$ 、100  $\Omega$  过渡电阻在距离 m 端 20 km、70 km、120 km、170 km 处运用该测距算法所得的测距结果。其中 IAG 表示 A 相经过渡电阻接地故障, IAIBG 表示 I 回线 A 相和 II 回线 B 相跨线故障。由表 2 可知,本算法对同塔四回线各类故障均具有较高的测距精度。

图 3 给出了在 IAIBG 故障下两端电源功角差为 0 时过渡电阻和故障距离对测距精度的影响。图

4 给出了在 IAIBCG 故障下过渡电阻为 100  $\Omega$  时故障距离和两端电源功角差对测距精度的影响。图 5 给出了发生在 170 km 处 IAIBIICG 故障下两端电源功角差和过渡电阻对测距精度的影响。由图 3~图 5 可知,本文所用测距算法不受过渡电阻、系统电源功角差和故障位置等因素的影响,具有较高的测距精度。

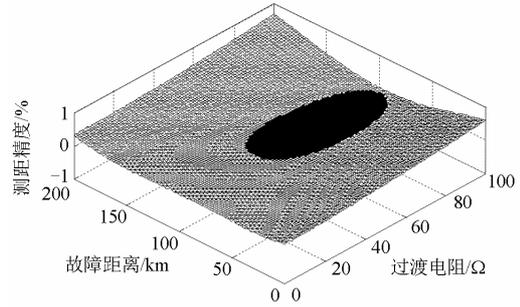


图 3 故障距离和故障电阻对 IAIBG 故障测距的影响  
Fig. 3 Influence of fault position and fault impedance on fault location for the IAIBG fault

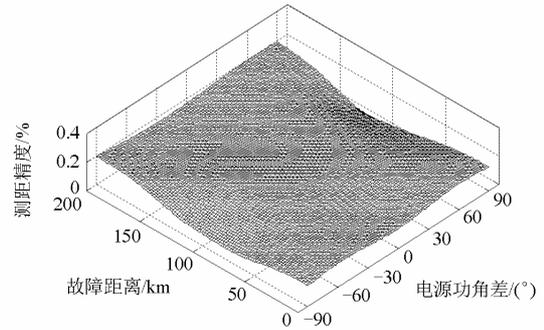


图 4 故障距离和电源功角差对 IAIBCG 故障测距的影响  
Fig. 4 Influence of fault position and power phase shift on fault location for the IAIBCG fault

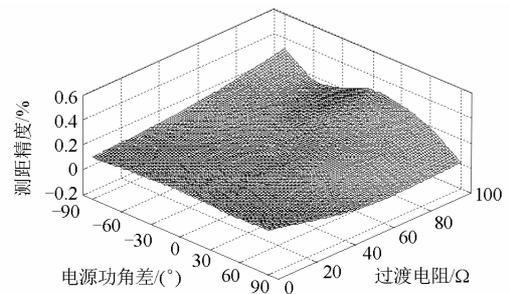


图 5 电源功角差和故障电阻对 IAIBIIC 故障测距的影响  
Fig. 5 Influence of power phase shift and fault impedance on fault location for the IAIBIIC fault

表 1 线路参数解耦后各序网阻抗参数和导纳参数  
Table 1 Decoupled parameters of impedance and admittance

| 线路参数              | 参数各序 | 零序参数 $R/\Omega$ | 正序参数 $R/\Omega$ | 负序参数 $R/\Omega$ |
|-------------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 阻抗参数              | e    | 0.9985+j3.4445  | 0.0348+j0.4162  | 0.0348+j0.4162  |
|                   | f    | 0.0348+j0.4162  | 0.0348+j0.4162  | 0.0348+j0.4162  |
|                   | g    | 0.0348+j0.4162  | 0.0348+j0.4162  | 0.0348+j0.4162  |
|                   | h    | 0.0348+j0.4162  | 0.0348+j0.4162  | 0.0348+j0.4162  |
| 导纳参数( $10^{-7}$ ) | e    | 1+j7.8569       | 1+j27.7439      | 1+j27.7439      |
|                   | f    | 1+j27.7439      | 1+j27.7439      | 1+j27.7439      |
|                   | g    | 1+j27.7439      | 1+j27.7439      | 1+j27.7439      |
|                   | h    | 1+j27.7439      | 1+j27.7439      | 1+j27.7439      |

表 2 测距结果  
Table 2 Results of fault location

| 故障类型           | 过渡电阻 $R/\Omega$ | 实际故障距离 $d/km$ |          |           |           | 最小相对误差/% | 最大相对误差/% |
|----------------|-----------------|---------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
|                |                 | 20            | 70       | 120       | 170       |          |          |
| IAG            | 0.01            | 20.179 8      | 70.186 5 | 119.791 7 | 169.197 2 | 0.089 9  | 0.401 4  |
|                | 50              | 19.153 8      | 69.558 1 | 120.048 3 | 170.679 3 | 0.024 2  | 0.423 1  |
|                | 100             | 18.130 9      | 69.181 9 | 120.509 9 | 171.564 3 | 0.254 9  | 0.934 6  |
| IABG           | 0.01            | 20.142 6      | 70.195 7 | 119.786 7 | 169.715 4 | 0.071 3  | 0.142 3  |
|                | 50              | 19.564 6      | 69.944 7 | 120.010 4 | 170.444 3 | 0.005 2  | 0.222 2  |
|                | 100             | 19.094 8      | 69.844 2 | 120.144 5 | 170.882 3 | 0.072 3  | 0.452 6  |
| IABCG          | 0.01            | 20.412 7      | 70.170 3 | 119.923 1 | 169.664 5 | 0.038 4  | 0.206 4  |
|                | 50              | 19.845 8      | 69.836 2 | 120.060 7 | 170.200 9 | 0.030 3  | 0.100 5  |
|                | 100             | 19.528 4      | 69.983 0 | 120.121 1 | 170.573 8 | 0.008 5  | 0.286 9  |
| IAIBG          | 0.01            | 20.141 9      | 70.195 6 | 119.787 5 | 169.715 3 | 0.070 9  | 0.142 3  |
|                | 50              | 19.565 1      | 69.944 3 | 120.010 8 | 170.443 9 | 0.005 4  | 0.222 0  |
|                | 100             | 19.093 5      | 69.847 4 | 120.144 7 | 170.882 5 | 0.072 4  | 0.453 2  |
| IAIBCG         | 0.01            | 20.413 0      | 70.170 8 | 119.924 5 | 169.663 5 | 0.037 8  | 0.206 5  |
|                | 50              | 19.847 3      | 69.835 8 | 120.061 2 | 170.201 0 | 0.030 6  | 0.100 5  |
|                | 100             | 19.529 3      | 69.982 6 | 120.121 4 | 170.573 8 | 0.008 7  | 0.286 9  |
| IAIIBCG        | 0.01            | 20.430 6      | 70.250 3 | 119.929 4 | 169.631 0 | 0.035 3  | 0.215 3  |
|                | 50              | 19.731 9      | 69.952 3 | 119.962 6 | 170.137 4 | 0.018 7  | 0.134 0  |
|                | 100             | 19.518 6      | 69.805 3 | 120.132 8 | 170.303 7 | 0.066 4  | 0.240 7  |
| IBCIIABCG      | 0.01            | 20.390 2      | 70.107 1 | 119.901 1 | 169.701 3 | 0.049 5  | 0.195 1  |
|                | 50              | 19.864 4      | 70.023 4 | 120.011 4 | 170.105 4 | 0.005 7  | 0.067 8  |
|                | 100             | 19.709 6      | 69.891 4 | 119.992 0 | 170.084 0 | 0.004 0  | 0.145 2  |
| IAIIBIICG      | 0.01            | 20.412 9      | 70.171 4 | 119.922 8 | 169.664 7 | 0.038 6  | 0.206 4  |
|                | 50              | 19.846 4      | 69.835 6 | 120.062 9 | 170.200 8 | 0.008 2  | 0.100 4  |
|                | 100             | 19.527 0      | 69.982 6 | 120.121 7 | 170.573 4 | 0.008 7  | 0.236 5  |
| IAIIBIICIVABCG | 0.01            | 20.471 4      | 70.195 1 | 119.872 9 | 169.600 4 | 0.063 6  | 0.235 7  |
|                | 50              | 19.892 4      | 70.037 0 | 120.047 9 | 170.102 5 | 0.018 5  | 0.053 8  |
|                | 100             | 19.763 6      | 69.842 6 | 120.006 4 | 170.266 6 | 0.003 2  | 0.133 3  |

## 5 结语

本文在深入研究同塔四回线线路耦合的基础上,利用十二序分量法将线路参数解耦后得到适用于同塔四回线各类故障测距的 e 序正序基频故障分量,采用长线路传输线方程建立双端测距方程,并将其转化为适用于蚁群算法的函数寻优问题。利用双端电气量建立的测距方程原理上不受过渡电阻的

影响,该算法原理简单,求解方便,不受系统电源功角差、过渡电阻的影响,具有较高的测距精度,且适用于同塔四回线各类型故障测距,具有很强的工程实用价值。

## 参考文献

- [1] 徐建国. 对国外超高压同塔多回送点线路技术的调研分析[J]. 电力建设, 2001, 22(7): 15-18.

XU Jianguo. Investigation and analysis on transmission line technique of EHV multiple-circuit on the same tower abroad[J]. Electric Power Construction, 2001, 22(7): 15-18.

[2] 黄爱华, 郑旭, 钱广忠. 同杆并架多回路技术的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 60-63.  
HUANG Aihua, ZHENG Xu, QIAN Guangzhong. Application of technology of constructing multiple circuits on the same tower[J]. East China Electric Power, 2006, 34(8): 60-63.

[3] 龚震东, 范春菊, 田羽. 一种适合于同杆4回线的故障测距方法[J]. 电力系统及其自动化, 2007, 31(23): 70-73.  
GONG Zhendong, FAN Chunju, TIAN Yu. A fault location algorithm suitable for jointed four transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 70-73.

[4] 王勃, 徐习东, 方愉东. 消除同走廊线路互感影响的输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 1-6.  
WANG Bo, XU Xidong, FANG Yudong. Fault location method for eliminating the influence of the mutual inductance of transmission lines in common corridor using oneterminal data[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 1-6.

[5] 张晓明, 徐岩, 王瑜, 等. 一种基于参数检测的双端故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 106-111.  
ZHANG Xiaoming, XU Yan, WANG Yu, et al. A fault location algorithm for two-terminal transmission lines based on parameter detection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 106-111.

[6] 刘涤尘, 杜新伟, 李媛, 等. 基于遗传算法的高压长线路双端故障测距研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 21-25.  
LIU Dichen, DU Xinwei, LI Yuan, et al. Fault location using two-terminal data for HV & long transmission line based on genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 21-25.

[7] 毛鹏, 孙雅明, 张兆宁. 基于神经网络原理的高压架空输电线路故障测距模型的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 66-73.  
MAO Peng, SUN Yaming, ZHANG Zhaoning. The model study of fault location system for high voltage overhead transmission line based on hierarchical distributed neural networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(3): 66-73.

[8] 陈允平, 吴夙, 龚庆武, 等. 输电线路故障定位的最小二乘法实现[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 54-56.  
CHEN Yunping, WU Su, GONG Qingwu, et al. Least square realization in fault location of transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 54-56.

[9] 陈焯. 用于连续函数优化的蚁群算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(6): 117-120.  
CHEN Ye. Ant colony system for continuous function optimization[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2004, 36(6): 117-120.

[10] 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法在连续空间寻优问题求解中的应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 45-48.  
WANG Lei, WU Qidi. Ant system algorithm in continuous space optimization[J]. Control and Decision, 2003, 18(1): 45-48.

[11] 田羽, 范春菊, 龚震东. 同杆4回线12序分量法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 35-39.  
TIAN Yu, FAN Chunju, GONG Zhendong. A study on twelve-sequence component method of four-parallel lines on the same towers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 35-39.

[12] 李博通, 李永丽, 陈莉, 等. 同塔四回线参数解耦及故障分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 1-9.  
LI Botong, LI Yongli, CHEN Li, et al. Method for parameter decoupling and fault analysis of four-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 1-9.

[13] 刘颖超, 张纪元. 梯度下降法[J]. 华东工学院学报, 1993(2): 12-22.  
LIU Yingchao, ZHANG Jiyuan. Gradient descent[J]. Journal of East China Institute of Technology, 1993(2): 12-22.

[14] 黄海, 林穗华. 几种修正拟牛顿法的比较[J]. 广西民族师范学院学报, 2011, 28(3): 8-11.  
HUANG Hai, LIN Suihua. Comparison of some modified quasi-Newton methods[J]. Journal of Nanning Junior Teachers College, 2011, 28(3): 8-11.

[15] 周伟军. 拟牛顿法及其收敛性[D]. 长沙: 湖南大学, 2006: 1-48.  
ZHOU Weijun. Quasi-Newton methods and their convergence properties[D]. Changsha: Hunan University, 2006: 1-48.

收稿日期: 2015-01-13; 修回日期: 2015-07-03

作者简介:

吴彪(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: 1249428143@qq.com

于仲安(1973-), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统分析、计算机监控技术及应用的研究工作;

邹浩(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制。

(编辑 魏小丽)