

基于粒子群-最小二乘混合算法的参数自适应故障测距方法

梁远升, 王 钢, 李海锋

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 对于双端故障测距频域法, 为了消除线路参数不确定性和双端数据不同步的影响, 必须建立多维非线性故障测距观测方程进行求解, 其求解方法的有效性将决定测距结果的成败, 而目前采用的方法均存在着局限性。为此, 利用粒子群优化算法的全局搜索能力与最小二乘迭代算法的快速精确收敛能力, 提出一种基于粒子群-最小二乘混合算法的参数自适应故障测距方法。为了提高实用性, 还针对前置低通滤波器和具有并联电抗器的输电线路等问题进行了研究。以 1 000 kV 特高压输电线路故障测距为例, 进行全面仿真验证, 证明了测距方案的正确性。

关键词: 故障测距; 粒子群优化算法; 最小二乘迭代算法

A parameter adaptive fault location scheme based on the combination of particle swarm optimization algorithm and least squares method

LIANG Yuan-sheng, WANG Gang, LI Hai-feng

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to eliminate the effects of transmission line parameter uncertainty and data unsynchronization for two terminals fault location schemes, a set of multidimensional nonlinear equations need to be set up, then solved by optimization algorithms. If the adopted optimal solving algorithm is unavailable, it could lead to fault location failure. For the limitations of conventional optimization algorithms, this paper proposes a novel fault location scheme which combines Least Squares Method (LSM) with Particle Swarm Optimization (PSO), so both the global optimal convergence ability of PSO and the fast and accurate convergence ability of LSM can be well employed for fault location. In order to enhance the practicability of the proposed scheme, the paper also researches on the problems such as low-pass pre-filter, transmission line with shunt reactors and elimination of transient components. The simulation based on a 1000kV transmission system model is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC, No. 50337010) and National Natural Science Foundation of Guangdong (No.05300167).

Key words: fault location; particle swarm optimization; least squares method

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)04-0016-07

0 引言

输电线路故障的准确测距对于减少停电检修时间, 提高电网输供电可靠性具有重大意义。目前故障测距的方法可分为行波法^[1,2]与阻抗法两大类, 其中阻抗法又可分为时域法^[3]和频域法^[4]。按照以时间换取精度的原则, 频域法故障测距比时域法更为有效。但是, 要实现频域法双端故障测距的高精度, 并具备实用性, 必须同时解决好两方面关键问题: 一、消除故障暂态影响的滤波算法; 二、包含线路自适应参数、双端数据不同步和故障距离等未

知量的多维非线性故障测距观测方程的求解算法。

由于在故障暂态过程中, 电压电流量不仅包含丰富的周期分量, 而且还包含衰减的非周期直流分量。受其影响, 频域法故障测距往往因难以获取准确的故障工频相量而受到限制。因此, 本文在前期工作中已提出了一种消除故障暂态影响的新型相量滤波算法^[5], 从根本上消除了故障暂态衰减直流分量的影响, 提高了故障测距频域法的精度。另一方面, 由于高压输电线路在运行过程中受沿线地质、气候等因素变化的影响, 线路参数往往偏离先前的实测值并随时发生改变, 这种线路参数不确定性将会给测距造成较大误差。此外, 两端数据不同步也将对故障测距造成影响。因此, 为了消除线路参数不确定性和双端数据不同步对测距精度的影响, 必

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50337010); 广东省自然科学基金项目 (05300167)

须联立正常状态冗余方程和故障状态方程,建立包含线路自适应参数、非同步相角和故障距离等6个未知量的频域故障测距观测方程^[6-9]。然而,对于这样的多维非线性故障测距观测方程,其求解问题却常被故障测距研究者所忽视,最小二乘迭代法依然被广泛应用于测距方程的求解。由于最小二乘迭代法对迭代初值非常敏感,往往无法保证收敛于全局最优解^[10,11],以致测距失败。因此,研究一种精确可靠的基于全局寻优算法的故障测距方法对于任何一种故障测距算法都具有现实意义。

近年来的研究表明,粒子群优化算法 PSO (Particle Swam Optimization) 对函数优化具有强大的生命力,并对优化目标函数的形式没有特殊要求,具有很强的全局寻优能力,算法简单,已在许多函数优化应用领域得到了广泛的研究和应用^[12-15]。本文在考虑线路参数的不确定性和双端数据的不同步情况下,构造故障测距观测方程,并将其转化为非线性优化问题,建立故障测距 PSO 求解模型进行求解。经过大量的仿真试验,验证了 PSO 算法具有很强的全局寻优能力;然而,从部分误差较大的搜索过程中发现,其搜索中后期的粒子群活跃程度较低,该过程的搜索并未能为寻找更优解做出贡献。可见,对于故障测距的应用,PSO 算法的深度搜索能力不足,未能保证每次搜索结果的精度。然而,利用 PSO 算法的全局寻优能力,结合最小二乘法在良好初值下的快速寻优能力,可以互补 PSO 算法的深度搜索能力的不足与最小二乘法对初值敏感的缺点。

因此,本文提出一种基于粒子群-最小二乘混合算法的参数自适应故障测距方法,充分利用 PSO 的全局搜索能力和最小二乘的精确快速收敛能力,保证了故障测距的准确性和可靠性。为了提高测距方案的实用性,还针对前置低通滤波器以及具有并联电抗器的输电线路等问题进行了研究,并以 1 000 kV 特高压输电线路的故障测距为例,进行了全面的仿真验证。

1 故障测距优化模型的构建

图 1 所示双端系统,假设线路完全换位,故障发生在距 M 端 kl 处 ($0 \leq k \leq 1$)。

分别对电压电流信号进行对称分量变换和傅立叶变换,可得电路方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_{MK} = \dot{U}_M \cosh \dot{\gamma}_k kl - \dot{I}_{MK} \dot{Z}_{ck} \sinh \dot{\gamma}_k kl \\ \dot{U}_{NK} = \dot{U}_N \cosh \dot{\gamma}_k (1-k)l - \dot{I}_{NK} \dot{Z}_{ck} \sinh \dot{\gamma}_k (1-k)l \end{cases} \quad (1)$$

其中: $K=1,2,0$ 表示正、负和零序; $\dot{U}_{MK}, \dot{U}_{NK}$ 分别为从 M、N 端推算到故障点的序电压; $\dot{U}_M, \dot{U}_N, \dot{I}_M, \dot{I}_N$ 分别为 M、N 端的序电压、电流;

$\dot{\gamma}_k, \dot{Z}_{ck}$ 分别为线路每千米的传播常数和波阻抗。

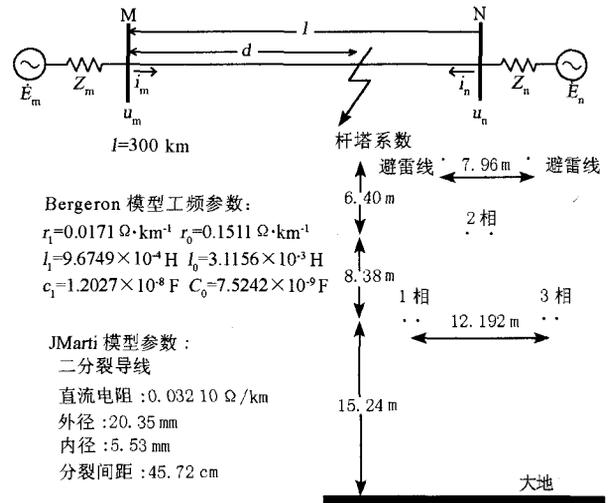


图 1 双电源输电系统模型

Fig.1 The transmission system model of two end sources

设两端数据不同步时间差对应的基波相量的相角偏差(非同步角)为 φ ,则由两侧电压和电流计算得到的故障点电压各序分量关系为:

$$\dot{U}_{MK} = \dot{U}_{NK} e^{j\varphi}$$

因此,利用故障后正、负序电路方程以及故障前的冗余信息,可构建如下方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_M \cosh \dot{\gamma}_1 kl - \dot{I}_M \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 kl = \\ [\dot{U}_N \cosh \dot{\gamma}_1 (1-k)l - \dot{I}_N \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 (1-k)l] e^{j\varphi} \\ \dot{U}_M \cosh \dot{\gamma}_2 kl - \dot{I}_M \dot{Z}_{c2} \sinh \dot{\gamma}_2 kl = \\ [\dot{U}_N \cosh \dot{\gamma}_2 (1-k)l - \dot{I}_N \dot{Z}_{c2} \sinh \dot{\gamma}_2 (1-k)l] e^{j\varphi} \\ \dot{U}_M \cosh \dot{\gamma}_0 l - \dot{I}_M \dot{Z}_{c0} \sinh \dot{\gamma}_0 l = \dot{U}_N e^{j\varphi} \\ \dot{U}_M = (\dot{U}_N \cosh \dot{\gamma}_1 l - \dot{I}_N \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 l) e^{j\varphi} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\dot{U}_M, \dot{U}_N, \dot{I}_M, \dot{I}_N$ 分别为故障前线路 M、N 端的电压、电流正序分量。为了便于建立优化求解模型,将式(2)的 $\varphi, \dot{\gamma}_k, \dot{Z}_{ck}$ 归一化为 $[0,1]$ 区间的 k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 变量参数:

$$\begin{cases} \varphi = (2k_0 - 1)\Delta\varphi \\ \dot{\gamma}_1 = (1 + 2k_1\Delta k_1 - \Delta k_1)\gamma_a + j(1 + 2k_2\Delta k_2 - \Delta k_2)\gamma_b \\ \dot{Z}_{c1} = (1 + 2k_3\Delta k_3 - \Delta k_3)Z_a + j(1 + 2k_4\Delta k_4 - \Delta k_4)Z_b \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\Delta\varphi$ 为预计最大非同步角; $\gamma_a, \gamma_b, Z_a, Z_b$ 分别为线路传播常数 $\dot{\gamma}_k$ 和波阻抗 \dot{Z}_{ck} 实际值的实虚部, $\Delta k_1 \sim \Delta k_4$ 为对应线路参数的预计最大偏差。由式(2)解耦后得到的方程组,可构造以 $k, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$ 为观测量的,且经归一化处理的 6 维观测方程组:

$$F(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \text{real}(Z_1(\mathbf{x})) \\ \text{real}(Z_2(\mathbf{x})) \\ \text{real}(Z_3(\mathbf{x})) \\ \text{real}(Z_4(\mathbf{x})) \\ \text{imag}(Z_1(\mathbf{x})) \\ \text{imag}(Z_2(\mathbf{x})) \\ \text{imag}(Z_3(\mathbf{x})) \\ \text{imag}(Z_4(\mathbf{x})) \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{x} = [k, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4]$$

$$Z_1(\mathbf{x}) = \dot{U}_{M1} \cosh \dot{\gamma}_1 kl - \dot{I}_{M1} \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 kl -$$

$$[\dot{U}_{N1} \cosh \dot{\gamma}_1 (1-k)l - \dot{I}_{N1} \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 (1-k)l] e^{j\varphi}$$

$$Z_2(\mathbf{x}) = \dot{U}_{M2} \cosh \dot{\gamma}_1 kl - \dot{I}_{M2} \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 kl -$$

$$[\dot{U}_{N2} \cosh \dot{\gamma}_1 (1-k)l - \dot{I}_{N2} \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 (1-k)l] e^{j\varphi}$$

$$Z_3(\mathbf{x}) = \dot{U}_M \cosh \dot{\gamma}_1 l - \dot{I}_M \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 l - \dot{U}_N e^{j\varphi}$$

$$Z_4(\mathbf{x}) = \dot{U}_M - (\dot{U}_N \cosh \dot{\gamma}_1 l - \dot{I}_N \dot{Z}_{c1} \sinh \dot{\gamma}_1 l) e^{j\varphi}$$

由此, 测距方程可转化为优化求解问题, 即:

$$\begin{aligned} \min |F(\mathbf{x})| \quad (\mathbf{x} = [k, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4]^T) \\ \text{s.t. } 0 \leq k \leq 1, \quad 0 \leq k_i \leq 1, (i = 0, 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (5)$$

3 故障测距的 PSO 求解模型的构建

3.1 PSO 的基本原理

Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出了一种在模拟鸟类等群体智能行为的基础上发展起来的新进化算法, 称为粒子群优化算法。它是一种基于群体智能的随机优化算法, 其基本思想是通过群体中个体间的协作和信息共享来寻找最优解^[12]。

算法采用速度-位置搜索模型, 每个粒子代表解空间的一个候选解, 解的优劣程度由适应函数 (*fitness*) 决定, 适应函数根据优化目标定义。设解空间维数为 d , 第 i 个粒子的速度 $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 决定了该粒子在搜索空间单位迭代次数的位移。PSO 随机初始化一群粒子, 其中第 i 个粒子在 d 维解空间中的位置为 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 。每一次迭代, 各粒子通过动态跟踪两个极值来更新其速度和位置。第一个是粒子个体从初始到当前迭代次数搜索产生的最优解, 即个体极值点 $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$; 第二个是整个粒子种群目前的最优解, 即全局极值点 $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_d)$ 。粒子根据以下公式更新其速度和位置^[16]:

$$\mathbf{v}_{\text{new},i} = c_0 \mathbf{v}_i + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (\mathbf{g} - \mathbf{x}_i) \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_{\text{new},i} = \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_{\text{new},i} \quad (7)$$

其中: rand_1 和 rand_2 都为均匀分布在 $[0,1]$ 区间的随机数; c_0 称为惯性权重因子, c_1 和 c_2 分别称为个体

和全局学习因子。粒子在解空间内不断跟踪个体和全局极值进行搜索, 直到达到规定的迭代次数 N_{max} 或满足规定的误差标准为止。

1999 年, Clerc 对算法的数学研究证明, 采用收敛因子模型能确保算法的收敛性, 粒子速度限制在各维度允许的变化范围内, 可以取得更好的优化效果^[17,18]。故本文取典型的设置: $c_0 = 0.729, c_1 =$

$c_2 = 1.4962$, 粒子各维的最大速度 $v_{\text{max}} = 1$ 。

3.2 粒子群与适应度函数的定义及粒子位置的调整

对应式(5)的 $\mathbf{x} = [k, k_0, k_1, k_2, k_3, k_4]$, 定义个数为 n 、维数为 6 的粒子群 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i6}), (i = 1, 2, \dots, n)$ 。利用计算机的多处理技术, 粒子的个数对算法的效率影响较小, 为了提高全局搜索能力, n 可取较大的值。

根据故障测距观测方程, 即式(4), 可将适应度函数定义为:

$$\text{fitness}(\mathbf{x}_i) = |F(\mathbf{x}_i)| \quad (8)$$

另外, 使用式(7)前需要把 $\mathbf{v}_{\text{new},i}$ 各维值控制在最大速度 $v_{\text{max}} = 1$ 内。使用式(7)更新粒子位置后, 若粒子的第 1 维值 x_{i1} 超出 $[0,1]$ 区间, 则采用下式处理:

$$x_{i1} = \begin{cases} -x_{i1} & (x_{i1} < 0) \\ x_{i1} & (0 \leq x_{i1} \leq 1) \\ 2 - x_{i1} & (x_{i1} > 1) \end{cases} \quad (9)$$

4 基于粒子群-最小二乘混合算法的故障测距

4.1 PSO 算法的不足

PSO 算法解决多维优化问题时, 早熟收敛现象经常出现; 观察大量的 PSO 搜索过程, 可以发现, 虽然各次的 PSO 搜索结果均能趋向于最优解, 但在搜索中后期粒子群的运动状态近乎静止, 不活跃的粒子群对更优极值的搜索所起的作用并不大。如图 2 所示。

本文对故障测距 PSO 求解模型进行了大量的测试, 图 2 为某次测试粒子群第一维的搜索轨迹, 该次测试的实际故障为 5 km 处, 线路全长为 300 km, 即第一维的最优解应为 0.0166。从图 2 的放大图中的轨迹可见, 在中后期长达 400 多次的搜索过程中, 粒子群第一维的运动幅度不足 0.001, 活跃程度非常小。按 300 km 计算, 即粒子的第一维仅在 0.3 km 内移动, 并未对进一步搜索更优极值带来贡献。当最大搜索次数取 600 时, 搜索结果则为 0.0213, 对应的测距误差为 1.41 km。由此可见, PSO 的深度搜索能力不能满足高精度故障测距的要求。

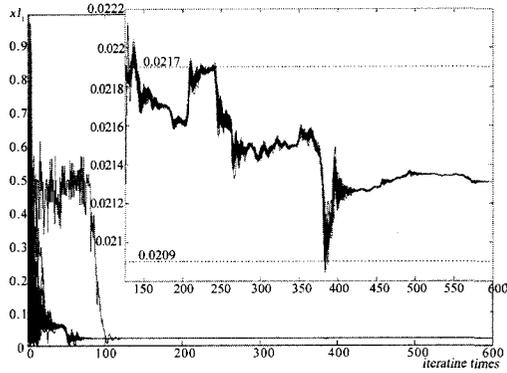


图 2 粒子第一维搜索轨迹

Fig.2 The track of the 1st dimension of particle swarm

4.2 最小二乘迭代法

设非线性方程为： $f_i(x) = 0$ ；

其中： $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, $i = 1, 2, \dots, m$ ($m > n$)。

将方程在某一代点 $x^{(l)}$ 附近进行泰勒展开，略去高次项，可得：

$$\Delta x^{(l)} = -(J^{(l)T} J^{(l)})^{-1} J^{(l)T} f_i(x^{(l)})$$

$$x^{(l+1)} = x^{(l)} + \Delta x^{(l)}$$

其中： $J = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x} \right|_{x=x^{(l)}}$ 为方程在 $x^{(l)}$ 处的 Jacobi 矩阵。

通过迭代，当 $|\Delta x^{(l)}| < \epsilon$ (ϵ 为一极小正数)，迭代收敛于 $x^{(l)}$ 。以上为最小二乘法 LSM (Least Squares Method) 的基本原理。

当最小二乘迭代初值远离真实解时，被略去的高次项造成的影响过大，将可能导致无法收敛或收敛于局部极值。然而，当迭代初值在真实解的附近时，被略去的高次项所造成的偏差较小，迭代收敛较快。

4.3 基于粒子群-最小二乘混合算法的故障测距方法

尽管 PSO 算法较难保证测距的精度，但其全局寻优能力有助于缩小求解范围，逼近最优解。而最小二乘法的缺陷是对迭代初值敏感，但是当迭代初值较接近于真实解时，收敛速度及其精确度较高。因此，将 PSO 的全局寻优能力与最小二乘法在全局最优解邻域内的快速收敛能力相结合，可实现两者的互补。

图 3 为基于粒子群-最小二乘混合算法的线路参数自适应故障测距流程框图。首先，采用 PSO 算法进行寻优；然后以 PSO 寻找的解 g 作为最小二乘法的迭代初值，进行最小二乘迭代，最后以最小二乘收敛值作为最终的最优解。

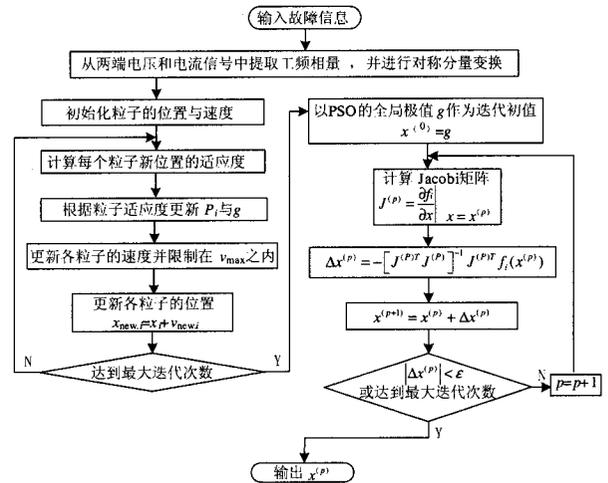


图 3 基于粒子群-最小二乘混合算法的故障测距流程框图

Fig.3 Flow chart of fault location scheme based on the combination of PSO and LSM

5 混合算法性能的仿真比较

利用电磁暂态仿真程序 ATP-EMTP，采用如图 1 所示的 1 000 kV 特高压输电系统模型进行大量的仿真分析。线路模型采用更切合工程实际的 JMarti 依频模型。为了便于分析验证算法的性能，在此故障电气信息取故障稳态（故障后 100 ms）的电压、电流量，分别基于最小二乘、PSO 和混合算法进行故障测距仿真计算。并且，在仿真中分别设置线路在不同位置发生各种类型的短路故障，过渡电阻为 10 Ω。

5.1 基于最小二乘的故障测距计算结果

表 1 基于最小二乘法的测距计算结果（单位：km）

Tab.1 Results of fault location based on LSM										
δ	φ	5 km	10 km	50 km	100 km	150 km	200 km	250 km	290 km	295 km
0°	14.4°	4.999	9.999	49.999	99.998	144.312	199.998	249.998	289.999	294.999
	28.8°	4.999	9.999	49.999	99.998	32.208	125.641	249.998	289.999	294.999
	43.2°	64.413	69.398	109.278	99.998	112.160	10.743	266.178	289.999	294.999
	57.6°	285.780	128.989	168.865	218.713	85.727	201.255	51.883	286.951	0.404
15°	14.4°	5.003	10.005	50.008	100.002	149.999	200.002	250.005	290.002	295.002
	28.8°	196.727	15.718	107.275	34.965	242.983	194.563	210.070	128.559	129.971
	43.2°	275.402	10.867	279.558	50.993	162.377	295.608	210.070	54.663	295.002
	57.6°	218.593	136.382	244.470	63.965	127.322	250.204	203.809	134.604	43.981
30°	14.4°	5.002	10.003	50.006	100.002	149.999	200.001	250.002	290.001	295.001
	28.8°	0.488	295.897	50.006	100.002	149.999	200.001	250.002	290.001	295.001
	43.2°	192.371	287.969	221.909	17.712	149.999	200.001	250.002	290.001	295.001
	57.6°	59.665	154.521	181.683	100.002	149.999	200.001	250.002	144.101	24.949

表 1 仅列出了单相短路故障情况下基于最小二乘的故障测距方法的部分仿真计算结果，非同步角 φ 分别为 14.4°、28.8°、43.2°、57.6°，系统两侧电源电势

的夹角 δ 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ，并假设已知的线路参数偏离实际参数 10%。由表 1 可见，非同步角越大，测距计算越不稳定；最小二乘法在求解多维的测距观测方程时，稳定性较差，甚至造成测距失败。然而，由测距成功的计算结果可见，最小二乘法的计算精度是较高的。

5.2 基于 PSO 的故障测距计算结果误差统计

表 2 仅列出了单相短路故障情况下基于 PSO 的故障测距方法的计算结果误差统计， φ 仅取 57.6° ， δ 分别取 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ，并假设已知的线路参数偏离实际参数 10%。每种情况的统计次数均为 100 次，表中“[0.0,0.1]”列的统计数据表示计算误差在 0.0 km 至 0.1 km 范围内的概率，其余各列类同。“ ≥ 1.0 ”列的统计数据表示误差大于等于 1 km 的概率。

表 2 基于 PSO 算法的测距计算结果误差水平统计 (单位: km)

Tab.2 Error statistics of fault location based on PSO algorithm

故障	[0.0, 0.1)	[0.1, 0.2)	[0.2, 0.3)	[0.3, 0.4)	[0.4, 0.5)	[0.5, 0.6)	[0.6, 0.7)	[0.7, 0.8)	[0.8, 0.9)	[0.9, 1.0)	最大 距离 ≥ 1.0
$\delta=0^\circ, \varphi=57.6^\circ$											
5	14.0%	6.0%	8.0%	10.0%	3.0%	13.0%	6.0%	7.0%	5.0%	4.0%	24.0%
10	9.0%	8.0%	13.0%	12.0%	8.0%	9.0%	10.0%	8.0%	1.0%	3.0%	19.0%
50	8.0%	12.0%	22.0%	16.0%	14.0%	11.0%	7.0%	6.0%	3.0%	0.0%	1.0%
100	11.0%	33.0%	39.0%	13.0%	1.0%	3.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.590
150	17.0%	62.0%	21.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.288
200	8.0%	17.0%	45.0%	18.0%	6.0%	3.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%
250	6.0%	4.0%	5.0%	14.0%	20.0%	17.0%	9.0%	9.0%	3.0%	4.0%	9.0%
290	2.0%	9.0%	2.0%	7.0%	4.0%	2.0%	5.0%	3.0%	11.0%	6.0%	49.0%
295	6.0%	8.0%	4.0%	3.0%	7.0%	4.0%	8.0%	6.0%	4.0%	10.0%	40.0%
$\delta=15^\circ, \varphi=57.6^\circ$											
5	2.0%	2.0%	1.0%	0.0%	1.0%	5.0%	1.0%	6.0%	11.0%	5.0%	64.0%
10	1.0%	2.0%	2.0%	4.0%	3.0%	8.0%	3.0%	6.0%	6.0%	4.0%	61.0%
50	5.0%	1.0%	6.0%	8.0%	9.0%	7.0%	10.0%	12.0%	12.0%	6.0%	24.0%
100	9.0%	18.0%	18.0%	15.0%	22.0%	8.0%	6.0%	2.0%	1.0%	0.0%	1.013
150	16.0%	30.0%	28.0%	17.0%	8.0%	0.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.610
200	9.0%	19.0%	21.0%	30.0%	12.0%	6.0%	2.0%	1.0%	0.0%	1.0%	0.725
250	6.0%	12.0%	10.0%	11.0%	13.0%	13.0%	13.0%	7.0%	6.0%	3.0%	1.703
290	4.0%	7.0%	8.0%	7.0%	9.0%	7.0%	5.0%	10.0%	14.0%	4.0%	25.0%
295	0.0%	10.0%	12.0%	3.0%	9.0%	7.0%	10.0%	9.0%	8.0%	8.0%	24.0%
$\delta=30^\circ, \varphi=57.6^\circ$											
5	2.0%	5.0%	10.0%	2.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	4.0%	4.0%	47.0%
10	2.0%	4.0%	7.0%	4.0%	3.0%	4.0%	9.0%	8.0%	2.0%	9.0%	48.0%
50	2.0%	12.0%	8.0%	7.0%	10.0%	9.0%	10.0%	9.0%	10.0%	8.0%	15.0%
100	10.0%	21.0%	18.0%	11.0%	15.0%	14.0%	2.0%	4.0%	2.0%	0.0%	3.0%
150	30.0%	17.0%	23.0%	9.0%	15.0%	3.0%	2.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.752
200	15.0%	31.0%	21.0%	16.0%	12.0%	2.0%	2.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.740
250	20.0%	26.0%	18.0%	20.0%	8.0%	4.0%	3.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.741
290	11.0%	33.0%	21.0%	10.0%	9.0%	5.0%	4.0%	4.0%	2.0%	1.0%	0.904
295	13.0%	27.0%	17.0%	14.0%	9.0%	4.0%	6.0%	3.0%	3.0%	3.0%	1.011

由各列统计数据可知，采用 PSO 算法进行测距计算的误差水平并不理想，尤其是故障发生在线路

两端时。当 $\varphi=15^\circ, \delta=57.6^\circ$ ，故障距离在 5 km 和 10 km 处时，计算误差大于等于 1 km 的概率超过 60%，最大误差为 5.000 km，搜索效果是不能接受的。尽管如此，PSO 的全局搜索能力是应该肯定的，其搜索结果作为最小二乘法的迭代初值是可以接受的。

5.3 基于粒子群-最小二乘混合算法的故障测距结果

表 3 给出了本文提出的基于粒子群-最小二乘混合算法的故障测距结果，其中 φ 取 57.6° ， δ 分别取 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ，并假设已知的线路参数偏离实际参数 30%，故障类型分别为单相接地、两相接地、相间短路和三相短路。可见，基于粒子群-最小二乘混合算法的故障测距方法能稳定精确地求解多维故障测距观测方程，有效地解决在考虑线路参数自适应以及两端数据非同步情况下故障测距方法的精度不足和稳定性较差等问题。

表 3 粒子群-最小二乘混合算法计算结果 (单位: km)

Tab.3 Results of fault location based on PSO-LSM

	δ	5 km	10 km	50 km	100 km	150 km	200 km	250 km	290 km	295 km
单相 接地	0°	4.999	9.999	49.999	99.998	149.999	199.998	249.998	289.995	294.999
	15°	5.002	10.004	50.008	100.002	150.000	200.002	250.004	290.002	295.001
	30°	5.002	10.003	50.006	100.002	150.000	200.001	250.002	290.001	295.001
两相 接地	0°	4.999	9.999	49.999	99.998	149.999	199.997	249.998	289.995	294.999
	15°	5.003	10.005	50.008	100.002	149.999	200.003	250.005	289.991	295.001
	30°	5.002	10.003	50.006	100.002	149.999	200.001	250.003	289.990	295.000
相间 短路	0°	4.999	9.999	49.999	99.998	149.999	199.997	249.998	289.991	294.999
	15°	5.003	10.005	50.008	100.002	149.999	200.003	250.005	289.993	295.001
	30°	5.002	10.003	50.006	100.002	149.999	200.002	250.003	289.991	295.000
三相 短路	0°	4.999	9.999	49.999	99.998	150.000	199.998	249.998	289.991	294.999
	15°	5.002	10.005	50.008	100.002	149.999	200.003	250.006	290.011	295.000
	30°	5.002	10.003	50.006	100.002	149.999	200.001	250.003	290.003	295.000

6 混合算法的实用性研究

为了实现算法的实用性，本文对以下三点进行了研究：

1) 由于超/特高压输电线路电容充电电流大，通常必须在输电线路两端装设并联电抗器以补偿电容电流，控制工频过电压^[19]。因此，本文对于具有并联电抗器的输电线，将两侧的电流进行了处理：

$$i'_k = i_k - \dot{U}_k / Z_{LK}$$

其中 Z_{LK} 为并联电抗器的各序阻抗。

2) 在实际的故障测距应用中，受保护动作时间的限制，只能利用故障发生至保护动作断路器跳开之前这一故障暂态过程的电压、电流信息进行测距计算。因此，本文采用前期工作提出的一种高精度的相量滤波算法^[5]，从故障暂态信息中提取故障基频信息，降低衰减直流分量的影响，以提高基于故障暂态的频域故障测距法的精度。

3) 本文采用的采样频率为 5 kHz, 根据采样定理, 最多仅能还原 50 次以内谐波, 50 次以上的谐波高频信号将无法获取, 且经全波傅氏算法还将发生畸变, 从而影响故障测距的精度。即使对于 25 次至 50 次的谐波, 其每周采样点数不足 4 个, 基于全波傅氏算法, 该频段的谐波滤除精度也显然不足。因此, 本文增设了截止频率为 500 Hz 的前置低通滤波, 在算例验算时用 Butterworth 数字滤波器作模拟。

7 算例

为了验证本文所提测距方法的正确性, 以图 1 所示的 1 000 kV 特高压输电系统模型为基础, 其中两侧系统电源摆开 5° 功角, 线路两侧装设补偿度为 90% 的并联电抗器, 对不同的故障时刻、故障类型和过渡电阻情况进行了全面的仿真验证, 并对有无前置低通滤波器的效果进行了分析比较, 部分测距结果见表 4 和表 5。表 4 和表 5 所列为不同故障合闸角(范围 90° , 间隔 18°) 误差最大的测距结果。由表可见, 在故障暂态下, 当无前置滤波时金属性接地的最大测距误差为 3.663 km, 相对误差达到 1.22%, 高阻接地的最大测距误差为 2.757 km, 相对误差达到 0.919%。而采用前置低通滤波后, 金

表 4 无前置低通滤波的测距结果 (单位: km)

Tab.4 Results of fault location without pre-low-pass filter

故障类型	5	10	50	100	150	200	250	290	295	平均	最大	
										误差	误差	
金属性短路	单相	4.81	9.77	49.79	100.18	149.98	199.92	250.15	290.22	295.20	0.088	0.231
	两相	5.94	9.37	50.37	101.76	149.98	200.50	249.43	290.87	291.34	0.638	3.663
	相间	6.76	9.51	50.31	98.88	149.99	200.49	249.68	290.43	293.16	0.517	1.841
	三相	5.88	9.71	49.98	99.62	149.99	200.19	249.97	290.25	294.11	0.319	0.892
高阻接地	单相	5.34	10.32	49.80	99.40	149.99	200.18	250.18	289.80	294.79	0.152	0.599
	两相	4.87	9.56	50.31	102.76	149.98	200.32	249.83	290.42	295.11	0.261	2.757
	相间	4.87	9.54	50.33	102.33	149.97	200.32	249.84	290.40	295.11	0.226	2.331
	三相	4.92	9.71	50.05	100.18	149.99	200.11	249.93	290.25	295.06	0.101	0.286

表 5 具有前置低通滤波的测距结果 (单位: km)

Tab.5 Results of fault location with pre-low-pass filter

故障类型	5	10	50	100	150	200	250	290	295	平均	最大	
										误差	误差	
金属性短路	单相	4.77	9.76	49.70	100.17	149.98	199.91	250.23	290.25	295.24	0.120	0.305
	两相	4.52	9.46	49.65	100.25	149.99	199.89	250.19	290.44	295.48	0.164	0.541
	相间	4.74	9.85	49.76	100.16	145.00	199.95	250.16	290.21	295.24	0.134	0.257
	三相	4.86	9.85	49.78	100.11	150.00	199.96	250.15	290.14	295.14	0.113	0.224
高阻接地	单相	5.22	10.19	49.81	100.31	149.99	199.92	250.20	289.91	294.89	0.093	0.311
	两相	4.75	9.75	49.76	100.17	150.00	199.95	250.15	290.26	295.29	0.144	0.294
	相间	4.74	9.74	49.76	100.17	150.00	199.95	250.16	290.26	295.29	0.143	0.291
	三相	4.83	9.83	49.77	100.13	150.00	199.96	250.15	290.15	295.16	0.129	0.231

属性接地的最大测距误差为 0.541 km, 相对误差为 0.18%; 高阻接地的最大测距误差为 0.311 km, 相对误差 0.10%。这充分验证了本文测距方法正确性。

8 结论

(1) 基于 PSO 建立的参数自适应故障测距优化求解模型, 解决了多维非线性参数自适应故障测距观测方程优化求解过程中因局部收敛而导致测距失败的可能。

(2) 提出的基于粒子群-最小二乘混合的参数自适应故障测距方法, 既保证了优化求解的全局性, 又保证了最优解的快速收敛性, 从而满足了参数自适应故障测距的高精度要求。

(3) 针对前置低通滤波器、具有并联电抗器的输电线路以及消除故障暂态分量等问题进行了研究, 并以 1 000 kV 特高压输电线路的故障测距为例, 进行仿真验证, 结果表明本文所提测距方案计算精度高, 并具有良好的稳定性和实用性。

参考文献

- [1] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用—A 型原理[J]. 继电器, 2004, 32(2):13-18.
CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Modern Travelling Wave Based Fault Location Principle and Its Applications to Actual Fault Analysis-Type A Principle[J]. Relay, 2004, 32(2): 13-18.
- [2] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用—D 型原理[J]. 继电器, 2004, 32(3):13-18.
CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Modern Travelling Wave Based Fault Location Principle and Its Applications to Actual Fault Analysis-Type D Principle[J]. Relay, 2004, 32(3): 13-18.
- [3] 杨涛. 一种双端同步采样的时域故障测距算法[J]. 继电器, 2007, 35(23): 5-8.
YANG Tao. A Time-domain Fault Location Algorithm Using Synchronized Sampling at Two Ends[J]. Relay, 2007, 35(23): 5-8.
- [4] 徐鹏, 王钢, 李晓华, 等. 双端非同步数据故障测距的非线性估计算法[J]. 继电器, 2005, 33(1): 16-20.
XU Peng, WANG Gang, LI Xiao-hua, et al. A Nonlinear-estimation Algorithm for Two-terminal Fault Location on Asynchronous Data[J]. Relay, 2005, 33(1): 16-20.
- [5] 梁远升, 王钢, 李海锋. 消除暂态过程影响的滤波算法及其在故障测距中的应用[J]. 电力系统自动化,

- 2007,31(22):77-82.
- LIANG Yuan-sheng, WANG Gang, LI Hai-feng. A Filtering Algorithm for Eliminating Effect of Transient Component and Its Application on Fault Location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(22):77-82.
- [6] 康小宁, 索南加乐. 求解频域参数方程的双端故障测距原理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 16-20.
- KANG Xiao-ning, SUONAN Jia-le. Frequency Domain Fault Location Method Based on the Transmission Line Parameter Identification Using Two Terminal Data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(10):16-20.
- [7] 全玉生, 王晓蓉, 杨敏中, 等. 工频双端故障测距算法的鲁棒性问题和新算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 28-32.
- QUAN Yu-sheng, WANG Xiao-rong, YANG Min-zhong, et al. Two New Algorithms and Their Robustness for Two-Terminal Fault Location on HV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10):28-32.
- [8] 梁军, 麻常辉, 负志皓. 基于线路参数估计的高压架空输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 60-63.
- LIANG Jun, MA Chang-hui, YUN Zhi-hao. A Fault Location Algorithm for High Voltage Overhead Power Transmission Line Based on Line Parameter Estimation[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 60-63.
- [9] 蒋春芳, 王克英. 基于参数估计的双端不同步故障测距算法[J]. 继电器, 2008, 36(1): 1-5.
- JIANG Chun-fang, WANG Ke-ying. Unsynchronous Two-terminal Fault Location Algorithm Based on Line Parameter Estimation[J]. Relay, 2008, 36(1): 1-5.
- [10] Bianchini M, Fanelli S, Gori M. Optimal Algorithms for Well-conditioned Nonlinear Systems of Equations[J]. IEEE Trans on Computers, 2001, 50(7): 689-698.
- [11] Eberhart R C, Shi Y. Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization[A]. In: Piscataway ed. Proc Congress on Evolutionary Computation[C]. San Diego, CA, NJ: IEEE Press, 2000. 84-88.
- [12] Kennedy J, Eberhart R, Particle Swarm Optimization[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Perth, Australia: 1995.1942-1948.
- [13] 雷开友, 邱玉辉, 贺一. 一种优化高维复杂函数的 PSO 算法[J]. 计算机科学, 2006, 33(8): 202-204.
- LEI Kai-you, QIU Yu-hui, HE Yi. An Effective Particle Swarm Optimizer for Solving Complex Functions with High Dimensions[J]. Computer Science, 2006, 33(8): 202-204.
- [14] Van Den Bergh F, Engelbrecht A P. A New Locally Convergent Particle Swarm Optimizer[A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics[C]. Hammamet, Tunisia: 2002.96-101.
- [15] Clerc M. The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization[R]. In: Proc of the Congress on Evolutionary Computation[C]. Washington DC: 1999.1951-1957.
- [16] Eberhart R C, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory[C]. In: Proceedings of Sixth International Symposium Micro Machine and Human Science[C]. Nagoya(Japan):1995.
- [17] Eberhart R C, Shi Y. Particle Swarm Optimization: Developments Applications and Resources[A]. In: Pro Congress on Evolutionary Computation[C]. Seoul, South Korea, NJ: IEEE Press, 2001. 81-86.
- [18] Clerc M, Kennedy J. The Particle Swarm-explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002,6(1):58-73.
- [19] 刘东超, 李永丽, 曾治安. 带并联电抗器的双回线故障测距算法研究[J]. 电力系统自动化, 2006,18(2):5-9.
- LIU Dong-chao, LI Yong-li, ZENG Zhi-an. Research on Accurate Fault Location Algorithm for Double Circuit Transmission Line with Shunt Reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,18(2):5-9.

收稿日期: 2008-04-17

作者简介:

梁远升(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统故障分析与故障测距; E-mail: y_s_liang@126.com

王钢(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护、控制及自动化;

李海锋(1976-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护。