

基于抗差估计理论的输电线路故障定位新型算法

龚庆武, 钱峰, 陈玉林, 陈允平

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对采样中出现的粗差, 提出了一种基于抗差估计理论的故障定位算法。通过等价权原理, 将抗差估计理论和最小二乘法有机的结合起来, 有效地避免了粗差的影响。算法采用微分方程作为数学模型, 并利用相模变换解耦; 然后, 在模域采用输电线路双端信号列写故障点方程; 最后, 用抗差最小二乘法求解。经过RTDS实验表明, 该算法结果稳定, 具有很好的准确性和抗干扰能力。

关键词: 抗差估计; 故障定位; 双端信号; 粗差

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)20-0013-04

0 引言

输电线路的故障定位方法可以简单的归纳为行波法和故障分析法。行波法对硬件要求极高, 且行波波头难以捕捉, 会产生定位误差。故障分析法中, 单端法无法摆脱过渡电阻和对侧助增电流的影响, 其定位精度不高。采用双端法进行故障定位时, 亦不可避免地需要对双端采集数据进行处理。最小二乘法^[1, 2]是目前应用最广泛的数据处理方法, 对于严格服从正态分布的数据, 最小二乘法具有最优一致无偏且方差最小的统计特性。其数学模型简洁, 计算方法简单。但其亦存在缺点, 即不具备处理粗差的能力, 数据中的粗差会严重歪曲最小二乘法估计的结果。实际上, 严格地服从正态分布的采样数据几乎没有。因此, 就有必要提出一种具有抗粗差能力的处理方法。

抗差估计是指在粗差不可避免的情况下, 选择适当的估计方法, 尽可能避免粗差的影响, 得出实际分布模式下的未知量的最佳估计值。根据等价权原理, 可以将抗差估计(M估计)化成最小二乘的形式, 也就是说给传统最小二乘法赋予了抗差的能力。本文采用微分方程进行故障定位, 利用抗差最小二乘法对基于GPS同步采样数据进行处理, 提高算法的精度。RTDS实验表明该算法精度高, 抗干扰能力强。

1 抗差估计理论介绍^[3]

1.1 抗差估计理论的基本思想

采样数据大致可分为三类: 有效数据, 可利用数据和有害数据。抗差估计的原则是充分利用有效信息, 限制可利用信息, 排除有害信息。其目标是:

在假定的观测分布模型下, 估计应是最优或接近最优的; 假定的分布模型与实际的分布模型有较小差异时, 估计受到粗差的影响较小; 当假定的分布模型与实际的分布模型有较大偏离时, 估计不致受到破坏性影响。在物理模型基本正确的前提下, 抗差估计能够抵御以下几种情况对估值的影响: 大量小误差; 少量粗差; 假定的分布偏离实际数据的分布; 系统结构不良产生的保差(指观测值中出现粗差, 而又很难通过观测其自身余差大小来发现)作用的影响。

抗差估计与经典估计理论的根本区别在于: 抗差估计是把估计理论建立在符合数据实际分布模式基础上的, 而经典估计则是建立在某种理想的分布模式上的。

1.2 抗差最小二乘法

设有一组相互独立的观测值 $\{l_i\}$, 其初始权值为 $\{q_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。相应的误差方程式为:

$$V = A\hat{x} - L \quad (1)$$

式中: L 为 $n \times 1$ 阶观测向量, A 为 $n \times m$ 阶系数矩阵, \hat{x} 为 $m \times 1$ 阶未知参数向量 x 的估值, V 为观测余差向量。

用经典最小二乘法求解参数 x 的估计值 \hat{x} 的法方程为:

$$A^T Q A \hat{x} - A^T Q L = 0 \quad (2)$$

$$\hat{x} = (A^T Q A)^{-1} A^T Q L \quad (3)$$

其中: Q 是对角元素为初始权 q_i 的权矩阵。为了更为合理的为每个观测值赋予适当的权值, 抗差估计将准则函数定义为余差 v 的函数, 其表达式为:

$$\sum_{i=1}^n (v_i) = \min \quad (4)$$

式中: (\cdot) 是适当选择的凸函数, 令 $(v_i) =$

(v_i) , $i = (v_i)/v_i$, i 即为权因子。显然, 是余差 v 的非线性函数。则式(4)可写成:

$$\sum_{i=1}^n v_i a_i = 0 \quad (5)$$

式中: a_i 是系数矩阵 A 的第 i 行向量, v_i 是第 i 个观测值的余差。通过余差 v_i 的值来确定权因子 i , 达到对各个观测值重新赋权的目的。对 $|v_i|$ 较小的有效信息采取保权处理, 即 $i = 1$; 对 $|v_i|$ 在一定范围内的可利用信息采取降权处理, $i \in (0, 1)$; 对 $|v_i|$ 较大的粗差, 使其权为 0。对此, 在后面的具体计算中再给予详细阐述。考虑到观测值的初始权值 q_i , 令新的权矩阵 $\bar{Q} = \{q_i\} = \{q_i, i\}$ 。将式(5)转化为矩阵表达式:

$$A^T \bar{Q} V = 0 \quad (6)$$

相应的法方程式为:

$$A^T \bar{Q} A \hat{x} - A^T \bar{Q} L = 0 \quad (7)$$

$$\hat{x} = (A^T \bar{Q} A)^{-1} A^T \bar{Q} L \quad (8)$$

由于观测值相互独立, 故 \bar{Q} 为对角阵, 其对角元素为 q_i, i 。由式(8)可见, 抗差估计可以通过等价权化为最小二乘估计的形式。这样既继承了经典最小二乘法算式简单、计算方便的特点, 又在此基础上给予赋予了抗差的能力。

2 算法推导

2.1 故障时短路点 P 值的微分方程

从故障发生到保护切除故障这段时间内, 暂态过程尚未结束。对暂态数据滤波后, 采用相量法建立的代数方程很难克服衰减直流分量的影响。而微分方程可准确描述此暂态过程。

忽略输电线路电容, 建立一种集中参数模型。线路的两端分别标记为 M 和 N , 线路全长为 L 。假设三相线路均匀换位, 以单相短路为例, 其等值网络如图 1 所示。

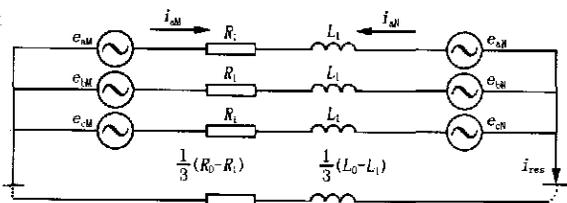


图 1 输电线路集中参数模型

Fig. 1 Lumped parameter model of transmission line

对线路进行相模变换^[4](本文选取 Karenbauer

变换作为变换矩阵)后, 各模量之间不再耦合。由于线模参数(, 模量)稳定, 不受大地电阻率等因数的影响。因此, 本文取线模分量进行定位计算。相模变换的引入, 使算法不受多回线路间互感的影响, 这样就实现了单回线、双回线和多回线算法的统一。经过 Karenbauer 变换后, 线模分量对应的线路参数在数值上等于正序分量参数。其回路可简化为图 2, 图中 P 为短路点 f 到 M 侧的距离与线路全长的百分比。

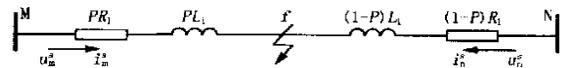


图 2 故障线路模示意图

Fig. 2 Fault line model

由图 2 可得:

$$u_f = u_m^s - PR_1 i_m^s - PL_1 \frac{di_m^s}{dt} \quad (9)$$

$$u_f = u_n^s - (1-P)R_1 i_n^s - (1-P)L_1 \frac{di_n^s}{dt} \quad (10)$$

由式(9)、(10)得:

$$u_{mn}^s = P(R_1^s i_m^s + L_1^s \frac{di_m^s}{dt} + R_1^s i_n^s + L_1^s \frac{di_n^s}{dt}) - (R_1^s i_n^s + L_1^s \frac{di_n^s}{dt}) \quad (11)$$

式中: $i_m^s, i_n^s (s = ,)$ 分别是两侧电流的 s 线模量; $R_1^s, L_1^s (s = ,)$ 分别是 s 线模量对应的电阻和电感; $u_{mn}^s (s = ,)$ 为两侧电压差的 s 线模量, 整理式(11)并离散化得:

$$P = \frac{u_{mn}^s(i) + R_1^s i_n^s(i) + L_1^s \frac{di_n^s(i)}{dt}}{R_1^s i_m^s(i) + L_1^s \frac{di_m^s(i)}{dt} + R_1^s i_n^s(i) + L_1^s \frac{di_n^s(i)}{dt}} \quad (12)$$

式中: p 为第 i 个采样点对应的 P 值。 $\frac{di^s(i)}{dt}$ 由中心

差分计算公式 $\frac{i^s(i+1) - i^s(i-1)}{2T_s}$ 计算得到。 $T_s =$

$1/f_s$, f_s 为采样率。

2.2 用抗差最小二乘法求 P

抗差估计的成败在很大程度上取决于所使用的函数和函数, 在等价权原理的支持下, 函数可转化为等价权函数。常见的等价权函数有: Huber 函数、Hampel 函数、Tukey 函数、Andrews 函数等。经过大量的实践, 本文选取 Huber 分布作为采样数据

的分布函数。下面是 Huber 分布的极值函数，函数和权因子。

$$(u) = \begin{cases} u^2/2 & |u| \leq k \\ k|u| - \frac{1}{2}k^2 & |u| > k \end{cases} \quad (13)$$

$$(u) = \begin{cases} u & |u| \leq k \\ k \cdot \text{sign}(u) & |u| > k \end{cases} \quad (14)$$

$$(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq k \\ k \cdot \text{sign}(u) / u & |u| > k \end{cases} \quad (15)$$

其中： $u = (l - a^T \hat{x}) / s$ ， s 在 $|u| \leq k$ 区间取 $\hat{\sigma}$ (标准差)，在区间 $|u| > k$ ，取 MAD ， $MAD = \text{med}_i |l_i - a_i^T \hat{x}|$ 。 k 值由子样污染率 ϵ 计算得出。 k 值一经确定，Huber 分布的极值函数也就确定了。粗差在采样数据中所占比例一般在 1% ~ 10%，对应的 k 值则在 1 ~ 2 之间。对此，文献[2]中做了详细阐述，本文只列出部分 ϵ 及其对应的 k 值。

表 1 污染率 ϵ 和其对应的 k 值

ϵ	k	ϵ	k	ϵ	k
0.002	2.435	0.020	1.717	0.200	0.862
0.005	2.160	0.050	1.399	0.300	0.685
0.010	1.945	0.100	1.140	0.500	0.436

Huber 函数分布密度如图 3 所示。可见，Huber 分布是污染正态分布的一种，它的主体是正态分布，干扰分布服从拉普拉斯分布。因为主体分布含正态分布的观测值，故采用最小二乘估计；干扰分布则采用中位数估计，利用观测数据中的排序信息提高估计效率。中位数是抗偏能力很强的估计，对总体而言，有害信息使这种估计的偏度最小。

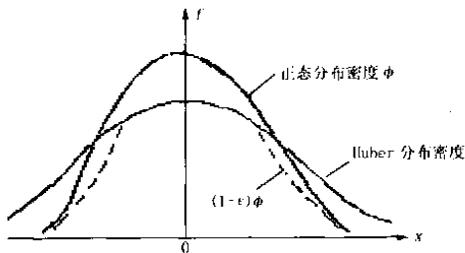


图 3 Huber 分布密度

Fig. 3 Distribution density of Huber function

设式(12)分母为 A ，分子为 L 。并将 A 与 L 表示成矩阵形式。则式(12)可化为：

$$AP = L \quad (16)$$

由于各采样点采样条件和精度相同，故给每个

采样值均赋予 $q_i = 1$ 的初始权值。则可解得 P 的最小二乘估值：

$$\hat{P} = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (17)$$

由余差 $v_i = l_i - a_i^T \hat{P}$ 的值结合式(15)，便可确定各采样值的权因子 q_i ，则新的权矩阵 $\bar{Q} = \{q_i \delta_{ij}\} = \text{diag}\{q_i\}$ 。取 $k = 1.2$ ，在 $|u| \leq k$ 的中心区域，采用最小二乘法以取得估计的基本效率。在 $|u| > k$ 的区域，其权值随着 $|u|$ 的增大而减小，权函数如图 4 所示。

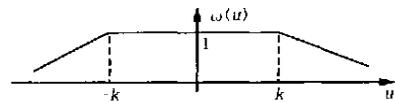


图 4 Huber 分布权函数

Fig. 4 Distribution weight function of Huber

由前面叙述便可得 P 的抗差最小二乘解：

$$\hat{P} = (A^T \bar{Q} A)^{-1} A^T \bar{Q} L \quad (18)$$

3 RTDS 实验

3.1 仿真模型

本文以赣西供电局白江线为试验对象建立模型。实验中所用采样率为 $f_s = 4$ kHz，其模型系统图见图 5，参数如下。

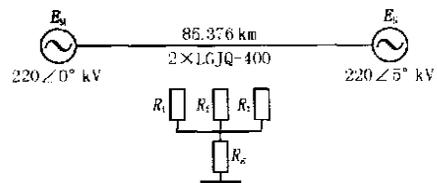


图 5 数字仿真系统图

Fig. 5 Schematic diagram of digital system simulation

系统参数： $E_M = E_N = 220$ kV， $\angle MN = -5^\circ$ ，

$Z_M = Z_N = 10$ ；

线路参数： $Z_1 = 0.0792 + j0.4278$ / km， $Z_0 = 0.3829 + j1.3288$ / km，地线型号：G - 50；线路型号：2 x LGJQ - 400。线路全长： $L = 85.376$ km。

3.2 实验结果

为了验证算法，我们针对电力系统输电线路中可能发生的短路进行了大量的仿真实验。并将实验结果列于表 2 ~ 5 中。结果采用相对误差表示，即实际误差与线路全长的比值。

1) 故障类型和故障距离对定位精度的影响

表 2、表 3 中分别列出了不同故障类型、故障距离时两种算法的定位结果。

表2 采样较精确时两种算法的定位结果

Tab.2 Fault location results of two kinds of algorithms with precise sampling

故障类型	短路点实际距离/(%)	经典最小二乘		抗差最小二乘	
		计算值	误差	计算值	误差
单相接地	10	9.937	0.063	9.942	0.058
	50	49.719	0.281	49.792	0.208
	90	89.863	0.137	89.899	0.101
两相接地	10	9.843	0.157	9.861	0.139
	50	49.756	0.244	49.783	0.217
	90	90.152	0.152	90.142	0.142
两相短路	10	9.862	0.138	9.881	0.119
	50	49.810	0.190	49.829	0.171
	90	89.701	0.299	89.723	0.277
三相接地	10	9.835	0.165	9.845	0.155
	50	49.855	0.145	49.861	0.139
	90	89.901	0.099	89.918	0.082

表3 采样出现一定粗差时两种算法的定位结果

Tab.3 Fault location results of two kinds of algorithms with some gross errors in sampling

故障类型	短路点实际距离/(%)	经典最小二乘		抗差最小二乘	
		计算值	误差	计算值	误差
单相接地	10	8.731	1.269	9.599	0.401
	50	48.835	1.165	49.514	0.486
	90	88.986	1.014	89.529	0.471
两相短路	10	10.901	0.901	10.309	0.309
	50	50.869	0.869	50.298	0.298
	90	90.779	0.779	90.269	0.269
两相接地	10	9.162	0.837	9.781	0.219
	50	49.109	0.891	49.729	0.271
	90	89.001	0.999	89.723	0.276
三相接地	10	10.803	0.803	9.767	0.233
	50	50.739	0.739	49.808	0.192
	90	90.828	0.828	89.727	0.273

由表2、表3可见,定位结果与故障类型和故障位置无关。当采样较精确时,抗差最小二乘法与经典最小二乘法所得定位结果接近。而当采样出现一定粗差时,本算法能够有效的避免粗差的影响,使定位相对误差控制在0.5%以内,达到较好的抗差效果。

2) 过渡电阻变化对定位精度的影响

表4 A相短路过渡电阻从0增至100 定位结果

Tab.4 AG fault location results of transient resistance changed from 0 to 100 ohm

过渡电阻/	定位结果/(%)	误差/(%)
0	29.721	0.279
20	29.873	0.127
40	29.912	0.088
60	30.169	0.169
80	30.305	0.305
100	30.270	0.270

3) 故障发生角变化对定位精度的影响

表5 故障发生角从0至50度的定位结果

Tab.5 Fault location results of fault angle changed from 0 to 50 degrees

相角差/(°)	定位结果/(%)	误差/(%)
0	30.134	0.134
10	29.792	0.208
20	29.532	0.468
30	29.427	0.563
40	29.809	0.191
50	29.851	0.149

由表4、表5可见,过渡电阻与系统运行方式都不影响定位精度。

4 结论

1) 本文算法简单,只需知道线路正序参数以及线路两端同步电压、电流采样值,而与其它参数无关。

2) 采用基于抗差估计理论的算法,有效的避免了采样过程中可能出现的粗差对定位精度的影响,保证了算法的精度。

3) 相模变换的引入,使算法不受多回线路间互感的影响,实现了单回线、双回线和多回线算法的统一。

仿真证明,本算法是一种抗干扰能力强、高精度的算法。

参考文献:

- [1] 束洪春,司大军,葛耀中(SHU Hong-chun, SI Da-jun, GE Yao-zhong). 高压输电线路电弧故障检测与定位最小二乘法新解(A New Least Error Square Method for Detecting and Locating Arc Fault in EHV Transmission Line)[J]. 电工技术学报(Transactions of China Electrotechnical Society), 2000,15(5):63-68.
- [2] 陈允平,龚庆武,等(CHEN Yur-ping, GONG Qing-wu, et al). 输电线路故障定位的最小二乘法实现(An Accurate Fault Location and Its Data Processing by Least Square Method)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001,25(13):54-56.
- [3] 周江文,黄幼才,杨元喜,等(ZHOU Jiang-wen, HUANG You-cai, YANG Yuan-xi, et al). 抗差最小二乘法(Robustified Least Squares Method)[M]. 武汉:华中理工大学出版社(Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press),1997.
- [4] 吴维韩,张芳榴,等(WU Wei-han, ZHANG Fang-liu, et al). 电力系统过电压数值计算(The Numerical Calculation of Power System Overvoltage)[M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press),1989.

(下转第24页 continued on page 24)

络模型可以更好地适应发电厂报价的复杂环境。

参考文献:

- [1] 姚建刚,章建 (YAO Jian-gang, ZHANG Jian). 电力市场分析 (Power Markets Analysis) [M]. 北京:高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 1999.
- [2] 胡守仁,余少波,戴葵 (HU Shou-ren, YU Shao-bo, DAI Kui). 神经网络导论 (Neural Network Guide Discussion) [M]. 长沙:国防科技大学出版社 (Changsha: National University of Defense Technology Press), 1993.
- [3] 胡守仁,沈清,时春 (HU Shou-ren, SHEN Qing, SHI Chun). 神经网络应用技术 (Neural Network Application Technology) [M]. 长沙:国防科技大学出版社 (Changsha: National University of Defense Technology Press), 1993.
- [4] 王三明,蒋军成 (WANG San-ming, JIANG Jun-cheng). 基

于神经网络理论的系统安全评价模型 (Safety Assessment of the System Based on the Artificial Neural Network) [J]. 工业安全与防尘 (Industrial Safety and Dust Control), 2001, 2: 31-34.

收稿日期: 2004-02-04; 修回日期: 2004-04-25

作者简介:

张喜铭 (1980 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力市场软件开发及电力系统稳定性方向研究; E-mail: ximingzhang@hotmail.com

姚建刚 (1952 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、配电系统自动化和新型输电方式的研究;

李立颖 (1981 -), 女, 硕士研究生, 主要从事电力市场软件开发及电力系统稳定性方向研究。

Research of dynamic tuning of BP model with amending nerve cell output function in the forecast of pool purchase price

ZHANG Xi-ming¹, YAO Jian-gang¹, LI Li-ying¹, ZHANG Yue-hui², SU Zhu-xin²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan HDHL Electrical & Technology Co., Ltd, Changsha 410082, China)

Abstract: The theory of ANN is introduced. Considering some limitations of BP neural network model, this paper presents the optimized method of dynamic tuning of BP neural network with amending nerve cell output function. This method gets rid of the limitations of bad nonlinear characteristics and bluntness to the change of actual conditions of the former BP neural network model, and possesses merits of higher speed of convergence. Based on this method, a new pool purchase price forecast model is built. The result of simulative operation demonstrates that the amended BP neural network model may be more accurately adapted to the complicated circumstance of generator bidding.

Key words: pool purchase price; artificial neural network; BP model; nerve cell output function

(上接第 16 页 continued from page 16)

收稿日期: 2004-02-20; 修回日期: 2004-05-07

作者简介:

龚庆武 (1967 -), 男, 副教授, 研究生导师, 主要从事电力系统继电保护及自动化方面的研究; E-mail: nemo-feng@163.com

钱峰 (1979 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继

电保护及自动化方面的研究;

陈玉林 (1980 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定与控制方面的研究;

陈允平 (1945 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护, 高电压技术, 电力系统稳定控制, 自动化方面的研究。

A new fault location algorithm for transmission line based on robust estimation theory

CONG Qing-wu, QIAN Feng, CHEN Yr-lin, CHEN Yur-ping

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Considering the gross sampling errors, this paper proposes a fault location algorithm based on the theory of robust estimation. Based on the principle of equivalent weights, robust estimation theory is effectively combined with least square method, and efficiently eliminates the influence of gross errors. The differential equation is adopted as the mathematical model, and phase model transformation is used for decoupling. Then the fault location equation is established by using double-terminal signal of the transmission line in model components. At last, the solution is obtained by the least robustness square method. The experiment of RTDS shows that this algorithm is of high stability, accuracy and immunity.

Key words: robust estimation; fault location; double-terminal signal; gross errors