

# 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究

尹晓光<sup>1</sup>, 宋琳琳<sup>1</sup>, 尤志<sup>1</sup>, 朱子钊<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 根据现有的输电线路双端行波故障测距原理, 提出一种与波速无关的双端行波测距方法。采用小波变换法对行波信号进行分析, 判断故障初始行波和故障点反射行波到达线路两端母线的时刻, 求解一组由距离、时间和速度组成的方程组, 得到与波速无关的故障测距公式。理论上该方法不受行波波速的影响, 并且具有较高的测距精度。通过 Matlab 软件仿真, 证明了该方法的有效性和正确性。

**关键词:** 行波; 波速; 故障测距; 小波变换

## Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed

YIN Xiao-guang<sup>1</sup>, SONG Lin-lin<sup>1</sup>, YOU Zhi<sup>1</sup>, ZHU Zi-zhao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
2. School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** An accurate fault locating method based on existing double-terminal traveling waves fault location principle is presented, which avoids the influence of traveling wave speed. This method uses wavelet transform to analyze traveling wave signals and determine the arrival time of the fault initial traveling waves and the reflected wave from the point of failure reaching both ends of bus bar. Then a group of equations involving distance, time and velocity is solved and the fault location formula unrelated to wave speed is obtained. In theory this method avoids the wave speed influence, and has high accuracy in fault location. The Matlab software simulative results prove its validity and correctness.

**Key words:** traveling waves; wave speed; fault location; wavelet transform

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0035-05

## 0 引言

目前, 工程上使用的故障测距方法主要有阻抗法和行波法。当过渡电阻较大时会影响阻抗法的测距精度。行波法只需计算故障行波到达母线的时刻, 结合行波波速计算出故障点, 不受故障类型和过渡电阻的影响, 理论上具有更高的测距精度<sup>[1-2]</sup>。

## 1 现有行波测距方法分析

目前工程上使用的行波测距方法都要结合波速与行波到达母线时刻计算故障发生位置。由理论分析可知, 行波的波速表达式为  $v = 1/\sqrt{LC}$  ( $L, C$  分别是单位长度导线的电感和电容值), 在不同的输电线路结构中波速是不同的。对于同一线路, 在不同时刻线路的参数也不尽相同。由于波速是一个不确定的量, 工程中一般根据不同的输电线路电压等级选择一个接近光速的值来近似表示波速, 波速取值为  $0.936c$  (110 kV)<sup>[3]</sup> 到  $0.987c$  (500 kV)<sup>[4-5]</sup> 不等。显然, 波速取值的不确定会影响行波故障测

距的精度。文献[6]提出了一种不受波速影响的单端行波故障测距方法, 通过检测故障初始行波、故障点反射行波和来自对端母线的透射行波到达测量点的时刻计算故障发生位置。线路发生金属性短路或过渡电阻很小时, 来自对端母线的透射波较弱难以正确检测。如果线路发生三相金属性接地故障且过渡电阻值接近零, 则来自对端母线的行波在故障处几乎透射不过来, 导致该方法测距失败。本文提出了一种与波速无关的双端行波测距方法, 通过检测故障初始行波和故障点反射行波到达线路两端测量点的时刻计算出故障发生位置, 提高了测距方法的稳定性。

## 2 故障行波的检测

行波测距需要检测故障行波波头到达母线的时刻, 小波分析法可以有效检测故障行波信号奇异点, 小波分析中的模极大值对应行波到达观测点的时刻。模极大值的正负对应行波信号的突然上升或下降。本文在仿真时采用 db5 小波进行分析, 如图1所示。

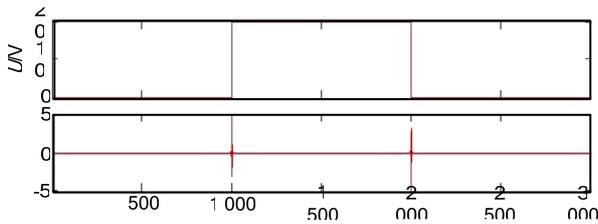


图1 原始信号和小波变换模值

Fig.1 The original signal and wavelet transform module values

### 3 不受波速影响的双端行波测距方法

目前使用的双端行波测距，通过检测两个故障初始行波波头分别到达线路两端母线的的时间和波速来求得故障位置。本文提出的新方法除了需要得到两个初始行波波头分别到达线路两端母线的的时间外，还需要检测故障点反射行波分别到达两端母线的的时间。由于发生故障后行波在输电线路上传播时遇到阻抗不连续的地方就会产生透射和反射现象，对端母线的反射波会在故障点发生透射到达本端母线，而且可能先于本端故障点反射波到达，所以必须对第二个到达的行波进行判别。故障点反射波信号的小波变换模极大值极性与初始行波极性相同，而对端母线反射波透射过来的行波信号小波变换模极大值极性与初始行波极性相反<sup>[7-8]</sup>。利用这一结论，可以对第二个到达母线的行波的性质进行判别。

输电线路各相之间存在线间耦合，会影响测距精度。必须对原始故障信号进行解耦，消除这种影响。本文采用凯伦贝尔矩阵对原始故障信号进行解耦，三相故障行波信号通过相模变换得到0模、 $\alpha$ 模和 $\beta$ 模三个模量。其中0模受零序电感和零序电阻影响较大，不宜用来测距<sup>[9]</sup>。

设线路长度为 $L$ ，故障点 $f$ 到M端距离为 $x$ ，到N端距离为 $y$ ，行波传播波速为 $v$ (实际波速值未知)。线路两端测量点M，N分别测量到多个波头，测量到的第二第三个波头可以根据它们的极性判断出是故障点反射波还是来自对端母线的透射波。设 $t_0$ 为故障发生的绝对时刻， $t_1$ 为故障点产生的初始行波到达M端的时刻， $t_2$ 为故障点反射行波到达M端的时刻， $t_3$ 为故障点产生的初始行波到达N端的时刻， $t_4$ 为故障点反射行波到达N端的时刻。如图2所示。

由图2可得方程：

$$\begin{aligned} x + y &= L \\ (t_1 - t_0)v &= x \quad (t_3 - t_0)v = y \\ (t_2 - t_0)v &= 3x \quad (t_4 - t_0)v = 3y \end{aligned}$$

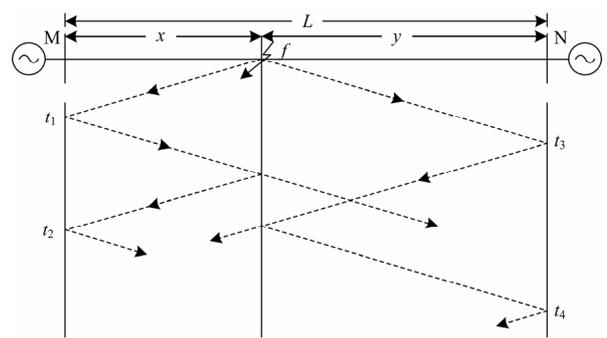


图2 行波故障测距原理图

Fig.2 Schematic diagram of traveling wave fault location

联立求解可得：

$$\begin{aligned} x &= \frac{t_1 - t_0}{t_1 - 2t_0 + t_3} L & y &= \frac{t_3 - t_0}{t_1 - 2t_0 + t_3} L \\ t_0 &= \frac{3t_1 - t_2}{2} & \text{或} & t_0 = \frac{3t_3 - t_4}{2} \end{aligned}$$

理论上M端与N端计算出的故障发生时刻 $t_0$ 是相等的，但由于对行波信号进行采样时采样值是一组离散的数值，所以在求取波头到达时刻和故障发生时刻时存在误差。计算时分别用两端算得的 $t_0$ 计算故障距离，再取平均值，尽可能地减小测距误差。

当 $t_0 = \frac{3t_1 - t_2}{2}$ 时：

$$x_1 = \frac{(t_2 - t_1)L}{2(t_2 - 2t_1 + t_3)} \quad y_1 = \frac{(t_2 - 3t_1 + 2t_3)L}{2(t_2 - 2t_1 + t_3)}$$

当 $t_0 = \frac{3t_3 - t_4}{2}$ 时：

$$x_2 = \frac{(2t_1 - 3t_3 + t_4)L}{2(t_1 - 2t_3 + t_4)} \quad y_2 = \frac{(t_4 - t_3)L}{2(t_1 - 2t_3 + t_4)}$$

取平均值：

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{L}{4} \left( \frac{t_2 - t_1}{t_2 - 2t_1 + t_3} + \frac{2t_1 - 3t_3 + t_4}{t_1 - 2t_3 + t_4} \right) \\ y &= \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{L}{4} \left( \frac{t_2 - 3t_1 + 2t_3}{t_2 - 2t_1 + t_3} + \frac{t_4 - t_3}{t_1 - 2t_3 + t_4} \right) \end{aligned}$$

### 4 算法仿真

仿真使用Matlab仿真软件中PSB模块，用Matlab自带的wavelet软件对仿真数据进行小波分析。进行仿真的电力系统结构图如图3所示。

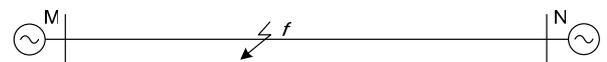


图3 仿真电力系统结构图

Fig.3 Simulation of power system structure

仿真采用某实际110 kV输电线路参数, 使用50 Hz三相分布线路模型, 线路参数为:

$$R_0=0.400\ 91\ \Omega/\text{km}; R_1=0.130\ 08\ \Omega/\text{km};$$

$$L_0=4.234\ 7\ \text{mH}/\text{km}; L_1=1.330\ 6\ \text{mH}/\text{km};$$

$$C_0=0.007\ 154\ 5\ \mu\text{F}/\text{km}; C_1=0.009\ 778\ 9\ \mu\text{F}/\text{km}$$

线路全长23.536 km, 设置为A相接地故障, 故障点距M端距离12.866 km, 距N端距离10.67 km, 接地电阻0.1  $\Omega$ , 采样频率1 MHz。设定故障发生时刻0.035 s, M端测得暂态电压行波波形如图4所示(N端与此类似)。

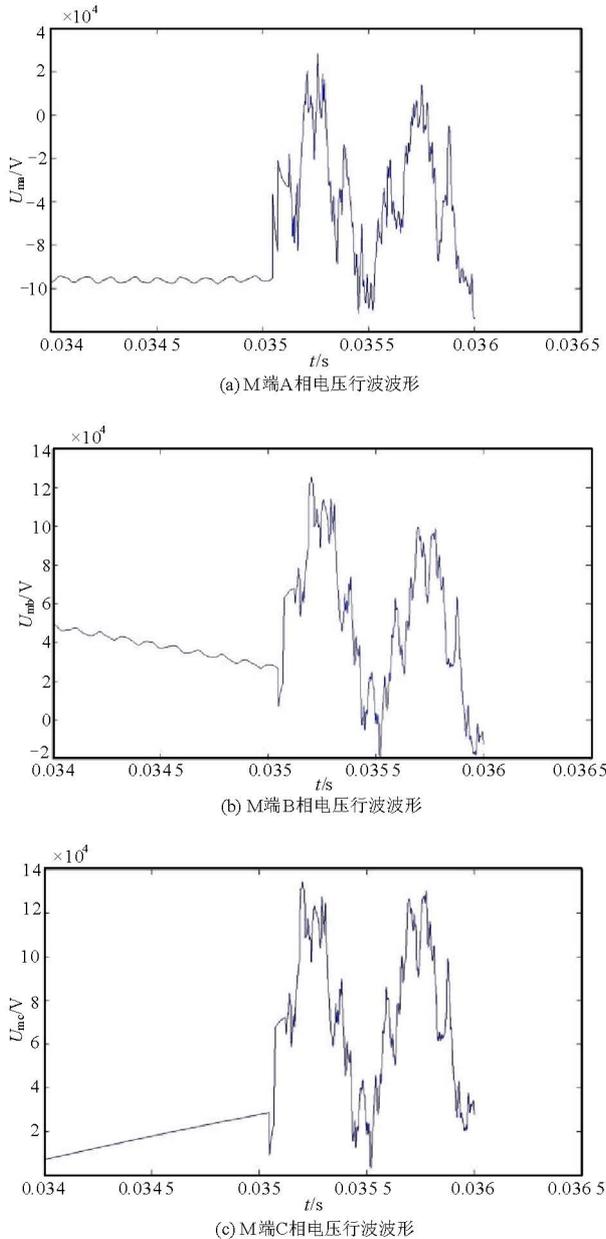


图4 M端各相电压行波波形图

Fig.4 Each phases of voltage traveling-wave waveform on M-side

采用凯伦贝尔变换对行波信号进行解耦, 将相量变换为模量后, 各模量之间相互独立没有耦合关系<sup>[10]</sup>。M端电压行波解耦后的三个模量波形如图5所示(N端与此类似)。

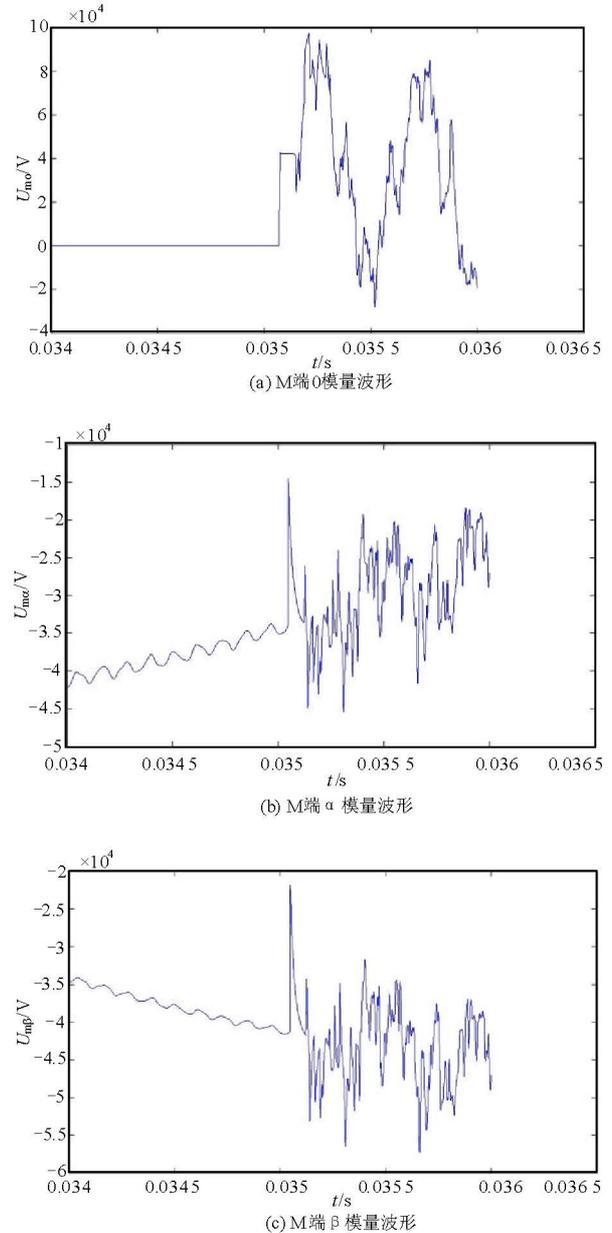


图5 经凯伦贝尔变换后的M端模量波形图

Fig.5 Karenbauer transformed by the M-terminal modulus waveforms

使用小波分析工具对M端和N端 $\alpha$ 模量进行小波变换, 求取行波波头到达时刻。图6给出了M端 $\alpha$ 模量的变换结果(N端与此类似)。图7给出了M端N端的小波变换模极大值检测结果。

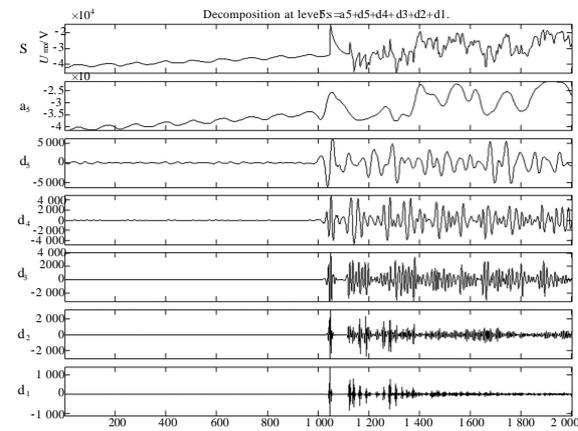
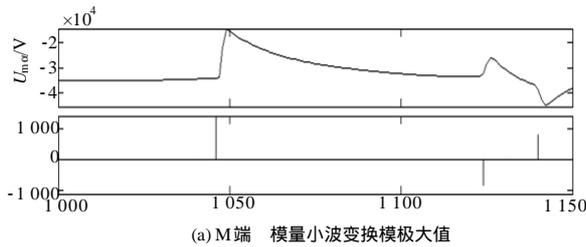
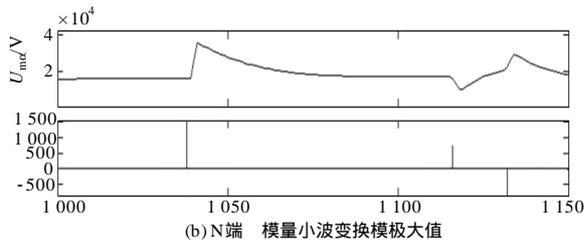


图6 M端a模量小波变换结果

Fig.6 Results of wavelet transform modulus a on M-side



(a) M端 模量小波变换模极大值



(b) N端 模量小波变换模极大值

图7 M端N端a模量小波变换模极大值

Fig.7 a modulus of wavelet transform modulus maxima on M-side and N-side

由图7可见，故障发生后M端N端分别检测到多个行波波头。由行波在各个波阻抗不连续点的反射系数可知，到达母线的初始行波极性与故障点反射行波极性相同，与来自对端母线的透射行波极性相反。判断出，到达M端的第1个和第3个行波是初始行波和故障点反射行波，到达N端的前两个行波是初始行波和故障点反射行波。仿真开始时间为0 s，结束时间为0.07 s，故障发生时间为0.035 s，采样频率1 MHz。

根据小波变换结果， $t_1=0.035\ 048\ s$ ， $t_2=0.035\ 138\ s$ ， $t_3=0.035\ 04\ s$ ， $t_4=0.035\ 12\ s$ ，用公式计算得 $x=12.876\ 9\ km$ ， $y=10.659\ 1\ km$ ，误差0.010 9 km与设定的故障位置相比具有较高的测距精度。

如果采用传统的测距方法：

$$x = [(t_1 - t_3)v + L] / 2$$

取波速  $v=280\ 800\ km/s$  算得  $x=12.891\ 2\ km$ ，误差 0.025 2 km，误差相对较大。上述两种方法在不同故障位置 and 不同接地电阻情况下的仿真实验结果见表 1 和表 2。

表1 原方法测距结果

Tab.1 Results of original method of fault locating

	故障处	故障处	接地	测得距	测得距	误差/
	距M端	距N端		M端距	N端距	
	距离/km	距离/km	电阻/ Ω	离/km	离/km	
1	3.036	20.5	5	2.922 8	20.613 2	0.113 2
2	7.23	16.306	0.01	7.134 8	16.401 2	0.095 2
3	12.866	10.67	0.1	12.891 2	10.644 8	0.025 2
4	18.126	5.41	10	18.226 4	5.309 6	0.100 4

表2 新方法测距结果

Tab.2 Results of new method of fault locating

	故障处	故障处	接地	测得距	测得距	误差/
	距M端	距N端		M端距	N端距	
	距离/km	距离/km	Ω	离/km	离/km	
1	3.036	20.5	5	2.993 9	20.542 1	0.042 1
2	7.23	16.306	0.01	7.198 7	16.337 3	0.031 3
3	12.866	10.67	0.1	12.876 9	10.659 1	0.010 9
4	18.126	5.41	10	18.062 5	5.473 5	0.063 5

对比表1和表2的仿真实验数据可知，输电线路发生故障时在行波实际波速未知的情况下，根据输电线路的电压等级设定波速进行测距会产生相对较大的误差。采用不受波速影响的测距方法可以获得更高的测距精度。

## 5 结论

(1) 目前实际使用的行波故障测距装置可以有效地检测并辨别出初始故障行波和故障点反射行波，利用故障时线路两端初始故障行波和故障点反射行波的算法，消去了波速的影响，相对传统算法可以更准确地求得故障发生位置。

(2) 如果线路某端未能检测到故障点反射行波，则故障发生的绝对时刻由另一端单独算出，但测距精度可能会有所下降。如果线路两端都未能检测到故障点反射行波本方法会失效，这时应当采用传统的双端行波测距方法来代替。

(3) 本文提出的算法也存在一些不足，由于需要检测的四个时间量都会直接影响测距精度，因此增大了测距失败的可能性。实际使用时，本文算法应当作为现有双端测距方法的补充，参考不同测距

方法的结果对故障位置进行判断。

### 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-D型原理[J]. 继电器, 2004, 32 (3): 14-17, 28.  
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): 14-17, 28.
- [2] 葛耀中, 徐丙垠, 陈平. 利用暂态行波测距的研究[J]. 西安交通大学学报, 1995, 29 (3): 70-75.  
GE Yao-zhong, XU Bing-yin, CHEN Ping. Study of fault location based on traveling waves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29 (3): 70-75.
- [3] BO Z Q, WELLER G, JIANG F, et al. Application of GPS based fault location scheme for distribution system[C]. //1998 International Conference on Power System Techonlogy Proceedings. Beijing(China): 1998: 53-57.
- [4] GALE P F, TALOR P V, HITCHIN C. Traveling wave fault locator experience on Eskom's transmission network[C]. //Seventh International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam (Netherlands): 2001: 327-330.
- [5] 邓军波, 施围. 输电线路接地故障行波测距新方法[J]. 继电器, 2000, 28(8): 16-18.  
DENG Jun-bo, SHI Wei. A new technique of earth fault location[J]. Relay, 2000, 28(8): 16-18.
- [6] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 29-32.  
JIANG Tao, LU Yu-ping. Study of fault locating based on single terminal traveling waves avoiding wave speed influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (12): 29-32.
- [7] 董新洲, 刘建政, 余学文. 电线路暂态电压行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报, 2001, 16(3): 57-61, 74.  
DONG Xin-zhou, LIU Jian-zheng, YU Xue-wen. Fault characteristics and wavelets analysis of the transient voltage travelling waves[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16 (3): 57-61, 74.
- [8] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996.  
DONG Xin-zhou. Application of wavelet transform to transmission line fault location [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1996.
- [9] 郭方正. 双端行波故障测距方法的深入研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.  
GUO Fang-zheng. Study of fault locating based on double terminal traveling waves[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [10] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.  
MA Dan-dan, WANG Xiao-ru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- 收稿日期: 2010-01-10; 修回日期: 2010-03-30  
作者简介:  
尹晓光 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xingtai1984@126.com  
宋琳琳 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;  
尤志 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。
- (上接第 34 页 continued from page 34)
- [15] 杨伟, 彭丽, 张俊芳, 等. 基于模糊神经网络的自适应单相自动重合闸[J]. 继电器, 2005, 13(15): 66-70.
- [16] 雷绍兰, 孙才新, 周淙, 等. 基于径向基神经网络和自适应神经模糊系统的电力短期负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 78-82.  
LEI Shao-lan, SUN Cai-xin, ZHOU Quan, et al. Short-term load forecasting method based on RBF neural network and ANFIS system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 78-82
- [17] 郭恒, 罗可. ANFIS 在短期负荷预测中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 105-107.  
GUO Heng, LUO Ke. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system to short-term load forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2005, 25(22): 78-82.
- [18] 孙旭, 任震. 空间负荷预测在城市电网规划中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(14): 46-49.  
SUN Xu, REN Zhen. Application of spatial forecasting in urban power network planning[J]. Relay, 2005, 33(14): 46-49.
- 收稿日期: 2010-01-13  
作者简介:  
周淙 (1973-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力地理信息系统、配电网规划、电气设备在线监测与故障诊断; E-mail: zhouquan@cqu.edu.cn  
孙威 (1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力地理信息系统在配电网中的应用、配电网空间负荷预测。