

· 自动化技术 ·

基于排列熵算法的电力系统故障信号分析

李从善, 刘天琪, 李兴源, 曹喜民, 刘利兵

(四川大学电气信息学院 成都 610065)

【摘要】 电网故障的快速准确诊断对加快事故处理和系统恢复进程、保证电力系统的安全运行具有至关重要的作用。分析了目前应用于电力系统故障诊断的数据来源, 提出采用广域量测的电气量信息进行电力系统的快速诊断方法。首先将广域量测系统采集的数据进行小波变换, 通过相关系数法滤噪处理, 以此来重构信号, 采用排列熵算法对重构的信号进行排列熵分析。由于排列熵反映了一维时间序列的复杂度, 对信号变化具有较高的敏感性, 可以应用于电力系统故障信号分析方面。相比传统的小波分析方法, 该方法不存在选取小波基问题, 且算法简单, 编程易实现, 能够满足在线故障诊断条件。通过对IEEE10机39节点标准测试系统的故障仿真分析, 结果表明了该方法的有效性和实用性。

关键词 相关系数; 故障诊断; 排列熵算法; 电力系统; 小波变换

中图分类号 TM711

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.02.013

Power System Fault Signal Analysis Based on Permutation Entropy Algorithm

LI Cong-shan, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan, CAO Xi-min, and LIU Li-bing

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University Chengdu 610065)

Abstract Rapid and accurate diagnosis of fault has a crucial role for speeding up the recovery process and ensuring the safe operation of the power system. This paper analyzes the data sources currently used in power system fault diagnosis, proposes the use of wide-area information for rapid diagnosis of power systems. First, wavelet transform is used to process the wide area measurement data, through correlation coefficient method to eliminate the noise and reconstruct the signal, then permutation entropy calculation use the of the reconstructed signal. Since the complexity of the arrangement of entropy reflects a one-dimensional time series, the signal changes with high sensitivity, therefore, it can be applied to power system fault diagnosis. Compared with the traditional wavelet analysis method, this method avoids the problem of selecting wavelet base and meets the conditions for online fault diagnosis. In addition, it is simple and easy to program. The approach is applied in IEEE10 machine 39-bus system fault diagnosis. The diagnostic results show the applicability and effectiveness of the method.

Key words correlation coefficient; fault diagnosis; permutation entropy (PE) algorithm; power system; wavelet transform

大规模电网互联在提高系统运行经济性的同时, 也使得局部电网的故障对整个系统的影响范围更广。尽管现代电力系统采用了大量先进的设备、保护和控制手段, 但仍无法避免电网故障的发生^[1]。故障快速准确诊断是建设现代智能电网的必然要求, 故障诊断历来是专家和学者的研究热点, 并且已取得了一定的研究成果^[2-17]。从已有的研究成果中可以看出, 故障诊断主要涉及两个方面的内容: 1) 故障诊断的信息来源; 2) 故障诊断方法。目前应

用于故障诊断的信息来源主要有数据监控及采集系统(SCADA)、继电保护故障信息管理系统(RPMS)、广域测量系统(WAMS)。已有的故障诊断方法主要有人工智能技术、解析模型方法以及信息融合技术3类方法, 人工智能技术主要包括专家系统^[2-3]、遗传算法^[4]、Petri网络^[5-6]、粗糙集理论^[7-8]、贝叶斯网^[9]、多Agent技术^[10]、优化技术^[11]。文献[12-15]通过建立故障解析模型并求解实现对故障的诊断。随着信息理论的发展, 研究者将信息融合技术引入到故障诊

收稿日期: 2014-07-01; 修回日期: 2014-10-15

基金项目: 国家973项目(2013CB228204)

作者简介: 李从善(1985-), 男, 博士生, 主要从事电力系统稳定与控制方面的研究。

断中,文献[16-17]提出了一种综合SCADA开关量、故障录波器电气量及WAMS系统电气量的多源信息融合电网故障诊断方法。文献[18]基于振动信号对高压断路器机械故障诊断进行了研究。

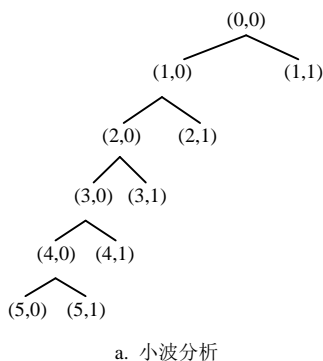
当电力系统发生故障时,首先是故障元件的电气量信息发生变化,其次是保护动作,最后才是相应的开关^[19]。采用电气量信息可以最快实现系统故障诊断。随着近年来WAMS量测系统在电力系统中的应用,以相量测量单元(PMU)为基础的WAMS量测数据具有高精度、延时小、更新周期短等优点,这为电力系统故障在线诊断提供了数据平台。本文在此数据平台基础上,提出采用排列熵理论实现电力系统故障诊断。首先将WAMS数据进行小波变换,通过相关系数滤波处理,以此来重构信号,采用排列熵算法对重构的信号进行排列熵分析。与传统的小波分析方法对比,该方法具有算法简单,编程易实现,不存在小波基选取困难问题,能够满足在线故障诊断的要求,这为电力系统故障信号分析提供了新的思路。通过对IEEE10机39节点标准测试系统的故障仿真分析,结果表明了该方法的有效性和实用性。

1 信号降噪处理

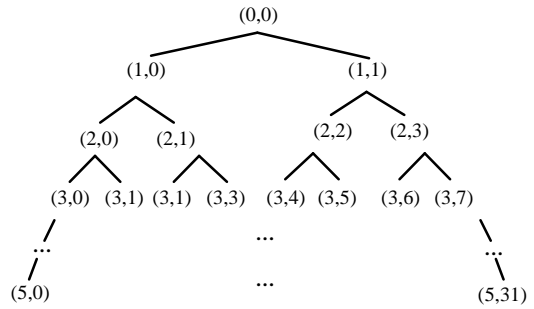
1.1 小波包分析

小波分析优于傅里叶变换,它在时域和频域同时具有良好的局部化性质,但每次只对信号的低频部分进行分解,保留高频部分。小波包分析对此进行了改进,可同时在低频和高频部分进行分解,自适应地确定信号在不同频段的分辨率,使之与信号频谱相匹配,从而提高时频分辨率^[20]。以5层小波分解为例,两者分解结构如图1所示。

由图1可以看出,小波包分析是对小波分析的扩张,具有多维多分辨率分析的特点,能为信号提供一种更加精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解,提高了时频分辨率。



a. 小波分析



b. 小波包分析

图1 5层分解结构图

1.2 小波包分解与重构算法

设 $f(t)$ 为一时间信号, P_j^i 表示第 j 层上的第 i 个小波包,称为小波包系数。小波包分解的快速算法为:

$$\begin{cases} p_0^1(t) = f(t) \\ p_j^{2^{i-1}} = \sum_k H(k-2t)p_{j-1}^i(t) \\ p_j^{2^i} = \sum_k G(k-2t)p_{j-1}^i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, H 、 G 为小波分解滤波器, H 与尺度函数有关, G 与小波函数有关。重构算法为:

$$p_j^i(t) = 2^i \sum_k h(t-2k)p_{j+1}^{2^{i-1}}(t) + \sum_k g(t-2k)p_{j+1}^{2^i}(t) \quad (2)$$

式中, $j=0,1,\dots,n$, 为分解层数; $i=1,2,\dots,2^{j-1},2^j$; h 、 g 为小波重构滤波器, h 与尺度函数有关, g 与小波函数有关。

1.3 相关系数法滤波

一般情况下,包含噪声的信号经小波分解后,高频分量即为噪声。以往基于小波变换阈值降噪法的理论依据是^[20],含噪声的信号经小波分解后有用信号的小波变换系数大于噪声的小波变换系数。对分解得到的小波系数设定一个阈值,小波系数低于该阈值置为0,高于该阈值的小波系数完整保留或做相应的“收缩”处理。最后将处理后获得的小波系数利用逆小波变换进行重构,得出有效信号,实现降噪的目的。由于电网发生故障时,电气量信号包含了大量的暂态高频分量,若按照上述阈值降噪法,可能会将有用的故障特征成分一并剔除。

基于上述原因,本文提出相关系数法实现噪声分量的筛选,其基本思想是噪声信号与原信号的相关性很小,因此可以通过相关系数来辨别噪声信号分量,相关系数定义为:

$$\rho_{xy} = \frac{E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3)$$

式中, $E[\cdot]$ 表示数学期望; μ_x 和 μ_y 分别为原始信号 x 和 y 的均值; σ_x 和 σ_y 分别为原始信号 x 和 y 的标准差。

2 应用于电力系统故障信号分析的排列熵算法

文献[21-24]提出了一种衡量一维时间序列复杂度的平均熵参数——排列熵,它具有较高的鲁棒性,能够较好地反映时间序列数据的微小变化,目前主要应用于气象、医学方面以及机械故障预测领域,在电力系统方面还未得到应用。该方法与Kolmogorow熵和Lyapunov指数相比具有概念简单、计算简单的优点,可以更好地检测出复杂系统的动力学突变,下面介绍其基本原理。

设一时间序列 $\{X(i), i=1, 2, 3, \dots, n\}$, 对其进行相空间重构, 得到矩阵:

$$\begin{bmatrix} x(1) & x(1+\tau) & \dots & x(1+(m-1)\tau) \\ x(2) & x(2+\tau) & \dots & x(2+(m-1)\tau) \\ x(j) & x(j+\tau) & \dots & x(j+(m-1)\tau) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(k) & x(k+\tau) & \dots & x(k+(m-1)\tau) \end{bmatrix} \quad j=1, 2, 3, \dots, k \quad (4)$$

式中, m 和 τ 分别为嵌入维数和延迟时间; $k=n-(m-1)\tau$ 。矩阵中每一行看作是一个重构分量, 共有 k 个。将 $X(i)$ 重构矩阵中的第 j 个重构分量 $[x(j) \ x(j+\tau) \ \dots \ x(j+(m-1)\tau)]$ 按照升序重新进行排列, 即:

$$[x(i+(j_1-1)\tau) \leq x(i+(j_2-1)\tau) \leq \dots \leq x(i+(j_m-1)\tau)] \quad (5)$$

式中, j_1, j_2, \dots, j_m 表示重构元素所在列的索引。如果重构分量中存在相等的值, 如 $x(i+(j_{i1}-1)\tau) = x(i+(j_{i2}-1)\tau)$, 此时按照 j 值的大小进行排序, 即 $j_{i1} < j_{i2}$ 时, 有:

$$x(i+(j_{i1}-1)\tau) \leq x(i+(j_{i2}-1)\tau) \quad (6)$$

因此对于任意一个时间序列组成的向量 $X(i)$ 都可以得到一组符号序列为:

$$S(l) = [j_1, j_2, \dots, j_m] \quad (7)$$

式中, $l=1, 2, \dots, k$, 且 $k \leq m!$, m 个不同的符号序列 $[j_1, j_2, \dots, j_m]$ 共有 $m!$ 中不同的排列, 符号序列 $S(l)$ 是其中一种。计算每一种符号序列出现的概率 P_1, P_2, \dots, P_k , 此时, 时间序列 $X(i)$ 的 k 种不同符号序列的排列熵(PE)按照Shannon熵的形式定义为:

$$H_p(m) = -\sum_{j=1}^k P_j \ln P_j \quad (8)$$

当 $P_j = 1/m!$ 时, $H_p(m)$ 就达到最大 $\ln(m!)$ 。为了方便, 通常用 $\ln(m!) H_p(m)$ 进行归一化处理, 即:

$$H_p = H_p(m) / \ln(m!) \quad (9)$$

H_p 取值范围为 $0 \leq H_p \leq 1$, 表示时间序列 $[X(i), i=1, 2, 3, \dots, n]$ 的随机程度, 值越小, 说明时间序列越规则, 反之, 时间序列越接近随机, 其变化反映并放大了时间序列的微小变化。

基于信号降噪与排列熵分析的电力系统故障诊断步骤为:

- 1) 首先将含噪信号经小波分解, 得到各层小波系数;
- 2) 设定一个阈值 α , 根据式(1)计算各分量与原信号的相关性, 若相关系数小于 α , 则直接将其剔除;
- 3) 将经过筛选后的小波分量重构得到滤波后的信号;
- 4) 计算滤波后信号的排列熵, 通过熵值诊断系统故障。

总体流程如图2所示。

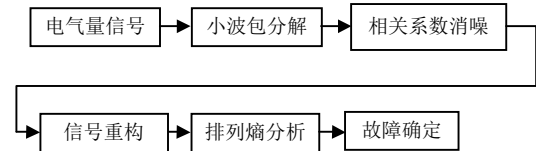


图2 排列熵分析故障诊断流程

3 仿真分析

为验证本文方法的有效性, 以图3所示的10机39节点标准测试系统为例, 在电力系统仿真软件PSCAD中, 对系统发生概率最大的单相故障进行了仿真分析, 并测得了系统故障后A、B、C三相电流信号, 将其做为诊断信号。

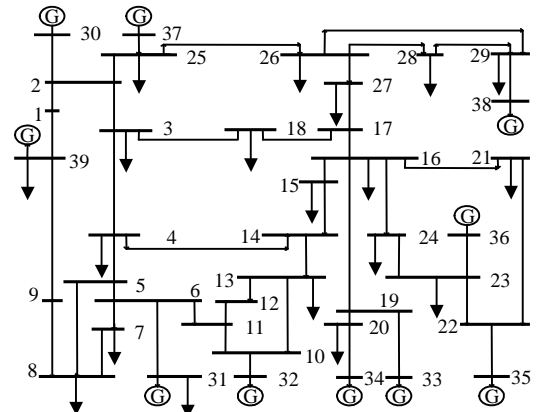


图3 10机39节点系统

3.1 提取故障信号

通过在PSCAD里搭建10机39节点系统, 模拟单相瞬时性故障。不失一般性, 本文选择了节点3和节

点18之间的线路发生A相短路故障,故障发生在100 ms,持续50 ms消失。通过在真实信号(不含噪声的信号)基础上叠加信噪比为5的随机噪声,形成含量测噪声的电气量信号,如图4a所示。

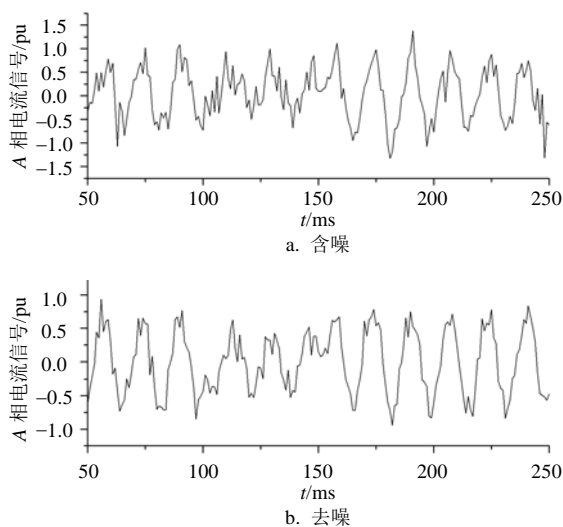


图4 A相电流信号

3.2 相关系数法去噪

采用小波变换对含噪声的A、B、C相电流信号进行5层小波分解,共得到32个小波分量,并用式(3)计算其相关系数,以 $A_{5,0}, A_{5,1}, \dots, A_{5,31}$ 表示 $C(5,0), C(5,1), \dots, C(5,31)$ 各个小波分量的相关系数,以A相电流为例,计算结果如表1所示。

表1 A相电流各分量相关系数

A相电流	相关系数			
$A_{5,0}, A_{5,1}, \dots, A_{5,7}$	0.179	0.074	0.628	0.187
$A_{5,8}, A_{5,9}, \dots, A_{5,15}$	0.069	0.097	0.576	0.121
$A_{5,16}, A_{5,17}, \dots, A_{5,23}$	0.069	0.097	0.092	0.085
$A_{5,24}, A_{5,25}, \dots, A_{5,31}$	0.096	0.135	0.104	0.054
	-0.010	0.082	0.088	0.037
	0.056	0.085	0.132	0.058
	0.120	0.076	0.089	0.096
	0.101	0.1331	0.061	0.073

剔除小波相关系数小于0.09的小波分量,采用剩余的小波分量重构信号,如图4b所示。对比可知,经过相关系数滤波去噪后能够大致看出信号的变化,但不够明显。

3.3 排列熵分析

对采集的整个时间序列数据,分别计算滤波后信号的A、B、C三相的排列熵。计算结果如表2所示。

表2 排列熵值

A相熵值	B相熵值	C相熵值
0.790	0.687	0.699

从表2可以看出,A相电流的排列熵明显大于B相和C相。而B、C两相电流的排列熵几乎相等。从而由熵值可以判断出A相发生了故障。为了详细分析整个时间序列排列熵的变化,采用文献[24]的方法。将经过滤波后的整个时间序列数据分为若干个长度为 l 的子序列,这些子序列相互之间使用最大重叠情形,即将每个子序列向后移动一个数据点得到下一个子序列。然后分别对A、B、C三相电流信号计算其排列熵,仿真参数 $m=4, \tau=4, l=100$ 。计算结果如图5所示。

由图5a可以明显看出,A相的排列熵在100 ms和150 ms发生了明显突变,从而证明在这两个时刻,电流发生了突变。而B相和C相排列熵值很平稳没有较大变化。因此从排列熵值的变化不仅可以判断出系统故障,并且可以明显看出故障发生的时刻。从而证明了该方法的有效性。

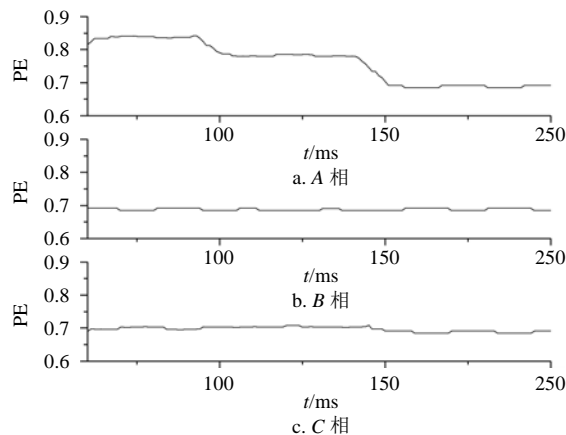


图5 排列熵值变化

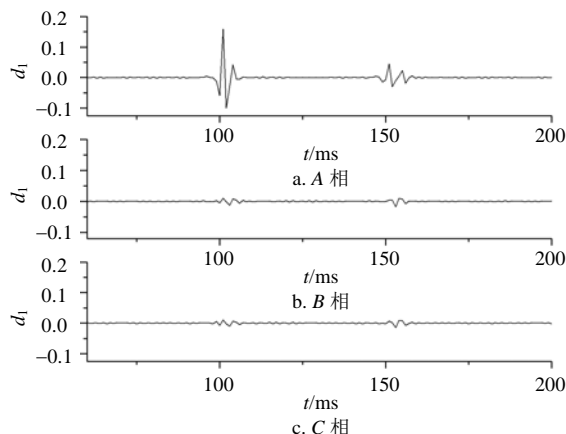


图6 d_1 变化图

为了做对比,本文又采用小波分析方法对信号做了仿真分析。采用db5小波,对信号进行6层分解,提取重构信号的高频部分 d_1 如图6所示。通过对比,可得该方法与小波分析具有相同的结果。

4 结 论

本文提出将排列熵理论应用于电力系统故障诊断中。通过小波包分解与相关系数法去噪后能够较好地提取出故障的有用信息, 并通过排列熵分析, 不仅能够诊断出系统故障, 通过熵值的变化还可以得出故障发生的时刻, 仿真结果验证了该方法的有效性。本文是对排列熵在电力系统故障诊断中的有益尝试, 并取得了满意的效果, 其算法的简单性和有效性可以满足电力系统在线故障诊断的要求, 为电力系统故障信号分析提供了新的思路, 这对其在电力系统实际故障诊断中具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 刘道兵. 电网故障诊断的解析化建模与求解[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
LIU Dao-bing. Analytical modeling and solving of power grid fault diagnosis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [2] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1-8.
ZHAO Wei, BAI Xiao-min, DING Jian, et al. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi-agent technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-8.
- [3] LEE H J, AHN B S, PARK Y M. A fault diagnosis expert system for distribution substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 92-97.
- [4] LIU Yi, LI Ying, CAO Yi-jia, et al. Forward and backward models for fault diagnosis based on parallel genetic algorithms[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2008, 9(10): 1420-1425.
- [5] 杨健维, 何正友, 臧天磊. 基于方向性加权模糊Petri网的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 42-49.
YANG Jian-wei, HE Zheng-you, ZANG Tian-lei. Power system fault-diagnosis method based on directional weighted Fuzzy Petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 42-49.
- [6] SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri nets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2053-2059.
- [7] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于粗糙集与决策树的配电网故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 794-798.
WANG Ying-ying, LUO Yi, TU Guang-yu. Fault diagnosis method for distribution networks based on the rough sets and decision tree theory[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 794-798.
- [8] 张耀天, 何正友, 赵静, 等. 基于粗糙集理论和朴素贝叶斯网络的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 37-43.
ZHANG Yao-tian, HE Zheng-you, ZHAO Jing, et al. A power network fault diagnosis method based on rough set theory and naive Bayesian networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 37-43.
- [9] 周曙. 基于贝叶斯网的电力系统故障诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
ZHOU Shu. Power system fault diagnosis method based on Bayesian network research[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [10] LEKKAS G P, AVOURIS N M, PAPAKONSTANTINOOU G K. Development of distributed problem solving system for dynamic environments[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1995, 25(3): 400-414.
- [11] 张晓玲, 陈先禄. 优化技术在发、变电所接地网故障诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 64-66.
ZHANG Xiao-ling, CHEN Xian-lu. The technique of optimization applied in the grounding grid's failure diagnosis of the power plant and substation[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 64-66.
- [12] 高湛军, 陈青, 程婷婷, 等. 应用于电网故障诊断的统一信息模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 49-52.
GAO Zhan-jun, CHEN Qing, CHENG Ting-ting, et al. A Uniform information model for power grid fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 49-52.
- [13] 翁汉琰, 毛鹏, 林湘宁. 一种改进的电网故障诊断优化模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 66-70.
WENG Han-li, MAO Peng, LIN Xiang-ning. An improved model for optimizing power system fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 66-70.
- [14] 郭文鑫, 廖志伟, 文福拴, 等. 计及警报信息时序特性的电网故障诊断解析模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 26-31.
GUO Wen-xin, LIAO Zhi-wei, WEN Fu-shuan, et al. An analytic model for power network fault diagnosis with the temporal information of alarm messages taken in to account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 26-31.
- [15] GUO Wen-xin, WEN Fu-shuan, LEDWICH G, et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1393-1401.
- [16] 刘毅, 高振兴, 郭创新, 等. 一种考虑多层信息融合的电网故障诊断辅助决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 14-18.
LIU Yi, GAO Zhen-xing, GUO Chuan-xin, et al. An assistant decision-making for fault diagnosis based on multilayer information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 14-18.
- [17] 高振兴, 郭创新, 俞斌, 等. 基于多源信息融合的电网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 17-23.
GAO Zhen-xing, GUO Chuan-xin, YU Bin, et al. Study of a fault diagnosis approach for powergrid with information fusion based on multi-data resources[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 17-23.
- [18] 关永刚, 黄瑜琰. 基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 66-68.

- GUAN Yong-gang, HUANG Yu-long, QIAN Jia-li. An overview on mechanical failure diagnosis technique for high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3): 66-68.
- [20] 符玲, 何正友, 麦瑞坤, 等. 小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 64-69.
- FU Ling, HE Zheng-you, MAI Rui-kun, et al. Information fusion method of entropy evidences and its application to fault diagnosis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 64-69.
- [21] 张翠芳. 基于小波变换的信号降噪技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2007.
- ZHANG Cui-fang. Based on wavelet transform signal noise reduction technology research[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2007.
- [22] 侯威, 封国林, 董文杰, 等. 利用排列熵检测近40年华北地区气温突变的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2663-2668.
- HOU Wei, FENG Guo-lin, DONG Wen-jie, et al. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of north China[J]. Acta Phys Sin, 2006, 55(5): 2663-2668.
- [23] 姚文坡, 刘铁兵, 戴加飞, 等. 脑电信号的多尺度排列熵分析[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 1-7.
- YAO Wen-po, LIU Tie-bing, DAI Jia-fei, et al. Multiscale permutation entropy analysis of electroencephalogram[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(7): 1-7.
- [24] 冯辅周, 饶国强, 司爱威. 排列熵算法研究及其在振动信号突变检测中的应用[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 221-224.
- FENG Fu-zhou, RAO Guo-qiang, SI Ai-wei, et al. Research and application of the arithmetic of PE in testing the sudden change of vibration signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 221-224.

编辑 漆蓉

(上接第232页)

- [6] BAHL P, CHANDRA R, DUNAGAN J. SSCH: Slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 Ad-hoc wireless networks[C]//Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Cambridge, MA: ACM, 2004.
- [7] SO H S W, WALRAND J, MO J. McMAC: A multi-channel MAC proposal for Ad hoc wireless networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington: IEEE Press, 2007.
- [8] BONETTO R, BUI N, ROSSI M, et al. McMAC: a power efficient, short preamble multi-channel medium access control protocol for wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques. Cambridge, MA: ACM, 2012.
- [9] XU C, LI G, CHENG W, et al. Multi-transceiver multiple access (MTMA) for mobile wireless ad hoc networks[C]//IEEE International Conference on Communications. Washington: IEEE Press, 2005.
- [10] KIM T O, JUNG S D, LEE S S. CMMP: Clustering-based multi-channel MAC protocol in VANET[C]//IEEE Second International Conference on Computer and Electrical Engineering. Washington: IEEE Press, 2009.
- [11] HAMID M, FETHI F, EURECOM M L, et al. A survey and qualitative analysis of multi-channel mac protocols for vehicular Ad hoc networks[J]. International Journal of Computer Applications, 2006(10): 30-35.

编辑 张俊