

# 基于改进贝叶斯分类法的电能质量扰动分类方法

张文涛, 王成山

(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津市 南开区 300072)

## Power Quality Disturbance Classification Method Based on Improved Bayes Method

ZHANG Wen-tao, WANG Cheng-shan

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT:** Based on improved Bayes method, two improved classification methods for transient power quality disturbances are proposed. In these classification methods the feature of optimal classification in original Bayes method is reserved, it makes the original Bayes method turning into non-parametric classification and enlarges the applicability range of classification, thus the optimal classification of intercrossed samples which amount is limited. By use of alternative transients program (ATP) five typical power quality disturbance signals, such as voltage oscillation, voltage interruption etc., are simulated, classified and recognized, the classification results of transient voltage disturbances show that the proposed two classification methods for transient power quality disturbances possess good classification characteristics and can be applied in wider scope.

**KEY WORDS:** power quality; wavelet transforms; bayes method; K nearest neighbor method; disturbance classification; alternative transients program

**摘要:** 基于改进贝叶斯分类法提出了2种改进的暂态电能质量扰动分类方法。该分类方法保留了原贝叶斯分类法“最优分类”的性质,使原贝叶斯分类法转化为非参数分类法,扩大了分类法的适用范围,可对数量有限的交叉样本进行最优分类。采用交流暂态仿真软件对5种典型的电能质量扰动信号如电压振荡、电压中断等进行仿真和分类识别。对暂态电压扰动的分类结果表明,上述改进的暂态电能质量扰动分类方法分类特性良好、适用范围较广。

**关键词:** 电能质量; 小波变换; 贝叶斯分类法; K近邻法; 扰动分类; 交流暂态仿真软件

## 0 引言

随着科学技术和国民经济的发展,用户对电能的需求量日益增加,对电能质量的要求也越来越高。对扰动进行正确地分类和有效地治理成为解决

电能质量问题的关键<sup>[1-6]</sup>。采用手工的方法对采集的扰动信号进行分类,既费时费力,又缺乏科学性<sup>[7-8]</sup>。运用计算机技术对扰动进行智能化分类时,通常采用先确定扰动源位置、再减小扰动或移除扰动源<sup>[9-11]</sup>的方法。这种方法高效、实用,可用于自动监测和分析电能质量问题。

在对多种电能质量问题进行分类时,只提取几种特征值(如扰动持续时间)进行分析会产生特征值的交叉。文献[12]的判别函数法就因难以处理特征值交叉带来的线性不可分问题而产生分类误差<sup>[3]</sup>。针对贝叶斯分类法在参数不确定的情况下应用范围易受到限制<sup>[12]</sup>的问题,本文将贝叶斯分类法转化为非参数分类法,扩展了原贝叶斯分类法的适用范围,使之在数量有限且存在交叉样本的条件下进行最优分类,并基于改进的贝叶斯分类准则提出了2种改进的暂态电压扰动分类方法。仿真和分析结果均表明上述方法具有良好的分类特性。

## 1 小波分析

### 1.1 小波变换

小波变换作为一种信号处理工具<sup>[1-2,13]</sup>可以从粗到细地分析时间序列,从低分辨率到高分辨率地显示信号动态过程变化的全貌,剖析信号局部变化的特征,适于分析电能质量暂态扰动问题<sup>[13]</sup>。此外,小波变换还可对信号进行降噪、识别、数据压缩和还原等<sup>[14-15]</sup>。小波变换以母小波函数为基本函数,其母小波函数为

$$y_{m,n}(l) = a_0^{-\frac{m}{2}} y(a_0^{-m}l - nb_0) \quad (1)$$

式中:  $a_0$ 、 $b_0$ 均为常数,  $a_0 > 1$ ,  $b_0 \neq 0$ ;  $m$ 、 $n$ 为正整数;  $l$ 为自变量。

离散的小波变换函数为

$$T_x(m, n) = a_0^{-\frac{m}{2}} \sum_l x(l) y\left(\frac{l - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2)$$

令  $a = a_0^m$ 、 $b = nb_0 a_0^m$  即可实现信号的离散扩张和移动。利用双尺度关系对信号进行时间分解, 即

$$f(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n) f(2t - n) \quad (3)$$

通过反向变换可将分解的信号再重新组合, 即

$$y(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n) f(2t - n) \quad (4)$$

式(2)和(4)中:  $f(t)$  为尺度函数;  $y(t)$  为小波函数;  $h(n)$  和  $g(n)$  为展开系数。

## 1.2 特征提取

通过小波变换可以方便地确定扰动开始和结束的时刻以及暂态扰动的其它特征信息。为便于分析和使用, 本文采用欧氏距离度量法提取扰动的特征信息。在欧氏距离度量法中,  $n$  维向量  $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_n)$  和  $\mathbf{B}=(b_1, b_2, \dots, b_n)$  之间的欧氏距离为

$$d = \left| \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2 \right|^{1/2} \quad (5)$$

## 2 改进的电能质量扰动分类方法

### 2.1 贝叶斯分类法

进行模式分类时, 利用贝叶斯公式得出使错误率最小的分类规则是基于最小错误率的贝叶斯分类法<sup>[6]</sup>的核心思想。该分类法的最优判定准则为

$$p(x \in R_2 | w_1) P(w_1) = p(x \in R_1 | w_2) P(w_2) \quad (6)$$

此时最小的分类错误率为

$$p(e) = p(x \in R_2 | w_1) p(w_1) + p(x \in R_1 | w_2) p(w_2) \quad (7)$$

式(6)和(7)中:  $w_1$  和  $w_2$  分别为第一类和第二类样本;  $x$  为 2 类样本中的某个样本;  $R_1$  和  $R_2$  为由分类线确定的样本分类范围。

由于样本总数有限, 实际应用中难以得到各个样本的概率和条件概率值, 因此贝叶斯最优分类法易受到限制。

### 2.2 改进的贝叶斯最优分类准则

贝叶斯样本分类示意图见图 1。图中:  $T$  代表最优分类线;  $T$  左边的样本归于第一类;  $T$  右边的样本归于第二类; 曲线①和②表示按某种特征向量分类的 2 类样本的分布率。假定样本总数无穷大, 则上述样本的分布率曲线是光滑的。按照分布率曲线, 上述样本分布于区域 1~4。

在以下的各式中,  $N_1$  代表区域 1 中第一类样本总数, 分类归于第一类, 属正确分类;  $N_2$  代表区域 2 中第二类样本总数, 分类归于第二类, 属正确分

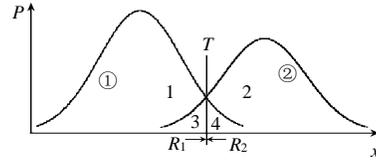


图 1 贝叶斯样本分类

Fig. 1 Bayes classification of the samples

类; 区域 3、4 均由 2 类样本混和构成, 其中  $N_{3a}$  代表区域 3 中第 1 类样本总数, 分类归于第一类, 属正确分类;  $N_{3b}$  代表区域 3 中第二类样本总数, 分类归于第一类, 属错误分类;  $N_{4a}$  代表区域 4 中第一类样本总数, 分类归于第二类, 属错误分类;  $N_{4b}$  代表区域 4 中第 2 类样本总数, 分类归于第二类, 属正确分类。因此 2 类样本的总数为

$$N = N_1 + N_2 + N_{3a} + N_{3b} + N_{4a} + N_{4b} \quad (8)$$

在贝叶斯最佳分类情况下, 样本分类归于第一类的概率为

$$p(w_1) = (N_1 + N_{3a} + N_{3b}) / N \quad (9)$$

样本分类归于第二类的概率为

$$p(w_2) = (N_2 + N_{4a} + N_{4b}) / N \quad (10)$$

在归于第一类的条件下, 分类错误的概率为

$$p(x \in R_1 | w_2) = N_{3b} / p(w_2) \quad (11)$$

在归于第二类的条件下, 分类错误的概率为

$$p(x \in R_2 | w_1) = N_{4a} / p(w_1) \quad (12)$$

欲使 2 类样本的平均错误率  $p(e)$  达到最小。在分类时要求 2 类样本的错误率相同, 即

$$\frac{N_1 + N_{3a} + N_{4a}}{N} \cdot \frac{N_{4a}}{p(w_1)} = \frac{N_2 + N_{4b} + N_{3b}}{N} \cdot \frac{N_{3b}}{p(w_2)} \quad (13)$$

由此可得

$$N_{3b} = N_{4a} \quad (14)$$

由式(14)可知: 在最优分类时, 2 类交叉样本的错误分类样本数相同, 即使分类错误的样本数相同的分类标准就是最优的分类标准; 去除区域 3 中第二类样本和区域 4 中第一类样本后, 对最优分类的结果并无影响, 但经过修正的 2 类样本却由线性不可分变为线性可分。

### 2.3 基于改进贝叶斯最优分类准则的最优分类线法

为便于分析, 上述结论是在样本数为无穷大的条件下得到的。当样本数有限时, 上述推导过程和结论同样成立。在实际的暂态电压扰动分类过程中, 样本总数有限, 且交叉的样本数量不多, 因此可采用简便的处理方法对暂态电压扰动进行分类。假设样本为 2 类 2 维的特征向量, 对应的特征值互相独立。最优分类线法的分类步骤如下:

(1) 计算 2 类样本期望值坐标 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 。

$$\begin{cases} x_1 = \sum_{j=1}^{n_1} x_{1j} / n_1 \\ y_1 = \sum_{j=1}^{n_1} y_{1j} / n_1 \\ x_2 = \sum_{j=1}^{n_2} x_{2j} / n_2 \\ y_2 = \sum_{j=1}^{n_2} y_{2j} / n_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $n_1$  和  $n_2$  分别为第一类和第二类样本的总数;  $x_{1j}$ 、 $x_{2j}$ 、 $y_{1j}$ 、 $y_{2j}$  为样本特征向量中的元素。

(2) 计算分类线  $T$ 。作 1 条连接 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 的线段, 即

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (16)$$

式中 $(x, y)$ 为线段上的点,  $x_1 \leq x \leq x_2$ 。式(16)的垂线为最优分类线  $T^{[6]}$ , 即

$$(x_2 - x_1)y = (y_1 - y_2)(x + k_0) \quad (17)$$

按照改进的贝叶斯最优分类准则, 最优分类线两侧数量较少的 2 类样本的数量应该相同。根据该分类准则可以确定式中的系数  $k_0$ 。

该分类线的任一侧都包含 2 类样本, 其中数量较少的样本对应于图 1 中区域 3 的第二类样本或区域 4 的第一类样本。2 维样本最优分类线示意图如图 2 所示。图中: 叉形符号代表第一类样本; 圈形符号代表第二类样本。

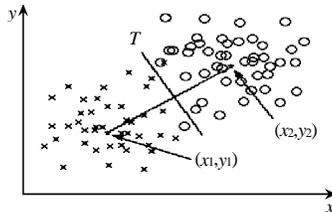


图 2 2 维样本最优分类线示意图

Fig. 2 Optimal classification line for the samples in two dimension space

按照上述方法可以确定 1 维样本的最优分类线。当样本仅含一个特征值时, 1 维样本最优分类线示意图见图 3。此时分类线  $T$  化为分类点。

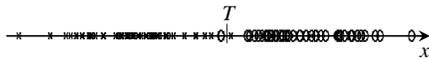


图 3 1 维样本最优分类线示意图

Fig. 3 Optimal classification line for the samples in one dimension space

## 2.4 基于改进贝叶斯最优分类准则的改进 K 近邻法

K 近邻法的核心思想是取未知样本  $x$  附近  $k$  个

近邻的样本, 上述  $k$  个近邻的多数样本属于哪一类,  $x$  则归入该类别。由于 K 近邻法的计算量较大, 文献[12]提出采用快速搜索 K 近邻法将样本分成一些不相交的子集再进行分类。本文对 K 近邻法作了优化和简化, 其分类示意图见图 4。改进 K 近邻法的具体分类过程如下: 去除 2 类样本的所有交叉样本后, 将 2 类样本中距离最近的 2 个样本定义为箭头样本, 如图 4 所示。当测试样本 1 的特征参数位于 2 个箭头样本特征参数的左边时, 即样本 1 与左边箭头的样本特征参数距离最近, 取  $k=1$ , 测试样本 1 归为左边的一类; 当测试样本 2 的特征参数在 2 个箭头样本中间时, 若与左边箭头的样本距离较近, 则取  $k=1$ , 测试样本 2 归为左边的一类, 若与右边箭头的样本距离较近, 测试样本 2 归为右边的一类。当被分类样本含有多个特征参数时, 可采用上述方法依次分类。图中的 2 类样本中各有 1 个交叉样本, 去掉交叉样本后, 箭头所指的样本即为线性不相交的 2 类样本中间距最近的 2 个样本。由上述样本处理过程可知, 改进 K 近邻法中  $k$  只能取 1。

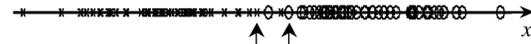


图 4 改进 K 近邻法的分类示意图

Fig. 4 Classification of the samples utilizing improved K nearest neighbor method

K 近邻法在巨量的原始样本中选出尽可能多的样本作为训练样本, 而改进 K 近邻法在全部原样本中挑选 2 个样本, 因此改进 K 近邻法提高了分类准确率。同时改进 K 近邻法在保留“最优分类”性质的前提下, 不改变 K 近邻法的非参数分类特性, 克服了 K 近邻法计算量大和计算存储量大的缺点。

## 3 仿真结果与分析

本文采用交流暂态仿真软件 (alternative transients program, ATP) 对 5 种典型的电能质量扰动信号 (电压振荡、电压中断、电压凹陷、电压缺口、电压凸起) 进行仿真和分类识别。仿真过程如下:

(1) 使用 ATP 对各种电能质量扰动信号进行仿真, 获得各种扰动的数据。随机取定产生扰动的电路元件参数。本文将各类扰动的数据分为 2 组, 第一组用于计算上述最优分类方法, 第二组用于验证该最优分类方法。

(2) 对所得样本的数据进行小波分解, 经过降噪后得到扰动信号的小波分解系数。将从小波分解系数中提取的各扰动信号的扰动持续时间和扰动开始后的电压值作为每个样本的特征向量。

(3) 计算 2 类样本间的最优分类标准。使用分级分类法, 每级只使用 1 个特征值。

(4) 根据上述最优分类标准对各类第二组样本进行分类, 验证其分类方法的正确性。

(5) 比较分类结果。采用不同分类方法<sup>[16]</sup>得到的分类结果见表 1。由表 1 可知, 本文基于改进贝叶斯最优分类准则提出的最优分类线法和改进 K 近邻法均具有良好的分类特性。

表 1 采用不同方法得到的分类结果

分类方法	最优	改进 K	能量特征	熵特征	BP 神经	进化神经
	分类线法	近邻法	矢量法	矢量法	网络法	网络法
总正确率/%	95.3	95.7	82.0	94.0	86.0	89.5

## 4 结论

(1) 本文提出的改进最优分类线法基于贝叶斯最优分类准则将传统贝叶斯最优分类法转化为非参数最优分类法, 扩大了传统贝叶斯最优分类法的使用范围, 并经最优处理使 2 类样本转化为线性无关的样本, 改善了样本之间的特性。

(2) 将改进的贝叶斯最优分类准则应用在分类线方法上, 在保留“最优分类”性质的前提下自动生成判据, 计算更为简化。同时将改进的贝叶斯最优分类准则应用在 K 近邻法中, 克服了 K 近邻法计算量和存储量大的缺点, 提高了分类准确率。

## 参考文献

- [1] 胡鸣, 陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 12-16.  
Hu Ming, Chen Heng. Detection and location of power quality disturbances using wavelet transform modulus maxima[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 12-16(in Chinese).
- [2] 胡鸣, 陈珩. 电能质量及其分析方法综述[J]. 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.  
Hu Ming, Chen Heng. Survey of power quality and its analysis methods[J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 36-38(in Chinese).
- [3] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.  
Xiao Xiangning, Xu Yonghai. Power quality analysis and its development[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 66-69(in Chinese).
- [4] 徐永海, 肖湘宁. 电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 48-52.  
Xu Yonghai, Xiao Xiangning. Power quality problems in deregulated power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 48-52(in Chinese).
- [5] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1-6.  
Chen Xiangxun. Wavelet-based measurement and classification of short duration power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 1-6(in Chinese).
- [6] 刘应梅, 白晓民, 张红斌, 等. 基于动态测度的电能质量扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 57-62.  
Liu Yingmei, Bai Xiaomin, Zhang Hongbin, et al. The detection of power quality disturbance based on dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 57-62(in Chinese).
- [7] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.  
Zhan Yong, Cheng Haozhong, Ding Yifeng. S-transform-based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 51-56(in Chinese).
- [8] 郑岗, 石梅香, 刘丁, 等. 基于时域、多分辨率分析和规则基的电能质量扰动分类[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 65-68.  
Zheng Gang, Shi Meixiang, Liu Ding, et al. Power quality disturbance classification based on time-domain rule base and wavelet multi-resolution decomposition[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 65-68(in Chinese).
- [9] 王宾, 潘贞存, 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56-59.  
Wang Bin, Pan Zhencun, Xu Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 56-59(in Chinese).
- [10] 文继锋, 刘沛. 一种电能质量扰动的检测和分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 17-20.  
Wen Jifeng, Liu Pei. A method for detection and classification of power quality disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 17-20(in Chinese).
- [11] Schmaranz R, Fickert L, Renner H. Automated power system event detector and classifier[C]. 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power System. 2004.
- [12] 杨光正, 吴岷, 张晓莉. 模式识别[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [13] 薛惠, 杨仁刚, 罗红, 等. 利用小波变换分配电网电能质量扰动. 电网技术, 2003, 27(7): 60-65.  
Xue Hui, Yang Rengang, Luo Hong, et al. Analysis of power quality disturbance in distribution network by wavelet transform[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 60-65(in Chinese).
- [14] 薛惠, 杨仁刚. 基于小波包除噪的电能质量扰动检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 85-90.  
Xue Hui, Yang Rengang. Power quality disturbance detection method using wavelet package transform based denoising scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 85-90(in Chinese).
- [15] Zhang H, Liu P, Malik O P. Detection and classification of power quality disturbances in noisy conditions[J]. Generation Transmission and Distribution IEE Proceedings, 2003, 150: 567-572.
- [16] 王成山, 王继东. 基于小波包分解的电能质量扰动分类方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 78-82.  
Wang Chengshan, Wang Jidong. Classification method of power quality disturbance based on wavelet packet decomposition[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 78-82(in Chinese).

收稿日期: 2006-09-28.

作者简介:

张文涛(1972—), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量分析, E-mail: zhangwt01@sohu.com;

王成山(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化等方面的研究工作。

(编辑 杜宁)