

基于数字图像处理技术的暂态电能质量扰动分类

江辉, 郑岳怀, 王志忠, 陈笠, 彭建春

(深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518061)

摘要: 为改进暂态电能质量扰动分类方法的准确性, 先将暂态电能质量扰动一维数据信号通过归一化处理转换为二维灰度图像, 再应用伽马校正、边缘检测及峰谷检测等数字图像处理方法增强扰动特征, 得到新的灰度图像和二值图像。提取二值图像的形态学特征值组成特征向量。通过概率神经网络实现暂态电能质量扰动分类。对所提方法进行了仿真计算和比较分析。结果表明, 所提出的暂态电能质量扰动分类新方法改进了扰动分类的准确性, 是一种有效可行的方法。

关键词: 电能质量; 数字图像处理; 概率神经网络; 暂态; 扰动分类

An image processing based method for transient power quality classification

JIANG Hui, ZHENG Yuehuai, WANG Zhizhong, CHEN Li, PENG Jianchun

(College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China)

Abstract: A new method is proposed to improve the accuracy of method for classifying transient power quality disturbance. First, the grayscale images are created by normalizing the data of disturbance voltage waveforms. Then image enhancement techniques, such as gamma correction and edge detection as well as peak detection methods, are employed to produce new grayscale images and binary images so as to make characteristics of the disturbance striking. The morphologic feature values are extracted from the binary images. At last, the probability neural network (PNN) is trained by the morphologic feature values and then used to classify transient power quality disturbance. The proposed new method for classifying transient power quality disturbance is simulated based on numerical examples. Simulation results show that the accuracy of the new method is better than the existing methods, it is effective and practical.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177102 and No. 51477104).

Key words: power quality; image processing; PNN; transient state; disturbance classification

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0072-07

0 引言

电能质量问题可能引起电网中某些电力设备损坏, 敏感负荷不能正常工作, 对电能质量扰动进行分类识别具有重要意义。

电能质量扰动信号特征量自动提取的主要方法有^[1-2]: 傅里叶变换、加窗傅里叶变换、小波变换^[3-6]和 S 变换^[7-13]等。傅里叶变换存在频谱泄露和栅栏效应等缺陷, 不能对具有暂态、突变等特性的电能质量扰动信号进行分析。

小波变换^[3-6]具有从不稳定信号提取信息的能力。一维小波方法通过对不同扰动信号做多尺度变换来提取特征量, 文献[5]通过选用 db4 小波对扰动信号进行 12 层分解, 提取各层小波变换系数构造的小波变换能量分布差作为特征向量来进行扰动分类。但此方法计算量大, 不同的母小波可能导致结果互相矛盾, 并且, 一维小波变换不能显示波形变化特征, 不能对以时域特征变换为主的扰动信号进行有效检测。

S 变换^[7,12-13]是连续小波变换的相位校正, 可以完全实现从时域到二维频域的转变, 时频特性较好, 但计算量偏大。文献[7]采用 S 变换分别提取基波信号及 3、5、7 次谐波的能量作为其特征量, 但其对于含有谐波的复合扰动识别率不高。文献[13]

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51177102, 51477104); 深圳市基础研究计划项目 (JCYJ20140418193546100, JCYJ20120817164050203)

引入高斯窗调节因子对传统 S 变换不能有效分辨含谐波扰动信号的缺陷做出了改进, 但计算时间偏长。

文献[14-15]提出了相空间重构图像及主成分分析(PCA)相结合的方法来对电能质量扰动信号分类, 利用相空间重构法构造扰动信号轨迹, 将其转化为图像, 对不同的相空间重构轨迹图进行特征提取来实现扰动分类。该方法训练时间短, 对暂态电能质量能进行较好的识别, 但易受噪声影响。

文献[16]提出用二维离散平稳小波变换(2D-DWT)的方法对信号进行检测, 通过整周期法, 把一维数据转化为二维数据。用二维小波函数进行分解并得到一个低频分量和水平、垂直和斜线 3 个高频分量。利用这 4 个部分的信号能量组成的特征向量来进行扰动分类。该方法计算量小, 分类速度快。但该方法对暂态扰动持续时间较短的情况, 特征提取不明显, 识别率较低。

本文提出了一种基于数字图像处理技术^[17-18]的暂态电能质量扰动分类的新方法。这种方法通过提取扰动信号的形态学特征值^[19-20]即可实现对短时暂态电能质量扰动的有效分类。

1 典型的数字图像处理方法

灰度图像实质上是一组取值在一定强度范围内的数据在二维空间分布构成的。灰度图像中, 强度 0 代表黑色, 强度 256 代表白色。图像数据中的每个元素对应于灰度图像的一个像素, 一幅图像可以定义为一个二维函数 $f(x, y)$, 其中 (x, y) 是其平面坐标, 其在点 (x, y) 处的幅值为图像在该点的亮度。在检测电能质量扰动时, 首先对记录的信号数据通过倍乘和平移进行归一化处理, 将电能质量扰动信号电压值量化为 0~256:

$$f: \mathbb{R}^1 \rightarrow [0, 256] \quad (1)$$

二值图像是一个取值只有 0 和 1 的逻辑数组。0 显示为黑, 1 显示为白。选择合适的阈值(本文选 128), 灰度图像中像素的灰度值大于这个阈值的设成 255, 小于这个阈值的设成 0。这样处理后的图像就只有黑白两色, 从而将灰度范围划分成目标和背景两类, 实现了图像的二值化。将灰度图像二值化即得二值图像。基于像素在二值图像中组成对象的连接形式, 我们可以提取电能质量扰动分类所需要的形态学特征值, 包括: 面积, 欧拉数(欧拉数是图像拓扑结构的一种测量, 定义为对象的总个数与对象中孔洞的个数的差), 极值点等等, 从而实现电能质量扰动分类的特征量提取。

1.1 伽马校正

伽马校正是一种对个别像素值进行非线性调

整的方法^[21]。输入灰度值与输出灰度值的关系为

$$s = cr^\gamma \quad (2)$$

其中: c 和 γ 为正常数; r 为输入灰度级; s 为输出灰度级。

图 1 显示取不同 γ 系数下伽马校正的作用结果。不同的 γ 值得到不同的幂律曲线。通过选取较大的 γ 值做伽马校正, 使波形负半部分中较宽范围的暗色输入值映射为较窄范围的输出值。同理, 对于波形正半部分, 也可用较小的 γ 值做伽马校正, 伽马校正主要用于区分暂升、暂降和闪变。

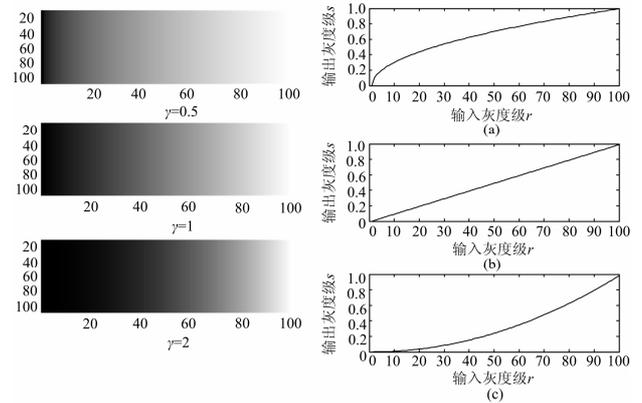


图 1 伽马校正

Fig. 1 Gamma correction

1.2 边缘检测

图像边缘是指图像局部强度变化最显著的部分。边缘检测主要用于图像中灰度强度变化较大的时候, 去除多余的数据, 保留有用特征来进一步识别图像边缘^[21]。本文选用 Canny 算子检测, Canny 算子是最优的阶梯型边缘检测算子, 可以尽可能多地标识出原始图像中的实际边缘。

Canny 算子具体实现步骤如下。

(1) 去噪声: 用高斯滤波器平滑图像。

(2) 梯度计算: 通过式(3)到图像灰度沿着 x 和 y 方向的导数 G_x 、 G_y , 再通过式(4)、式(5)分别求出梯度的幅值和方向。

$$G = (G_x, G_y) = \left(\frac{\partial G}{\partial x}, \frac{\partial G}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$|G(x, y)| = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan(G_y / G_x) \quad (5)$$

(3) 梯度方向确定: 把边缘的梯度方向分成几种角度来找到像素梯度方向的邻接像素。

(4) 遍历图像: 如果某个像素的灰度值与它的梯度方向上前后两个像素的灰度值相比不是最大的,

那么这个像素灰度值就置为 0，即不是边缘。

(5) 用累计直方图计算阈值并寻找边缘：Canny 算子使用的是双阈值，像素值高于阈值的部分一定为边缘，低于阈值的部分一定不是边缘，介于中间的像素值只有在其邻接像素中有超过高阈值的边缘像素才是边缘。

边缘检测主要用于识别瞬时脉冲和振荡脉冲。

1.3 峰谷检测

当 x 轴和 y 轴分别表示像素位置， z 轴表示像素强度时，灰度图像可以被看做一幅三维图像，高灰度值和低灰度值相当于地形图中的山峰和低谷。可以用灰度图的强度来显示局部极大极小值^[21]，如图 2 所示。峰谷检测可以用于检测电压缺口和短时中断。

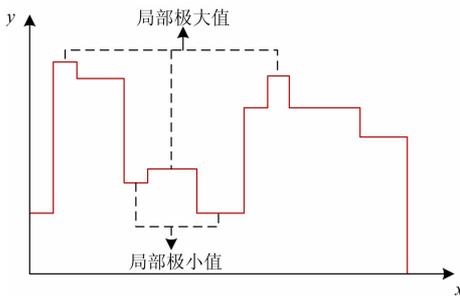


图 2 极大极小值分布图

Fig. 2 Representation of peaks and valleys in a grayscale image

2 基于数字图像处理技术的电能质量扰动分类

暂态电能质量扰动信号的检测与分类一直是电能质量研究领域的难点。暂态扰动信号发生时间短，有非平稳、突发性的特点，难以检测。必须对信号进行精细化分析才能实现对其准确检测。本文通过应用数字图像处理方法对电能质量扰动信号进行处理，增强扰动信号特征，通过对扰动信号转化的二值图进行分析，提取特征值，组成特征向量，实现对电能质量扰动的分类。

2.1 电压暂降

为比较电压暂降信号和正常电压信号的灰度图与二值图的区别，将一个周期的无扰动标准正弦信号作为基准信号，与待检测信号一起进行归一化处理，分别对混合信号正、负部分进行伽马变换，得到电压暂降的灰度图和二值图，如图 3 所示。

暂降区域的灰度强度相对正常信号较暗，如图 3(a)所示。二值图中，暂降区域分别显示为全黑或全白的长条纹，而正常信号部分则显示为黑白相间的条纹，如图 3(b)、图 3(c)所示。图 3(d)中，黑色长条纹长度表示暂降持续时间。分别比较基准信号

与待检测信号二值图的欧拉数和面积，即可判断是否发生暂降。

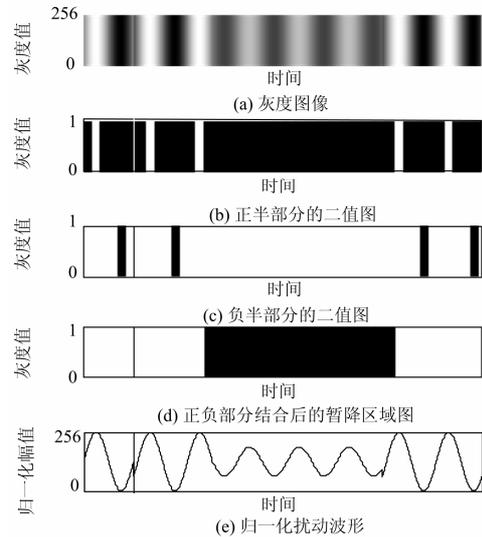


图 3 电压暂降的灰度图和二值图

Fig. 3 Patterns describing a sag in a disturbance waveform

2.2 电压暂升

经伽马校正处理后，电压暂升信号的灰度图和二值图如图 4 所示。暂升区域的灰度强度相对正常信号较亮，如图 4(a)所示。扰动信号暂升区域显示为黑白相间的条纹，正常信号显示为全黑或全白的长条纹，如图 4(b)、图 4(c)所示。图 4(d)中，白色长条纹长度表示暂升持续时间。比较基准信号与待检测信号的欧拉数和面积，判断是否暂升。

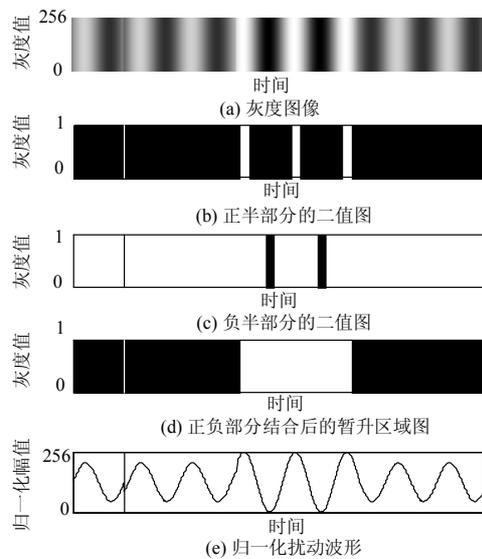


图 4 电压暂升的灰度图和二值图

Fig. 4 Patterns describing a swell in a disturbance waveform

2.3 电压闪变

经伽马校正处理后，电压闪变信号的灰度图和

二值图如图 5 所示。闪变区域条纹面积会不断发生周期性变化, 如图 5(b)~图 5(d)所示。计算电压闪变区域二值图的面积, 通过与基准信号部分的二值图面积对比来判断是否电压闪变。

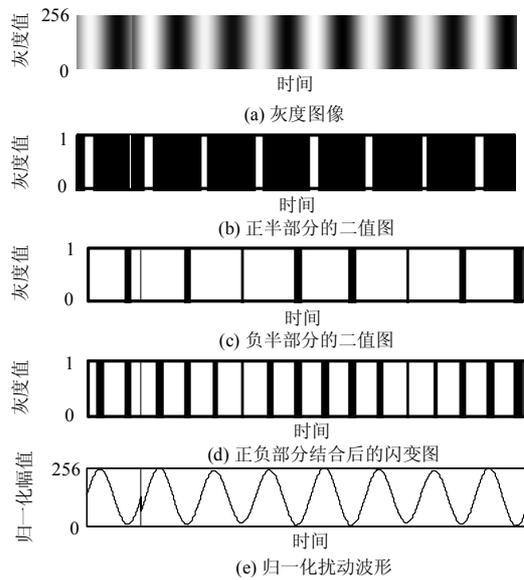


图 5 电压闪变的灰度图和二值图

Fig. 5 Patterns describing a voltage flicker in a disturbance waveform

2.4 瞬时脉冲

检测瞬时脉冲信号, 需使用 Canny 边缘检测器来提取信号特征。经 Canny 边缘检测器检验后, 瞬时脉冲信号的灰度图和二值图如图 6 所示。

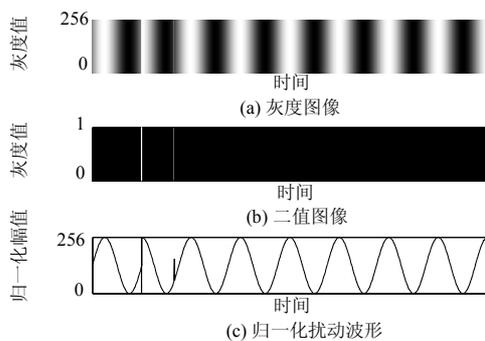


图 6 瞬时脉冲的灰度图和二值图

Fig. 6 Patterns describing an impulsive in a disturbance waveform

瞬时脉冲发生时二值图中会产生一个相对应的细白条纹, 正常信号部分显示为黑色, 如图 6(b)所示。计算其欧拉数和面积, 若基准信号面积为 0, 欧拉数为 0, 待检测信号面积很小, 欧拉数为 1, 判断为瞬时脉冲。

2.5 振荡脉冲

Canny 检测器同样可以用于识别振荡脉冲。混合信号经 Canny 边缘检测器检验后其灰度图和二值图如图 7 所示。正常信号二值图部分为黑色(欧拉数为 0), 振荡脉冲细条纹数较多, 且条纹距离较近。这是区分振荡脉冲和瞬时脉冲的依据。

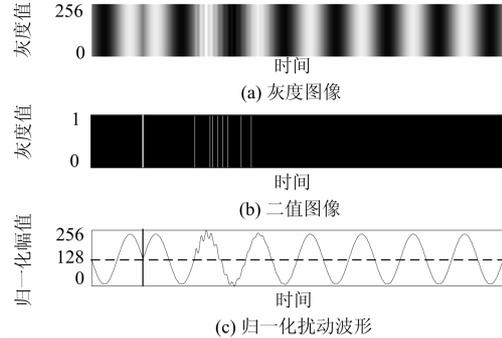


图 7 振荡脉冲的灰度图和二值图

Fig. 7 Patterns describing an oscillatory transient in a disturbance waveform

2.6 电压缺口

电压缺口用局部极大极小值法来检测。加入基准信号做变换后得到的二值图 and 灰度图如图 8 所示。

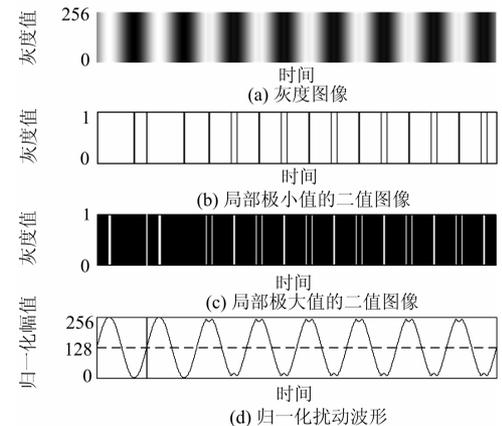


图 8 电压缺口的灰度图和二值图

Fig. 8 Patterns describing notches in a disturbance waveform

扰动信号缺口区域的条纹数在相对应的极大、极小值图像附近为两条, 正常信号区域为一条, 如图 8(b)、图 8(c)所示。检测时, 通过比较基准信号与待检测信号的面积和欧拉数判断是否电压缺口。

2.7 电压中断

电压中断用局部极大极小值法来检测。加入基准信号做极大极小值变换后的灰度图和二值图如图 9 所示。极大极小值法在判断中断时比伽马校正要好, 它能识别出很小的峰值。中断区域在二值图像中显示为黑色的长条纹, 如图 9(b)、图 9(c)所示。

图 9(d)中的黑色长条纹显示中断持续时间。检测时,通过计算基准信号与待检测信号的欧拉数和面积来判断是否电压中断。

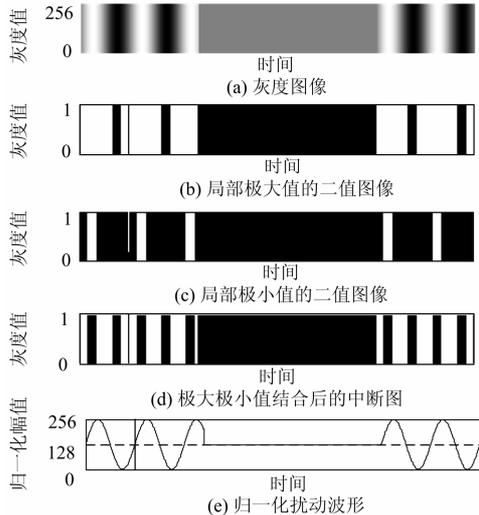


图 9 电压中断灰度图

Fig. 9 Patterns describing an interruption in a disturbance waveform

3 基于数字图像处理技术的特征值提取及 PNN 分类方法

3.1 特征值的选取

基于前面的分析可知,通过选取合适的二值图中的形态特征量可以实现对电能质量扰动信号分类。本文选取 10 个特征值组成特征向量:

- 1) 正、负部分信号二值图结合后的面积 p ;
- 2) 正、负部分信号二值图结合后的欧拉数 L ;
- 3) 正半部分信号二值图的面积 $p1$;
- 4) 正半部分信号二值图的欧拉数 $L1$;
- 5) 负半部分信号二值图的面积 $p2$;
- 6) 负半部分信号二值图的欧拉数 $L2$;
- 7) 基准信号正半部分的面积 $p3$;
- 8) 基准信号负半部分的面积 $p4$;
- 9) 基准信号正半部分的欧拉数 $L3$;
- 10) 基准信号负半部分的欧拉数 $L4$ 。

3.2 基于 PNN 的分类方法实现

PNN^[15]是以概率统计思想和贝叶斯(Bayes)分类规则构成的分类神经网络。PNN 的网络学习过程简单,学习速度快,分类更准确,对错误、噪声容忍高,适合应用于模式识别、分类等问题^[22]。

3.3 分类步骤

扰动分类流程图如图 10 所示。

首先,对扰动信号进行归一化处理,对信号正、负部分分别做伽马校正,得到其二值图像。对伽马

校正后的正、负部分二值图像做腐蚀膨胀处理后,逻辑取反相加,得到其正、负部分结合二值图。通过检测其 L 、 $L3$ 、 $L4$ 、 $p3$ 、 $p4$ 的值,来判断暂升暂降闪变。

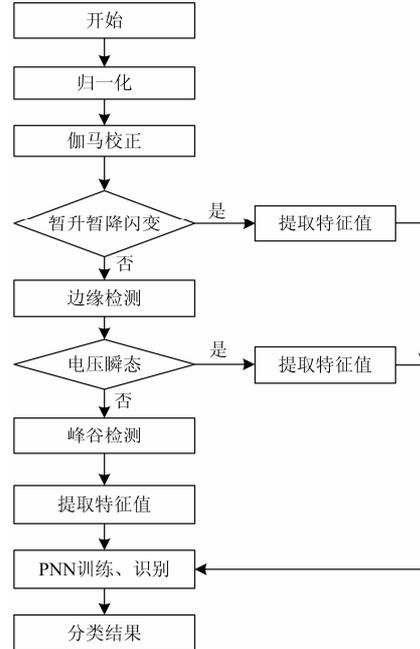


图 10 扰动分类识别流程图

Fig. 10 Flow chart of the disturbance classification

若 $L=1$, $L3=0$, $L4=1$, $p3=0$, $p4=1$, 判断为暂升;

$L=2$, $L3=1$, $L4=2$, $p3=0.1760$, $p4=0.8280$ (不同的 γ 系数下 $p3$ 、 $p4$ 取值不同,本文按经验分别取值为 0.2 和 3), 判断为暂降;

$L=16$, $L3=1$, $L4=2$, $p1 < p3$, $p2 > p4$, 则为闪变。

再通过选取合适的阈值和 σ 值(本文按经验取阈值范围为 0.04~0.4, σ 值为 0.5)对信号做边缘检测,并检测其 $p3$ 、 $p4$ 及 L 值,若 $p3$ 、 $p4$ 为 0,且 $L=1$,判断为瞬时脉冲;若 $p3$ 、 $p4$ 为 0, $L > 2$,判断为振荡脉冲。

最后通过对信号做极大极小值变换,判断是否为缺口或中断。

3.4 算例分析

通过 Matlab7.7 产生上述七种典型扰动和正常信号模型样本 2 400 个。以相同采样率(250 点/周期)采样,总共采样点数为 2 000。为充分证明特征提取和扰动分类的可靠性,扰动的开始时间、幅度、间隔、振荡频率等都采用随机函数生成。扰动信号类型如表 1 所示。每类扰动的训练样本和测试样本分别为 200 个和 100 个。用本文所提方法和二维离散平稳小波方法分别进行分类比较,分类结果如表

2 所示。

由表 2 可知, 基于数字图像处理的方法能精确地实现暂态电能质量扰动分类。在某些扰动类型的

识别上其识别率达到 100%, 说明提取的特征值和判断方法能非常有效地对扰动进行分类。

表 1 PDQ 信号模型

Table 1 Signal models of PDQ

扰动类型	信号模型	参数设置
电压暂升	$v(t) = \{1 + A[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \sin(\omega_0 t)$	$0.1 \leq A \leq 0.9, T \leq t_2 - t_1 \leq 20T$
电压暂降	$v(t) = \{1 - A[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \sin(\omega_0 t)$	$0.1 \leq A \leq 0.9, T \leq t_2 - t_1 \leq 20T$
电压闪变	$v(t) = [1 + A \cos(B\omega_0 t)] \cos(\omega_0 t)$	$0.05 \leq A \leq 0.2, 0.05 \leq B \leq 0.5$
瞬时脉冲	$v(t) = \sin(\omega_0 t) + 2\delta(t - 0.3)$	
振荡暂态	$v(t) = \sin(\omega_0 t) + Ae^{-\alpha(t-t_1)} \sin(\alpha\omega_0 t)[u(t-t_1) - u(t-t_2)]$	$0.1 \leq A \leq 0.8, 10 \leq \alpha \leq 15c$ $5 \leq c \leq 10, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$
电压缺口	$v(t) = \sin(\omega_0 t) - \text{sgn}(\sin(\omega_0 t)) \sum_{i=0}^{26} A\{u[t - (t_1 + 0.02i)] - u[t - (t_2 + 0.02i)]\}$	$0.1 \leq A \leq 0.4$
电压中断	$v(t) = \{1 - A[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \sin(\omega_0 t)$	$0.9 \leq A \leq 1, T \leq t_2 - t_1 \leq 20T$

表 2 分类结果

Table 2 Classification results

扰动类型	图像处理方法识别率	二维离散平稳小波识别率
正常电压	100.0%	99.0%
电压暂升	100.0%	98.0%
电压暂降	100.0%	97.0%
电压闪变	99.0%	95.0%
瞬时脉冲	94.0%	98.0%
振荡脉冲	95.0%	97.0%
电压缺口	97.0%	95.0%
电压中断	96.0%	96.0%
平均	97.6%	96.9%

与二维离散平稳小波方法相比, 本文方法对暂升、暂降、闪变具有更高识别率。这是因为其形态学特征值能准确反映扰动特征、易于分类的缘故; 对瞬时脉冲和振荡脉冲, 本文方法的识别率比二维离散小波的略低。这是因为本文为了加快识别速度, 对这两种扰动进行边缘检测时选取了相同阈值(0.04~0.4), 振荡脉冲扰动特征不明显时, 较小边缘特征向量的提取会产生误差。若是单独对瞬时脉冲(0.04~0.4)和振荡脉冲(0.01~0.4)设置阈值, 本文方法的识别率将大大提高。

4 结论

引入数字图像处理方法对暂态电能质量扰动信号进行变换和分类识别, 其变换后的灰度图像能清楚地检测出扰动发生的位置。

暂态电能质量扰动信号二值图像中的形态学特征(欧拉数和面积)能有效反映暂态电能质量扰动信

号的特征, 为暂态电能质量扰动分类提供可靠依据。

本文基于数字图像处理的方法属于精细的扰动识别方法。它在低噪声的情况下能对扰动信号进行准确识别。在保证信号分类精度的前提下, 怎样通过数字图像处理方法提升信号的抗干扰能力、如何合理选择相关阈值等是值得进一步探讨的课题。

参考文献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
LIN Haixue. Main problems of modern power quality[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12.
- [2] GARGOOM A M, ERTUGRUL N, SOONG W L. A comparative study on effective signal processing tools for power quality monitoring[C]// Proceedings of 11th European conference on power electronics and applications, Dresden, Germany; September 11-14, 2005: 1-10.
- [3] OMER N G, DOGAN G E. 2-D analysis and compression of power quality event data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 791-798.
- [4] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.
LU Boyong, HUANG Wenqing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2011, 26(5): 171-177.
- [5] 秦英林, 田立军, 常学飞. 基于小波变换能量分布和神经网络的电能质量扰动分类[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 64-67.
QIN Yinglin, TIAN Lijun, CHANG Xuefei. Classification of power quality disturbance based on wavelet energy distribution and neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 64-67.

- [6] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
ZHANG Peng, LI Hongbin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.
- [7] 李立, 易吉良, 朱建林. 采用改进不完全S变换估计电能质量扰动参数[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 187-194.
LI Li, YI Jiliang, ZHU Jianlin. Parameter estimation of power quality disturbances using modified incomplete s-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 187-194.
- [8] 岳明道. 基于S变换和分类树的电网暂态电能质量扰动分类辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 32-37.
YUE Mingdao. Transient power quality disturbance classification and identification in grid based on S transform and classification trees[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 32-37.
- [9] 易吉良, 彭建春, 谭会生. S变换在电能质量扰动分析中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 141-147.
YI Jiliang, PENG Jianchun, TAN Huisheng. A summary of S-transform applied to power quality disturbances analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 141-147.
- [10] ZHAO F, YANG R. Power quality disturbance recognition using S-transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 944-950.
- [11] 孙楚平, 杨旭. 基于S变换模时频矩阵的电能质量扰动检测与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 68-72.
SUN Chuping, YANG Xu. Detection and recognition of power quality disturbance based on module time-frequency matrixes by S transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 68-72.
- [12] 唐求, 王耀南, 郭斯羽, 等. 基于S变换与PNN的电能质量多扰动检测[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1668-1673.
TANG Qiu, WANG Yaonan, GUO Siyu, et al. Power quality disturbance detection base on S transform and PNN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8): 1668-1673.
- [13] 徐方维, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 基于改进S变换的电能质量扰动分类[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 77-84.
XU Fangwei, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. classification for power quality short duration disturbances based on generalize S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 77-84.
- [14] 李智勇, 吴为麟. 基于相空间重构的电能质量扰动特性提取方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(4): 672-675.
LI Zhiyong, WU Weilin. Power quality disturbance feature extraction based on phase space reconstruction[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(4): 672-675.
- [15] 李智勇, 吴为麟, 林震宇. 基于相空间重构和支持向量机的电能质量扰动分类方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 70-75.
LI Zhiyong, WU Weilin, LIN Zhenyu. A power disturbance classification method based on phase space reconstruction and support vector machines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 70-75.
- [16] 李霖, 杨洪耕. 基于二维离散平稳小波的电能质量扰动分类[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 21-26.
LI Lin, YANG Honggeng. Power quality disturbance classification based on 2-d static wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 21-26.
- [17] SHAREEF H, MOHAMED A. Power quality disturbance detection and visualization utilizing image processing methods[C] // Proceeding International Middle East Power Conference, Cairo, Egypt, December 2010.
- [18] DOGAN G E, OMER N G. Power quality event detection using joint 2D wavelet subspaces[J]. IEEE Trans Inst Meas, 2004, 53(4): 1040-1046.
- [19] SHAREEF H, MOHAMED A, IBRAHIM A A. An image processing based method for power quality event identification[J]. Electrical Power and Energy Systems Res 2013, 46(2): 184-197.
- [20] 张艳玲, 刘桂雄, 曹东, 等. 数学形态学的基本算法及在图像预处理中应用[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(3): 356-359.
ZHANG Yanling, LIU Guixiong, CAO Dong, et al. Basic operators of mathematical morphology and application in image preprocessing[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(3): 356-359.
- [21] 冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [22] 张文涛, 王成山. 基于概率神经网络的电压暂态扰动分类[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 34-38.
ZHANG Wentao, WANG Chengshan. Classification of the voltage transient disturbances based on probabilistic neural networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 34-38.

收稿日期: 2014-09-25; 修回日期: 2014-10-30

作者简介:

江辉(1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能电网、电能质量分析与控制; E-mail: huijiang@szu.edu.cn

郑岳怀(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。

(编辑 周金梅)