

基于数学形态学复合滤波和无时延 d-q 变换的 电压暂态扰动识别

王霄桦, 程浩忠, 胡丹

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 暂态电压扰动的识别是当前电能质量领域研究的热点, 采用了无时延 d-q 变换进行暂态电压扰动识别, 从而解决了延时 60° 构造对称三相电压的 d-q 变换的镜像扰动问题, 针对无时延 d-q 变换易受谐波及高频噪声干扰的缺点, 研究了数学形态学结合离散积分的滤波方案, 用以取代传统的数字低通滤波器。在 LabVIEW 中的将该方案与传统数字低通滤波器进行对比, 结果表明该滤波方案响应速度快, 适应能力强, 检测精度高, 具有非常优越的综合性能。

关键词: 数学形态学; 离散积分; 复合滤波; d-q 变换; 电压扰动; 响应速度; 电压骤降; 电压骤升

Recognition of transient voltage disturbances based on integrated mathematics morphology filters and non-delay d-q transform

WANG Xiao-hua, CHENG Hao-zhong, HU Dan

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Recognition of transient voltage disturbances is one of the focuses of power quality study. This paper proposes a method based on the improved non-delay d-q transform which eliminates the 60° minor disturbance. Because the non-delay transform is easy to be interfered by harmonics and noises, a new filter combining with Mathematical Morphology and Discrete Integral is established, in order to replace the traditional digital filters. Labview is used to do the comparison with traditional digital filters, and simulation results indicates that this method has excellent comprehensive performance such as strong anti-interference ability, faster dynamic response speed and higher precision.

Key words: mathematical morphology; discrete integral; integrated filters; d-q transform; voltage disturbances; response speed; voltage sag; voltage swell

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)09-0032-05

0 引言

随着众多高新技术产业的快速发展, 以 IT 行业为代表的敏感负荷对电网的供电电能质量, 尤其是电压骤降 (Sag)、电压骤升 (Swell) 等暂态电能质量提出了更高的要求。对这些企业而言, 一次持续时间几十毫秒的电压骤降即可引起数百万元的经济损失。因此国际上对于暂态电能质量的研究给予了高度的重视, 国内对于暂态电能质量问题的研究也方兴未艾。

传统上对于暂态电压扰动的分析方法有电压均方根值法和短时傅里叶变换法 (STFT)。电压均方根值法虽然算法简单, 但是其延时至少在半个周期以上, 并且无法得到扰动的准确发生时间。而短时傅里叶变换 (STFT) 虽然解决了傅立叶变换不能

描述时变信号的问题, 但是由于实际多尺度过程的分析要求时-频窗口具有自适应性, 而 STFT 的时-频窗口固定不变。所以它不适合分析像高频振荡、电压骤降等动态电压质量这样的多尺度过程和突变过程, 且这种方法的离散形式没有正交展开, 难以实现高效算法^[1]。近年来提出的小波变换方法对信号具有自适应性, 具有时域和频域同时局部化的特点, 且对突变信号非常敏感, 不过目前对于小波基的选择还没有统一的方法或可遵循的原则。而且小波变换需要计算多个尺度, 屡次迭代计算, 计算量大^[2], 此外, 小波变换的结果本身难以直接进行扰动类型识别, 常需要与人工智能等方法结合, 更加重了计算负担, 从而使得小波变换在实时系统中的应用非常困难。

瞬时无功功率理论是目前在谐波和无功电流

的监测^[3,4]方面应用较为成功的方法之一。由于瞬时无功理论不适用于三相不对称系统,文献[5]提出了由单相电压延时 60° 构造虚拟对称三相电压的方法,但该方法变换结果在扰动持续时间小于 $1/6$ 周期时存在较大误差,在扰动超过 $1/6$ 周期时会产生镜像扰动干扰。针对这些问题,文献[6]提出一种时无延的改进d-q变换方法。在此基础上,本文利用数学形态学和离散积分的复合滤波方法来代替传统数字低通滤波器,实验结果表明该方法具有更高的精度,以及更快的响应速度。

1 时无延d-q变换原理

由瞬时无功理论,将abc三相对称电压变换到d-q轴的关系式为

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中: } C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ -\cos \omega t & -\cos(\omega t - 2\pi/3) & -\cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

变换阵 C 中 $\sin \omega t$ 和 $\cos \omega t$ 是与a相电压同相位的正、余弦信号。

理想系统三相电压表达式如下所示

$$\begin{cases} v_a = \sqrt{2}V \sin \omega t \\ v_b = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = \sqrt{2}V \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

则d-q变换结果为

$$\begin{cases} v_d = \sqrt{3}V \\ v_q = 0 \end{cases} \quad (3)$$

当有相位跳变时变换结果为

$$\begin{cases} v_d = \sqrt{3}V \cos \alpha \\ v_q = \sqrt{3}V \sin \alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 为电压扰动发生时的相位跳变值。

现利用a相电压构造另外两相虚拟电压。由式(2),可得

$$\begin{cases} v_a' = \sqrt{2}V \omega \cos \omega t \\ \cos \omega t = \frac{v_a'}{\sqrt{2}V \omega} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_a' 是a电压的导数。利用三角函数公式将式(2)

中 v_b 、 v_c 展开得:

$$\begin{cases} v_b = \sqrt{2}V \sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} + \sqrt{2}V \sin(\frac{2\pi}{3}) \cos \omega t \\ v_c = \sqrt{2}V \sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} + \sqrt{2}V \sin(\frac{2\pi}{3}) \cos \omega t \end{cases} \quad (6)$$

将公式(5)代入式(6)得

$$\begin{cases} v_b = -\frac{1}{2}v_a' - \frac{\sqrt{3}}{2\omega}v_a' \\ v_c = -\frac{1}{2}v_a' + \frac{\sqrt{3}}{2\omega}v_a' \end{cases} \quad (7)$$

这样便完成了对虚拟对称三相电压的构造。将式(7)及 v_a 代入式(1),即可得到 v_d 和 v_q 。

由上面分析可见,电压的基波有效值在 v_d 中表现为直流分量,第 h 次谐波信号则分解为 $h \pm 1$ 次谐波信号的叠加;q轴电压的变换结果中直流分量为0,谐波信号的变换结果与d轴相似。定义瞬时电压有效值为:

$$v_{\text{rms}}(t) = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{v_d^2 + v_q^2}(t) \quad (8)$$

式(8)即瞬时有有效值计算的原理,时无延d-q变换可适用于各种形状的电压扰动检测,其物理意义明确,通过监测瞬时有有效值是否超过一定的限值即可检测到是否有电压骤降、骤升发生。

2 数学形态学

2.1 形态学的基本运算

数学形态学(Mathematical Morphology)是一门建立在集合理论和积分几何理论之上学科,它的基本思想是用一个类似于“探针的”结构元素在信号中连续移动,考察信号的各个部分之间的关系,提取信号的主要特征^[7,8]。

在二值形态变换中最常用的运算是膨胀运算(Dilation)、腐蚀运算(Erosion)、开运算(Opening)、闭运算(Closing),将二值形态变换推广到函数领域便成为灰度变换。电力系统电压信号多为一维信号,可以用集合方式表示。现就一维信号的灰度变换加以介绍。

一维灰度变换的定义如下:设输入序列 $f(n)$ 和 $g(n)$ 分别是定义在 $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$ 和 $G = \{0, 1, \dots, M-1\}$ 上的离散函数,且 $N \geq M$ 。用序列函数 $g(n)$ 对信号 $f(n)$ 进行的灰度膨胀和腐蚀分别定义为:

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n-x) + g(x) : x \in G\} \quad (9)$$

$$(f \ominus g)(n) = \min\{f(n+x) - g(x) : x \in G\} \quad (10)$$

上式中: $n=(0,1,2, \dots, N-1)$ 。

在形态学中, 集合 $g(n)$ 称为结构元素。结构元素即“探针”, 去局部探测图形中每一区域的几何特征, 通过不断的移动结构元素, 便可以提取出图像中的特征信息作分析和描述。

2.2 形态学滤波器

腐蚀运算可消除图形边缘小突起部分; 膨胀运算可填充图形中的小孔, 它们对信号有一定程度的平滑作用, 腐蚀和膨胀并不是互逆运算, 因此, 可以利用它们的不同级联方式构成不同的形态学滤波器。例如, 可以先对信号进行腐蚀, 然后对其结果进行膨胀运算, 或者先对信号进行膨胀运算再腐蚀其结果(这里使用同一种结构元素)。这就构造了两种新的形态学变换, 前一种称为开运算, 定义如式(11), 后一种称为闭运算, 定义如式(12)。

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (11)$$

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (12)$$

开运算可用于过滤信号上方的峰值噪声, 除去毛刺及小桥结构; 而闭运算可用于平滑或抑制信号下方的波谷噪声, 填平小沟结构。基于开、闭运算可以构造 3 种形态学滤波器, 交替滤波、混合滤波和交替混合滤波, 其形式如下所示:

交替滤波器

$$[(f)oc(g)](n) = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (13)$$

$$[(f)co(g)](n) = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (14)$$

混合滤波器

$$[(f)hf(g)](n) = (f \circ g + f \bullet g)(n)/2 \quad (15)$$

交替混合滤波器

$$[(f)ah(g)](n) = [(f)oc(g) + (f)co(g)](n)/2 \quad (16)$$

3 检测过程

改进 d-q 变换虽然没有 60° 镜像扰动问题, 但由于其构造虚拟三相过程中使用了求导运算, 会将输入信号中的 h 次谐波放大 h 倍, 同理电网的背景噪声也会被放大, 从而使得改进 d-q 变换的输出结果极易被干扰, 以至完全无法辨识。因此需要一个前置于 d-q 变换的滤波器过滤输入信号中除基波以外的其他成分。研究发现数学形态学结合离散积分的复合滤波具有截止频率好, 响应速度快的特点, 用其代替传统的数字低通滤波, 电压扰动检测方案如图 1 所示, 单相电压经复合滤波后构造三相电压, 同时由锁相环锁定相电压频率, 产生同步正、余弦信号, 经矩阵运算最终得到瞬时电压信号。

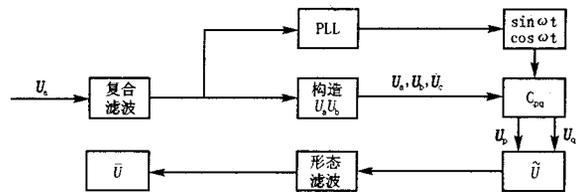


图1 暂态电压扰动检测原理图

Fig. 1 Recognition procedure for transient voltage disturbances

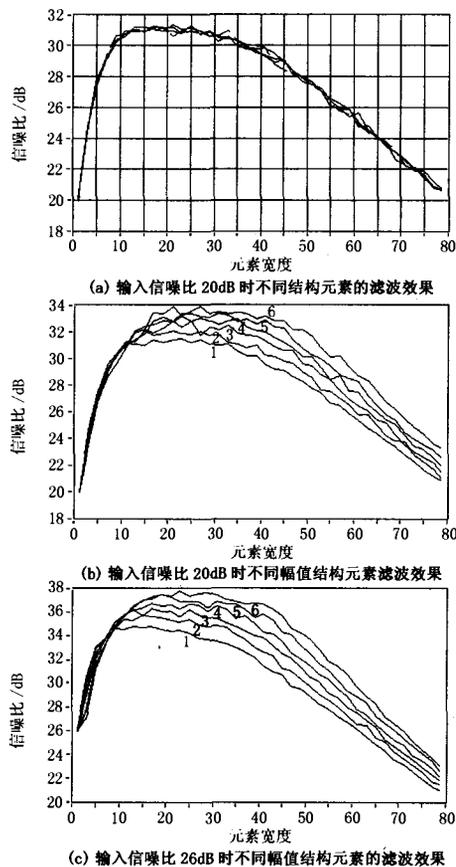
形态学滤波器对于滤除高频噪声具有良好的效果, 而结构元素的选择对滤波效果的影响非常关键。本文中前置滤波器采用混合形态学滤波器, 其形式如式(15)所示。输入信号序列对应式(15)中 f , 结构元素序列对应 g 。形态学滤波器的常见结构元素有直线结构、半圆结构、三角结构及正弦结构。图 2(a) 显示四种结构元素的滤波能力非常接近, 其滤波曲线几乎重合, 而元素宽度对滤波效果影响非常明显。当宽度过大时会引起输出波形的严重失真。其后用信噪比分别为 20 dB、26 dB 的输入信号观察不同幅值结构元素的滤波效果, 结果如图 2(b)、2(c) 所示。可见, 增加幅值可以提升滤波效果, 在低噪声水平时这种提升更加明显。但是取得最佳效果时结构元素的宽度将增大, 计算量也随之增加, 影响实时性。综合考虑, 确定结构元素幅值为 0.06, 宽度为 18 的半圆结构。

离散积分滤波利用正弦函数的正交完备性来实现滤波, 式(17)即 Simpson 积分公式^[9], 其实质是利用一个滑动窗口中信号的平均值作为当前点的值。

$$v = \frac{2}{3N} \left[\sum_{l=0}^{N/2-1} v(2l) + \sum_{l=1}^{N/2} v(2l-1) \right] \quad (17)$$

其中: N 即滑动窗口的宽度, 其大小决定了复合滤波器的响应速度。同时也决定整个检测系统的响应速度。较大的 N 值有利于滤除低次谐波, 但是相应地会降低检测系统的跟踪性能。故 N 的取值应该同后置形态学滤波器的结构元素宽度紧密配合, 以寻找到滤波性能与响应速度之间的最佳平衡点。

d-q 变换的输出结果中, 除了直流成分外, 还可能含有 2、4、6 等次谐波。为了能滤除 2 次及以上的谐波而只保留直流成分, 后置的形态学滤波器采用宽度为 65 的直线结构元素, 使用交替 CO 滤波器形式, 其形式如式(14)所示, 从而有效抑制信号中由 3、5 次谐波所产生的波动。此时离散积分窗宽定为 40。



图中 1~6 曲线分别对应元素幅值为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12

图 2 结构元素选择示意图

Fig. 2 Selection of structure element

4 算例及辨识效果比较

为了验证本文提出的电压暂态扰动方案, 利用 LabVIEW 产生幅值为 1 V 的正弦电压信号, 在正弦信号上叠加不同程度的谐波以及高斯白噪声, 以便更真实地模拟电网的实际情况。信号采样率为 12 800 点/s, 每周波 256 采样点, 连续产生 20 周波 5120 点的波形, 并在第 8 周波, 即 2048 点发生持续时间两个工频周期 (40 ms), 幅度为 50%, 相位跳变 15° 的矩形电压骤降。将本文的方法同常见的数字滤波器滤波方案进行对比以检验性能, 对照系统的滤波器配置如表 1 所示。

实际电网情况千差万别, 本文根据相关经验, 设定两种模拟电网条件, 即一般、良好两种条件, 在各个条件下试验所有方案并将输出结果汇总比较, 两种条件具体如表 2 所示, 表中数值为幅值, 单位均为 V。

表 1 对照系统滤波器配置

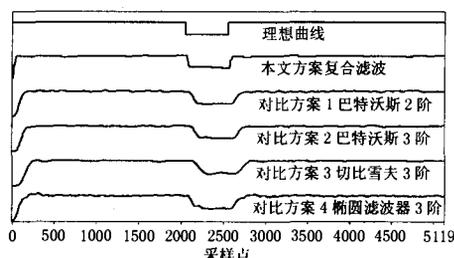
Tab.1 Configuration of contrastive filter

	前置滤波器	后置滤波器
方案1	巴特沃斯, 2 阶, 截止频率 70 Hz	巴特沃斯, 2 阶, 截止频率 70 Hz
方案2	巴特沃斯, 3 阶, 截止频率 80 Hz	巴特沃斯, 3 阶, 截止频率 80 Hz
方案3	切比雪夫 I 型, 3 阶, 截止频率 50 Hz	切比雪夫 I 型, 3 阶, 截止频率 40 Hz
方案4	椭圆滤波器, 3 阶, 截止频率 80 Hz,	椭圆滤波器, 3 阶, 截止频率 150 Hz

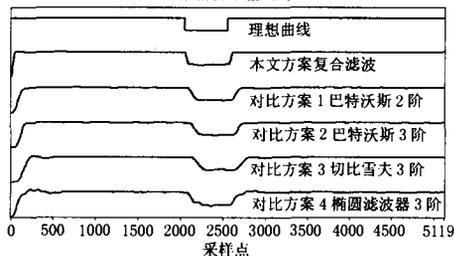
表 2 电网条件

Tab.2 Experiment condition

	3 次	5 次	7 次	11 次	13 次	23 次	25 次	噪声	畸变率
一般	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	14.9%
良好	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	3.0%



(a) 一般情况下输出对比



(b) 良好情况下输出对比

图 3 电压有效值检测效果对比

Fig. 3 Contrast of voltage RMS detection

实验结果如图 3 所示, 由图 3 可见, 本文方案对理想曲线的吻合程度最高, 对电压跌落形态的刻画最准确, 设定 90% 额定电压为电压骤降限值, 当瞬时有有效值低于 90% 额定电压时即判断电压骤降开始, 当电压恢复到 90% 以上即判断骤降结束, 将各方案运行 3 遍取平均值, 统计信息结果在表 3 列出。

仿真结果表明, 本文的复合滤波方案对电压扰动响应速度明显快于其他滤波器方案, 瞬时电压曲线反应灵敏, 其响应时间不超过五分之一工频周期, 时间定位能力强, 而且对扰动幅值的测量精度也明显高于其他滤波器。同时可以看出, 该方案具有很强的抗干扰能力, 可以很好的适应实际电网的复杂情况。

表 3 电压骤降识别结果
Tab.3 Result of sag detection

	理想情况	开始点	结束点	最低值/(%)	平均值/(%)
一般情况	理想情况	2 048	2 560	0.50	0.50
	本文方案	2 065	2 588	0.54	0.48
	方案 1	2 119	2 682	0.64	0.52
	方案 2	2 143	2 709	0.70	0.53
	方案 3	2 174	2 754	0.72	0.52
良好情况	本文方案	2 066	2 598	0.55	0.51
	方案 1	2 113	2 677	0.65	0.52
	方案 2	2 142	2 706	0.71	0.51
	方案 3	2 172	2 756	0.73	0.52
	方案 4	2 108	2 683	0.58	0.56

进一步地,利用 Matlab 的 PSB 工具箱建立输电系统模型如图 4 所示, 设定 A 点 0.1 s 时发生单相短路故障, 0.2 s 时开关动作切除故障。B 点为 300 km 输电线路的中点。将 B 点电压波形数据导入 LabVIEW 进行扰动识别, 判断电压骤降开始时间 0.100 2 s, 结束时间 0.207 9 s。仿真结果表明, 由于后置 CO 滤波器对电压下降沿和上升沿具有“前推”作用, 这在一定程度上弥补了复化积分滤波造成的延时, 只要参数配合得当, 可以大大提高扰动时间定位精确度。B 点波形和输出结果的对照如图 5 所示。

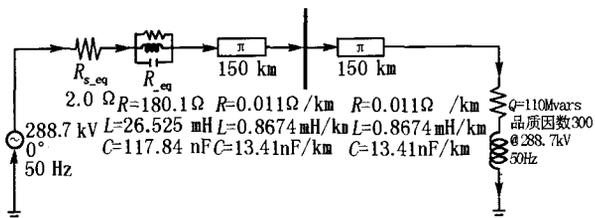


图 4 仿真系统电路图

Fig.4 System diagram of simulink

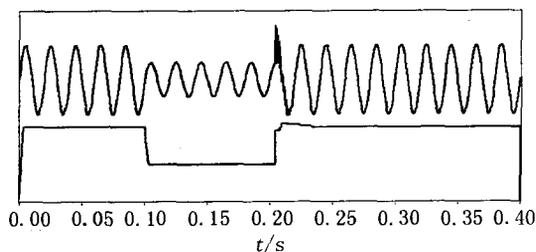


图 5 电压骤降及识别结果对照

Fig.5 Voltage sag and its recognition

5 结论

本文采用了改进无时延 d-q 变换获得瞬时电压

有效值, 为了提高无时延 d-q 变换的抗干扰能力, 利用数学形态学滤波器和离散积分混合滤波抑制噪声和谐波, 最后利用直线结构的混合滤波器过滤 d-q 变换输出中的低次谐波。仿真结果表明该方案相比传统低通数字滤波器具有更良好的综合性能, 并且由于形态学滤波器运算简单, 适合运用于实时监测系统。由该方案设计的电压暂态扰动识别模块已经成功运用于上海交通大学自主研发的高性能电能质量综合监测系统中, 并将进行进一步的开发实验。

参考文献

- [1] Daubechies I. The Wavelet Transform Time-frequency Localization and Signal Analysis[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1990, 36 (5): 961-1005.
- [2] Peng F Z, Akagi H, Nabae A. Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1993, 29(1):144-152.
- [3] Fujita H, Akagi H. A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems—Series Connection of Passive and Active Filters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1991, 27(6):1020-1025.
- [4] 李庚银, 罗 艳, 周 明, 等. 基于数学形态学和网格分形的电能质量扰动检测及定位[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (2): 25-30.
LI Geng-yin, LUO Yan, ZHOU Ming, et al. Power Quality Disturbance Detection and Location Based on Mathematical Morphology and Grille Fractal[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 25-30.
- [5] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 基于dq变换和ANN的电能质量扰动辨识[J]. 电力系统自动化, 2001, 14(1): 24-27.
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al. Power Quality Disturbance Identification Using d-q Conversion-based Neural Classifier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 14(1): 24-47.
- [6] 赵国亮, 刘宝志, 肖湘宁, 等. 一种无时延的改进d-q变换在动态电压扰动识别中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 53-57.
ZHAO Guo-liang, LIU Bao-zhi, XIAO Xiang-ning, et al. Application of Improved d-q Transform Without Time Delay in Dynamic Voltage Disturbance Identification[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 53-57.
- [7] 何益宏, 卓放, 等. 基于瞬时无功功率里谱谐波检测的离散滤波方法[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(4): 13-50.
HE Yi-hong, ZHUO Fang, et al. A Discrete Filtering Method for Harmonics Detection Based on Instantaneous Reactive Power Theory[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(4): 13-50.

(下转第 59 页 continued on page 59)

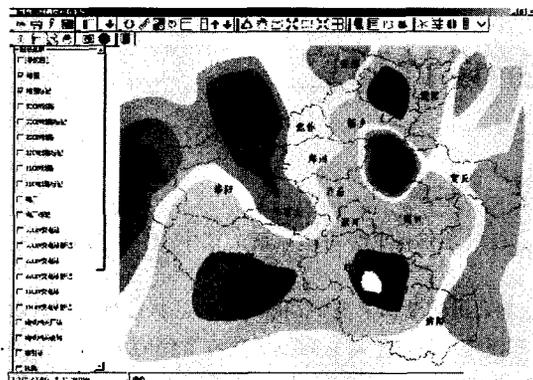


图6 TIN法生成的等高线

Fig.6 Contour used by TIN method

TIN 算法是基于构建不规则三角网, 通常使用线性内插法 (LINEAR) 或双变量五次齐次内插法 (QUINTIC), 寻找和跟踪等值点, 再对等值点联接形成等值线。在构建三角形时, 尽管对三角形进行了优化, 难免还是出现棱角很尖锐的三角形, 即使运用曲线拟合也还是会出现等高线折点处交角尖锐的现象, 整体的效果不如规则格网法美观。

规则格网用于不规则边界区域时, 边界处需要特殊处理。当格网点与地貌特征线不重合时, 不能准确表示地形的结构与细部, 因此, 基于格网地形数据生成的等高线不能准确地描述地形。为克服其缺点, 还需要附加特征地形数据, 如地形特征点、山脊线、山谷线、断裂线等, 从而构成完整的地形数据。由于节点运行数据曲面没有实际地形那样具有像陡崖、断层等复杂情况, 因此使用规则格网法形成电压等高线是可以满足要求的。

此外, 规则格网数据便于数据的检索, 可以用统一的算法完成检索和插值检索。由于矩形格网地形数据存储量最小, 可以方便地进行压缩存储, 便于使用而且容易管理, 因而使用规则格网数据形成等高线是目前应用较广泛的一种形式。

参考文献

[1] Modeling-our-World.ESRI公司ArcGIS白皮书[Z].2000.

(上接第 36 页 continued from page 36)

- [8] 王晶, 束洪春, 陈学允.小波变换电力系统工学应用综述[J].电网技术, 2003, 27(6): 51-63.
WANG Jing, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun.A Survey of Wavelets Transform Applying to Power System Engineering[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 51-53.
- [9] 陈平, 李庆民.基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J].中国电机工程学报, 2005, 25 11(6): 60-65.
CHEN Ping, LI Qing-min.Design and Analysis of Mathematical Morphology-based Digital Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 11(6): 60-65.

Modeling-our-World.ArcGIS Whitepaper, ESRI[Z].2000.

- [2] 韩祯祥, 吕捷, 邱家驹. 科学计算可视化及其在电力系统中的应用前景[J]. 电网技术, 1996, 20(7): 22-27.
HAN Zhen-xiang, Lü Jie, QIU Jia-ju. Visualization in Scientific Computing and Its Application Prospects in Power System[J]. Power System Technology, 1996, 20(7):22-27.
- [3] 樊红, 詹小国. arc/info应用与开发技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.217-245.
FAN Hong, ZHAN Xiao-guo. Application and Development Technology of ARC/INFO[M].Wuhan: Wuhan University Press,2002. 217-245.
- [4] 侯景儒, 尹镇南. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
HOU Jing-ru, YIN Zhen-nan. Practical Geostatistics[M]. Beijing:Geologic Press,1998.
- [5] Overbye T J.Visualization of Power Systems[M]. PSERC Publication, 2002.2-36.
- [6] 邬伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统原理方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 178-190.
WU Lun, LIU Yu, ZHANG Jing. GIS Theory and Application[M]. Beijing:Science Press, 2001. 178-190.
- [7] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3).
LI Xin, CHENG Guo-dong, LU Ling. Comparison of Spatial Interpolator Method[J]. Advance in Earth Sciences,2000,15(3).
- [8] Goodchild M F,Iam N S,Areal Interpolation,a Variant of the Traditional Spatial Problem[J].Geo-processing, 1980,(1): 197-312.

收稿日期: 2006-10-31; 修回日期: 2006-12-21

作者简介:

王杰 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统信息整合及数据平台; E-mail: song0576@163.com

吴琴 (1976-), 女, 工程师, 主要从事电力信息技术方面的研究;

樊淑丽 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统信息整合与图形显示。

收稿日期: 2006-11-13; 修回日期: 2007-01-08

作者简介:

王霄桦 (1980-), 男, 硕士研究生, 从事电能质量分析方面研究; E-mail: wang_xiaohua@sytu.edu.cn

程浩忠 (1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电压稳定、电网规划、电能质量、电力市场等方面的科研工作;

胡丹 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事电能质量分析方面研究。