

基于整数小波变换的 Ray-Period 压缩算法

王学伟, 孙金凤, 王 琳

(北京化工大学, 北京市 朝阳区 100029)

A Ray-Period Compression Algorithm Based on Integer Wavelet Transform

WANG Xue-wei, SUN Jin-feng, WANG Lin

(Beijing University of Chemical Technology, Chaoyang District, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: To solve the problems existing in data compression methods based on traditional wavelet transform, on the basis of analyzing integer lifting process in depth, a Ray-Period compression algorithm based on integer wavelet transform is proposed. Considering the features of power system data and according to the property of multi-resolution analysis of integer wavelet transform, the original data is transformed into wavelet domain to make the transformed signal energy mainly centralized to low-frequency coefficients. Then the low-frequency data is processed by lossless Ray-Period compression algorithm and the improved threshold value compression algorithm is adopted to process high-frequency coefficients, and as to such non-zero coefficients whose percentages of post-compressed threshold value are greater than 3.125% a novel bitmap compression algorithm is used to process them. The results of compression experiments using actual data prove that the energy recovery coefficient of the proposed compression algorithm can be better than 10^{-4} , the data compression ratio can be as small as 6.39%, and the data compression speed is about twice faster than the algorithms based on the traditional wavelet transform.

KEY WORDS: data compression; lifting algorithm; integer wavelet transform; Ray-Period; threshold value

摘要: 为解决基于传统小波变换的数据压缩方法存在的问题, 在深入分析整数提升过程的基础上, 提出了一种基于整数小波变换的 Ray-Period 压缩算法。该算法针对电力数据的特点, 根据整数小波变换多分辨率分析的特性, 将原始数据变换到小波域, 以使变换后的信号能量主要集中在低频系数上, 而后采用无损的 Ray-Period 压缩算法处理低频数据, 采用改进的阈值压缩算法处理高频系数, 并采用新的位图压缩算法处理阈值压缩后元素值超过 3.125% 时的非零元素。采用实际数据进行压缩, 该算法的能量恢复系数优于 10^{-4} , 压缩比小于 6.39%, 速度比传统的小波变换压缩算法提高了近 1 倍。

关键词: 数据压缩; 提升算法; 整数小波变换; Ray-Period; 阈值

0 引言

在电力系统中, 需要获取大量的实时数据, 供信宿接收、分析和利用。采用通用无线分组业务 (general packet radio service, GPRS) 公众网或码分多址 (code division multiple access, CDMA) 公众网传输这些数据具有投资少、可靠性高的特点^[1]。而采用这种方式进行数据传输时, 其运行费用是通过流量计费的, 因而如何有效压缩数据以减少流量、加快网络传输的速度、减小本地存储的空间, 已成为企业降低成本的重要研究课题之一^[2]。

电力系统中的数据通常是一个宽频带的信号, 除 50 Hz 工频周期信号外, 还包含了多次谐波等随机分量^[3]。应用小波变换方法对上述信号进行压缩具有较高的压缩比^[4-5], 但目前提出的算法多基于传统的一代小波变换^[6-10], 其计算量大, 不利于实时计算, 难以用低廉的硬件系统实现, 且变换结果为浮点数。受处理器字长的限制, 变换前后的信号失真, 特别是在需要对小波系数再编码时, 取整操作的实施将会产生更严重的精度误差。基于第二代小波变换的压缩方法有效解决了上述问题。文献[11]采用二代小波提升算法 (lifting scheme) 结合阈值的压缩算法, 有效提高了计算速度, 但其未进行整数提升, 变换后仍为浮点数, 因而重构误差较大。文献[12]采用整数小波变换结合 Huffman 编码实现了电力数据的无损压缩, 但由于 Huffman 编码没能抓住电力数据的特点, 受无损压缩的限制, 其压缩倍数仅限于 5。文献[2]针对电力系统数据的特点提出

了 Ray-Period 无损压缩算法, 其对 50 Hz 工频信号具有很好的压缩效果, 但当数据中包含多次谐波等分量时, 压缩率较低且实时性较差。

为此, 本文提出一种高效的基于整数小波变换的 Ray-Period 压缩算法。该算法根据整数小波变换多分辨率分析的特性, 通过选择合适的分解层数, 将各谐波分量有效地分解到高频部分, 同时使其能量主要集中于低频系数上, 在此基础上应用 Ray-Period^[2]对低频数据进行无损压缩, 而因高频部分携带信息相对较少, 可采用阈值方法进一步减小其压缩比。

1 一代小波滤波器组的提升原理

第二代小波变换是 Sweldens 和 Daubechies 等学者于 1994 年从数学角度提出一种简明有效的构造小波基的方法, 该方法也称提升算法^[13]。它直接通过简单地分裂、预测和更新等一系列步骤完成对一系列数字信号的变换。提升算法继承了经典小波的多分辨特性, 具有运算速度快、占用存储空间小等优点, 可以用来实现任意具有有限长度滤波器的经典小波^[13], 且在同样数据长度下, 采用提升算法可以使速度提高近 1 倍^[11]。因此在实际应用中, 如何将经典的一代小波滤波器组用提升算法实现是可行的, 也是十分必要的。

为建立由提升算法构造的小波变换与一代小波滤波器组之间的联系, 首先将小波滤波器组表示为多相矩阵的形式, 即

$$\mathbf{P}(z) = \begin{bmatrix} h_e(z) & g_e(z) \\ h_o(z) & g_o(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{P}(z^{-1})^T = \begin{bmatrix} \hat{h}_e^o(z^{-1}) & \hat{h}_o^e(z^{-1}) \\ \hat{g}_e^o(z^{-1}) & \hat{g}_o^e(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \hat{h} 和 \hat{g} 为小波分解滤波器组; h 和 g 为综合滤波器组; 下标 o 和 e 分别表示相应滤波器的奇数部分和偶数部分。设 $s_{j-1,2l}$ 、 $s_{j-1,2l+1}$ 分别表示 $j-1$ 级尺度系数的偶、奇数部分, s_j 和 d_j 分别表示 j 级的尺度与小波系数, 则小波变换的分解合成可表示为

$$\begin{bmatrix} s_j \\ d_j \end{bmatrix} = \mathbf{P}(z^{-1})^T \begin{bmatrix} s_{j-1,2l}(z) \\ s_{j-1,2l+1}(z) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} s_{j-1,2l} \\ s_{j-1,2l+1} \end{bmatrix} = \mathbf{P}(z) \begin{bmatrix} s_j(z) \\ d_j(z) \end{bmatrix}$$

由 Eucliden 定理可得

$$\begin{bmatrix} h_e(z) \\ h_o(z) \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{m-1} \begin{bmatrix} 1 & s_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $s_i(z)$ 和 $t_i(z)$ 为罗朗多项式; K 为刻度因子。为推导 $\mathbf{P}(z)$ 的提升实现形式, 本文引入一个新矩阵 $\mathbf{P}^0(z)$, 且 $\mathbf{P}(z)$ 是 $\mathbf{P}^0(z)$ 的一步提升, 即

$$\mathbf{P}(z) = \mathbf{P}^0(z) \begin{bmatrix} 1 & s_m(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $s_m(z)$ 为原始提升系数。令

$$\mathbf{P}^0(z) = \begin{bmatrix} h_e(z) & g_e^o(z) \\ h_o(z) & g_o^o(z) \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(1)(5)代入式(4)可得, $g^o(z)$ 为一个与 $h(z)$ 互补的滤波器, 因此由式(3)可得

$$\mathbf{P}^0(z) = \prod_{i=1}^{m-1} \begin{bmatrix} 1 & s_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)使 $g^o(z)$ 得以确定, 最后由式(4)(5)计算得出

$$s_m(z) = \begin{bmatrix} g_e(z) & g_e^o(z) \\ g_o(z) & g_o^o(z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

综合式(4)(6)(7)就得到了式(1)(2)中的一代小波多相矩阵的提升格式, 即

$$\mathbf{P}(z) = \prod_{i=1}^m \begin{bmatrix} 1 & s_i(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_i(z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(z^{-1})^T = \prod_{i=1}^m \begin{bmatrix} 1 & -t_i(z^{-1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -s_i(z^{-1}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $s_i(z)$ 为用于构造第二代小波变换中的预测算子; $t_i(z)$ 为用于构造第二代小波变换中的更新算子; K 为刻度因子。

以 db4 小波滤波器组为例, 其提升实现正变换的公式为

$$s_i^{(0)} = s_{j-1,2l}, \quad d_i^{(0)} = s_{j-1,2l+1} \quad (10)$$

$$d_i^{(1)} = d_i^{(0)} + \mathbf{a}s_{l+1}^{(0)}, \quad s_i^{(1)} = s_i^{(0)} + \mathbf{b}d_{l+1}^{(0)} + \mathbf{g}d_{l-1}^{(0)} \quad (11)$$

$$d_i^{(2)} = d_i^{(1)} + \mathbf{c}s_{l+2}^{(1)} + \mathbf{d}s_{l+1}^{(1)} \quad (12)$$

$$s_i^{(2)} = s_i^{(1)} + \mathbf{e}d_{l-2}^{(1)} + \mathbf{h}d_{l-1}^{(1)} \quad (13)$$

$$d_i^{(3)} = d_i^{(2)} + \mathbf{m}s_l^{(2)} + \mathbf{s}s_{l-1}^{(2)} + \mathbf{w}s_{l-2}^{(2)} \quad (14)$$

$$s_j = Ks_l^{(2)}, \quad d_j = d_j^{(3)} / K \quad (15)$$

式中: 上标 0~3 为相应的预测或更新次数; $\mathbf{a} = -0.32227589$; $\mathbf{b} = -1.11712361$; $\mathbf{c} = -0.30014226$; $\mathbf{d} = -0.01880835$; $\mathbf{e} = 0.11764809$; $\mathbf{f} = 2.13181671$; $\mathbf{g} = 0.63642827$; $\mathbf{h} = -0.46908348$; $\mathbf{i} = 0.14003924$; $\mathbf{j} = -0.02479124$; $\mathbf{k} = 0.73412453$ 。需要说明的是, 反变换只需把正变换的符号反过来即可。

2 整数小波变换

提升算法扩展了小波变换的应用领域,使得小波的构造有了更多的灵活性。在该算法的基础上加入适当的整数提升步骤即可实现整数小波变换,即在忽略归一化因子的情况下,将算子 $[x+0.5]$ 作用于每一个提升步骤中的算子 $s_i(z)$ 和 $t_i(z)$,即可得到小波变换的整数提升算法,以上述 db4 小波提升实现的式(11)为例,其整数小波变换的实现方式为 $d_i^{(1)} = d_i^{(0)} + [a s_{i+1}^{(0)} + 0.5]$,式(12)~(15)的实现形式可依此类推。

3 Ray-Period 压缩算法

考虑到上述整数小波变换具有多分辨率分析能力,首先将电力数据进行多级整数小波变换,得到的低频数据在基本保持了原始采样数据的特征之外,还有效去除了谐波分量。经研究分析,这些低频数据具有一定的周期性。针对电力数据的这一特点,本文结合多种无损压缩算法,研究并实现了 Ray-Period 无损压缩算法^[2]。

针对低频数据进行编码时不存在量化误差的问题,本文采用整数小波变换,通过对低频数据进行 Ray-Period 压缩,在不增加失真度的情况下进一步减小了压缩比。关于 Ray-Period 算法的基本思想及实现过程见文献^[2]。

4 改进的阈值压缩算法

阈值的选取方法是数据压缩的核心问题^[6,11]。本文采用基于 Brige-Massart 策略的小波系数选择规则得到阈值,通过设定每级高频系数保留的个数,运用程序自适应地计算各级阈值。第 n 级保留的系数个数定义为

$$L_n = M / (J + 2 - n)^a \quad (16)$$

式中: M 的默认值为 $L(1)$, $L(1)$ 表示分解后低频系数的个数; J 为分解的级数; a 的典型值为1.5。将每级小波变换后的小波系数按照绝对值从大到小的顺序重新排列,选取第 L_n 个系数为该级阈值,去掉小于该阈值的分量,保留大于该阈值的分量,从而达到压缩的目的。由式(16)可知,分解层次 n 越小,该层保留的小波系数 L_n 越少,这与随着频率的升高,携带的有用信息量逐步减少是一致的。

另一方面,通常在阈值处理后要记录非零系数的位置及系数取值^[14],这使要记录的数据量加倍。

随着非零系数的增多,这种问题就显得越来越明显,特别是当非零系数的个数超过全部小波系数的50%时,这种记录方法不但不能压缩数据,反而使数据量加大。为了解决这个问题,本文在阈值处理后非零系数值超过3.125%时,给出了一种新的标记非零系数位置的方法—非零代表位图法。

本文的非零系数门限取为3.125%,这是因为在32位处理器上,存储一个整数需要4个字节(32位),即一个整数的存储空间可以标记32个小波系数的代表位图,更进一步说,小波系数的非零代表位图将占据小波系数存储空间的 $1/32 = 3.125%$ 。表1给出了非零代表位图法的示例,其中 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 代表非零系数取值。

表1 非零代表位图示例
Tab.1 The example map of nonzero representative bit

| 方法 | 存储位置 | | | | | | | |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 源数据流 | D_1 | 0 | D_2 | D_3 | 0 | 0 | 0 | D_4 |
| 传统方法 | D_1 | 1 | D_2 | 3 | D_3 | 4 | D_4 | 8 |
| 本文方法 | 10110001 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | — | — | — |

对于阈值处理后的系数 $D_1 0 D_2 D_3 0 0 0 D_4$,假设每个系数占1个字节,若用传统的标记非零元素位置的方法存储需要8个字节,这样不能实现数据压缩,而非零代表位图法进行压缩,用1来标记阈值处理后非零元素的位置,用0标记零元素的位置,这样一个数据流就从8个字节压缩到了5个字节。在解压缩端,对应位图中0的位置填充0,1的位置填充非零元素值即可。

将经过处理后的高低频数据存储在一起就得到了最终的压缩结果。

5 压缩性能指标

为定量分析和衡量压缩与重构算法的性能,本文引入了压缩比、能量恢复系数和均方误差3个评价因子。压缩比的表达式为

$$r_{CR} = (S_n / S_0) \times 100\% \quad (17)$$

式中: S_n 代表压缩后信号的数据量; S_0 代表原始信号的数据量。能量恢复系数的表达式为

$$r_{ERP} = \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} \hat{x}^2(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)} \right) \times 100\% \quad (18)$$

式中: $x(n)$ 为原始信号采样点; $\hat{x}(n)$ 为由压缩数据重构的信号; N 为信号长度。均方误差的表达式为

$$e_{MSE} = \left(\frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} [\hat{x}(n) - x(n)]^2}}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2}} \right) \times 100\% \quad (19)$$

6 实验结果与分析

数据压缩主要是对小波系数进行子带编码, 由于 db 小波具有正交性、紧支性、功率互补性和高阶消失矩等多种优点, 既有良好的多分辨特性, 又保持了一定的数值计算速度, 因此常以此为基础进行子带编码, 并将其进行整数提升, 这种方法特别适用于电力系统实时数据的压缩。

实验中采用提升后的 db4 小波来验证该压缩与重构算法的正确性和有效性。实验数据采用如图 1 所示的电能量数据, 它表示某工业系统一天的用电情况, 每隔 20 s 采样一次, 采样点数为 4 320。数据压缩结果如表 2 所示。表中: n 为采样点; r_{CR1} 为应用小波阈值的整体压缩比; r_{CR2} 为 Ray-Period 对低频系数的压缩比; r_{CR} 为算法整体压缩比。

从表 2 可以看出: 随着小波分解层次的加深, 压缩算法的压缩比会随之减小, 但随着小波分解层

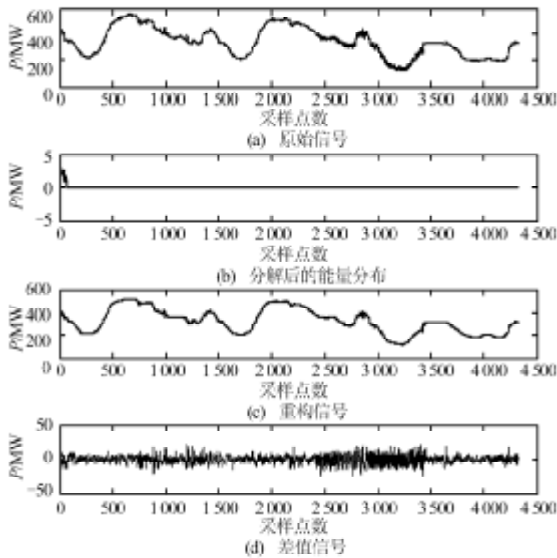


图 1 电能量数据压缩效果

Fig. 1 The compression effect of electric energy data

表 2 电能量数据的压缩结果

Tab.2 The compression results of electric energy data

| n | $r_{CR1}/\%$ | $r_{CR2}/\%$ | $r_{CR}/\%$ | $r_{ERP}/\%$ | $e_{MSE}/\%$ |
|-----|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 3 | 34.79 | 28.75 | 25.89 | 99.999 3 | 0.259 1 |
| 4 | 19.76 | 38.94 | 15.94 | 99.999 1 | 0.290 4 |
| 5 | 14.38 | 45.28 | 12.66 | 99.998 8 | 0.349 0 |
| 6 | 7.50 | 28.71 | 6.39 | 99.998 1 | 0.438 6 |
| 7 | 3.80 | 51.47 | 3.42 | 99.994 1 | 0.766 3 |

次的加深, 最高层尺度系数的个数逐半减少, 用于重构原信号的特征信号也会减少(均方误差随之增大), 而且计算量加大, 减弱了压缩算法的有效性, 可见压缩比与均方误差是互相制约的。

考虑到算法的实时性, 小波分解级数不宜过高, 本文选择 db4 小波, 分解级数为 6, 此时的阈值压缩比为 7.50%, 相对误差为 0.438 6%, 能量保留百分比仍高达 99.998 1%, 有效保持了原有信号的特征, 对低频系数进行 Ray-Period 压缩之后, 在没有增加相对误差的情况下, 压缩比进一步提升至 6.39%, 即压缩倍数约为 15, 此时的原始信号、重构信号及误差信号如图 1 所示。由图 1 可知, 本文的算法可对电能量数据进行压缩和重构。

为证实该阈值算法的优越性, 本文适当调整了式(16)中 M 的取值, 并将其压缩效果与采用传统标记法得到的结果进行了对比, 结果见表 3, 其中 a 为 1.5, L 为小波分解最高级低频系数的个数。由表 3 可知, 当均方误差保持在 3.0×10^{-3} 之内时, 采用本文算法得到的压缩比可达到 10.18%, 而采用传统标记法得到的压缩比为 27.41%。

表 3 本文提出的阈值算法与传统方法压缩结果的对比
Tab.3 The compression results of the proposed threshold value algorithm and traditional algorithm

| 方法 | n | $r_{CR}/\%$ | $r_{ERP}/\%$ | $e_{MSE}/\%$ | |
|------|--------|-------------|--------------|--------------|---------|
| 本文方法 | $M=L$ | 4 | 19.76 | 99.999 1 | 0.290 4 |
| | $M=2L$ | 5 | 14.00 | 99.999 2 | 0.265 5 |
| | $M=3L$ | 6 | 10.18 | 99.999 3 | 0.265 4 |
| 传统方法 | 4 | 27.41 | 99.999 1 | 0.290 4 | |

为了进一步证实该压缩算法的有效性, 本文对多种常见类型的电能质量短时扰动信号^[6-8,15-16]进行了压缩实验, 其中电压中断、电压凸起、电压凹陷和电压平顶采用 5 级小波分解, 短时谐波采用 6 级小波分解, 上述电能质量短时扰动信号的压缩结果如表 4 所示。由表 4 可以看出, 本文的算法对电力系统数据均具有较好的压缩效果, 尤其对于短时谐波信号, 压缩倍数高达 16。

表 4 各种电能质量短时扰动信号的压缩结果

Tab.4 The compression results of different short-time disturbance of power quality events

| 类型 | $r_{CR1}/\%$ | $r_{CR2}/\%$ | $r_{CR}/\%$ | $r_{ERP}/\%$ | $e_{MSE}/\%$ |
|------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 电压中断 | 13.42 | 37.00 | 11.45 | 99.999 8 | 0.148 0 |
| 电压凸起 | 12.95 | 34.74 | 10.91 | 99.999 6 | 0.195 2 |
| 电压凹陷 | 13.02 | 36.83 | 11.04 | 99.999 6 | 0.211 2 |
| 电压平顶 | 13.80 | 38.52 | 11.88 | 99.999 1 | 0.298 2 |
| 短时谐波 | 7.04 | 30.86 | 5.96 | 99.999 2 | 0.274 9 |

7 结论

(1) 本文基于整数小波变换的 Ray-Period 压缩算法具有计算速度快、占用内存小、不存在量化误差、逆变换简单等优点, 有效弥补了一代小波变换的不足。

(2) 本文提出用非零代表位图法来标记阈值处理后非零小波系数的位置, 与传统方法相比, 该方法可在同等大小的均方误差下获得更高的压缩倍数。

(3) 本文采用 Ray-Period 压缩算法压缩低频数据, 有效消除了各次谐波对 Ray-Period 的影响。

(4) 仿真实验表明该算法对电力数据均具有较好的压缩效果, 最大压缩倍数可达 16, 且重构信号精确度高、运算速度快, 这为电力数据的实时压缩提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] 林德浩. 基于 GPRS/CDMA 的大用户电力负荷管理系统[J]. 电力需求侧管理, 2005, 7(4): 34-36.
Lin Dehao. Large consumer power load management system based GPRS/CDMA communication technology[J]. Power Demand Side Management, 2005, 7(4): 34-36(in Chinese).
- [2] 王学伟, 戴紫薇. Ray-Period 压缩算法的研究与实现[J]. 电测与仪表, 2006, 43(10): 26-29.
Wang Xuewei, Dai Ziwei. Research and realization of Ray-Period compression[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(10): 26-29(in Chinese).
- [3] Huang S J, Jou M J. Application of arithmetic coding for electric power disturbance data compression with wavelet packet enhancement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1334-1341.
- [4] 何正友, 钱清泉, 刘志刚. 一种基于优化小波基的电力系统故障暂态数据压缩方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 1-5.
He Zhengyou, Qian Qingquan, Liu Zhigang. An electric power system fault transient data compression method based on optimal wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 1-5(in Chinese).
- [5] 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): 52-63.
Wang Jing, Shu Hongchun, Chen Xueyun. A survey of wavelets transform applying to power system engineering[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 52-63(in Chinese).
- [6] 欧阳森, 宋政湘, 陈德桂, 等. 基于小波原理的电能质量检测数据实时压缩方法[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 37-40.
Ouyang Sen, Song Zhengxiang, Chen Degui, et al. A wavelet theory based real-time data compression method for power quality detection[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 37-40(in Chinese).
- [7] 刘应梅, 白晓民, 易俗, 等. 基于最小极大法的电力扰动信号压缩[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 33-37.
Liu Yingmei, Bai Xiaomin, Yi Su, et al. Compression of power system disturbance signals based on least maximum method[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 33-37(in Chinese).
- [8] Meher S K, Pradhan A K, Panda G. An integrated data compression scheme for power quality events using spline wavelet and neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2-3): 213-220.
- [9] 李鹏, 杨洪耕, 孔飘红. MDL 判据在电能质量扰动信号数据压缩中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 48-52.
Li Peng, Yang Honggeng, Kong Piaohong. Application of minimum description length criterion in data compression of power quality disturbance signal[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 48-52(in Chinese).
- [10] 刘志刚, 钱清泉. 基于多小波的电力系统故障暂态数据压缩研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 22-26.
Liu Zhigang, Qian Qingquan. Compression of fault transient data in electric power system based on multiwavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 22-26(in Chinese).
- [11] 乐全明, 郁惟庸, 柏传军, 等. 基于提升算法的电力系统故障录波数据压缩新方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 74-78.
Yue Quanming, Yu Weiyong, Bai Chuanjun, et al. Novel compression scheme of fault recording data in power systems based on lifting algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 74-78(in Chinese).
- [12] 闰常友, 杨奇逊, 刘万顺. 基于提升格式的实时数据压缩和重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 6-10.
Yan Changyou, Yang Qixun, Liu Wanshun. A real-time data compression & reconstruction method based on lifting scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9), 6-10(in Chinese).
- [13] Calderbank R, Daubechies I, Sweldens W, et al. Wavelet transforms that map integers to integers[R]. USA: Princeton University, 1996.
- [14] 任震, 何建军, 黄雯莹, 等. 基于小波包算法的电机故障信号的压缩和重构[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 25-29.
Ren Zhen, He Jianjun, Huang Wenying, et al. Compression and reconstruction for faults signals of electric machines based on wavelet packets[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 25-29(in Chinese).
- [15] 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 measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 1-6(in Chinese).
- [16] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于双小波的短时电压波动信号检测[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 17-21.
Shi Min, Wu Zhengguo, Yin Weimin. Detection of short duration voltage variation signal based on double wavelet[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 17-21(in Chinese).

收稿日期: 2007-11-02。

作者简介:

王学伟(1958—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电参量测量与谐波分析、电能质量分析、现代信号处理等;

孙金凤(1981—), 女, 硕士研究生, 研究方向为数据压缩及传输技术、现代信号处理, E-mail: tiantian312@163.com。

(编辑 杜宁)