



# 利用小波去噪进行步态加速度信号预处理

谢政宇<sup>1</sup> 刘学广<sup>1</sup> 张 巩<sup>1</sup> 吴牧云<sup>1</sup> 闫 明<sup>1</sup> 张二宝<sup>1</sup> 谭 鉴<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨,150001

**摘 要:**针对步态识别方法中加速度信号的去噪问题,提出了一种利用复合评价指标及小波熵进行步态加速度信号小波去噪的参数优选方法。均方根误差和平滑度的变化率随小波分解层数的增加表现出单调性和负相关性,根据该特性使用改进熵权法构建了一种复合评价指标,通过构建的复合评价指标确定不同小波基处理步态信号时的最优分解层数,根据步态信号小波分解后低频系数的小波熵大小来确定每一分解层次的最优小波基。实验结果表明,所提方法确定的小波去噪方案可以满足步态信号研究的滤波要求。

**关键词:**改进熵权法;复合评价指标;判别函数法;最优小波基选取

**中图分类号:**P208

**文献标志码:**A

使用加速度计提取步态特征的步态识别技术可以在提高用户使用满意度的同时完成身份识别,因此使用范围比较广泛<sup>[1-2]</sup>。加速度计的观测数据受多方面因素影响,总是掺杂着大量的噪声信息,给步态特征的提取和识别带来了困难<sup>[3]</sup>。

在步态识别预处理过程中,信号的去噪方法主要包括有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)低通滤波、移动均值滤波、加权移动均值滤波及小波去噪等,而基于小波理论的小波去噪算法模型简单,几乎不需要含噪信号的任何先验信息,且小波变换具备良好的时频特性<sup>[4]</sup>,在步态信号预处理领域受到了许多学者的重视。文献[5]首次将小波去噪方法应用到步态加速度信号滤波中,以消除因外界环境或身体晃动等引起的噪声;文献[6]使用小波基函数db3对垂直方向加速度信号进行5层尺度小波分解和重构;文献[7]使用小波基函数db8对加速度信号进行两层尺度小波分解和重构;文献[8]使用小波基函数db5对加速度信号进行3层尺度小波分解和重构。虽然文献[6-8]都给出了各自使用的小波基函数和分解尺度层数,但不同的信号有着不同的最优去噪参数,不能仅依靠前人的经验选择去噪参数<sup>[9]</sup>,需要有一种可靠的去噪参数选取方法。

文献[10]提出使用复合评价指标选取最优小波基和最佳分解层数,但复合评价指标的构建

过程并未涉及小波基特性的分析,因此其能否用于分解层次以外的去噪参数的选取还存在疑问。近些年比较流行的筛选最优小波基的方法有通过计算小波基函数与待分析信号的相关性系数的基于相关性计算的小波基选取方法(correlation-based wavelet selection scheme, CBWSS)<sup>[11]</sup>和比较信号经小波分解后的低频系数能量谱的基于能量谱计算的小波基选取方法(energy-based wavelet selection scheme, EBWSS)<sup>[12]</sup>。文献[13]在这两种方法的基础上提出了一种基于小波熵的小波基选取规则(wavelet entropy-based wavelet selection scheme, WEBWSS),这种方法根据信号的低频系数小波熵自适应地确定每一层小波分解的最优小波基,对信号类型没有限制,使用范围较广。但文献[13]并未提及如何选取小波最优分解层数。因此,本文提出基于改进熵权法定权,构建新的复合评价指标来确定步态信号的最佳分解层数,根据逐层离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)分解得到的低频系数小波熵大小来确定每一分解层次的最优小波基,以得到适用于步态信号的最佳去噪方案。

## 1 小波去噪参数的选择

小波去噪效果取决于很多因素,就目前使用

收稿日期:2020-12-08

项目资助:国家自然科学基金(51775124)。

第一作者:谢政宇,硕士生,主要从事数据处理技术研究。jxrjxzy@163.com

通讯作者:刘学广,博士,教授。LXG1973@hotmail.com

最广泛的小波阈值去噪方法而言,需要考虑的因素有小波基函数、分解尺度、阈值函数、阈值估计方法等,实际应用中需要面对的一个难题就是如何根据不同信号特征从这些参数中组合出最优去噪方案<sup>[14]</sup>。

### 1.1 复合评价指标的构建

对于小波变化最佳分解层数的确定,众多专家学者提出了许多方法,这些方法都取得了一定的效果。传统的小波去噪评价指标如均方根误差(root mean square error, RMSE)、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、互相关系数  $R$ 、平滑度  $r$  等只能反映出信号的一部分特性,对小波去噪效果的评价都不够全面。本文挑选分别表征信号的细节和逼近信息并且随分解层数增加呈负相关<sup>[15]</sup>的两种指标——RMSE 和  $r$ ,使用改进熵权法<sup>[16]</sup>构建新的复合评价指标,通过复合评价指标确定最佳分解层数。

复合评价指标的计算步骤如下:

1) 构建小波阈值去噪方案,其中方案变量为分解层数,方案中的其他参数事先给定。

2) 计算各方案在真值未知时的 RMSE 和  $r$  并将其归一化处理,得到归一化后的评价指标矩阵  $P$ 。本文采取最大-最小归一化法,计算公式为:

$$\begin{cases} R = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x(i) - \tilde{x}(i))^2 / N} \\ r = \sum_{i=1}^{N-1} (\tilde{x}(i+1) - \tilde{x}(i))^2 / \sum_{i=1}^{N-1} (x(i+1) - x(i))^2 \\ I = \frac{R - \min(R)}{\max(R) - \min(R)} \\ J = \frac{r - \min(r)}{\max(r) - \min(r)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $N$  为待处理信号长度;  $x$  为纯净信号;  $\tilde{x}$  为去噪信号;  $R$  为 RMSE;  $I$  为归一化后的 RMSE;  $J$  为归一化后的  $r$ ;  $\max$  和  $\min$  为取最大值、最小值操作。评价指标矩阵  $P = [I \ J]$ 。

3) 为了避免当所有熵值趋近于 1 时各熵值微小的不同就会导致各指标熵权成倍变化的缺点,本文采用改进熵权法进行定权,权重计算公式为:

$$\omega_j = \begin{cases} (1 - \bar{e}^{33.35}) \omega_{0j} + \bar{e}^{33.35} \omega_{3j}, & e_j < 1 \\ 0, & e_j = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\omega_{0j} = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j)$$

$$\omega_{3j} = (1 + \bar{e} - e_j) / \sum_{k=1, e_k \neq 1}^n (1 + \bar{e} - e_k)$$

$e_j$  为各指标的熵值,熵值计算步骤见文献[17];  $\bar{e}$  为  $e_j$  中所有不为 1 元素的均值;  $\omega_j$  为各指标的权重,权重向量  $W = [\omega_1, \omega_2]$ 。

4) 复合评价指标  $M$  的计算公式为:

$$M = P \cdot W \quad (3)$$

$M$  值的最小值点对应的就是最佳分解层数。

### 1.2 基于复合评价指标的最优小波基选取

小波熵表征着小波系数的无序程度,是一种对时频域上能量分布特性进行定量描述的指标。根据噪声小波系数和有用信号小波系数在小波分解中呈现的不同特点,如果在 1 层 DWT 分解中选用的小波基为最优小波基,即其去噪效果最佳,则细节系数的无序度最小,小波熵也为最小值。WEBWSS 正是基于这一原理实现最优小波基选取<sup>[13]</sup>。对于 WEBWSS 的最佳分解层数选取问题,本文提出根据 §1.1 中构建的复合评价指标对 WEBWSS 作出改进:(1) 由复合评价指标确定各小波基的最佳分解层数,并按最佳分解层数将小波基进行分类;(2) 对同一类小波基使用 WEBWSS 确定每一层分解的最优小波基,最大分解层数为该类小波基的最优分解层数。WEBWSS 具体计算步骤见文献[13]。

在小波分析中,一般通过小波基的消失矩、正则性等指标选择最优小波基,但是在进行信号分析时,很难用单一的规则性系数或消失矩这样的参数来准确描述,因而很难应用于工程实践,而根据应用效果来选择小波基是一个很好的解决办法。通过分析小波模极大值与信号奇异点的对应关系,可以把提取出来的候选奇异点分为 4 种类型,根据这 4 种类型提出一个判别函数,通过判别函数取值判定最优小波基<sup>[18]</sup>。对于分解尺度的选择,本文提出模仿 WEBWSS 的思路,将 WEBWSS 中的小波熵换成判别函数,使其能够运用于工程实践。具体步骤为:

1) 由复合评价指标确定各小波基的最佳分解层数  $J$ ,并按最佳分解层数将小波基进行分类;

2) 使用同一类小波基  $\{\psi_i; i = 1, 2, \dots, n\}$  对含噪信号  $f$  作一层平稳小波变换分解,得到近似系数  $a_1^i$ 、细节系数  $d_1^i$ ,对  $d_1^i$  使用判别函数法确定第一层分解的最优小波基  $\phi_p$ ;

3) 令  $a_1^i = f$ ,重复步骤 2)、3) 直至分解层次为  $J$ ,得到待处理信号从第 1 层到第  $J$  层分解中各层次的最优小波基。

## 2 仿真分析

### 2.1 算例1

为了与文献[15,19-21]中提出的复合评价指标进行对比,本文设计了一个由3个周期项及一个趋势项组成的变形监测模拟时域数据<sup>[22]</sup>,并使用各种评价指标对其进行最佳分解层数的判定。其中,采样率为1 Hz,信号时间长度为1 024 s,并加入SNR为4 dB的高斯白噪声。表达式为:

$$S = 3\sin(2\pi t/500)\sin(2\pi t/200) +$$

$$2\sin(2\pi t/300) + \sin(2\pi t/50) + 0.001t \quad (4)$$

式中, $S$ 为变形监测模拟数据的信号幅值; $t$ 表示变形监测模拟数据的时间。

表1为真值已知和真值未知时各项评价指标的取值。由表1可以发现,真值已知情况下,分解层数为4时,RMSE最小,SNR和 $R$ 等4种传统评价指标随分解层数增加而单调变化,无法进行最佳分解层数的判定。

表1 真值已知和真值未知时各项评价指标取值

Tab.1 Values of Evaluation Indicators When True Values Is Known and Unknown

分解层数	真值已知				真值未知		
	RMSE	SNR	$R$	$r$	RMSE	SNR	$R$
1	1.192 3	7.307 5	0.915 4	11 220.591 4	1.237 2	8.414 5	0.922 3
2	0.859 1	10.153 7	0.953 5	697.120 4	1.491 2	6.792 4	0.884 9
3	0.596 6	13.321 4	0.977 1	19.744 5	1.612 3	6.114 0	0.863 9
4	0.434 5	16.075 5	0.987 9	2.514 5	1.663 4	5.843 0	0.854 4
5	0.740 5	11.444 2	0.961 9	0.121 7	1.807 9	5.119 4	0.825 3
6	0.952 5	9.257 6	0.935 0	0.059 1	1.945 8	4.481 0	0.794 1
分解层数	真值未知						
	$r$	$T$	$F$	$r_k$	$I$	$H$	$M$
1	0.081 6	0.937 3	1		0.942 6	1.318 7	0.993 7
2	0.005 1	0.080 7	0.104 8	1.205 3	0.123 6	1.496 2	0.064 0
3	0.000 1	0.034 8	0.001 4	1.081 2	0.067 0	1.612 5	0.005 1
4	0	0.037 9	0.061 5	1.031 7	0.064 0	1.663 4	0.004 0
5	0	0.050 5	0.053 4	1.086 9	0.059 9	1.807 9	0.005 1
6	0	0.062 7		1.076 3	0.057 4	1.945 8	0.006 3

使用文献[15,19-21]中的方法进行最佳分解层数的判定,文献[15]中的指标 $T$ 在分解层数为3时达到最小值,最佳分解层数为3;文献[17]中的指标 $F$ 经过异常值剔除以及拐点拟合后第二个值对应明显的拐点,最佳分解层数为3;文献[19]中的指标 $r_k$ 在分解层数为3时小于1.1,最佳分解层数为3;文献[20]中的指标 $I$ 在分解层数为2时出现极值,最佳分解层数为2;文献[21]中的指标 $H$ 在分解层数为6时达到最大值,最佳分解层数为6;只有本文提出的复合评价指标 $M$ 在分解层数为4时达到最小值,判定结果与实际相符。

除此之外,本文还使用上述几种指标对信噪比为10 dB的仿真信号进行最佳分解层数的判定,只有指标 $F$ 和 $M$ 可以得到与实际相符的结果,但指标 $F$ 计算步骤稍显复杂且判定容易出错。

综合比较之后可以看出,本文提出的复合评价指标与现有的指标相比,在可靠性、简便程度以及准确度上有一定的优势。

### 2.2 算例2

为了与后续实验数据进行对比,本文根据文献[23]建立的行人步行时加速度的动态模型,以 $Z$ 轴加速度为例,设计了一个垂向加速度的模拟信号 $A_z$ ,表达式为:

$$A_z(t) = 1 + 4\cos(3\pi t) \quad (5)$$

并加入信噪比为4 dB的高斯白噪声,其中采样频率为100 Hz,步频为1.5 Hz,信号长度为1 024个采样点。

本文还以复合评价指标作为判定标准,进行了一次最优小波基的筛选,通过去噪结果分析判断其是否能用于最优小波基的选取。其基本思路是:(1)由复合评价指标得到各小波基的最优分解层数;(2)比较各小波基在最优分解层数上对应的复合评价指标值,最小值对应的小波去噪方案即为最优去噪方案。

本文使用的阈值函数为软阈值函数,阈值估计方式为启发式阈值选择,小波基库中包括db族、sym族、coif族、bior族等共38种常用小波基,



最终在真值未知时得到 10 种去噪方案。图 1 为真值未知时各信号的频谱对比,其中  $g$  为重力加速度。研究表明人正常步行的步频为  $1\sim 5\text{ Hz}$ <sup>[8]</sup>, 99% 以上的运动能量集中在  $15\text{ Hz}$  以下的步态信号成分中<sup>[10]</sup>。

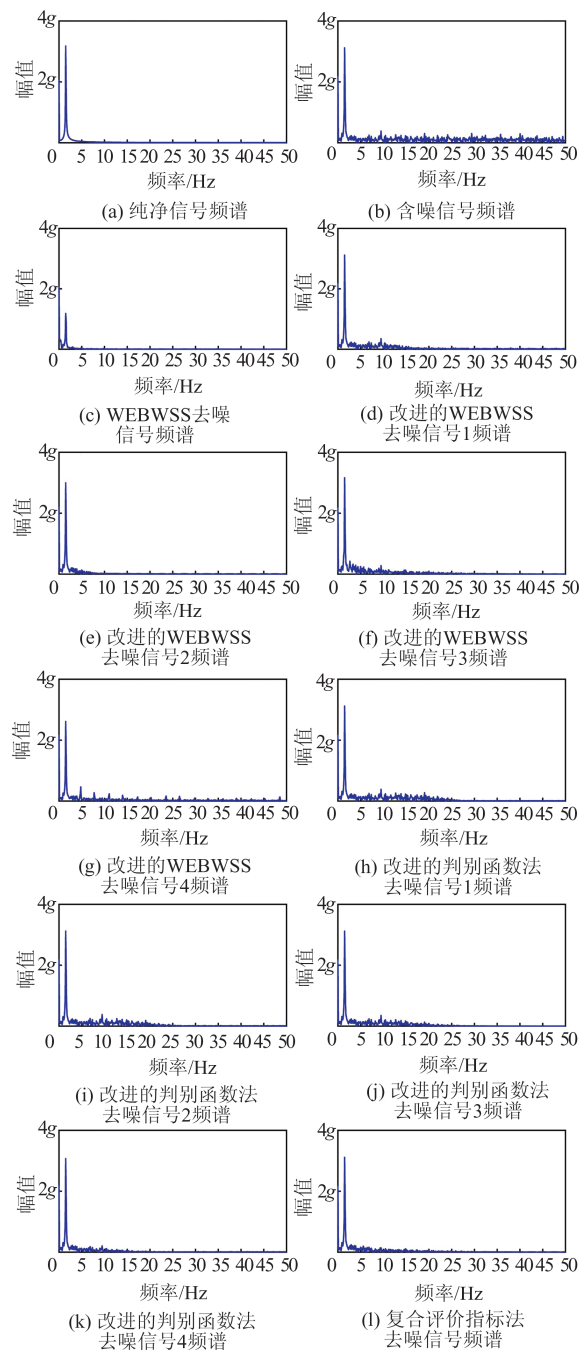


图 1 真值未知时各信号单边频谱图

Fig. 1 Comparison of Single-Side Spectra of Different Signals When Truth Value Is Unknown

图 1 显示,只有 WEBWSS 确定的方案 1 和改进 WEBWSS 确定的方案 3 将大于  $5\text{ Hz}$  的噪声频率信息基本滤除。虽然方案 1 去噪效果最好,大于  $1.5\text{ Hz}$  的频率信息已经全部滤除,但去噪信号

中  $1.5\text{ Hz}$  的步频信息已经改变,存在过度去噪问题。图 2 中方案 1 的去噪信号(蓝色实线)与纯净信号(黑色虚线)的波形图对比结果也显示信号特征已经改变,与纯净信号的拟合情况较差。反观方案 3,其去噪信号波形与纯净信号拟合良好,频谱图也显示其去噪信号中大于  $5\text{ Hz}$  的步频信息已经滤除,可将其视为最优去噪方案。因此可以认为面对步态信号时,改进的 WEBWSS 有着比 WEBWSS 更好的去噪表现,本文对其作出的改进有一定效果。

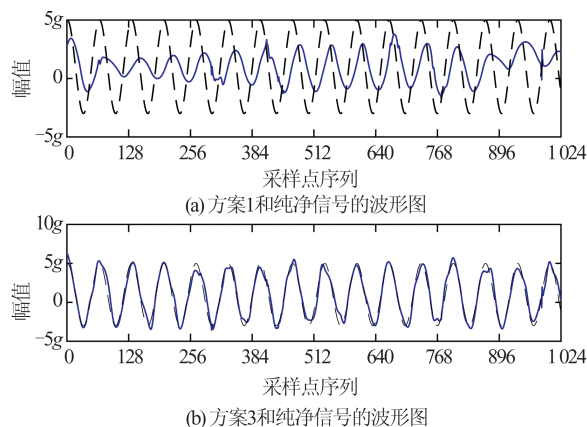


图 2 去噪信号与纯净信号的波形图对比

Fig. 2 Comparison of Waveform of Denoising Signal and Pure Signal

图 1 中改进的判别函数法确定的方案得到的去噪信号频谱显示,其在  $5\sim 20\text{ Hz}$  频率范围内含有较多噪声频率信息,而且判别函数法得到的去噪信号平滑度都偏大,通过对比这 4 种方案得到的信号与纯净信号的波形图发现判别函数法可以很好地定位奇异点位置,但却是以去噪信号的平滑性为代价。因此可以得到结论:判别函数法也不适用于步态信号去噪的最优小波基选取。

分析真值未知时的评价指标发现,4 种方法中,复合评价指标法确定的去噪方案的 4 项传统评价指标都不是最优值。图 1 的频谱图也显示,改进的 WEBWSS 和改进的判别函数法都能得到比复合评价指标法更令人满意的去噪方案,这一结果表明复合评价指标法并不适用于步态信号预处理中最优小波基的选取。

### 3 改进的 WEBWSS 确定去噪方案实验

本文实验数据来源于实验者在水平地面上自然行走  $30\text{ m}$  的步态加速度信号,采集装置为固

定在测试者右脚踝上的 MPU6050 集成三轴加速度传感器,采样率为 100 Hz。本文实验的部分垂直加速度信号波形图见图 3(a)。

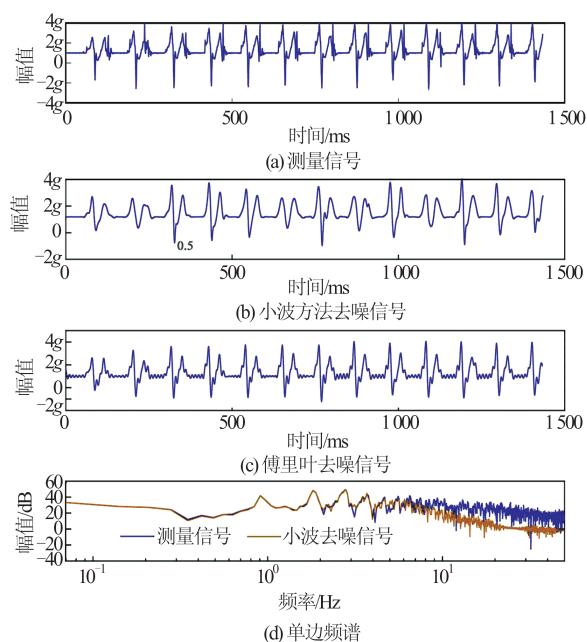


图3 测量信号和去噪信号的波形图对比  
Fig. 3 Comparison of Waveform and Spectrum of Measurement Signal and Denoising Signal

根据§2得到的结论,本文实验数据的处理将采用改进的 WEBWSS 确定去噪方案,最终得到 8 种去噪方案。经过多次实验发现,复合评价指标法可以用于评价改进的 WEBWSS 确定的各去噪方案的优劣,而根据 8 种方案的复合评价取值可以判定 bior3.3 小波基、3 层分解方案为最优去噪方案,其去噪信号如图 3(b)所示。本文还使用傅里叶去噪处理测量信号,去噪后信号如图 3(c)所示。可以发现,傅里叶去噪并未完全去除噪声,与小波去噪后的信号相比,小波去噪能够更好地保留测量信号波形的细节特征,其去噪后的加速度信号已经可以明显分辨出步态周期。图 3(d)为 bior3.3 小波基、3 层分解方案的去噪信号的单边频谱图。频谱图显示去噪信号保留了 5 Hz 以下的有效步频信息,大于 15 Hz 的噪声频率信息已经滤除,而 5~10 Hz 的频率成分则适当保留。这证明该方案的去噪效果是能够满足步态信号研究的滤波要求。由于篇幅有限,在此不再给出其他各个去噪方案的对比降噪图像及其频谱图。

## 4 结 语

小波去噪时小波基、分解层数以及阈值设定方法的选取均会影响去噪效果,而传统的单一评

价指标并不能很好地评价小波去噪效果。本文给出了一种可靠的复合评价指标,即通过改进熵权法将归一化后的 RMSE 和  $r$  进行线性组合。基于这一复合评价指标,本文对 WEBWSS 和判别函数法这两种最优小波基选取方法进行一定的改进,仿真及实验结果表明,改进后的 WEBWSS 确定的小波去噪方案在处理步态加速度信号时可以得到比较满意的结果。

1) 本文提出的复合评价指标与现有的传统评价指标以及各种复合评价指标相比,在判定真值未知信号的去噪效果时,在可靠性、简易程度以及准确度上有一定的优势。

2) 复合评价指标的构建是基于 RMSE 和  $r$  的取值随分解层数的增加呈现的变化趋势不同的原理,并不适用于最优小波基的选取。

3) WEBWSS 以及判别函数法都未涉及最佳分解层数的选取,本文基于复合评价指标对这两种方法进行了一定的改进,仿真和实验结果表明改进的 WEBWSS 确定的去噪信号可以满足步态信号研究的滤波要求。而判别函数法可以很好地定位奇异点位置,但却是以去噪信号的平滑性为代价,判别函数法不适用于步态信号去噪的最优小波基选取。

4) 与傅里叶去噪相比,小波去噪能够更好地保留测量信号波形的细节特征,其去噪后的加速度信号已经可以明显分辨其步态周期。

## 参 考 文 献

- [1] Zhen Qianqian, Zhang Tingliang. Review on Gait Recognition Technology [J]. *Journal of Henan Institute of Education (Natural Science Edition)*, 2017, 26(2): 16-19 (甄倩倩, 张庭亮. 步态识别技术研究进展[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2017, 26(2): 16-19)
- [2] Wang Ben, Yuan Tao, Liang Can. Gait Authentication Based on Acceleration Characteristic Point Extraction [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2009, 49(10): 1601-1604 (王奔, 袁涛, 梁灿. 基于加速度特征点提取的步态身份认证[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(10): 1601-1604)
- [3] Zhong Jinjin. Research on Denoising Detection and Identification of Transient Power Quality Signal [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012 (钟金金. 暂态电能质量信号的消噪、检测与识别研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012)
- [4] Luo Yiyong, Yao Yibin, Huang Cheng, et al. Defor-

- mation Feature Extraction and Analysis Based on Improved Variational Mode Decomposition [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(4): 612-619 (罗亦泳, 姚宜斌, 黄城, 等. 基于改进 VMD 的变形特征提取与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4): 612-619)
- [5] Liu R, Duan Z, Zhou J Z, et al. Identification of Individual Walking Patterns Using Gait Acceleration [C]//The 1st International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Wuhan, China, 2007
- [6] Xu Chuanlong. Human Behavior Recognition Based on 3D Accelerometers [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013 (徐川龙. 基于三维加速度传感器的人体行为识别[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013)
- [7] Hou Xiangfeng, Liu Rong, Zhou Zhaofeng. Application of Accelerometer MMA7260 in the Gait Feature Extraction [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007(3): 507-511 (侯向锋, 刘蓉, 周兆丰. 加速度传感器 MMA7260 在步态特征提取中的应用[J]. 传感技术学报, 2007(3): 507-511)
- [8] Zhai Wenting. The Realization of Human Gait Recognition by Using Acceleration Sensor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013 (翟文婷. 利用加速度传感器实现人体步态识别[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013)
- [9] Wang Dejun, Xiong Yongliang, Xu Shaoguang. A Precise Kinematic Single Epoch Positioning Algorithm Using Moving Window Wavelet Denoising [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 779-784 (王德军, 熊永良, 徐韶光. 利用窗口小波去噪的高精度动态单历元定位算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(6): 779-784)
- [10] Tu binbin, Gu Lihua, Xu Hui. Quality Evaluation Method for Wavelet De-noising in Gait Recognition [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2017, 39(1): 61-66 (涂斌斌, 谷丽华, 许会. 步态识别的小波去噪质量评价方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(1): 61-66)
- [11] Ma X, Zhou C, Kemp I J. Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD Detection [J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18(2): 37-45
- [12] Li J, Jiang T, Grzybowski S, et al. Scale Dependent Wavelet Selection for De-noising of Partial Discharge Detection [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(6): 1705-1714
- [13] Liu J, Siew W H, Soraghan J J, et al. A Novel Wavelet Selection Scheme for Partial Discharge Signal Detection Under Low SNR Condition [C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 2018
- [14] Queiroz R L D, Rao K R. Time-Varying Lapped Transforms and Wavelet Packets [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3293-3305
- [15] Zhu Jianjun, Zhang Zhetao, Kuang Cuilin, et al. A Reliable Evaluation Indicator of Wavelet De-noising [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(5): 688-694 (朱建军, 章浙涛, 匡翠林, 等. 一种可靠的小波去噪质量评价指标[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(5): 688-694)
- [16] Ouyang Sen, Shi Yili. A New Improved Entropy Method and Its Application in Power Quality Evaluation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(21): 156-159 (欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159)
- [17] Deng Min, Chen Xueying, Tang Jianbo, et al. A Method for Road Network Selection Considering the Traffic Flow Semantic Information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1438-1447 (邓敏, 陈雪莹, 唐建波, 等. 一种顾及道路交通流量语义信息的路网选取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(9): 1438-1447)
- [18] Xu L, Xue M. Selection of Optimal Wavelet Basis for Singularity Detection of Non-stationary Signal [C]//International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, China, 2011
- [19] Wen Hongyan. Research on Deformation Analysis Model Based on Wavelet Transform Theory [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004 (文鸿雁. 基于小波理论的变形分析模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004)
- [20] Deng Min, Wu Guangqiang. Comprehensive Evaluation Method of Wavelet De-noising Based on Variation Coefficient [J]. *Mechatronics*, 2016, 22(3): 30-35 (邓敏, 吴光强. 基于变异系数的小波降噪综合评价法[J]. 机电一体化, 2016, 22(3): 30-35)
- [21] Li Zongchun, Deng Yong, Zhang Guanyu, et al. Determination of Best Grading of Wavelet Transform in Deformation Measurement Data Filtering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 285-288 (李宗春, 邓勇, 张冠宇, 等. 变形测量异常数据处理中小波变换最佳级数的确定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(3): 285-288)

- [22] Xiang Dong, Gong Jianbing. To Determine the Quantitative Index for the Optimal Decomposition Scale in Wavelet De-noising of Deformation Series [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 467-470 (向东, 贡建兵. 变形序列小波消噪最佳分解尺度量化指标的确定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(4): 467-470)
- [23] Lee H, Lee J, Cho J, et al. Estimation of Heading Angle Difference Between User and Smartphone Utilizing Gravitational Acceleration Extraction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3746-3755

## Gait Acceleration Signal Preprocessing with Wavelet Denoising

XIE Zhengyu<sup>1</sup> LIU Xueguang<sup>1</sup> ZHANG Gong<sup>1</sup> WU Muyun<sup>1</sup> YAN Ming<sup>1</sup>  
ZHANG Erbao<sup>1</sup> TAN Jian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

**Abstract: Objectives:** Aiming at the denoising problem of acceleration signal in gait recognition method, a parameter optimization method using composite evaluation index and wavelet entropy for wavelet denoising of gait acceleration signal is proposed. **Methods:** Firstly, based on the geometric and physical meanings of the four traditional evaluation indexes of wavelet denoising effect, namely root mean square error (RMSE), signal-to-noise ratio (SNR), correlation coefficient ( $R$ ), smoothness ( $r$ ), an improved entropy weight method is used to evaluate the denoising effect. The two indexes under different wavelet decomposition levels are linearly weighted to obtain a new comprehensive evaluation index. The decomposition level corresponding to the lowest point of the comprehensive evaluation index is the optimal decomposition level. Then, based on the physical meaning of wavelet entropy, the optimal wavelet base for wavelet decomposition is determined by calculating the wavelet entropy of the low-frequency coefficients of different wavelet bases to process the signal. **Results:** Simulation and test results show that: (1) Compared with the existing composite evaluation indexes, the composite evaluation index has certain advantages in reliability, simplicity and accuracy; (2) wavelet entropy based wavelet selection scheme (WEBWSS) takes into account the optimization of the number of decomposition layers and the wavelet basis, and has better denoising performance than WEBWSS; (3) The discriminant function method after optimization can locate the singularity of the signal well, but at the cost of the smoothness of the denoising signal. Under the premise of meeting the filtering requirements of gait signal research, the detailed features of the wavelet denoised acceleration signal waveform obtained by the WEBWSS are well preserved, and the gait cycle can be clearly distinguished. **Conclusions:** The wavelet denoising scheme determined by optimized WEBWSS can obtain satisfactory results when processing gait acceleration signals.

**Key words:** improved entropy method; composite evaluation index; discriminant function method; selection of the optimal wavelet bases

**First author:** XIE Zhengyu, postgraduate, specializes in data processing algorithm research. E-mail: jxrjxzy@163.com

**Corresponding author:** LIU Xueguang, PhD, professor. E-mail: LXG1973@hotmail.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(51775124).

**引文格式:** XIE Zhengyu, LIU Xueguang, ZHANG Gong, et al. Gait Acceleration Signal Preprocessing with Wavelet Denoising[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(11): 1956-1962. DOI:10.13203/j.whugis20200265 (谢政宇, 刘学广, 张巩, 等. 利用小波去噪进行步态加速度信号预处理[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(11): 1956-1962. DOI:10.13203/j.whugis20200265)