

文章编号:1671-251X(2019)01-0040-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018040041

煤矿井下电磁无线随钻测量信号滤波研究

康厚清^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037;
2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:针对采用自适应滤波最小均方算法和递推最小二乘算法提取煤矿井下电磁无线随钻测量(EM-MWD)信号存在收敛速度慢与运算时间长等问题,提出了一种稳定快速横向递归最小二乘(SFT-RLS)算法,用于自适应滤除井下非稳态电气干扰与工频及其2倍频、3倍频干扰,实时提取微弱EM-MWD信号。该算法基于RLS算法,利用4个并行滤波器结构可降低运算时间,并利用加权最小二乘误差进行反馈以提高稳定性。仿真试验结果表明,SFT-RLS算法可实现对采样率为1 kHz的EM-MWD信号进行自适应滤波和自适应陷波,平均每次迭代运行时间小于156.98 μ s,实现了快速稳定收敛运算与实时自适应滤波;SFT-RLS算法自适应滤波可抑制信号与干扰比为-115 dB的非稳态电气干扰;SFT-RLS算法自适应陷波可实时滤除工频及其2倍频、3倍频干扰,有效提取频率为6.25 Hz的时间脉冲位置调制的EM-MWD信号波形,为正确解码EM-MWD信号提供了可靠数据。

关键词:煤矿井下电磁无线随钻测量信号;非稳态干扰;工频干扰;自适应滤波器;自适应滤波;自适应陷波;稳定快速横向递归最小二乘算法

中图分类号:TD655 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20181224.2209.007.html>

Research on filtering of electromagnetic measurement while drilling signal in underground coal mine

KANG Houqing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China; 2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: In view of problems of slow convergence speed and long computation time existed in electromagnetic wireless measurement while drilling (EM-MWD) signals extracted by adaptive filtering least mean square algorithm and recursive least squares algorithm, a stabilized fast transversal filters for recursive least squares (SFT-RLS) algorithm was proposed, which was used for adaptive filtering unsteady electrical interference and power frequency, as well as double frequency and triple frequency interference, and extracting weak EM-MWD signals in real time. Based on the RLS algorithm, the algorithm uses four parallel filter structures to reduce the operation time, and uses the weighted least squares error for feedback to improve the stability. The simulation results show that the SFT-RLS algorithm can achieve adaptive filtering and adaptive notch of the EM-MWD signals with a sampling rate of 1 kHz, the average running time of each iteration is less than 156.98 μ s, so as to realize fast and stable convergence operation and real-time adaptive filtering of EM-MWD signals; the adaptive filtering of the SFT-RLS algorithm can

收稿日期:2018-04-11;修回日期:2018-09-28;责任编辑:张强。
基金项目:国家“十三五”科技重大专项资助项目(2016ZX05043005-003)。
作者简介:康厚清(1973—),男,重庆永川人,高级工程师,硕士,主要研究方向为安全技术及仪器,E-mail:k2houqing@126.com。
引用格式:康厚清. 煤矿井下电磁无线随钻测量信号滤波研究[J]. 工矿自动化,2019,45(1):40-44.

KANG Houqing, Research on filtering of electromagnetic measurement while drilling signal in underground coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 40-44.

suppress unsteady electrical interference with a signal to interference ratio of -115 dB; the adaptive notch of the SFT-RLS algorithm can filter power frequency and its interference of double frequency and triple frequency in real time, and effectively extract the EM-MWD time position pulse modulation signal with 6.25 Hz, and provide reliable data for correct decoding of EM-MWD signals.

Key words: electromagnetic measurement while drilling signal in underground coal mine; unsteady state interference; power frequency interference; adaptive filter; adaptive filtering; adaptive notch; stabilized fast transversal filters for recursive least squares algorithm

0 引言

现阶段煤矿井下随钻测量信号的传输主要采用有线方式,需要专用通缆钻杆,而专用通缆钻杆结构复杂、使用成本高,限制了其更大规模的推广应用^[1]。电磁无线随钻测量(Electromagnetic Measurement While Drilling, EM-MWD)主要用于石油钻井及地面煤层气开采^[2],通过钻杆与大地作为传输信道,在不加中继情况下可传输 $2\ 500\sim 3\ 800\text{ m}$ ^[2-3]。煤矿井下 EM-MWD 与地面工作原理相似,如图 1 所示,采用普通钻杆与煤岩层作为传输信道,EM-MWD 发射机将传感器数据进行编码调制,并通过绝缘天线激励出沿钻杆引导的超低频电流信号,在钻杆附近形成准静电场,从而在钻机附近形成电位梯度,接收机采样该电位梯度差后,经过放大滤波提取 EM-MWD 信号并解码还原为传感器数据。由于煤矿井下 EM-MWD 信号是在高电阻率的煤岩介质中传播^[4],且电路需本质安全而不允许大功率发射,导致 EM-MWD 信号十分微弱,限制了其传输距离。同时,EM-MWD 信号还受到白噪声、工频及其谐波干扰与钻机高强度非稳态电气干扰^[5],这些干扰仅采用硬件处理方法去除困难,根据图 1,采用自适应算法滤除干扰是较理想的方法。

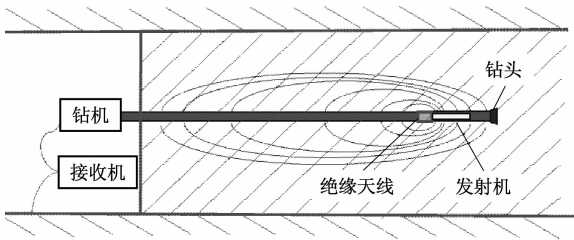


图 1 井下 EM-MWD 工作原理

自适应滤波算法主要有最小均方算法(Least Mean Square, LMS)和递推最小二乘(Recursive Least Square, RLS)2 种经典算法^[6]。改进的 LMS 算法包括归一化 LMS(Normalized LMS, NLMS)、时变 LMS 算法(Time Varying LMS, TVLMS)^[7]及变步长 LMS 算法(Variable Step-size LMS, VSLMS)^[8]等多种算法,但其收敛速度慢^[9],信号平稳适应性差^[10-11]。而 RLS 算法能快速收敛^[10-11],是

对信号非平稳适应性能最好的算法之一^[12],但运算量大。为此,本文提出了一种稳定快速横向递归最小二乘(Stabilized Fast Transversal Filters for Recursive Least Squares, SFT-RLS)算法,该算法基于 RLS 算法,利用 4 个并行滤波器结构降低运算时间,并利用加权最小二乘误差进行反馈以提高算法稳定性。SFT-RLS 算法能自适应滤除井下非稳态电气干扰与工频干扰,实时提取淹没在干扰与噪声中的微弱 EM-MWD 信号,为正确解码还原传感器数据提供可靠信号波形数据。

1 EM-MWD 信号的 SFT-RLS 自适应滤波

RLS 自适应滤波原理如图 2 所示, n 时刻输入信号矢量 $\mathbf{x}(n)$ 通过经权矢量 $\mathbf{w}(n)$ 加权后的滤波器进行滤波,得到信号 $y(n)$,与期望信号 $d(n)$ 比较后得到误差信号 $e(n)$ 。其代价函数为 $J(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} e(i)$,遗忘因子为 $\lambda, 0 < \lambda \leq 1$,误差权重在离 n 时刻近时较大,离 n 时刻远时较小,从而使 RLS 算法适应非稳态条件。

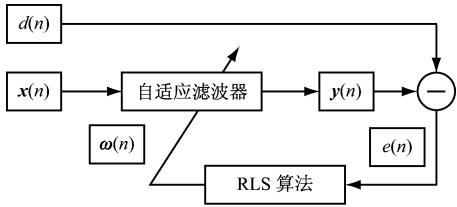


图 2 RLS 自适应滤波原理

Fig. 2 Principle of RLS adaptive filter
常规 RLS 算法如下:

$$e(n) = d(n) - \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n-1) \tag{1}$$

$$\mathbf{k}(n) = \frac{\mathbf{R}^{-1}(n-1)\mathbf{x}(n)}{\lambda + \mathbf{x}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n-1)\mathbf{x}(n)} \tag{2}$$

$$\mathbf{R}^{-1}(n) = \lambda^{-1}(\mathbf{R}^{-1}(n-1) - \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{R}^{-1}(n-1)) \tag{3}$$

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mathbf{k}(n)e(n) \tag{4}$$

式中: $\mathbf{k}(n)$ 为增益矢量; $\mathbf{R}(n)$ 为输入信号矢量 $\mathbf{x}(n)$ 的自相关矩阵。

由式(1)一式(4)可知,RLS 算法单次迭代运算量为 $O(N^2)$ 量级(N 为滤波器阶数),导致运算时间长,限制了其实时应用。文献[13]指出 SFT-RLS

算法是众多快速算法中复杂度最低且最具吸引力的算法,它将常规 RLS 算法分解为前向与后向预测、联合过程估计与辅助滤波 4 个滤波器并行运算,降低了运算时间,并在递推过程中引入加权最小二乘误差 ϵ 冗余参数,以保证算法稳定。文献[13]给出了完整的算法描述,将常规 RLS 算法运算量降到 $9N$ 量级。

SFT-RLS 算法中的遗忘因子 λ 和加权最小二乘误差 ϵ 的值会影响算法的稳定性及收敛速度。 λ 越小,收敛速度快,但误差大,算法稳定性差; λ 越大,收敛速度慢,但误差小,算法稳定性好。文献[13]指出, λ 最佳值为 $(1 - 0.4/(N + 1))$ 。针对煤矿井下 EM-MWD 信号经过硬件低通滤波后干扰幅值较大,但频率不高,而真实信号微弱的情况,在井下 EM-MWD 信号滤波中主要考虑在滤除强干扰时需尽量保证 EM-MWD 信号不引入更多误差。因此,在 SFT-RLS 算法自适应滤波器中,遗忘因子 λ 取一个稍大的固定值,在保证信号不被算法引入干扰的情况下尽量提高收敛速度;加权最小二乘误差 ϵ 取一较小值,但为保证算法稳定性,不能太小,本文中 ϵ 取值在 $0.001 \sim 0.1$ 之间都能保证算法稳定和算法收敛速度。

井下 EM-MWD 发射信号频率以 6.25 Hz 为主,当信号采样率为 $1\,000\text{ Hz}$,信号与干扰比为 -115 dB , $N=16$, $\lambda=0.99$, $\epsilon=0.01$ 时,整个 SFT-RLS 算法自适应滤波过程稳定正确。根据 Matlab 推荐测试程序运行时间方法(TIC-TOC),在防爆计算机上仿真计算单次迭代运行时间,如图 3 所示,单次运行时间最长约 $600\text{ }\mu\text{s}$,但该方法测量结果不精确。图 4 是采用 TIC-TOC 方法对 $6\,000$ 个数据迭代 100 次滤波循环记录数据, $6\,000$ 次迭代最高运行时间为 $0.941\,88\text{ s}$,平均每次迭代运行时间低于 $0.941\,88/6\,000=156.98\text{ }\mu\text{s}$,小于采样间隔 $1\,000\text{ }\mu\text{s}$,能做到实时滤波。

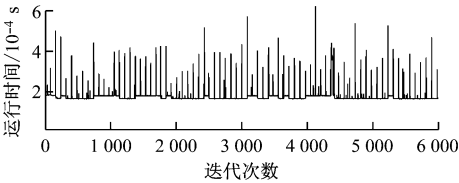


图 3 SFT-RLS 算法单次迭代运行时间

Fig. 3 Run time of single iteration of SFT-RLS algorithm

2 EM-MWD 信号的 SFT-RLS 算法自适应陷波

SFT-RLS 算法自适应滤波处理不能完全去除工频干扰,还需对 EM-MWD 信号进行工频及其倍频陷波处理。用 LMS 算法滤除工频干扰具有很好

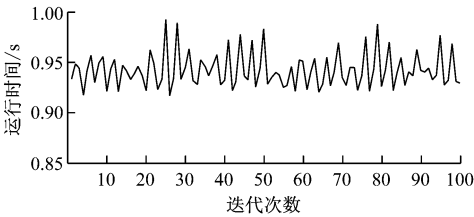


图 4 SFT-RLS 算法 6 000 次迭代运行时间

Fig. 4 Run time of 6 000-iterations of SFT-RLS algorithm 的效果^[14-15],而 SFT-RLS 算法收敛速度快,误差小^[16],效果更好。

SFT-RLS 算法自适应工频陷波器通过 SFT-RLS 算法自适应调节工频干扰的幅度和相位参数,从而滤除工频干扰,其结构原理如图 5 所示,其中, $a(n)$ 为 SFT-RLS 算法自适应滤波后输出数据, $b(n)$ 为工频信号经 SFT-RLS 算法自适应调节后数据, $c(n)=a(n)-b(n)$ 。由于此处只需考虑工频及其 2 倍频、3 倍频谐波干扰, $a(n)$ 可等效为由信号 $s(n)$ 与工频及其 2 倍频、3 倍频谐波组成(计算公式见式(5)), f_i 为频率, c_i 为幅值, θ_i 为相位(工频时 $i=1$, 2 倍频时 $i=2$, 3 倍频时 $i=3$); 式(6)中, $b(n)$ 为工频及其 2 倍频、3 倍频谐波数据经 SFT-RLS 算法自适应调节后输出的数据。式(7)为式(6)经过三角函数和差化积后的简记形式,其中 $\tilde{c}_i$ 为 SFT-RLS 算法自适应调节后的幅值, $\tilde{\varphi}_i$ 为 SFT-RLS 算法自适应调节后的相位。

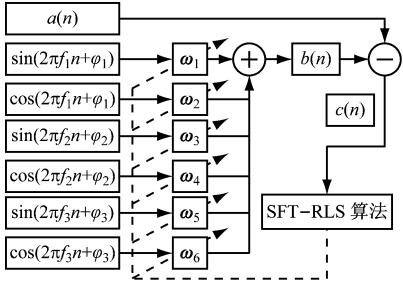


图 5 SFT-RLS 算法自适应陷波器结构原理

Fig. 5 Structural principle of adaptive notch filter of SFT-RLS algorithm

$$a(n) = s(n) + \sum_{i=1}^3 c_i \cos(2\pi f_i n + \theta_i) \tag{5}$$

$$b(n) = \sum_{i=1}^3 \omega_{2i-1}(n) \sin(2\pi f_i n + \varphi_i) + \sum_{i=1}^3 \omega_{2i}(n) \cos(2\pi f_i n + \varphi_i) \tag{6}$$

$$b(n) = \sum_{i=1}^3 \tilde{c}_i \cos(2\pi f_i n + \tilde{\varphi}_i) \tag{7}$$

对比式(5)与式(7),SFT-RLS 算法自适应调整 $\omega_1 \sim \omega_6$ 参数,使式(7)中的 $\tilde{c}_i$ 和 $\tilde{\varphi}_i$ 与式(5)中的 c_i 和 θ_i 一致,即 $a(n)=s(n)+b(n)$,则 SFT-RLS 算法

自适应陷波器输出数据 $c(n)=a(n)-b(n)=s(n)$ ，从而实现工频及其2倍频、3倍频自适应陷波。

3 仿真试验及结果分析

煤矿井下 EM-MWD 信号经传输一定距离后在接收端非常微弱，电压在微伏级，而相应的工频干扰电压在毫伏级，钻机运行过程中非稳态电气干扰电压可达到伏级，信号与干扰之比接近-100 dB。先对 EM-MWD 信号进行 SFT-RLS 自适应滤波，然后利用 SFT-RLS 陷波器进行工频干扰滤除，最后采用低通滤波处理。

经 SFT-RLS 算法自适应滤波前后的 EM-MWD 信号波形及频谱对比如图 6 所示。EM-MWD 信号波形中包含有 6.25 Hz 的位置脉冲调制信号、工频干扰与电气噪声；6.25 Hz 位置脉冲调制信号约在 1~2 s 时段和 4~5 s 时段停止；约在 3.5 s 与 4.5 s 位置分别有约 6 V 和 2 V 电气非稳态干扰，如图 6(a)所示；同时 EM-MWD 信号还混有工频干扰与噪声，如图 6(b)所示。EM-MWD 信号经 SFT-RLS 算法自适应滤波后，其中工频干扰和非稳态干扰得到极大抑制，但工频干扰并没有被完全滤除，如图 6(d)所示。

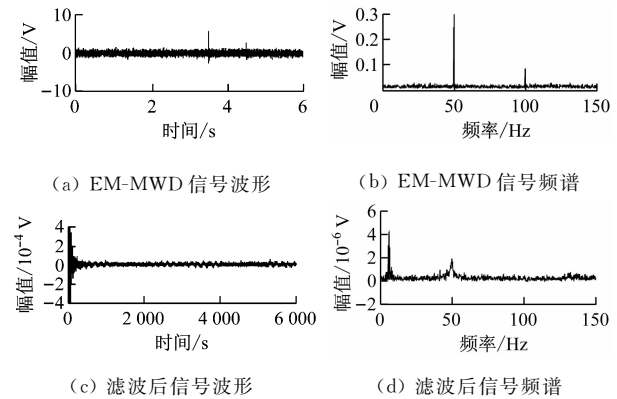


图 6 经 SFT-RLS 算法自适应滤波前后的 EM-MWD 信号波形及频谱

Fig. 6 EM-MWD signal waveform and spectrum before and after filtered by SFT-RLS algorithm

经 SFT-RLS 算法自适应陷波及低通滤波后的 EM-MWD 信号波形与频谱如图 7 所示。从图 7(b)可看出，工频及其倍频干扰滤除效果非常理想。经 SFT-RLS 算法自适应陷波后的波形还有宽频噪声，采用截止频率为 10 Hz 的数字低通滤波器滤波后的信号波形如图 7(c)所示，从波形图可见，6.25 Hz 位置脉冲调制信号被很好地恢复出来了，为 EM-MWD 信号解码提供了可靠的信号波形数据。

由图 6 与图 7 可知，此时信号与干扰比约为-115 dB，表明 SFT-RLS 算法自适应滤波及 SFT-RLS 算法自适应陷波适合滤除井下 EM-MWD 信

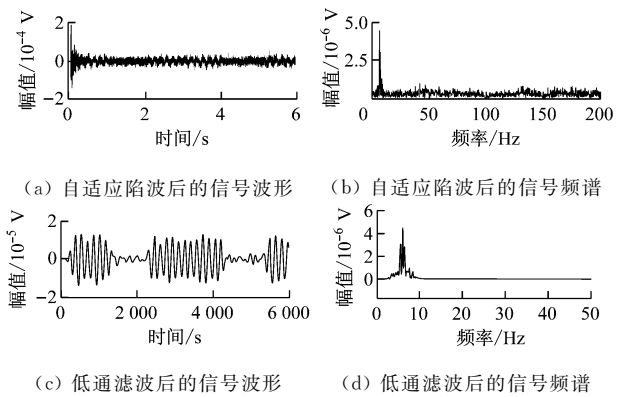


图 7 经 SFT-RLS 算法自适应陷波及低通滤波后的 EM-MWD 信号波形与频谱

Fig. 7 EM-MWD signal waveform and spectrum filtered by notch filter and low pass filter of SFT-RLS algorithm

4 结论

(1) 为实时提取井下微弱 EM-MWD 信号，采用 SFT-RLS 算法自适应滤除非稳态电气干扰与工频及其 2 倍频、3 倍频干扰，分析了 SFT-RLS 算法遗忘因子与加权最小二乘误差取值范围。仿真结果表明，SFT-RLS 算法自适应滤波能够实时滤除井下非稳态电气干扰，自适应陷波可准确滤除工频及其 2 倍频、3 倍频干扰。SFT-RLS 算法具有快速收敛与稳定的特点，利用 4 个并行滤波器可降低运算时间，利用加权最小二乘误差进行反馈可提高算法稳定性。

(2) 为提取井下更低信噪比的 EM-MWD 信号，需进一步研究 SFT-RLS 算法遗忘因子最佳大小随非稳态电气干扰波形变化的动态函数。

参考文献 (References):

[1] 王家豪,董浩斌,石智军,等. 煤矿井下随钻测量电磁传输信道建模[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1705-1710.
WANG Jiahao, DONG Haobin, SHI Zhijun, et al. Modeling an EM channel for MWD in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1705-1710.

[2] 杜俊杰,范业活,韩永国. 国内 EM-MWD 技术发展现状及在煤层气中的应用展望[J]. 中国煤层气, 2014, 11(4): 6-10.
DU Junjie, FAN Yehuo, HAN Yongguo. Development situation and application prospect of domestic EM-MWD in CBM directional well operations[J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(4): 6-10.

[3] 刘伟,黄崇君,连大炜. 电磁波随钻测量仪器测量效果影响因子分析[J]. 钻采工艺, 2017, 40(5): 11-14.

- LIU Wei, HUANG Chongjun, LIAN Taiwei. Numerical analysis of factors affecting EM-MWD electromagnetic signal attenuation [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(5): 11-14.
- [4] 范业活, 李威, 聂在平, 等. 基于 NMM 随钻电磁波传输信道特性分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 1125-1130.
- FAN Yehuo, LI Wei, NIE Zaiping, et al. Analysis of EM-MWD channel based on NMM [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(3): 1125-1130.
- [5] 王洪亮, 董浩斌, 蒋国盛. 基于相关自适应器的 EM-MWD 信号检测系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1013-1018.
- WANG Hongliang, DONG Haobin, JIANG Guosheng. Design of EM-MWD signal detection system based on correlation and adaptive filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1013-1018.
- [6] 李姣军, 李刚, 李恒. LMS 和 RLS 自适应滤波算法对比研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2011, 13(2): 132-134.
- LI Jiaojun, LI Gang, LI Heng. Comparative study between LMS and RLS adaptive filter algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2011, 13(2): 132-134.
- [7] DHIMAN J, AHMAD S, GULIA K. Comparison between adaptive filter algorithms [J]. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 2013, 2(5): 1100-1103.
- [8] 刘建勋, 王锋, 赵河明, 等. 基于 LMS 原理的引信回波信号滤波算法及应用[J/OL]. 弹箭与制导学报: 1-4 [2018-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1234.TJ.20180323.1605.008.html>.
- LIU Jianxun, WANG Feng, ZHAO Heming. Filtering algorithm and application of fuse echo signal based on LMS principle [J/OL]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance: 1-4 [2018-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1234.TJ.20180323.1605.008.html>.
- [9] 石鑫, 李春龙, 李昊. 基于 RLS 算法的自适应噪声抵消系统研究[J]. 电子测量与技术, 2010, 33(3): 44-46.
- SHI Xin, LI Chunlong, LI Hao. Adaptive noise canceling system based on RLS algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(3): 44-46.
- [10] 高丙坤, 倪杨. 基于 RLS 自适应滤波算法的 MIMO-OFDM 信道估计[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(4): 36-39.
- GAO Bingkun, NI Yang. MIMO-OFDM channel estimation based on RLS adaptive filtering algorithm [J]. Techniques of Automation & Applications, 2013, 32(4): 36-39.
- [11] 杨威, 刘宏清, 黎勇. 冲击噪声下的 LMS 和 RLS 联合滤波算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(2): 165-170.
- YANG Wei, LIU Hongqing, LI Yong. Joint estimation algorithm based on LMS and RLS in the presence of impulsive noise [J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(2): 165-170.
- [12] 郭天一, 廉保旺, 邹晓军. 一种具有快速跟踪能力的改进 RLS 算法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(8): 345-348.
- GUO Tianyi, LIAN Baowang, ZOU Xiaojun. A modified RLS algorithm with fast tracking capability [J]. Computer Simulation, 2009, 26(8): 345-348.
- [13] DINIZ P S. Adaptive filtering: algorithms and practical implementation [M]. Third Edition. New York: Springer, 2008: 333-345.
- [14] 赵汗青. 肌电信号工频谐波的同态自适应滤波方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(2): 154-158.
- ZHAO Hanqing. Homomorphic adaptive filtering method for power harmonic of EMG signals [J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2017, 27(2): 154-158.
- [15] 秦勤, 郑刚, 孟妍. 去除心电信号工频干扰的多阶自适应滤波器阶数确定策略研究[J]. 天津理工大学学报, 2014, 30(6): 39-44.
- QIN Qin, ZHENG Gang, MENG Yan. Order selection strategy in multiple adaptive filter for power line interference elimination in ECG signals [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2014, 30(6): 39-44.
- [16] 谷晓彬, 冯国英, 刘建. 自适应滤波算法在微弱振动测量中的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 154-160.
- GU Xiaobin, FENG Guoying, LIU Jian. Application of adaptive filtering algorithm in the weak vibration measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 154-160.