

DOI: 10.7652/xjtuxb201905010

拖拉机动力输出轴载荷经验模态分解 软阈值降噪研究

闫祥海, 周志立, 李忠利

(河南科技大学车辆与交通工程学院, 471003, 河南洛阳)

摘要: 针对拖拉机旋耕作业动力输出轴(PTO)载荷降噪中载荷先验特性预判的问题,提出了 PTO 载荷经验模态分解(EMD)软阈值降噪方法,得到了 PTO 载荷相同时域内不同频率固有模态函数(IMF)。利用边界局部特征尺度延拓算法对 IMF 出现的端点效应进行了抑制,与镜像对称延拓算法和多项式拟合延拓算法比较,在运行时间、正交指数及 IMF 数量 3 项评价指标中均占优势。利用 IMF 分量与载荷相关系数,辨识出前 3 阶 IMF 分量为噪声主导分量,对前 3 阶 IMF 分量分别进行了软阈值降噪,与剩余分量叠加重构了降噪后的 PTO 载荷。降噪后的 PTO 载荷主频为 4.492 Hz,与试验中旋耕机刀轴旋转频率相符。与 EMD 低通滤波降噪算法比较,EMD 软阈值降噪算法属于自适应数据驱动,不需要设定截止频率。以含噪信号与噪声误差比(d_{nSNR})为降噪性能评价指标,EMD 软阈值降噪算法的 d_{nSNR} 为 12.712 5,小于 EMD 低通滤波降噪算法的 d_{nSNR} 值 13.266 6,对比结果表明 EMD 软阈值降噪算法对实测拖拉机 PTO 载荷降噪效果明显。

关键词: 拖拉机 PTO 载荷;EMD 软阈值降噪;固有模态函数;端点效应;降噪性能评价指标

中图分类号: S222.3;TN911.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)05-0067-07

Study on the Noise Reduction of Tractor Power Take-off Load by Empirical Mode Decomposition Soft-Threshold Method

YAN Xianghai, ZHOU Zhili, LI Zhongli

(College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: Aiming at the prejudgment on prior characteristics of the power take-off (PTO) load measured during tractor rotary tillage, an empirical mode decomposition (EMD) soft-threshold denoising algorithm is proposed. The intrinsic mode functions (IMF) at different frequencies in the same time domain of PTO load are obtained by using EMD. The endpoint effect of IMF is suppressed by the boundary local feature scale extension algorithm. Compared with the mirror symmetric extension algorithm and polynomial fitting extension algorithm, this algorithm is dominant in the three evaluation indexes of running time, orthogonal index and IMF number. By analyzing the correlation coefficient between the IMF components and PTO load, the first three orders of the IMF components are identified as the noise dominant component. Soft-threshold denoising is performed on the first three orders of IMF components, and the denoised PTO load is reconstructed by superposition with the residual components. The denoised PTO load frequency is 4.492 Hz, which is consistent with the rotation frequency of the rotary cutter shaft in the test.

Compared with the EMD low-pass filter denoising algorithm, the EMD soft-threshold denoising algorithm belongs to adaptive data driving and does not need to set the cutoff frequency. The noisy signal-to-noise reduction error ratio (d_{nsnr}) is used as the denoising performance evaluation index. The d_{nsnr} value of the EMD soft-threshold denoising algorithm is 12.712 5, smaller than the d_{nsnr} value 13.266 6 by EMD low-pass filtering denoising algorithm. The comparison results show that the EMD soft-threshold denoising algorithm has obvious effect on the noise reduction of tractor PTO load.

Keywords: tractor PTO load; empirical mode decomposition soft-threshold denoising; intrinsic mode function; endpoint effect; denoising performance evaluation index

拖拉机旋耕作业动力输出轴(PTO)载荷是多分量非线性、非稳态信号,有效分离载荷中的噪声是载荷数据处理及有效使用的关键^[1]。传统尺度滤波降噪方法通过对载荷的频谱分析,利用先验知识人为选取截止频率,设计滤波器,消除噪声频带^[2-3]。截止频率的选取依赖对实测信号频率成分的预判。卡尔曼滤波降噪方法需要对噪声成分、噪声方差等信息准确分析,以预判噪声先验统计特性^[4]。小波滤波降噪方法需要根据数据特性对小波基、分解尺度人为选取^[5]。拖拉机PTO载荷测取受测试工况、测试环境因素的影响,噪声成分复杂,无法对载荷特性进行预判,以上降噪算法均不能对拖拉机PTO载荷进行有效降噪。经验模态分解(EMD)属于自适应数据驱动算法,人为干预因素少,可将载荷进行时域和频域的多尺度分解,得到固有模态函数(IMF)^[6-8]。利用相关系数^[9]、能量熵^[10]、排列熵^[11]等性能指标区分噪声主导IMF分量,通过对噪声主导IMF分量进行小波、阈值降噪^[12],既客观区分了噪声,又保留了噪声主导分量中的有用成分。针对EMD分解中出现的端点效应,有学者从载荷原始数据的延拓和预测两方面提出了多种抑制端点效应的方法,对不同类型数据得到了理想的EMD分解结果^[13-15],EMD降噪方法在工程领域得到了广泛应用。

本文在分析EMD软阈值降噪原理的基础上,对拖拉机旋耕作业PTO转矩载荷进行降噪研究。采用边界局部特征尺度延拓算法抑制PTO载荷EMD分解产生的端点效应,利用相关系数辨识噪声主导IMF分量,通过对噪声主导IMF分量软阈值降噪,实现拖拉机PTO载荷降噪。

1 EMD软阈值降噪原理分析

EMD软阈值降噪算法综合EMD理论与阈值降噪理论,根据数据自身特性对信号进行自适应处理,算法包括EMD分解、端点效应抑制、IMF分量

划分、软阈值降噪。对PTO载荷 $S(t)$ 进行EMD软阈值降噪的原理及流程如下。

(1)寻求 $S(t)$ 极大值点和极小值点,利用3次样条函数拟合得到极大值包络线 $m_+(t)$ 和极小值包络线 $m_-(t)$,求出 $S(t)$ 均值包络线

$$a_1(t) = [m_+(t) + m_-(t)]/2 \quad (1)$$

(2)由 $S(t)$ 减去 $a_1(t)$ 得到新序列 $h_{11}(t)$,判断 $h_{11}(t)$ 是否满足IMF两个定义条件:

整个数据序列中IMF函数过零点数和极值点数相等或至多相差1;

任意时刻 $m_+(t)$ 和 $m_-(t)$ 关于时间轴对称。

若满足条件, $h_{11}(t)$ 即为 $S(t)$ 一阶IMF分量;否则,将 $h_{11}(t)$ 视为原始序列,重复步骤(1)、(2)。经过 k 次循环, $h_{k1}(t)$ 满足IMF定义条件,则得到 $S(t)$ 一阶IMF分量

$$C_1(t) = h_{k1}(t) \quad (2)$$

(3)新序列 $r_1(t)$ 由 $S(t)$ 减去 $C_1(t)$ 得到,对 $r_1(t)$ 重复步骤(1)、(2),得到 $S(t)$ 二阶IMF分量 $C_2(t)$ 。照此循环 n 次,得到 $S(t)$ 的 n 个IMF分量 $C_m(t)$ 和残余量 $r_{n+1}(t)$,当 $r_{n+1}(t)$ 为单调函数时,分解终止。 $S(t)$ 可表示为

$$S(t) = \sum_{m=1}^n C_m(t) + r_{n+1}(t) \quad (3)$$

(4)判断分量 $C_m(t)$ 是否出现端点效应,若出现,进行端点处理,文中采用边界局部特征尺度延拓算法进行端点处理^[16]。记 $S(t)$ 左端第 i 个极大值为 $l_{\max_i}$,该极大值对应的序列点为 $\text{find}(l_{\max_i})$

$$L = (l_{\max_1} - l_{\max_i})/3 \quad (4)$$

$S(t)$ 左端延拓极大值的序列点为

$$\text{find}(L_{\max}) = \text{find}(l_{\max_1}) - \text{find}(L) \quad (5)$$

$S(t)$ 左端延拓极大值为

$$L_{\max} = \sum_{i=1}^3 l_{\max_i}/3 \quad (6)$$

至此,得到 $S(t)$ 左端延拓的极大值位置与幅

值。类似的方法得到左端延拓的极小值,右端延拓的极大值,极小值的位置与幅值,然后循环步骤(1)~(3)。若分量 $C_m(t)$ 没有出现端点效应则进行步骤(5)。

(5)文中利用 IMF 分量 $C_m(t)$ 与 $S(t)$ 相关系数区分噪声主导 IMF 分量与 PTO 载荷主导 IMF 分量。相关系数定义为

$$r = \frac{\sum_{t=1}^N [S(t) - \overline{S(t)}][C_m(t) - \overline{C_m(t)}]}{\sqrt{\sum_{t=1}^N [S(t) - \overline{S(t)}]^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N [C_m(t) - \overline{C_m(t)}]^2}} \quad (7)$$

式中: N 为 PTO 载荷总序列点数; $\overline{S(t)}$ 、 $\overline{C_m(t)}$ 分别表示载荷 $S(t)$ 、IMF 分量 $C_m(t)$ 的均值。

(6)计算噪声主导 IMF 分量 EMD 去噪阈值^[17]

$$\tau_m = \text{med}\{ |C_m(t) - \text{med}\{C_m(t)\}| \} \sqrt{2\ln M}/0.6745 \quad (8)$$

式中: τ_m 为 $C_m(t)$ 阈值; $\text{med}(\cdot)$ 表示中值函数; M 为 $S(t)$ 时间长度。

(7)EMD 软阈值去噪表达式为

$$\dot{C}_m(t) = \begin{cases} \text{sgn}(C_m(t))(|C_m(t)| - \tau_m), & |C_m(t)| \geq \tau_m \\ 0, & |C_m(t)| < \tau_m \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\dot{C}_m(t)$ 为 $C_m(t)$ 降噪后的分量; $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数。

(8)重构得到降噪后信号

$$\dot{S}(t) = \sum_{m=1}^j \dot{C}_m(t) + \sum_{m=j+1}^n C_m(t) + r_{n+1}(t) \quad (10)$$

式中: $\dot{S}(t)$ 表示经软阈值降噪后的 PTO 载荷; j 为噪声主导 IMF 分量的个数。

2 EMD 软阈值降噪算法应用

根据 EMD 软阈值降噪流程,对田间实测的拖拉机 PTO 载荷进行降噪处理,验证 EMD 软阈值降噪算法在 PTO 载荷降噪中的适用性。

2.1 PTO 载荷测取及 EMD 分解

对拖拉机配套 1GQN-230ZG 型号旋耕机进行了田间旋耕作业试验,采用 HDT05 转矩传感器检测 PTO 载荷,数据采集器获取传感器数据并传输至上位机软件进行数据显示、保存及分析。试验中耕深为 130 mm、耕幅为 2 300 mm,油门开度为 75%,发动机转速为 2 000 r/min,拖拉机作业速度为 4~5 km/h,PTO 转速范围为 650~700 r/min,

地面条件为耕后的黏砂壤土。PTO 载荷频率一般在 20 Hz 以内^[3],根据 Nyquist 采样定理及工程应用经验,数据采集器采样频率设置为 200 Hz,数据采集系统稳定运行时截取 1 600 个测量点,拖拉机 PTO 载荷如图 1 所示。

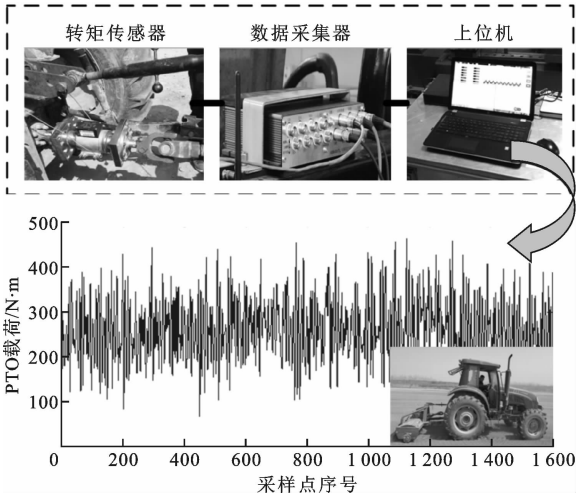


图 1 拖拉机 PTO 载荷

根据 EMD 软阈值降噪算法中步骤(1)~(3)对拖拉机 PTO 载荷进行 EMD 分解。在 IMF 定义条件基础上,参考 PTO 载荷实际分解过程,设置分解终止条件为:每个 IMF 最大迭代次数为 100;载荷平均值与包络幅值的比值小于阈值 0.5;载荷平均值与包络幅值比值大于阈值的信号数与信号总数之比小于阈值 0.5。

满足以上任一条件,分解终止。采用以上分解终止策略得到 7 阶 IMF 分量和一个残余量,如图 2 所示。

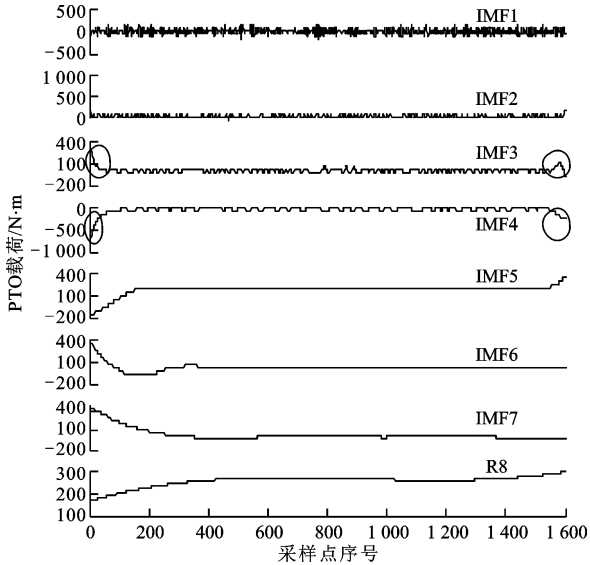


图 2 PTO 载荷 EMD 分解分量

由图 2 可知,EMD 分解方法将拖拉机 PTO 载荷分解为高频到低频的分量,由于 EMD 分解是基于数据驱动的分解方法,分解过程依赖极值点的选取,如果 PTO 载荷数据两端点处数值不是极值点,在 3 次样条插值过程中端点处会存在发散,导致 EMD 分解中出现端点效应。图 2 中 IMF3 分量与 IMF4 分量在端点处出现明显的数值发散(圆圈标注部分),且污染内部数据,IMF4 中数据超出载荷范围。由于端点效应的存在,出现虚假分量,使得载荷分解阶数较多。

2.2 PTO 载荷端点效应处理

根据 EMD 软阈值降噪算法中步骤(4)进行 PTO 载荷端点效应处理。PTO 载荷与旋耕机刀轴旋转频率有关,可认为是准周期信号,而镜像对称延拓算法^[18]与多项式拟合延拓算法^[19]对准周期信号 EMD 分解的端点效应处理结果较好,因此利用这两种算法与本文采用的边界局部特征尺度延拓算法进行对比分析。

镜像对称延拓算法中,由于 PTO 载荷左端第一个极值点为极小值,且第一个采样点值大于第一个极大值,因此取第一个采样点为对称点镜像运算。PTO 载荷右端最后一个极值点为极小值,且最后一个采样点值小于最后一个极大值,因此取右端最后一个极小值点为对称点镜像运算。多项式拟合延拓算法中,取 PTO 载荷左端前 3 个极大值进行二次多项式拟合得到拟合方程,计算拟合方程在原点处的函数值,该值为左端延拓极大值。利用类似的方法得到左端延拓的极小值、右端延拓的极大值和极小值。

将以上 3 种方法得到的延拓点与 PTO 载荷组合,得到新数据并进行 EMD 分解。以算法运行时间、正交指数及 IMF 数量为评价指标对比分析 3 种算法性能,结果如表 1 所示。正交指数定义为

$$R = \sum_{p=1}^{n+1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq p}}^{n+1} \sum_{i=1}^N C_p(i) C_k(i) / \sum_{j=1}^N S^2(i) \quad (11)$$

式中: p,k 为 IMF 分量序号; i 表示序列点数据序号。正交指数代表了信号能量丢失、IMF 分量信号重叠的程度,正交指数越小,算法性能越优。

对图 2 中出现端点效应明显的 IMF3 分量进行 3 种算法的端点局部对比,如图 3 所示。

由表 1 和图 3 可得,边界局部特征尺度延拓算法从 PTO 载荷全局搜寻延拓点,一定程度上保留了 PTO 载荷特征,EMD 分解结果较其他两种算法

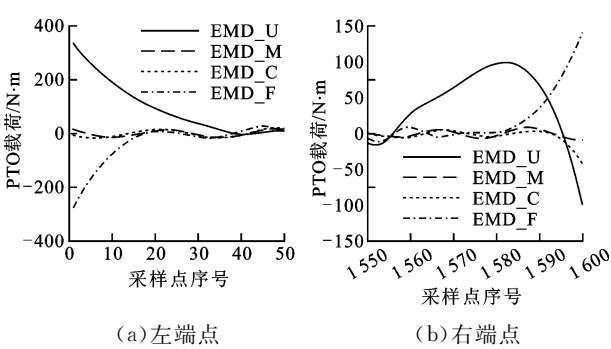


图 3 3 种算法在 IMF3 分量端点局部处理的结果

在 3 项评价指标与端点局部处理中均占优势。PTO 载荷采用边界局部特征尺度延拓算法的 EMD 分解结果如图 4 所示。

表 1 3 种端点效应处理算法 EMD 分解性能对比

处理算法	运行时间/s	正交指数	IMF 数量
EMD_U	0.125 3	0.653 0	7
EMD_C	0.062 7	0.011 1	6
EMD_M	0.082 6	0.011 9	7
EMD_F	0.639 7	0.022 8	7

注:EMD_U 表示未进行端点处理的 EMD 分解;EMD_C 表示边界局部特征尺度延拓算法进行端点处理的 EMD 分解;EMD_M 表示镜像对称延拓算法进行端点处理的 EMD 分解;EMD_F 表示多项式拟合延拓算法进行端点处理的 EMD 分解。

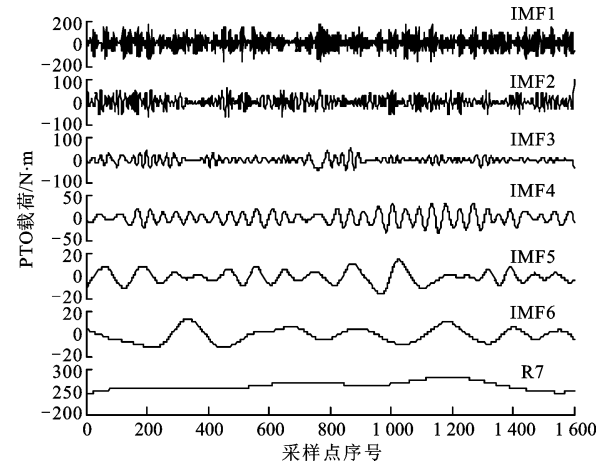


图 4 载荷边界局部特征尺度延拓 EMD 分解分量

图 4 中,PTO 载荷分解得到 6 阶 IMF 分量和一个残余量,与图 2 对比,IMF 分量数减少,IMF3、IMF4 中端点效应明显改善。

2.3 PTO 载荷软阈值降噪

根据 EMD 软阈值降噪算法中步骤(5)~(8)进行 PTO 载荷软阈值降噪。利用式(7)可得前 3 阶 IMF 分量与实测载荷相关系数均小于 0.3,属于微相关,认为是噪声主导分量。利用式(8)可得 IMF1

分量阈值为 115.588,IMF2 分量阈值为 50.450 7, IMF3 分量阈值为 29.696。利用式(9)对前 3 阶 IMF 分量进行软阈值降噪,利用式(10)得到软阈值降噪后的 PTO 载荷如图 5 所示。

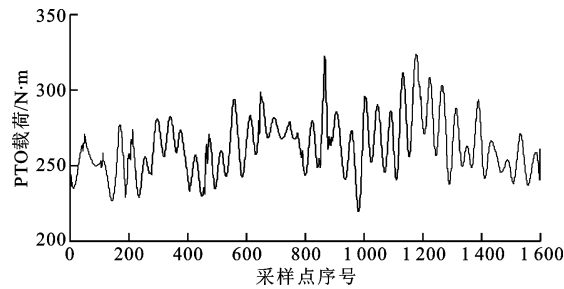


图 5 EMD 软阈值降噪 PTO 载荷

3 EMD 软阈值降噪结果分析

为对比 EMD 软阈值降噪效果,对图 4 中 6 阶 IMF 分量和一个残余量进行单一尺度滤波降噪。根据截止频率不同,构造 6 个 PTO 载荷低通滤波算法(序号为 1~6),6 个 PTO 载荷高通滤波算法(序号为 7~12)及 15 个 PTO 载荷带通滤波算法(序号为 13~27),以均方根误差为评价指标对 27 种尺度滤波降噪算法进行对比分析。图 6 为均方根误差归一化后的对比结果。

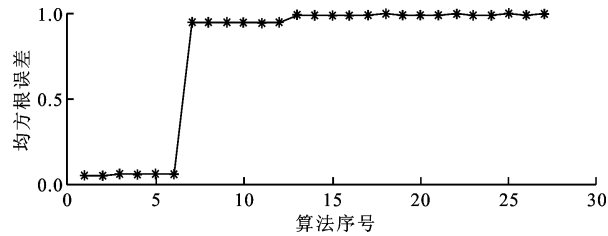


图 6 尺度滤波降噪算法对比

图 6 中,低通滤波算法相比高通、带通滤波算法的归一化均方根误差小,该结果同时验证了 PTO 载荷主要分布在低频 IMF 分量中的判断。文中选取归一化均方根误差最小的低通滤波算法作降噪效果对比。

定义含噪信号与噪声误差比为

$$d_{nSNR} = 10\lg\left(\sum_{i=1}^N S^2(i) / \sum_{i=1}^N (S(i) - \hat{S}(i))^2\right) \tag{12}$$

以 d_{nSNR} 为降噪性能评价指标,对 EMD 低通滤波降噪与 EMD 软阈值降噪效果进行评价。由式(12)得,EMD 低通滤波降噪与 EMD 软阈值降噪的 d_{nSNR} 分别为 13.266 6、12.712 5。EMD 软阈值降噪

的 d_{nSNR} 较小,说明降噪后载荷远离实测载荷,降噪明显。

对 PTO 载荷、低通滤波降噪及软阈值降噪后的 PTO 载荷进行频谱分析,结果如图 7 所示。

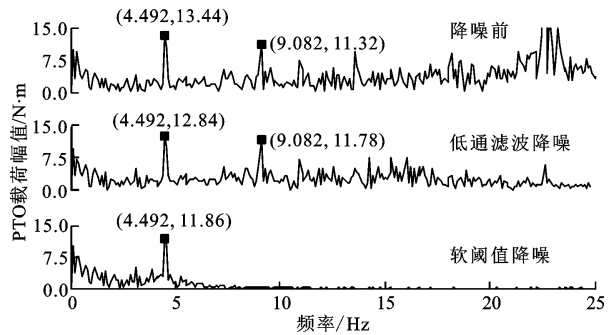


图 7 降噪前后 PTO 载荷频谱图

由图 7 可见,EMD 软阈值降噪后载荷频谱中幅值最大处频率接近 5 Hz,试验中旋耕机刀轴转速为 300 r/min,刀轴旋转频率为 5 Hz,与图中幅值最大处频率相符,因此频率 4.492 Hz 应为 PTO 载荷频率。EMD 低通滤波降噪后 PTO 载荷存在多处幅值较大的高频噪声,同时包含 PTO 载荷,降噪效果较差。EMD 软阈值降噪后高频噪声几乎为 0,以 PTO 载荷为主,降噪效果较好。采用 EMD 软阈值降噪保留了幅值较大的低频信号,该低频信号为旋耕机受到的随机冲击载荷,可对载荷谱编制及 PTO 寿命预测起重要作用。

4 总 结

拖拉机旋耕作业 PTO 载荷混杂多种高频噪声,载荷 EMD 分解时会出现端点效应,采用边界局部特征尺度延拓算法可有效抑制端点效应,与镜像对称延拓算法和多项式拟合延拓算法对比,在算法运行时间、正交指数及 IMF 分量数 3 项性能指标中均占优势。

EMD 软阈值降噪算法通过对 EMD 分解后的噪声主导 IMF 分量进行软阈值降噪,能够细分载荷频率,且降噪过程属于自适应数据驱动,不需要设定截止频率。与 EMD 低通滤波降噪算法相比,EMD 软阈值降噪方法得到的含噪信号与噪声误差比较小,降噪效果明显。

PTO 载荷频率与旋耕机刀轴旋转频率一致,且包含幅值较大的低频载荷,该低频载荷应为旋耕机受到的随机冲击载荷。文中采用的 EMD 软阈值降噪算法及降噪评价指标 d_{nSNR} 对农业机械田间实测载荷的处理具有一定参考作用。

参考文献:

- [1] 许春林, 李连豪, 赵大勇, 等. 悬挂农具作业动力学参数田间实时测试系统 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 83-88.
XU Chunlin, LI Lianhao, ZHAO Dayong, et al. Field real-time testing system for measuring work dynamic parameters of suspension agricultural implement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 83-88.
- [2] 胡振邦, 许睦旬, 姜歌东, 等. 基于小波降噪和短时傅里叶变换的主轴突加不平衡非平稳信号分析 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 20-23.
HU Zhenbang, XU Muxun, JIANG Gedong, et al. Analysis of non-stationary signal of a sudden unbalanced spindle based on wavelet noise reduction and short-time Fourier transformation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(5): 20-23.
- [3] 邱白晶. 旋耕机整机随机振动响应分析 [J]. 农业机械学报, 1996, 27(增刊): 25-29.
QIU Baijing. Random vibration response analysis on the rotary tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(S1): 25-29.
- [4] 曹青梅, 周志立, 张明柱, 等. 拖拉机驱动轮滑转率估算法与验证 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 35-41.
CAO Qingmei, ZHOU Zhili, ZHANG Mingzhu, et al. Algorithm and verification for estimating tractor driving wheel slip rate [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 35-41.
- [5] 王霄, 徐俊, 曹秉刚, 等. 小波降噪卡尔曼滤波锂电池荷电状态估计 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(10): 71-76.
WANG Xiao, XU Jun, CAO Binggang, et al. A Kalman filter SOC estimation method for lithium-ion batteries based on discrete wavelet transform denoising [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(10): 71-76.
- [6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [7] HUANG N E, CHEN X, MEN-TZUNG L O, et al. On Hilbert spectral representation: a true time-frequency representation for nonlinear and non-stationary data [J]. Adv Adaptive Data Anal, 2011, 3(1/2): 63-93.
- [8] CHUN Z, JUNAN Y, YINGKE L, et al. Single channel blind source separation by combining slope ensemble empirical mode decomposition and independent component analysis [J]. Journal of Computational Information Systems, 2012(8): 3117-3126.
- [9] 刘东瀛, 邓艾东, 刘振元, 等. 基于 EMD 与相关系数原理的故障声发射信号降噪研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(19): 71-77.
LIU Dongying, DENG Aidong, LIU Zhenyuan, et al. De-noising method for fault acoustic emission signals based on the EMD and correlation coefficient [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(19): 71-77.
- [10] 周小龙, 姜振海, 马风雷. 基于改进 HHT 能量熵和 SVM 的滚动轴承故障诊断 [J]. 机械传动, 2016, 40(12): 164-168.
ZHOU Xiaolong, JIANG Zhenhai, MA Fenglei. Fault diagnosis of rolling bearing based on improved HHT energy entropy and SVM [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(12): 164-168.
- [11] 张蒙, 朱永利, 张宁, 等. 基于变分模态分解和多尺度排列熵的变压器局部放电信号特征提取 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(6): 31-37.
ZHANG Meng, ZHU Yongli, ZHANG Ning, et al. Feature extraction of transformer partial discharge signals based on variational mode decomposition and multi-scale permutation entropy [J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2016, 43(6): 31-37.
- [12] 刘霞, 黄阳, 黄敬, 等. 基于经验模态分解(EMD)的小波熵阈值地震信号去噪 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 262-269.
LIU Xia, HUANG Yang, HUANG Jing, et al. Wavelet entropy threshold seismic signal denoising based on empirical mode decomposition (EMD) [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(1): 262-269.
- [13] 贾桂锋, 王自唱, 向兴发, 等. 短时经验模态分解实时识别生猪心电 QRS 波群 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 172-177.
JIA Guifeng, WANG Zichang, XIANG Xingfa, et al. Short-time empirical mode decomposition method of real-time QRS complex identifying for electrocardiography of pig [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 172-177.

(下转第 122 页)