

基于小波-VMD 联合降噪的传动系扭振信号分析

陈 龙^{1,2}, 史文库¹, 陈志勇¹, 张贵辉³

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春, 130022)

(2. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原, 030024)

(3. 吉林大华机械制造有限公司 长春, 130103)

摘要 针对试验测得转速、角加速度信号降噪问题, 提出一种小波阈值去噪和变分模态分解 (variational mode decomposition, 简称 VMD) 相结合的联合降噪方法, 用于对角速度、角加速度信号进行处理。首先, 对双质量飞轮减振性能进行整车试验及信号采集, 获得双质量飞轮第 1 质量和第 2 质量角速度、角加速度信号; 其次, 对小波进行参数优选, 提出以信噪比峰值来评价小波参数对其去噪性能的敏感性强弱, 在此基础上优选得到小波参数; 最后, 利用 VMD 分解得到若干模态分量 (intrinsic mode function, 简称 IMF), 通过互相关系数选择主要 IMF 并进行信号重构, 获得最终去噪信号, 并对去噪结果进行分析。结果表明, 所提方法能够有效去除角速度与角加速度信号中的噪声成分, 去噪信号与原信号相关系数分别为 0.998 5, 0.997 5, 0.835 4 和 0.683 6, 同时计算得到双质量飞轮加速工况下角速度和角加速度衰减率都在 80% 以上, 满足设计性能要求。

关键词 小波去噪; 变分模态分解; 联合降噪; 双质量飞轮; 传动系扭振

中图分类号 U461.1

引 言

汽车传动系扭振问题是由于传统内燃机汽车和混合动力汽车中发动机输出转矩或者转速存在波动引起的整个传动系扭转振动问题。角速度、角加速度信号是分析、评价传动系扭振问题的重要基础, 其反应了传动系动态响应特性^[1-2]。为了有效量化评价课题组开发的双质量飞轮对传动系扭转振动的减振性能, 以双质量飞轮第 1、第 2 扭转角速度和角加速度信号波动值的衰减量作为评价指标, 但是测试信号信噪比较低, 无法直接采用。为了解决这一问题, 需要进行信号降噪。

小波变换由于其具有良好的时频性和多分辨率, 被广泛应用于信号降噪处理中, 尤其以 Donoho 提出的经典阈值去噪应用最广^[3-4]。许多学者在此基础上针对小波函数选取^[5]、分解层数选取^[6-7]、阈值计算方法^[8-9]以及阈值函数^[10-12]开展了一系列的改进与优化方法研究。当信号信噪比较低时, 小波阈值选取较大, 此时会将信号部分的小波系数视为噪声, 容易产生误剔除, 从而影响去噪性能。针对这一问题, 提出了基于小波阈值去噪和经验模态分解

(empirical mode decomposition, 简称 EMD) 联合去噪的方法^[13-15], 但是经验模态分解存在着模态混叠、计算量大的缺点。VMD 是一种新型自适应信号处理方法, 对噪声信号有着较好的鲁棒性, 通过迭代搜寻变分模型最优解来确定每个模态的中心频率和带宽, 同时实现信号在频域内剖分及各分量的有效分离, 相比于经验模态分解方法, 其计算效率高, 抗噪性更好, 可在复杂噪声环境中提取关键信息^[16-17], 适合本研究信号处理。

综上所述, 基于降低信号中的噪声对评价指标干扰的目的, 笔者提出一种小波-VMD 联合降噪的去噪方法。

1 车辆传动系扭振信号采集

为了对某型双质量飞轮扭转减振器的性能进行有效评价, 需对其角速度、角加速度波动幅度的衰减率进行计算。角加速度的采集主要有直接法和间接法^[18-20]。直接法采用的传感器是直接测量, 抗干扰能力强, 但存在安装困难、成本高、适应性差等缺点, 尤其对车辆传动系测量难度更大。笔者采用间接

法,通过霍尔传感器采集转速信号,然后进行微分计算,从而得到角加速度。由于转速信号存在噪声干扰,微分计算会将噪声信号放大,导致角加速度信号与实际工程情况不相符并伴随极大失真现象,需对其进行降噪处理。

本研究试验车辆为某型前置前驱轿车,安装双质量飞轮扭转减振器,试验工况为3挡全油门加速工况,试验场地为襄樊试验场,试验仪器包括比利时LMS数据采集前端和霍尔转速传感器。试验传感器布置如图1所示。

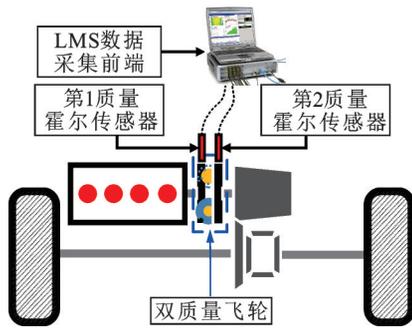


图1 传感器布置图

Fig.1 Sensor layout

由图1可知,第1质量启动齿圈和第2质量信号齿圈处布置霍尔转速传感器,采集第一质量飞轮和第二质量飞轮的角速度,通过微分计算得到角加速度信号。图2为霍尔传感器实际布置图。



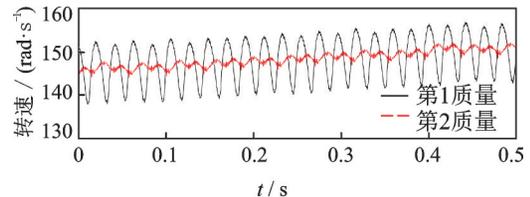
图2 试验实际布置图

Fig.2 Test layout

试验结果如图3所示。由图可知,经转速信号微分计算求得的角加速度存在明显噪声信号干扰,需对其进行降噪处理。

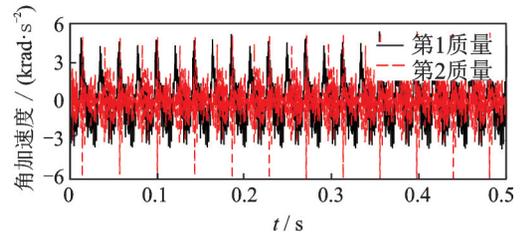
2 小波-VMD联合降噪

小波阈值法对本研究信号去噪效果较差,为提升去噪性能,提出一种小波阈值去噪与VMD分解相结合的联合降噪方法。其降噪原理如下:首先,通过小波阈值去噪对信号进行噪声压制、信号增强;其次,利用VMD对增强信号进行自适应模态分解,得到若干IMF,利用互相关系数提取主要模态分量;



(a) 转速信号

(a) Rotating speed signal



(b) 角加速度信号

(b) Angular accelerate signal

图3 试验信号

Fig.3 Test signal

最后,重构信号得到联合去噪后的角速度、角加速度信号。

2.1 小波阈值去噪原理

通过小波分解后,真实信号和噪声信号的小波系数在不同的分解尺度上有着较大差异。真实信号主要集中在较大的小波系数上,而噪声则分布在较小的系数上。根据这一特性,可通过对小波系数进行阈值处理来实现信号去噪,具体流程见图4。

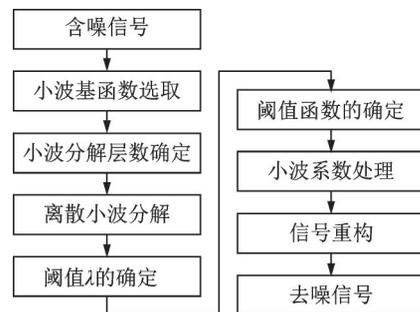


图4 小波去噪原理图

Fig.4 Principle of wavelet de-noising

由图4可知,小波去噪需要分别确定小波基函数、分解层数、阈值 λ 的计算方法以及阈值函数4个关键参数。

2.2 变分模态分解原理

VMD是基于Wiener滤波的自适应信号处理方法^[16],将其每个IMF定义为调幅调频信号,表达式为

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\phi_k(t)) \quad (1)$$

其中: $A_k(t)$ 为IMF的瞬时幅值; $\omega_k(t) = \phi_k'(t)$ 为IMF的瞬时频率。

首先,假设每个IMF是具有中心频率的有限带宽,其中心频率和带宽在分解过程中不断更新,变分问题就是寻求 k 个模态函数 $u_k(t)$,使得所有IMF的估计带宽和最小,和为输入信号。具体实现步骤如图5所示。由图可知,VMD分解去噪需要确定分解层数 K , K 设置的不同,最终处理结果也将不同^[21-22]。

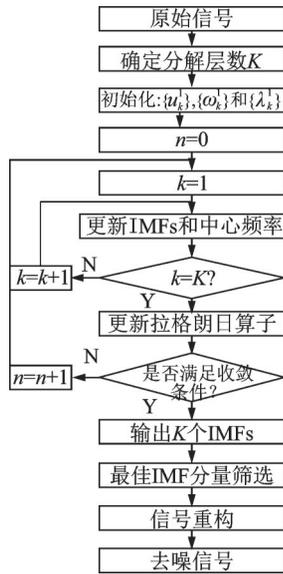


图5 VMD分解流程图

Fig.5 VMD decomposition flow chart

3 小波去噪参数优选

小波去噪参数的选取受信号类型的影响,同一组参数对不同类型的信号进行去噪处理时,可能产生相反的去噪效果。为实现传动系扭振信号有效去噪,笔者通过仿真获得一组理想传动系角加速度曲线,并在此基础上对小波参数进行优选,理想的角加速度曲线如图6所示。

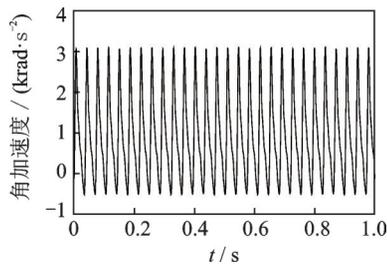


图6 角加速度仿真信号

Fig.6 Angular acceleration simulation signal

笔者使用信噪比(signal noise ratio,简称SNR)评价去噪效果,信噪比越大信号去噪效果越好,其计算公式为

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_0^2(i)}{\sum_{i=1}^N (x_0(i) - \hat{x}_0(i))^2} \right) \quad (2)$$

为了研究小波基函数、分解层数、阈值 λ 的计算

方法以及阈值函数4个关键参数的选取对小波去噪性能影响的重要性,定义信噪比峰峰值 SNR_{pp} 来表征关键参数对小波去噪性能影响的敏感程度,其计算公式为

$$SNR_{pp} = \max(SNR) - \min(SNR) \quad (3)$$

信噪比峰峰值 SNR_{pp} 值越大,表明该变量对小波去噪性能影响越大,越关键。

3.1 小波基函数分析

小波基函数的选取主要根据信号特征和小波基函数数学特征进行确定,笔者主要对db,sym和coif 3种小波基函数进行对比分析。分别对3种小波基函数各取5组,分解层数取6层,阈值函数选硬阈值函数,阈值计算方法采用通用阈值算法,输入信号信噪比为10 dB。计算得到小波去噪后的信噪比如图7所示。

小波函数总体信噪比峰峰值为1.31;3种小波函数各自的信噪比峰峰值为0.59,0.91和1.29。结果表明,小波函数对其去噪性能影响不大,同时db小波的峰峰值较小,说明其去噪性能较为稳定。综合考虑,笔者选取db4作为优选小波基函数。

3.2 分解层数影响分析

分解层数一般根据降噪后的评价指标进行确定,分解层数太少降噪效果不理想;分解层数过多,会导致计算量增加,同时可能会导致信号的信息丢失从而使信噪比下降,因此合理选择分解层数对小波去噪至关重要。笔者分别进行1~10层小波分解去噪,小波基函数采用上面选定的db4,其他参数保持初选方案不变。

由图8可知,随着分解层数的增加,信噪比先增大后减小并趋于平稳;随着信噪比的增加,最优分解层数在减少。最终选取分解层数为4。计算各噪声水平下 SNR_{pp} 值分别为10.81,8.27和5.92,说明小波去噪性能受分解层数影响要比小波基函数大。

3.3 阈值计算方法影响分析

目前主流阈值计算方法有:最小极大方差阈值、stein无偏估计阈值、启发式阈值、通用阈值以及各种新型改进型阈值计算方法^[7-11]。笔者对多种不同阈值计算方法进行对比分析,并将上述方法标以序号1~9。

阈值计算方法的改进主要是基于通用阈值算法,通过引入与小波分解层数相关的自适应系数,从而使阈值大小与分解层数相关,实现阈值随分解层

数自适应调整。分别对比通用阈值计算法和其改进型的阈值变化趋势,结果如图 9 所示。

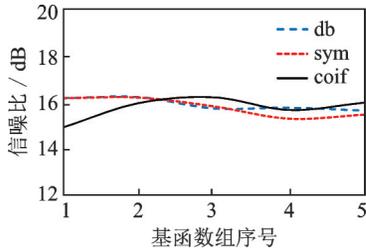


图 7 不同小波基函数去噪性能对比
Fig.7 Comparison of de-noising performance of different wavelet basis functions

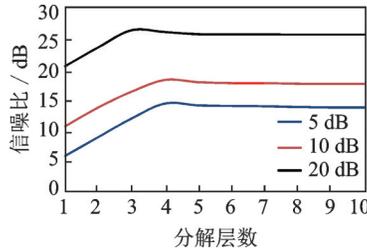


图 8 分解层数对小波去噪性能的影响分析
Fig.8 Analysis of the effect of decomposition layer degree wavelet de-noising performance

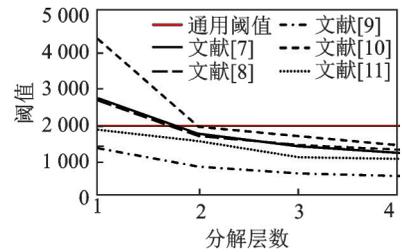


图 9 不同阈值计算方法对比
Fig.9 Comparisons of different threshold calculation methods

由图 9 可知,通用阈值计算法所得阈值为定值,不随分解层数的增加而增大;而实际小波系数会随着分解层数的增加而减小,所以通用阈值会产生“过扼杀”现象^[11]。对上述阈值计算方法的去噪性能进行对比分析,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,含噪信号信噪比大小对小波去噪性能影响不大。对比不同阈值计算方法的去噪性能可知,改进型阈值计算方法都能有效提升小波去噪性能,以改进 1 和改进 2 的效果最明显,笔者选用改进 2。各输入信噪比下峰峰值分别为 6.28, 6.79 和 3.95,其值相对较大,故对去噪性能影响较大。

3.4 阈值函数影响分析

阈值函数体现了对小波系数的处理策略,主要有硬阈值、软阈值及其相应的改进型阈值函数,笔者

选取 5 种最新型的改进阈值函数进行对比分析。各阈值函数的曲线对比如图 11 所示。

分别对阈值计算方法进行对比分析,结果如图 12 所示。由图可知,使用不同的阈值函数去噪后信噪比变化不大,SNR_{pp} 分别为 0.88, 1.25 和 2.70,说明阈值函数的选取对小波去噪性能影响敏感程度没有分解层数的选取和阈值计算方法大,为了计算简单,笔者使用硬阈值函数进行去噪分析。

在传动系扭转仿真信号去噪的基础上,对小波去噪关键参数进行去噪性能影响的敏感性分析,可知分解层数和阈值计算方法对小波去噪性能影响较大,小波函数和阈值函数比较而言较小。综上分析考虑,笔者最终选取的小波去噪参数组合为 db4 小波基函数,分解层数为 4,采用文献[8]阈值计算法,阈值函数采用硬阈值函数。

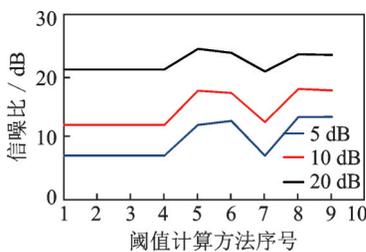


图 10 阈值计算方法对去噪性能影响曲线
Fig.10 Influence curve of threshold calculation method on de-noising performance

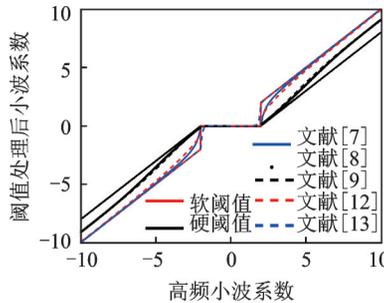


图 11 阈值函数对比曲线
Fig.11 Threshold function contrast curve

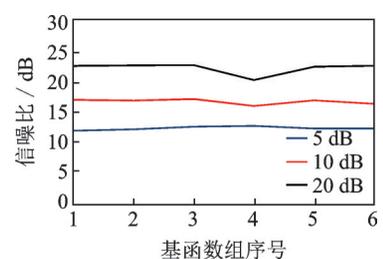


图 12 阈值函数对去噪性能影响分析
Fig.12 Effect of threshold function on denoising performance

4 小波-VMD 联合降噪

在小波阈值去噪的基础上,对信号进行 VMD 分解,根据模态分量互相关系数进行筛选,最后重构得到联合去噪信号。

由于分解层数 K 对 VMD 模态分解和去噪影响较大,为了防止过分解和欠分解现象,笔者分析不同

分解层数对 VMD 的影响,根据不同的 K 值对应的各个模态中心频率来确定分解次数^[22-23]。

由表 1 可知,当 $K=5$ 时中心频率存在欠分解,当 $K=7$ 时高频部分对本研究已无实际意义,综合考虑确定分解层数为 6,其中由于存在趋势项,所以存在 0 Hz 频率。最终分解结果如图 13 所示。

表 1 不同 K 值的 IMF 中心频率

Tab.1 Central frequencies of IMF with different K values

K	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7
3	0	383	792	—	—	—	—
4	0	383	792	1 237	—	—	—
5	0	383	718	1 090	1 561	—	—
6	0	48	383	767	1 090	1 508	—
7	0	48	383	718	1 041	1 308	1 683

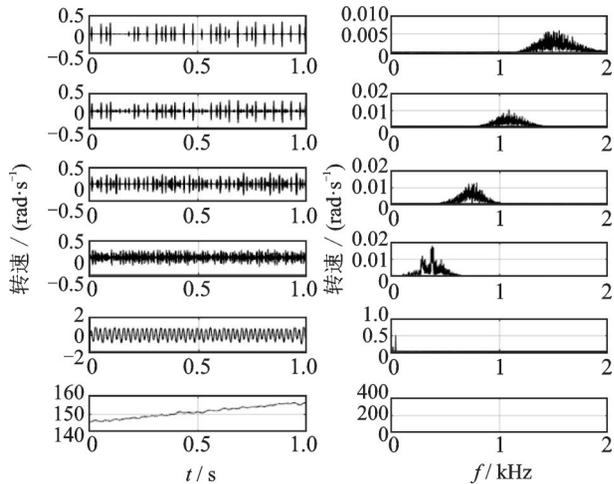


图 13 VMD 模态分量波形及频谱

Fig.13 Waveform and spectrum of VMD modal component

计算各模态分量与原信号互相关系数,结果如表 2 所示。

表 2 相关系数

Tab.1 IMF correlation coefficient

模态分量	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
相关系数	0.986 3	0.185 6	0.004 4	0.001 1	0.000 6	0.000 4

由表 2 可知,IMF₁和 IMF₂相关系数相对较大,IMF₃~IMF₆相关系数最大仅为 0.004 4,取前 2 阶模态分量进行信号重构,最终得到去噪后的信号如图 14、图 15 所示。图 14、图 15 为分别采用小波-VMD 去噪、小波阈值去噪和 VMD 去噪得到的降噪后转速、角加速度信号。由降噪后的时域曲线看,转速信号无明显差异,但是角加速度信号差异非常明显,小波去噪和 VMD 去噪后的角加速度曲线仍然存在着大量噪声,而采用笔者提出的小波-VMD 联合降噪方法得到的去噪角速度、角加速度信号周期性波动明显。以双质量飞轮第 1 质量角加速度曲线为例,其结果与仿真结果相似性较强,去噪结果可靠性较高,因此本研究方法有效。

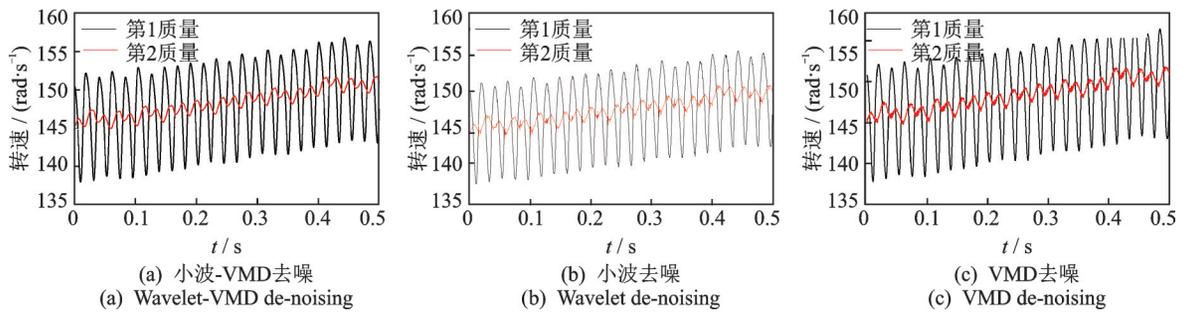


图 14 降噪后转速信号

Fig.14 Denoising speed signal

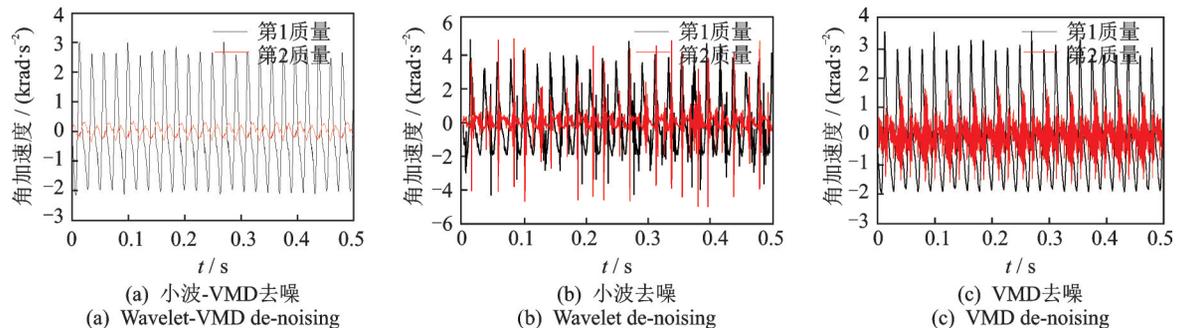


图 15 降噪后角加速度信号

Fig.15 Denoising angular acceleration signal

5 去噪信号分析

计算小波-VMD 去噪前后信号相关系数,结果

如表 3 所示。由表 3 可知,去噪前后角速度相关系数都在 0.99 以上,表明去噪结果可靠;但是角加速度相关系数较低,考虑到角加速度是通过间接法计算

得到,微分计算会放大较多噪声信号,原信号信噪比较低,导致相关系数较低。

表3 去噪前后信号相关系数
Tab.3 Signal correlation coefficient before and after denoising

质量	角速度/(rad·s ⁻¹)	角加速度/(rad·s ⁻²)
第1质量	0.998 5	0.835 4
第2质量	0.997 5	0.683 6

由于双质量飞轮第2质量角加速度去噪后相关系数较低,分析其是否对主要频率成分产生影响,利用频谱对去噪前后信号进行分析,图16为第2质量角加速度频谱图。由图可知,在主要频段范围内,去噪前后基本一致,说明去噪信号可信。

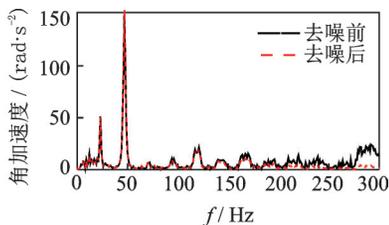


图16 第2质量角加速度频谱图

Fig.16 Second mass angular acceleration spectrum

对双质量飞轮的减振性能进行分析。首先,对角速度信号进行去趋势项处理;其次,分别计算角速度和角加速度波动衰减幅度,结果如表4所示。由表4可知,角速度、角加速度波动量的衰减幅度都在80%以上,说明双质量飞轮减振效果明显。

表4 角速度和角加速度波动均方根值及其衰减幅度
Tab.4 RMS and attenuation amplitude of angular velocity and angular acceleration fluctuation

参数	第1质量	第2质量	衰减幅度/%
角速度/(rad·s ⁻¹)	4.66	0.71	84.8
角加速度/(rad·s ⁻²)	1 485	170	88.5

6 结论

1) 小波-VMD联合降噪法去噪效果优于单独使用小波或者VMD法,试验数据分析结果表明了该方法的有效性。

2) 提出信噪比峰峰值概念,用以评价小波去噪对其参数的敏感性。仿真结果表明,小波分解层数和阈值计算方法对其去噪性能影响较大,小波函数和阈值函数对小波去噪性能影响较小。

3) 去噪后双质量飞轮扭振信号表明,其减振性能优异,振动(角速度、角加速度)衰减幅度在80%以上。

参 考 文 献

- [1] ALBERS A. Advanced development of dual mass flywheel (DMFW) design-noise control for today's automobiles[C]//5th Luk Symposium. Buhl, Germany: Luk Schaeffler Germany, 1994: 5-41.
- [2] 史文库,陈龙,陈志勇,等.分段刚度双质量飞轮非线性振动特性研究[J].汽车工程,2019,41(4):417-425. SHI Wenku, CHEN Long, CHEN Zhiyong, et al. Research on nonlinear vibration characteristics of staged stiffness dual mass flywheel [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(4): 417-425. (in Chinese)
- [3] DONOHO D L. De noising by soft thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 13627.
- [4] DONOHO D L. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of the American Statistical Association, 1995, 90:1200-1224.
- [5] 石凌志,岳建平,刘汉超,等.小波函数在沉降监测中信噪分离效果对比[J].甘肃科学学报,2018,30(6):17-23,68. SHI Lingzhi, YUE Jianping, LIU Hanchao, et al. Comparison of wavelet function in signal-noise separation effect for settlement monitoring[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(6): 17-23, 68. (in Chinese)
- [6] 余本富,王维博,郑永康,等.基于自适应分解层数和阈值的小波去噪算法[J].传感器与微系统,2017,36(12):126-129,133. YU Benfu, WANG Weibo, ZHENG Yongkang, et al. Wavelet de-noising algorithm based on adaptive decomposition number of layers and threshold[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(12): 126-129, 133. (in Chinese)
- [7] CHEN Y, CHENG Y, LIU H. Application of improved wavelet adaptive threshold de-noising algorithm in FBG demodulation[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 132:243-248.
- [8] 范小龙,谢维成,蒋文波,等.一种平稳小波变换改进阈值函数的电能质量扰动信号去噪方法[J].电工技术学报,2016,31(14):219-226. FAN Xiaolong, XIE Weicheng, JIANG Wenbo, et al. An improved threshold function method for power quality disturbance signal de-noising based on stationary wavelet transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 219-226. (in Chinese)
- [9] 王维博,董蕊莹,曾文入,等.基于改进阈值和阈值函数的电能质量小波去噪方法[J].电工技术学报,2019,34(2):409-418. WANG Weibo, DONG Ruiying, ZENG Wenru, et al. A wavelet de-noising method for power quality based on an improved threshold and threshold function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 409-418. (in Chinese)
- [10] 程浩,袁月,王恩德,等.基于小波变换的自适应阈值微震信号去噪研究[J].东北大学学报(自然科学版),

- 2018,39(9):1332-1336.
- CHENG Hao, YUAN Yue, WANG Ende, et al. Study of hierarchical adaptive threshold micro-seismic signal denoising based on wavelet transform[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(9):1332-1336. (in Chinese)
- [11] 刘思议,金涛,刘对.基于改进小波阈值去噪和RCRSV-MP算法的电力系统低频振荡模态辨识[J].电力自动化设备,2017,37(8):166-172.
- LIU Siyi, JIN Tao, LIU Dui. Power system low-frequency oscillation mode identification base on improved wavelet threshold de-noising and RCRSV-MP algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):166-172. (in Chinese)
- [12] 何巍,袁亮,章翔峰.改进小波去噪-Teager算子的齿轮微弱故障提取方法[J].振动、测试与诊断,2018,38(1):155-161.
- HE Wei, YUAN Liang, ZHANG Xiangfeng. Weak fault diagnosis method of gearbox based on improved wavelet denoising-teager energy operator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1):155-161. (in Chinese)
- [13] 蔡剑华,王先春,胡惟文.基于经验模态分解与小波阈值的MT信号去噪方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(2):303-307.
- CAI Jianhua, WANG Xianchun, HU Weiwen. A method for MT data denoising based on empirieal mode decomposition and wavelet threshold[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(2):303-307. (in Chinese)
- [14] 费鸿禄,刘梦,曲广建,等.基于集合经验模态分解-小波阈值方法的爆破振动信号降噪方法[J].爆炸与冲击,2018,38(1):112-118.
- FEI Honglu, LIU Meng, QU Guangjian, et al. A method for blasting vibration signal denoising based on ensemble empirical mode decomposition-wavelet threshold [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1):112-118. (in Chinese)
- [15] 甄龙信,王云龙,邓小艳,等.基于集合经验模态的小波半软阈值降噪[J].探测与控制学报,2018,40(5):55-59.
- ZHEN Longxin, WANG Yunlong, DENG Xiaoyan, et al. Wavelet semi-soft threshold denoising based on ensemble empirical mode decomposition [J]. Journal of Detection & Control, 2018, 40(5):55-59. (in Chinese)
- [16] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):531-544.
- [17] 郑小霞,周国旺,任浩翰,等.基于变分模态分解和排列熵的滚动轴承故障诊断[J].振动与冲击,2017,36(22):22-28.
- ZHENG Xiaoxia, ZHOU Guowang, REN Haohan, et al. A rolling bearing fault diagnosis method based on variational mode decomposition and permutation entropy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(22):22-28. (in Chinese)
- [18] 吴校生,陈文元.角加速度计发展综述[J].中国惯性技术学报,2007(4):458-463.
- WU Xiaosheng, CHEN Wenyuan. Review on angular accelerometer development [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007(4):458-463. (in Chinese)
- [19] OVASKA S J, VALIVIITA S. Angular acceleration measurement: a review [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(5):1211-1217.
- [20] 蔡艳平,李艾华,胡重庆,等.平稳小波自适应去噪用于曲轴瞬时角加速度测量[J].振动、测试与诊断,2010,30(3):310-314.
- CAI Yanping, LI Aihua, HU Chongqing, et al. Measurement of instantaneous angular acceleration of crankshaft using adaptive stationary wavelet denoising [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(3):310-314. (in Chinese)
- [21] 李华,伍星,刘韬,等.基于信息熵优化变分模态分解的滚动轴承故障特征提取[J].振动与冲击,2018,37(23):219-225.
- LI Hua, WU Xing, LIU Tao, et al. Bearing fault feature extraction based on VMD optimized with information entropy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(23):219-225. (in Chinese)
- [22] 唐贵基,王晓龙.参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J].西安交通大学学报,2015,49(5):73-81.
- TANG Guiji, WANG Xiaolong. Parameter optimized variational mode decomposition method with application to incipient fault diagnosis of rolling bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5):73-81. (in Chinese)
- [23] 马增强,柳晓云,张俊甲,等.VMD和ICA联合降噪方法在轴承故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2017,36(13):201-207.
- MA Zengqiang, LIU Xiaoyun, ZHANG Junjia, et al. Application of VMD-ICA combined method in fault diagnosis of rolling bearings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13):201-207. (in Chinese)



第一作者简介:陈龙,男,1990年12月生,博士、讲师。主要研究方向为汽车系统动力学与控制。曾发表《基于改进型峰值搜索法的变速箱振动阶比分析》(《振动、测试与诊断》2020年第40卷第6期)等论文。

E-mail:cl8450@163.com