

DOI:10.11918/201912056

多频波动线谱自适应控制算法及试验

高伟鹏, 贺国, 刘树勇

(海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033)

摘要: 研究了多频波动线谱激励下的主动隔振控制问题, 提出一种改进小波包自适应控制算法. 传统的自适应算法难以同时控制多线谱, 当线谱存在频率波动时, 窄带滤波算法难以取得理想的控制效果. 因此, 将小波包分解算法应用在控制算法中, 对信号进行等间距频带划分, 采取并行控制策略完成多线谱控制. 分析了不同小波基函数对信号分解的影响, 确定最优小波基. 针对虚有线谱和子频带过多导致的控制过盈问题, 改进小波包分解算法, 降低了计算量, 消除子频带中虚有线谱. 为每个子频带设置独立步长, 并根据算舌线函数修正迭代步长. 搭建控制系统开展试验研究, 结果表明, 本文所提改进小波包自适应算法在多频波动线谱激励下能够取得良好的控制效果, 线谱振动能量显著降低.

关键词: 振动控制; 多频波动线谱; dmey 小波基; 小波包分解改进算法; 变步长

中图分类号: O328

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)01-0168-08

Adaptive control algorithm of multi-frequency fluctuating line spectra and experiment

GAO Weipeng, HE Guo, LIU Shuyong

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The active vibration isolation control problem under multi-frequency fluctuant line spectrum excitation was studied, and an improved wavelet packet adaptive control algorithm was proposed. It was difficult for traditional adaptive algorithms to control multi-frequency line spectra at the same time. Narrowband filtering algorithms also could not achieve good effect under fluctuant frequency excitation. Therefore, the wavelet packet decomposition algorithm was introduced to the control algorithm to divide the signal into equally spaced frequency bands. And then, a parallel control strategy was adopted to control multi-frequency line spectrum. The influence of different wavelet basis functions on signal decomposition was analyzed, and the optimal wavelet basis was determined. Aimed at the problems caused by the virtual line spectrum and too many sub-bands, the wavelet packet decomposition algorithm was improved to reduce the calculation amount and eliminate the virtual line spectrum in the sub-band. An independent step size was set for each sub-band, and modified according to the tongue-line function. The control system was build to carry out experiment. The results showed that the improved wavelet packet adaptive algorithm proposed in this paper can achieve good control effect under multi-frequency fluctuant line spectrum excitation, and the vibration energy of line spectrum was significantly reduced.

Keywords: vibration control; multi-frequency fluctuant line spectra; dmey wavelet basis; improved wavelet packet decomposition algorithm; variable-step

舰船旋转机械设备振动向外传播时会产生辐射噪声, 其中包含了大量的低频线谱, 不仅对自身声纳产生干扰, 降低探测能力, 还增强了水声辐射, 降低声隐身性. 各类旋转机械造成的低频线谱频率成分复杂, 且存在频率波动现象, 如何对低频线谱进行控制具有重要的意义^[1]. 自适应控制算法不需要被控对象的精确模型^[2], 其中基于前馈控制的滤波最小均方算法 (filtered - x least mean square,

FxLMS), 作为有限响应滤波器与 LMS 算法的结合使用, 结构简单、易于工程实现, 得到了广泛应用^[3-4].

在实际工程应用中, 前馈 FxLMS 算法存在许多局限性: 1) 多频线谱激励下, 算法仅对其中 1~2 根线谱具备控制效果^[5]; 2) 线谱频率快速波动时, 控制算法易出现相位失真现象^[6]; 3) 收敛性能和稳定性对于迭代步长的要求是相悖的, 大步长导致稳态误差过大, 小步长收敛速度较慢^[7]. 对于上述问题, 大量学者对其控制性能开展了研究. 赵洪亮、Jeon 等^[8-9]使用窄带滤波法并行控制不同频率线谱, 可解决多频线谱控制问题, 但对窄带滤波器的要求较

收稿日期: 2019-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(51579242);

国家自然科学基金青年科学基金(51509253)

作者简介: 高伟鹏(1993—), 男, 博士研究生

通信作者: 刘树勇, lsydh@sina.com

高. 张志谊等^[10]基于频率估计方法构造信号分量实现跟踪滤波, 一旦出现频率失配, 控制效果显著降低. 李彦等^[11]通过可在线调节的相位差补偿器抑制频率波动下最优解的波动, 提高了控制系统鲁棒性. 浦玉学、路翠华等^[12-13]采用变步长算法提高控制前期的收敛速度, 同时减小控制后的稳态误差.

小波包变换可描述信号和频率的局部特征, 在任意的时间和空间域中分析信号^[14-15]. 本文将小波包分解应用到多频波动线谱自适应控制中, 保留了 LMS 算法的优势, 将信号频带进行等间隔划分, 对子频带信号进行并行控制, 有效地改善了控制效果. 确定了最优小波包基的选取原则, 同时针对小波包分解造成的滤波器数量过大、计算复杂和子频带内虚有线谱等问题改进了小波包分解算法; 基于改进的箕舌线函数设计变步长达到较快收敛速度和较小稳态误差. 最后, 搭建隔振试验台架和控制系统, 验

证所提算法的有效性.

1 小波基的选择

输入信号的分解情况会直接影响控制系统的收敛性和稳定性, 由参考信号对控制算法的影响可知, 要求分解后的子频带信号线谱能量集中、信号分解彻底且无明显端点效应. 直接从小波函数性质分析分解信号的特性难以实现, 因此, 根据仿真结果反推小波基函数的影响, 并确定最优小波基. 初始激励信号设置为频率为 28 ~ 31 Hz、35 ~ 38 Hz、58 ~ 61 Hz、108 ~ 111 Hz 的扫频 chirp 信号, 并叠加信噪比为 40 dB 的零均值高斯白噪声. 分解层数为 5, 采样频率为 1 kHz. 分别使用 Haar 小波、db5 小波、sym20 小波、bior3.3 小波和 dmey 小波对初始信号进行小波包分解, 分解后的小波树终端节点、子频带能量分布和某一频带详细线谱信息如图 1~5 所示.

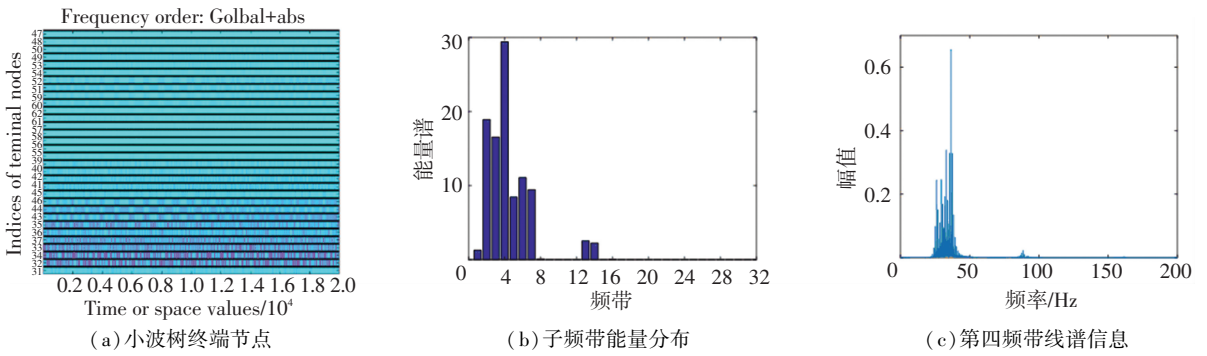


图 1 Haar 小波包基函数分解情况

Fig.1 Decomposition of Haar wavelet packet basis function

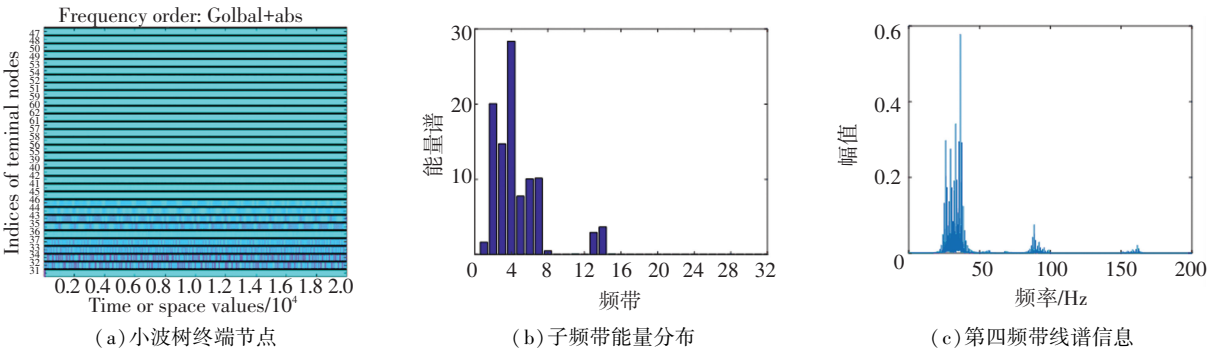


图 2 db5 小波包基函数分解情况

Fig.2 Decomposition of db5 wavelet packet basis function

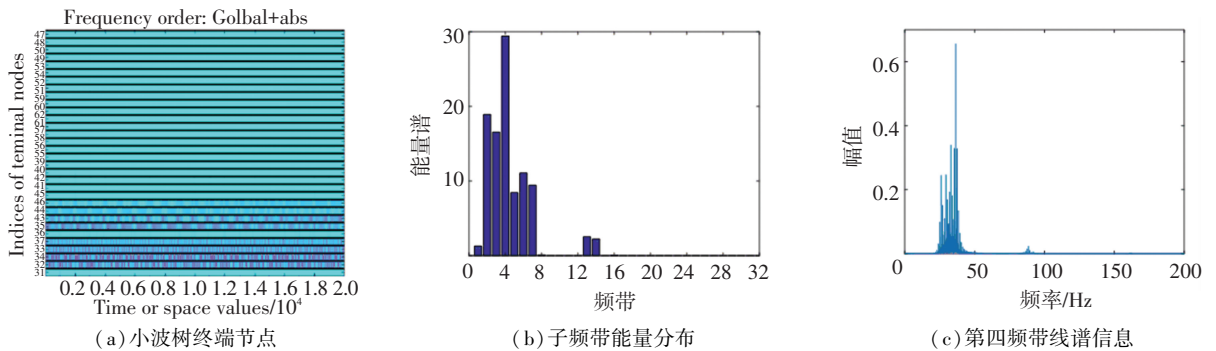


图 3 sym20 小波包基函数分解情况

Fig.3 Decomposition of sym20 wavelet packet basis function

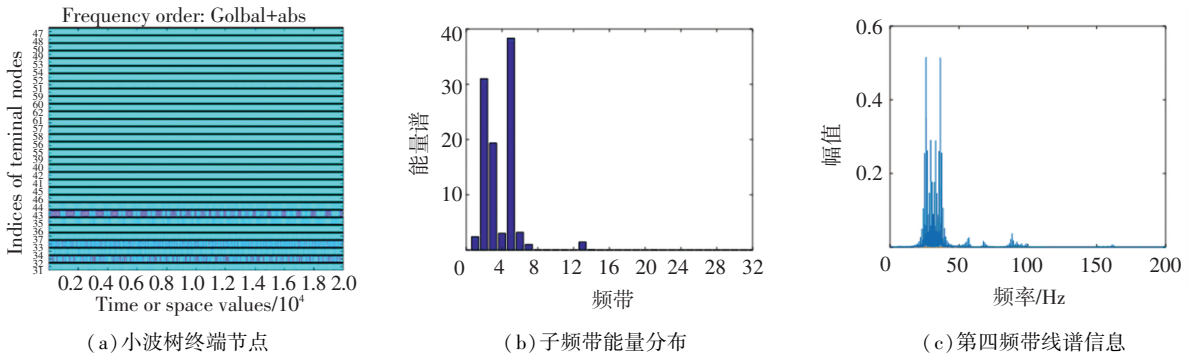


Fig.4 Decomposition of bior3.3 wavelet packet basis function

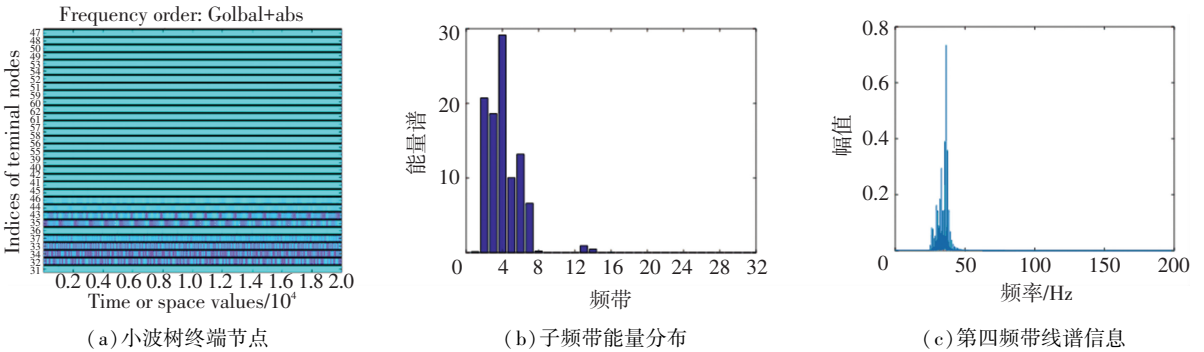


Fig.5 Decomposition of dmey wavelet packet basis function

纵观图 1~5 可知,对参考信号中存在相近频率线谱进行小波包分解时,可得出以下结论:

1) Haar 小波基函数分解后,线谱能量较为分散,在子频带内引起多根虚有线谱的振动,对于后续的自适应算法来说分解是失效的. 2) db5 小波基函数分解后,线谱能量稍集中,但子频带内虚有线谱能量较大,不利于后续各个频带的并行控制策略. 3) sym20 小波基函数分解后,线谱能量集中,子频带内虚有线谱能量较小,可用于后续控制算法实现. 4) bior3.3 小波基函数分解后,线谱能量高度集中,导致某些含有目标线谱的频带能量过小,子频带内虚有线谱能量过大,分解失效. 5) dmey 小波基函数分解后,线谱能量集中且近似均匀分布在含有目标线谱的频带内,子频带内主频能量高,虚有线谱能量很小,分解效果最佳.

综上所述,对于频率波动的复杂参考信号, dmey 小波包基函数的分解效果最佳, sym20 次之,其他小波基近似失效. 根据上文仿真结果,小波包基函数的选择有以下标准: 1) 基函数在时频或频域内具有紧支撑正交性. 2) 小波函数要具有近似对称性或对称性. 3) 小波函数要具备良好的衰减性和快速收敛性. 值得注意的是子频带中的虚有线谱,无论采取何种小波包均无法避免.

2 小波包最小均方算法

2.1 小波包分解改进算法

小波包分解在频域内将频带进行等间隔线性划

分,子频带中大部分不包含需要控制的线谱信息,对所有频带信号进行控制会极大增加滤波器个数和算法复杂度;且主线谱信号在自身频带或相邻频带内的能量映射导致频带内存在虚有线谱,会造成控制后出现其他线谱的振动. 因此,需对小波包分解算法进行改进.

小波包分解过程中,数据量没有发生变化,仅把数据按照不同频带进行了分割. 基于此,针对子频带数量过大的问题,使用能量选择法将子频带信号 $P_1(n), P_2(n) \dots P_J(n)$ ($J = 2^m$) 重新划分为 $Q + 1$ 个频带信号 $r_1(n), r_2(n) \dots r_{Q+1}(n)$, Q 为需要控制的波动线谱个数. 将原始子频带进行能量排序,按照从大到小的顺序取前 Q 个子频带作为划分后的新的第 1 ~ Q 个子频带,剩余子频带信号叠加后作为第 $Q + 1$ 个新子频带. $E_{P_j}(n)$ ($j = 1, \dots, J$) 为原始子频带的能量值, $E_{r_i}(n)$ ($i = 1, \dots, Q + 1$) 为划分后新的子频带的能量值.

假设 $j = k$ 时, $\max\{E_{P_j}(n)\} = E_{P_k}(n)$, 令

$$r_1(n) = P_k(n), \quad (1)$$

取出 $P_k(n)$, 令

$$r_2(n) = P_s(n) \max\{E_{P_{j(j \neq k)}}(n)\} = E_{P_s}(n). \quad (2)$$

以此类推,依次取出 $r_3(n), r_4(n) \dots r_Q(n)$. 将剩余子频带叠加作为 $r_{Q+1}(n)$.

此时,信号分解为 $Q + 1$ 个子频带信号,虚有线谱振动能量较小,可视为噪声,对子频带信号滤波要求只需保留子频带内较大线谱特征即可. 使用阈值

压缩进行滤波, 消除虚有线谱对控制影响. 虚有线谱本质上来说是能量映射或能量泄露造成的, 进行阈值压缩后保留下来的线谱信号 $f_i(n)$ 与 $r_i(n)$ 相比, 能量偏小. 对阈值压缩后的各个子频带信号设置补偿系数 c_i , 补偿系数由滤波前后子频带能量决定, 能量计算时利用去相关性减小干扰噪声的影响.

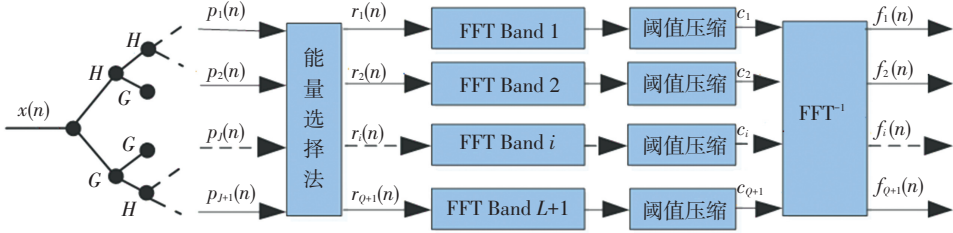


图 6 小波包改进分解算法

Fig.6 Improved wavelet packet decomposition algorithm

2.2 控制算法推导

将小波包改进分解算法 (Improved wavelet packet decomposition, IWPD) 应用到 FxLMS 算法中, 得到改进小波包自适应控制算法 (Improved wavelet packet x-Least mean square, IWPx-LMS). 算法结构如图 7 所示. 参考信号 $x(n)$ 经 IWPD 分解为 $f_i(n) (i = 1, 2, \dots, Q + 1)$ 一系列子频带信号. 带频信号 $f_i(n)$ 与其对应控制器 $W_i(n)$ 卷积即为此频带的控制输出信号 $y_i(n)$, 叠加后即得到全频段控制输出信号 $y_0(n)$, $y_0(n)$ 经次级通道 $S(z)$ 滤波后与经初级通道 $P(z)$ 滤波得到的期望信号叠加形成了误差信号 $e(n)$. $e(n)$ 、变步长 $\mu(n)$ 和次级通道估计模型 $\hat{S}(z)$ 用来完成控制器 $W_i(n)$ 的迭代更新, 这里, 为每个子频带设置独立步长.

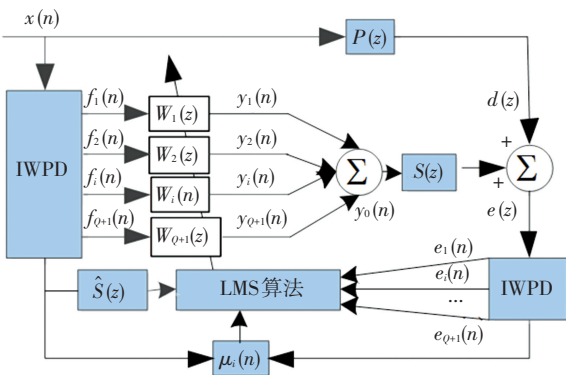


图 7 IWPx-LMS 算法结构图

Fig.7 Algorithm structure diagram of IWPx-LMS

设控制滤波器阶数为 L 时, 辨识估计滤波器阶数为 M , 则 $f_i(n)$ 的输入形式为

$$f_i(n) = [f_i(n), f_i(n-1), \dots, f_i(n-L+1)]^T, \quad (4)$$

第 i 个频带的控制滤波器 $W_i(n)$ 可表示为

$$c_i = K_i \cdot \frac{E_{r_i}(n)}{E_{f_i}(n)} = K_i \cdot \frac{E[r_i(n)r_i(n-1)]}{E[f_i(n)f_i(n-1)]} \quad i = 1, 2, \dots, Q + 1. \quad (3)$$

改进后的分解算法, 不再直接将参考信号 $x(n)$ 经小波包分解后的 $P_1(n), P_2(n) \dots P_j(n)$ 信号用于控制算法, 小波包变换部分具体改进如图 6 所示.

$$W_i(n) = [w_{i,1}, w_{i,2}, \dots, w_{i,L}]^T, \quad (5)$$

则有

$$y_i(n) = f_i^T(n) W_i(n) \quad i = 1, 2, \dots, Q + 1, \quad (6)$$

$$e_i(n) = d_i(n) + S^T(n) y_i(n) =$$

$$d_i(n) + S^T(n) f_i^T(n) W_i(n). \quad (7)$$

根据梯度下降原理, 控制器权系数更新如下:

$$W_i(n+1) = W_i(n) - u_i(n) e_i(n) \hat{f}_i(n) \quad i = 1, 2, \dots, Q + 1, \quad (8)$$

其中, $\mu_i(n)$ 为第 i 个频带的迭代步长, $\hat{P}_i(n)$ 为分解信号经次级通道估计模型滤波得到.

$$\hat{f}_i(n) = \hat{S}(z) f_i(n) = \sum_{j=0}^{M-1} s_j f_i(n-j). \quad (9)$$

分解后的频带信号自相关矩阵特性不同, 其迭代步长 $\mu_i(n)$ 的取值范围也不同. 收敛速度和稳态误差对于 $\mu_i(n)$ 的要求本就是相悖的, 缓解两者间的矛盾则要求控制前期采用较大步长获得较快收敛速度, 后期基本稳定时采用小步长减小稳态误差. 本文基于改进的算舌线函数来设计迭代步长, 将对应频带的参考信号和误差信号引入到迭代步长的更新中, 即

$$u_i(n+1) = \alpha_i u_i(n) + \beta_i \left[1 - \frac{\text{eps}}{f_i^T(n) f_i(n) + \gamma_i E_i(n) + 1} \right]. \quad (10)$$

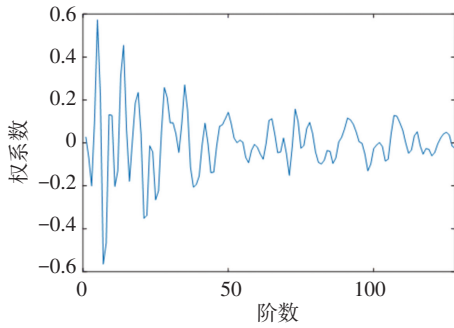
式中: α_i, β_i 为可调参数; eps 为常数, 与分解信号 $P_i(n)$ 输入特性相关; γ_i 为控制残差影响因子, 直接决定了步长的变化速度; 为了减小误差信号中的干扰对迭代步长的影响, $E_i(n)$ 不再是误差信号能量, 而是利用去相关性减小干扰的影响, $E_i(n) = E[e_i(n)e_i(n-1)]$.

式(6)、式(8)~(10)即为各个子频带控制参数更新迭代过程, 并联后即构成 IWPx-LMS 算法.

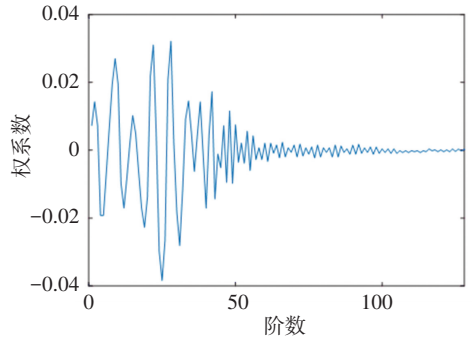
3 数值仿真分析

为评价 IWPx-LMS 算法性能,基于 matlab/simulink 进行仿真分析,分别用前馈 FxLMS 算法和

IWPx-LMS 算法对四波动线谱激励进行主动控制仿真分析.为使仿真结果更加贴近试验,模型中所用初级通道和次级通道均通过实验数据辨识得到,阶数均为 128 阶,具体如图 8 所示.



(a) 初级通道辨识结果



(b) 次级通道辨识结果

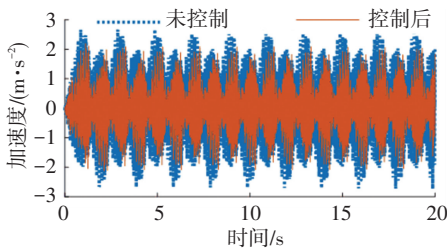
图 8 通道参数辨识

Fig.8 Identification of path parameter

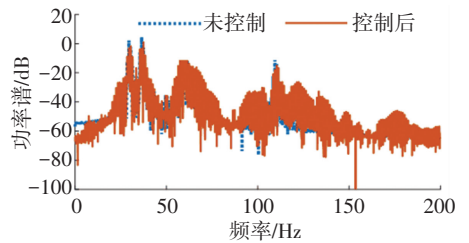
按照通道辨识结果设置初级通道和次级通道,控制滤波器阶数为 128,采样频率 1 kHz,小波包分解层数为 5,小波基“dmey”. FxLMS 算法步长 $5e-5$,控制滤波器个数 1;IWPx-LMS 算法控制滤波器个数为 5. 仿真结果如图 9、图 10 所示.

线谱基本无控制效果,振幅无明显减小,控制后各线谱能量基本无衰减;IWPx-LMS 算法控制后,振幅降幅达 80%,各扫频线谱平均衰减可达 19 dB,控制开启 7 s 后,时频图上的误差信号振动特征不再明显,控制效果良好.

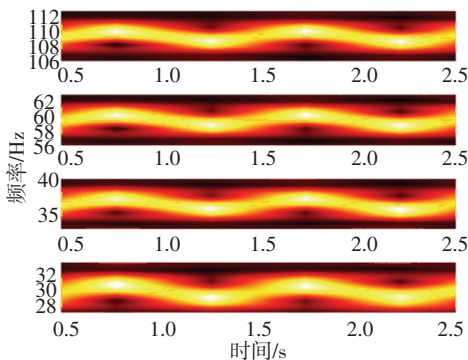
由图 9、图 10 可知:FxLMS 算法对于多频波动



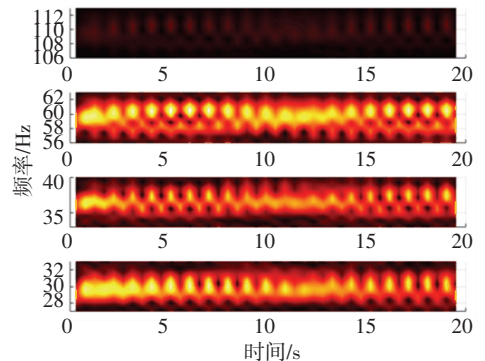
(a) 误差信号时间历程图



(b) 误差信号功率谱



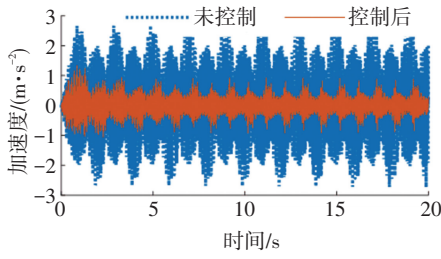
(c) 参考信号局部放大时频图



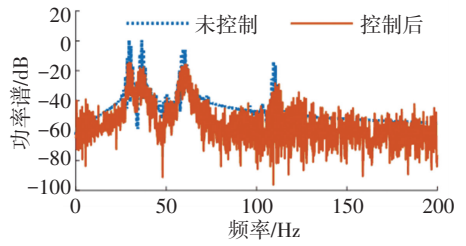
(d) 误差信号时频图

图 9 FxLMS 算法控制效果

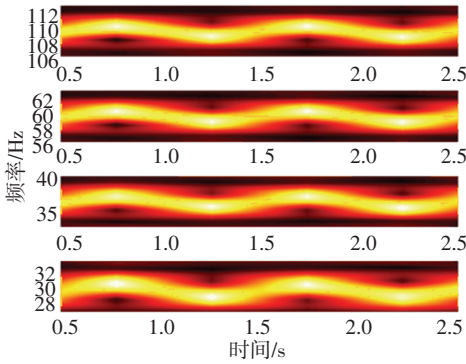
Fig.9 Control effect of FxLMS algorithm



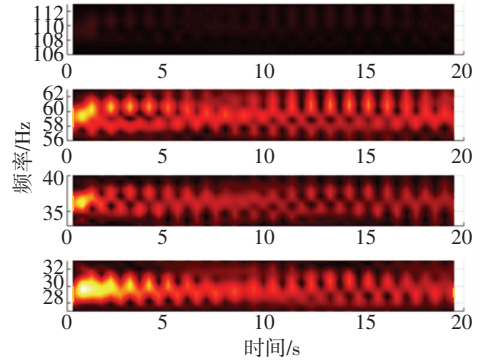
(a) 误差信号时间历程图



(b) 误差信号功率谱



(c) 参考信号局部放大时频图



(d) 误差信号时频图

图 10 IWPx-LMS 算法控制效果

Fig.10 Control effect of IWPx-LMS algorithm

4 试验研究

搭建隔振试验台架, 基于 NI-PXIe 控制系统进行主动控制试验. 试验台架主要包括: 激振器、主被动复合隔振器、加速度传感器、上层板、下层基座和立柱导轨等. 测控系统主要包括: PXIe-8880 控制器、A/D 采集板卡 PXI-4498、D/A 输出板卡 PXI-6733、机箱 PXIe-1062Q、功率放大器 Xenus XTL-230-36、接线盒、电缆等. 激振器上的加速度信号作

为参考信号, 下层基座加速度信号为误差信号, 将其控制前后的功率谱衰减作为振动评价指标. 控制系统工作原理为: 激励信号由控制器发出, 经 D/A 输出至功放, 驱动激振器产生初始振动; 采集参考信号和误差信号经 A/D 输入至控制器, 经算法计算得出控制输出信号, 经 D/A 输出至功放, 驱动主被动一体化作动器产生控制力, 抵消激振器产生的初始振动, 控制完成. 参数设置与仿真参数一致, 连接实物图如图 11 所示.

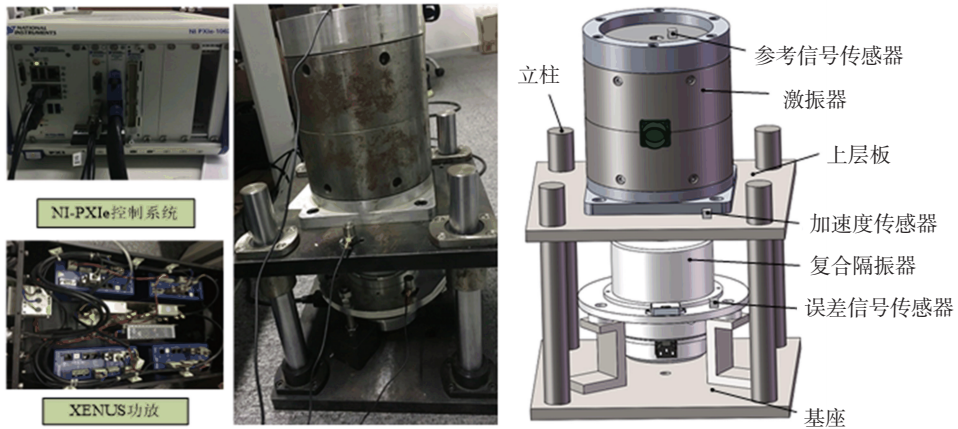


图 11 控制系统实物图和台架示意图

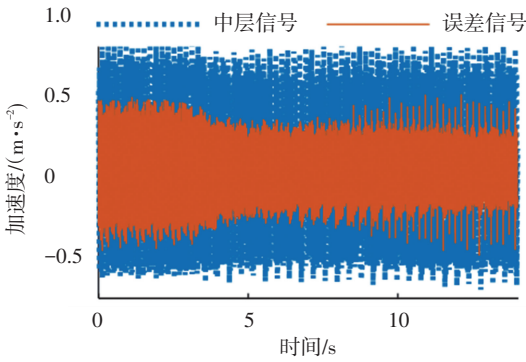
Fig.11 Control system and schematic diagram of bench

图 12 和图 13 分别是 FxLMS 算法和 IWPx-LMS 算法误差信号时间历程和功率谱. 3 s 后施加控制,

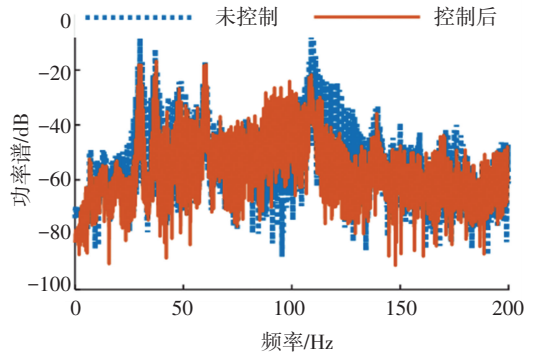
直到待控制点的振动响应得到抑制. 从时间历程图上可知, 被动隔振下误差信号较

之中层加速度信号有所衰减. FxLMS 算法对于波动线谱几乎无控制效果,仅个别线谱稍有衰减. IWPx-LMS 算法控制后,误差信号幅值降幅达 82%, 5 s 内完成收敛,有较快的收敛速度;线谱功率谱衰减明

显,平均可达 22 dB. 试验结果证明,基于“dmey”基函数的改进小波包分解算法,很好地改善了 FxLMS 算法的收敛性能,在多频波动线谱激励下,能够取得良好的控制效果.



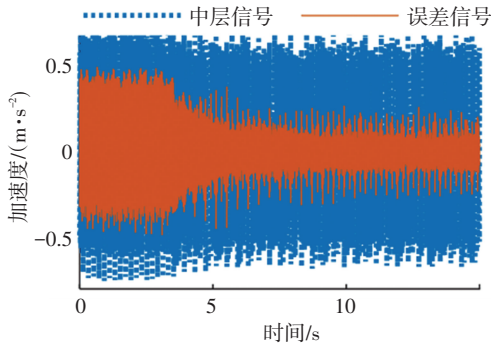
(a) 中层信号和误差信号时间历程图



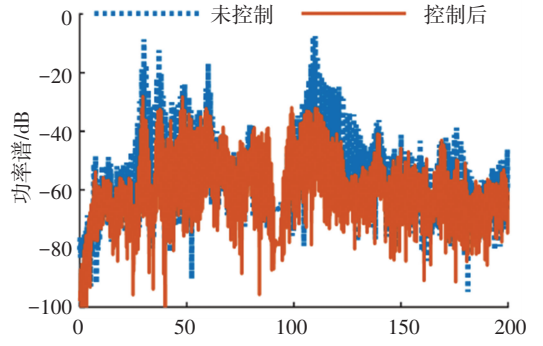
(b) 误差信号功率谱

图 12 FxLMS 算法试验结果

Fig.12 Experimental effect of FxLMS algorithm



(a) 中层信号和误差信号时间历程图



(b) 误差信号功率谱

图 13 IWPx-LMS 算法试验结果

Fig.13 Experimental effect of IWPx-LMS algorithm

5 结 论

多频波动线谱激励下,前馈 FxLMS 算法无法进行多频波动线谱的有效控制,基于此,本文提出了改进小波包自适应控制算法(IWPx-LMS),利用小波包分解将信号进行频带划分,然后采取并行控制的策略,在每个子频带中利用改进算舌线函数设计迭代步长,搭建控制系统和试验台架验证算法的可行性,得出以下结论:

1) “dmey”小波基为 IWPx-LMS 算法最优小波基. 小波包基函数选取原则:基函数在时频或频域内具有紧支撑正交性、近似对称性或对称性、良好的衰减性和快速收敛性.

2) 根据算舌线函数设计变步长,使系统具有较快的收敛速度和较小的稳态误差.

3) 数值仿真和试验结果均表明,IWPx-LMS 算法在多频波动线谱激励下能够取得良好的控制效果,线谱振动能量显著降低,平均降幅可达 22 dB.

参 考 文 献

[1] 朱石坚,何琳. 船舶机械振动控制[M]. 北京:国防工业出版社,2003

[2] FULLER C R, ELLIOTT S J, NELSON P A. Active control of vibration[M]. San Diego: Academic Press,1996

[3] 陈绍青,王永,魏璀璨,等. 一类多频线谱激励下的主动隔振控制方法[J]. 振动与冲击,2012,31(23):128. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.23.018

CHEN Shaoqing, WANG Yong, WEI Cuican, et al. An active vibration isolation control method under excitation of multi-line spectra [J]. Journal of Shock and Vibration, 2012, 31(23): 128. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2012.23.018

[4] SUN H L, ZHANG P Q, GONG X L, et al. A novel kind of active resonator absorber and the simulation on its control effort[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 300(2):117. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.07.040

[5] SNYDER S D. The effect of transfer function estimation errors on the filtered-x LMS algorithm[J]. IEEE Trans Signal Process, 1994, 42(4):950. DOI: 10.1109/78.285659

[6] DALEY S, JOHNSON F A, PEARSON J B, et al. Active vibration control for marine application [J]. Control Engineering Practice,

- 2004(12), 465. DOI: 10.1016/S0967-0661(03)00135-7
- [7] AN Fengyan, SUN Hongling, LI Xiaodong, et al. Optimization of parameters in decentralized adaptive control algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(1): 48. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2013.01.005
- [8] 赵洪亮. 选频有源噪声控制系统控制算法的理论与实验研究[D]. 北京: 中国科学院, 2004
- ZHAO Hongliang. Theoretical and experimental research on control algorithm of active noise control based on frequency-selected filter[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2004
- [9] JEON H J, CHANG T G, YU S, et al. A narrowband active noise control system with frequency corrector[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2011, 19(4): 990. DOI: 10.1109/TASL.2010.2073705
- [10] 张志谊, 王俊芳, 周建鹏, 等. 基于跟踪滤波的自适应振动控制[J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 64. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2009.02.043
- ZHANG Zhiyi, WANG Junfang, ZHOU Jianpeng, et al. A adaptive vibration control with tracking filters[J]. Journal of Shock and Vibration, 2009, 28(2): 64. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2009.02.043
- [11] LI Yan, HE Lin, SHUAI Changgeng. Time-domain filtered-x-Newton narrowband algorithms for active isolation of frequency-fluctuating vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 367: 1. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.12.019
- [12] 浦玉学, 张方, 姜金辉. 变步长自适应结构振动主动控制算法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10): 199. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.10.035
- PU Yuxue, ZHANG Fang, JIANG Jinhui. A varying step adaptive algorithm for structural vibration active control[J]. Journal of Shock and Vibration, 2015, 34(10): 199. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.10.035
- [13] 路翠华, 李国林, 周洪庆, 等. 基于相关特性的改进箕舌线变步长 LMS 算法[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(4): 896. DOI: 10.16337/j.1004-9037.2015.04.0023.
- LU Cuihua, LI Guolin, ZHOU Hongqing, et al. Improved tongue-like curve variable step LMS algorithm based on correlation characteristic[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(4): 896. DOI: 10.16337/j.1004-9037.2015.04.0023.
- [14] 侯新国, 牛超, 杨忠林. 基于最优 Morlet 小波自适应包络解调的弱故障特征提取方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(10): 88. DOI: 10.15938/j.emc.2016.10.012.
- HOU Xingguo, NIU Cao, YANG Zhonglin. Method to extract weak fault feature based on optimal Morlet wavelet adaptive envelope demodulation[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(10): 88. DOI: 10.15938/j.emc.2016.10.012.
- [15] 邢峰. 小波自适应算法在车身振动主动控制中的应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 62. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.009
- XING Feng. Application of adaptive wavelet algorithm in active vibration control for vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20): 62. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.009

(编辑 王小唯)

(上接第 154 页)

- [25] 邓景衡, 文湘华, 李佳喜. 碳纳米管负载纳米三氧化二铁多相类芬顿降解亚甲基蓝[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1436
- DENG Jingheng, WEN Xianghua, LI Jiabin. Degradation of methylene blue by heterogeneous Fenton-like reaction using Fe_3O_4 /carbon nanotube composites[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(6): 1436
- [26] PEREZ-BENITO J F. Iron (III)-hydrogen peroxide reaction: kinetic evidence of a hydroxyl-mediated chain mechanism[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2004, 108(22): 4853
- [27] 王炫, 陈俊涛, 张谦, 等. 蛭石- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}_2$ 非均相 Fenton 催化剂降解水中罗丹明 B 染料[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(7): 1003
- WANG Xuan, CHENG Juntao, ZHANG Qian, et al. Vermiculite- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}_2$ as a heterogeneous Fenton catalyst for degrading rhodamine B dye in wastewater[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(7): 1003
- [28] 于晓丹, 林鑫辰, 冯威, 等. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ @生物碳骨架复合材料的一步法制备及 UV-Fenton 催化性能[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(11): 2500
- YU Xiaodan, LIN Xinchun, FENG Wei, et al. One-step preparation and UV-Fenton properties of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ @bio-carbon composites[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2018, 39(11): 2500
- [29] 孙浩, 吴娟, 马东, 等. 钒酸铁类 Fenton 催化剂的制备及性能研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1734
- SUN Hao, WU Juan, MA Dong, et al. Preparation of iron (III) vanadate Fenton-like catalyst and its catalytic performance[J]. China Environmental Science, 2015, 35(6): 1734
- [30] 焦昭杰, 陈立功, 柳云骥, 等. 硫酸铜类芬顿法去除双酚 A[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1521-1528.
- JIAO Zhaojie, CHEN Ligong, LIU Yunqi, et al. Bisphenol A removal by Fenton-like oxidation with copper sulfate as catalyst[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1521
- [31] ZHANG Wu, JI Yanyan, PENG Han, et al. High efficiency synthesis of FeY type zeolite and its heterogeneous Fenton catalytic degradation[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2018, 39(9): 1985-1992.
- [32] XHOU Zicheng, LI Xu, GUO Linlin, et al. Fenton-like catalytic oxidation of methylene blue by sodium dodecyl sulfate modified NiFe_2O_4 [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(12): 5532
- [33] YAN Yuntao, MAO Yanpeng, DONG Yong, et al. Exothermic laws applicable to the degradation of o-phenylenediamine in wastewater via a $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$ homogeneous quasi-Fenton system[J]. Rsc Advances, 2019, 9(45): 26283
- [34] 冯梅, 陈炜鸣, 潘旭秦, 等. 紫外辐射 H_2O_2 与 PMS 氧化准好氧矿化垃圾床渗滤液尾水[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9): 3744
- FENG Mei, CHEN Weiming, PAN Xuqing, et al. Comparative study on UV- H_2O_2 and UV-PMS process oxidation of semi-aerobic aged refuse bioreactor leachate tail water[J]. China Environmental Science, 2019, 39(9): 3744
- [35] 闫云涛, 张柯, 毛岩鹏, 等. Fe_2O_3 @Sce 多相芬顿催化剂的制备及其降解放热性能[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3375
- YAN Yuntao, ZHANG Ke, MAO Yanpeng, et al. Preparation of Fe_2O_3 @Sce heterogeneous fenton catalyst and its degradation exothermic performance[J]. China Environmental Science, 2020, 40(8): 3375

(编辑 王小唯)