

# 控制与决策

Control and Decision

## 小波包变换自适应振动控制方法

高伟鹏, 贺国, 刘树勇, 杨理华

引用本文:

高伟鹏, 贺国, 刘树勇, 等. 小波包变换自适应振动控制方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 83–89.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0535>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于仿生算法改进粒子滤波的SLAM算法精度预测

Accuracy prediction of SLAM algorithm based on bionic algorithm to improve particle filter

*控制与决策*. 2021, 36(1): 166–172 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0555>

### 改进集成深层自编码器在轴承故障诊断中的应用

Application of improved ensemble deep auto-encoder in bearing fault diagnosis

*控制与决策*. 2021, 36(1): 135–142 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0270>

### 复杂背景下全景视频运动小目标检测算法

Panoramic video motion small target detection algorithm in complex background

*控制与决策*. 2021, 36(1): 249–256 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0686>

### 一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

*控制与决策*. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

### 基于改进萤火虫算法的区域交通信号配时优化

Timing optimization of regional traffic signals based on improved firefly algorithm

*控制与决策*. 2020, 35(12): 2829–2834 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1835>

# 小波包变换自适应振动控制方法

高伟鹏<sup>1</sup>, 贺国<sup>1</sup>, 刘树勇<sup>1†</sup>, 杨理华<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033; 2. 海军潜艇学院 动力操纵系, 山东 青岛 266199)

**摘要:** 针对主动隔振中输入信号频率成分复杂导致收敛慢、控制失效的问题, 提出一种变步长的小波包自适应算法(WPx-LMS). 通过小波包变换将输入信号分解到若干互不重叠的带频上, 并为每个分解信号设计独立的控制滤波器和迭代步长. 对比分析不同小波基对信号的分解结果, 基于误差信号设计变步长算法, 搭建双层隔振控制实验台架. 仿真实验表明, 与传统 LMS 算法相比, 所提出的 WPx-LMS 算法可在输入信号频率成分复杂的双层隔振平台中取得良好的控制效果.

**关键词:** sym 小波基; 变步长; 小波自适应算法; 频率复杂信号; 双层隔振平台

中图分类号: O328

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0535

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 高伟鹏, 贺国, 刘树勇, 等. 小波包变换自适应振动控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 83-89.

## Adaptive vibration control method based on wavelet packet transform

GAO Wei-peng<sup>1</sup>, HE Guo<sup>1</sup>, LIU Shu-yong<sup>1†</sup>, YANG Li-hua<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Power Control Department, Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of slow convergence and control failure due to complex frequency components of input signals in the an active vibration isolation system, a variable-step wavelet packet least mean square algorithm (WPx-LMS) is proposed. At first, the input signal is decomposed into a series of non-overlapping band frequency through wavelet packet transform. And then, an independent control filter and iterative variable-step are designed for each of the decomposition signals. The decomposition results of different wavelet basis are compared to determine the optimal wavelet basis in control system. By using error signals and decomposition signals to design the variable step strategy, the sensors and the controller are used to build the two-layer vibration isolation control test bench. The simulations experiments are carried out to verifily that the WPx-LMS algorithm, for the two-layer vibration isolation platform with complex input signals, can achieve better robustness and control effect than the conventional LMS algorithm.

**Keywords:** sym wavelet basis; variable step; wavelet packet adaptive algorithm; complex frequency components of input signals; two-layer vibration isolation platform

## 0 引言

随着被控对象日益复杂、控制精度不断提高, 自适应策略越来越多地应用到不确定系统控制中<sup>[1]</sup>. 计算机技术的快速发展使各种自适应算法的工程应用成为现实, 其中最小均方(least mean square, LMS)算法应用最为广泛<sup>[2-3]</sup>, 在振动主动控制方面该算法不需要受控对象精确的数学模型, 可根据系统输入和输出响应自适应调节滤波器参数, 通过一级调节装置达到减振效果. LMS 算法结构简单, 易于实现, 对线性系统有较强的逼近能力; 但对输入信号依赖性较强,

仅当输入信号频带窄时, 性能优良. 在船舶机械振动领域, 振源信号成分往往较为复杂, 算法出现收敛慢、不稳定甚至发散的情况, 工程应用大大受限<sup>[4-5]</sup>.

研究表明: 小波变换可将信号分成不同频率成分<sup>[6-10]</sup>. 小波自适应算法保留了 LMS 算法的优势, 同时减少了系统对输入信号的依赖, 提高了算法的收敛性和稳定性. 张玉璘等<sup>[7]</sup>对输入信号采用离散小波变换, 基于此在单频、谐频和随机噪声的干扰下取得了稳定的控制效果, 但计算量稍大. 邢峰<sup>[11]</sup>基于误差通道在线辨识设计小波自适应控制算法, 搭建车身结

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-07-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579242, 51509253); 上海交通大学海洋工程国家重点实验室研究基金项目(1714); 山东省自然科学基金项目(ZR2019QEE031).

责任编辑: 解学军.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: lsydh@sina.com.

构控制试验平台,对大型非线性结构的主动控制取得了良好的控制效果.曾繁玲<sup>[12]</sup>利用小波多分辨率分析的优势,将水轮机导叶信号分解成基础信号和细节信号进行自适应控制,减少了控制误差.然而,小波包在自适应主动控制中的应用仍存在许多问题需要解决,例如:如何在满足控制要求的条件下,通过合理选择小波基和层数来实现低分层复杂度下信号的最优分解以及每个频带最优步长的确定等.

鉴于此,本文提出基于变步长的小波包自适应算法,分析小波基对信号分解的影响,保证分解后信号在满足控制要求的前提下层数最小,降低整个算法运算量,并为每个频段设置独立步长实现最优控制效果.通过搭建双层隔振台架进行自适应控制研究,验证了算法的有效性.

### 1 小波包变换

针对频率成分复杂的输入信号,利用小波包变换将其分解到多个互不重叠的窄带频上<sup>[13]</sup>.与二进制多尺度分析不同,小波包对尺度空间和小波空间都进行分解,克服了高频段分辨率差的缺点<sup>[14-15]</sup>.

假定  $L^2(R) \approx V_0 = U_0^0$  在  $U_0^0$  空间存在正交尺度函数  $\varphi(t)$ ,则存在双尺度方程<sup>[16]</sup>

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} h_k \varphi(2t - k), \quad (1)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} g_k \psi(2t - k), \quad (2)$$

其中  $g_k = (-1)^k h_{N-1-k}^*$ ,  $\psi(t)$  为正交小波函数.

对于  $L^2(R)$  中的一组最佳正交小波基,在  $U_0^0$  空间内可分解为

$$U_0^0 = \bigoplus_{j=1}^J \left( \bigoplus_{i=0}^{2^{k_j}-1} U_{j+k_j}^{k_j+i} \right) \oplus U_J^0. \quad (3)$$

已知连续时间函数  $f(t) \in U_0^0$ ,  $f(t)$  在  $U_0^0$  正交基上的投影系数为

$$S_k^{0,0} = \langle f(t), \varphi(t - k) \rangle = \int_R f(t) \mu_0^*(t - k) dt. \quad (4)$$

同理,  $f(t)$  在各子空间  $U_j^n$  正交基的投影系数为  $\{S_k^{n,j}\}_{k \in \mathbb{Z}}$ , 称作  $f(t)$  的正交小波包变换.与 Mallat 算法相似,正交小波包变换算法也可采用递推算法实现,具体表示为

$$S_l^{2n,(j+1)} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{k-2l}^* S_k^{n,j}, \quad (5)$$

$$S_l^{2n+1,(j+1)} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} G_{k-2l}^* S_k^{n,j}. \quad (6)$$

这里:  $h_k$  和  $g_k$  可看作低通滤波和高通滤波系数,分解后频带的数量取决于小波包分解尺度,  $U_m^n$  表示第  $m$  层上第  $n+1$  个频带,  $n = 0, 1, \dots, 2^m - 1$ . 假设输入

信号采样频率为  $f_s$ , 根据 Nyquist 原理,可检测频带带宽为  $0 - f_s/2$ , 则第  $m$  层上各频带带宽均为  $f_s/2^{m+1}$ .

### 2 WPx-LMS算法

文献[17-19]研究了普通 FxLMS 算法.  $x(n)$  为参考输入信号;  $d(n)$  为期望信号;  $e(n)$  为误差信号;  $y(n)$  为控制输出信号;  $W(z)$  为控制滤波器;  $S(z)$  为次级通道,代表从控制信号  $y(n)$  到误差信号  $e(n)$  整个环节的特性. 算法框图如图1所示.

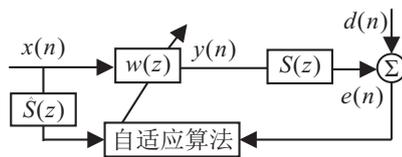


图1 FxLMS算法框图

控制器更新公式为

$$W(n+1) = W(n) + 2\lambda e(n) \hat{x}(n). \quad (7)$$

其中  $\hat{x}(n)$  是由参考信号  $x(n)$  经过次级通道估计矩阵  $\hat{S}(z)$  滤波后得到的. 算法稳定收敛的充要条件为

$$0 < \lambda < \frac{1}{a_{\max}}. \quad (8)$$

$a_{\max}$  为滤波参考信号  $\hat{x}(n)$  自相关矩阵最大特征值. 当输入信号频率成分复杂时,算法可能出现收敛慢,甚至发散的情况. 小波包变换将输入信号分解到互不重叠的频带上,采用不同的控制滤波器进行独立并联控制,对多线谱输入信号有很好的控制效果. 本文在 FxLMS 算法的基础上提出 WPx-LMS 算法,框图如图2所示.

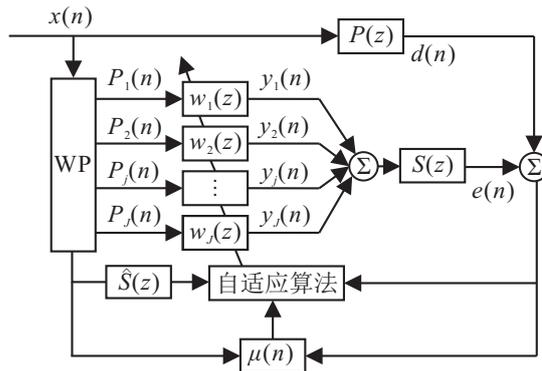


图2 WPx-LMS算法框图

输入信号经过小波包分解为  $P_1(n), P_2(n), \dots, P_J(n)$  等一系列频带不同的信号,  $J = 2^m$ ,  $m$  为小波分解层数. 由图2可见,第  $j$  个滤波器输出信号为

$$y_j(n) = P_j^T(n) W_j(n), \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (9)$$

系统误差信号为

$$e(n) = d(n) - \sum_{j=1}^J S^T(n) y_j(n). \quad (10)$$

将式(9)代入(10),可得

$$e(n) = d(n) - S^T(n) \sum_{j=1}^J(n)W_j(n). \quad (11)$$

由最速下降原理,控制器的更新公式为

$$W_j(n+1) = W_j(n) + \mu_j(-\nabla_j), \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (12)$$

其中:  $\mu_j$  为第  $j$  级控制滤波器的迭代步长,  $-\nabla_j$  为均方误差  $e^2(n)$  对第  $j$  个控制器  $W_j(n)$  的估计梯度. 假设第  $j$  级控制器长度为  $L$ , 则  $W_j(n)$  可表示为  $W_j(n) = [w_{j,1}(n), w_{j,2}(n), \dots, w_{j,L}(n)]$ , 则有

$$\begin{aligned} \nabla_j &= \frac{\partial e^2(n)}{\partial W_j(n)} = \\ &= -2e(n) \left[ \frac{\partial e(n)}{\partial w_{j,1}(n)}, \dots, \frac{\partial e(n)}{\partial w_{j,L}(n)} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

将式(11)代入(13),可得

$$\begin{aligned} \nabla_j &= \frac{\partial e^2(n)}{\partial W_j(n)} = \\ &= -2e(n)S^T(n)[p_{j,1}(n), p_{j,2}(n), \dots, p_{j,L}(n)] = \\ &= -2e(n)S^T(n)P_j(n). \end{aligned} \quad (14)$$

令  $\hat{P}_j(n) = S^T(n)P_j(n)$ , 将式(14)代入(12), 得到控制器更新公式为

$$W_j(n+1) = W_j(n) + 2\mu_j\hat{P}_j(n), \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (15)$$

为得到最优的控制效果, 针对每个频带信号设计变化步长, 控制前期残差较大, 采用较大步长获取较快的收敛速度; 控制后期采用小步长获取较小的稳态误差<sup>[20-21]</sup>. 各频带控制迭代步长为

$$\mu_j(n+1) = \beta\mu_j(n) + \frac{(1-\beta)E(n)}{P_j^T(n)P_j(n) + \text{eps}}. \quad (16)$$

其中:  $E(n)$  为控制残差;  $\text{eps}$  为极小正数, 防止出现分母为零的情况导致控制发散. 但要注意控制过程中脉冲信号造成步长过大, 所以当  $\mu_j(n) > \mu_{j,\max}$  时, 令  $\mu_j(n) = \mu_{j,\max}$ .

WPx-LMS算法如下所示:

$$\begin{cases} W_j(n+1) = W_j(n) + 2\mu_j\hat{P}_j(n), \quad j = 1, 2, \dots, J; \\ \mu_j(n+1) = \beta\mu_j(n) + \frac{(1-\beta)E(n)}{P_j^T(n)P_j(n) + \text{eps}}. \end{cases} \quad (17)$$

其中  $\hat{P}_j(n)$  由小波分解后的信号经过误差通道估计模型滤波后得到.

### 3 振动主动控制仿真分析

#### 3.1 双层隔振平台建模

本文以双层隔振实验平台为研究对象, 对 WPx-LMS 算法进行仿真分析和实验验证. 系统为单通道

控制系统, 包含参考信号传感器、误差信号传感器、电磁作动器和控制器等. 根据实际控制需要, 将初始激励设置为三频线谱信号, 同时叠加信噪比为 40 dB 的高斯白噪声. 隔振平台动力学分析如图 3 所示.

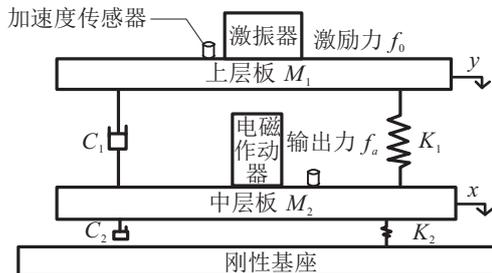


图 3 双层隔振平台动力学分析

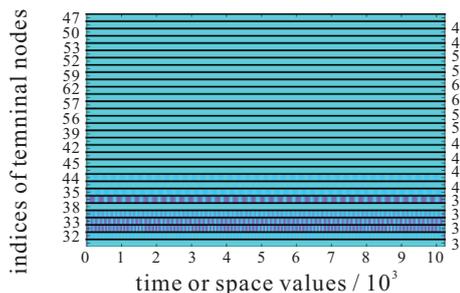
对中层板作受力分析, 得到中层位移  $X$  与作动器输出力  $f_a$  之间的关系<sup>[22]</sup>为

$$\frac{X}{F_a} = \frac{A_1 S^2}{B_1 S^4 + B_2 S^3 + B_3 S^2 + B_4 S + B_5}. \quad (18)$$

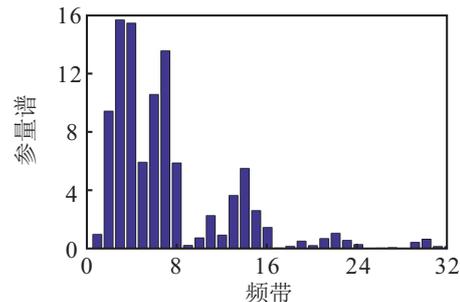
其中:  $A_1 = M_1, B_1 = M_1 M_2, B_2 = M_1 C_1 + M_1 C_2 + M_2 C_1, B_3 = M_1 K_1 + M_1 K_2 + M_2 K_1 + C_1 C_2, B_4 = K_2 C_1 + K_1 C_2, B_5 = K_1 K_2$ ;  $X$  为中层板位移, 二次求导即为加速度信号;  $F_a$  为作动器输出力  $f_a$  的拉氏变换. 因此式(18)可近似作为次级通道传递函数.

#### 3.2 小波包基的选择

输入信号分解情况会直接影响系统控制效果, 对小波基的性质也有一定要求. 工程应用中, 为减少计算量, 只对含有被控频率成分的频带分解信号设置独立控制器, 而将其他分解信号压缩重构后统一设置一个控制器, 故要求分解信号频带能量尽可能集中, 且无明显端点效应. 本文根据小波基性质的不同, 分



(a) Haar小波树终端节点



(b) Haar小波基分解后能量谱

图 4 Haar小波基分解情况

别使用 Haar、db、sym 和 bior 小波基进行分解,分解层数为5,结果如图4~图7所示.原始信号为37 Hz、60 Hz、110 Hz 的正弦信号、叠加信噪比为40 dB 的高斯白噪声.

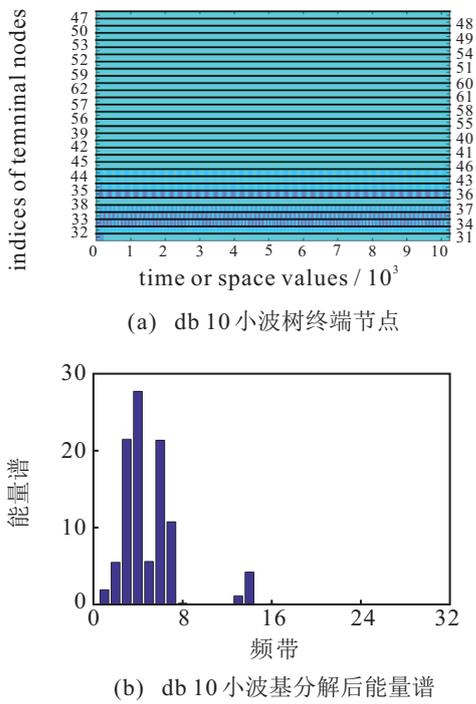


图5 db10小波基分解情况

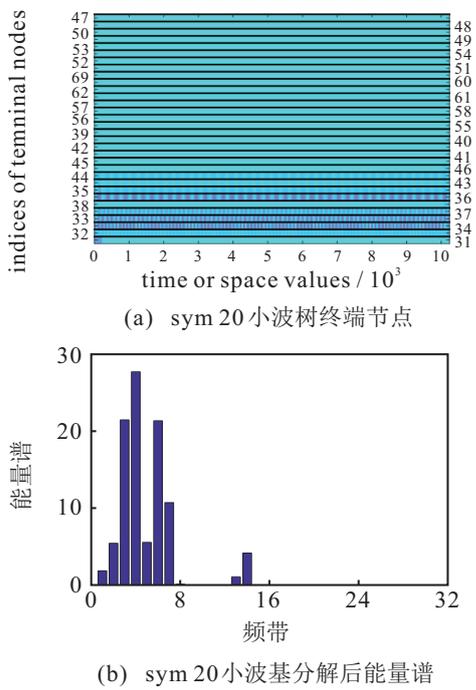


图6 sym 20小波基分解情况

由图4可见, Haar小波基5层分解后,频带能量谱较为发散,频带3、4、7能量谱最高,同时频带2、6相对较高,最大的能量谱不超过16,显然该分解后信号不利于控制.

图5中,信号分解后的能量谱集中在频带2、3、6上,最高可达28,其他频带能量谱较低,显然 db 10 小

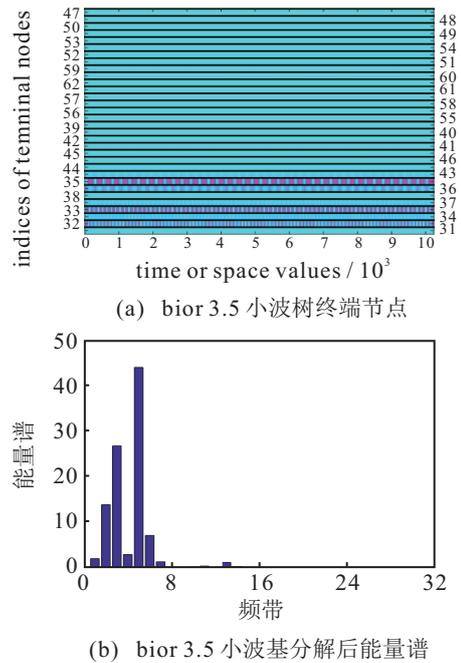


图7 bior 3.5小波基分解情况

波基优于 Haar 小波基.

图6中,信号分解后的能量谱集中在频带2、3、6上,最高可达27,其他频带能量谱较图5能量更低,分解后信号性能优于 db 10 小波分解后信号,更利于控制.

图7中,信号分解后能量谱高度集中在频带3、5上,低频线谱能量太小不利于控制.

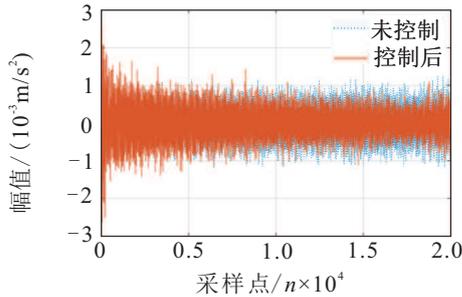
综上所述,当原始信号由37 Hz、60 Hz、110 Hz 的正弦信号叠加信噪比40 dB 的高斯白噪声构成时,sym 20 小波基是其进行小波包分解的最佳小波基.

### 3.3 仿真分析

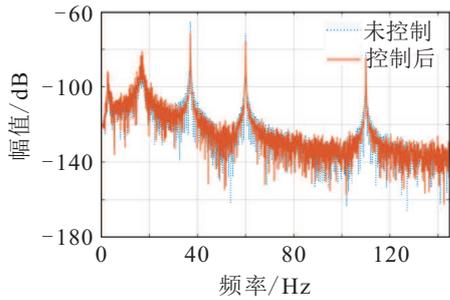
在simulink中搭建控制系统,初始激励信号为频率37 Hz、60 Hz、110 Hz 线谱叠加高斯白噪声而成,采样频率  $f_s$  为1 kHz,控制滤波器长度均为300,小波基采用sym 20,分解层数为5. 分别用 FxLMS 算法和 WPx-LMS 算法进行仿真分析,控制结果如图8和图9所示.

由图8和图9可见,对于由三频线谱叠加高斯白噪声而成的输入信号,FxLMS 算法控制前后误差信号基本不变,线谱振动衰减3~5 dB,效果不明显; WPx-LMS 算法收敛速度快,控制后误差信号明显减小,线谱振动衰减可达25 dB(37 Hz)、22 dB(60 Hz)、20.5 dB(110 Hz),控制效果良好. 单从频谱图上看, FxLMS 算法控制后在17 Hz 处激起了线谱振动; 而 WPx-LMS 算法控制后在17 Hz 处线谱振动有所减小,且频谱光滑度优于前者,表明参考信号经过小波包变换后,不仅可以实现频率解耦,对于干扰信号也有较

强的抑制效果.

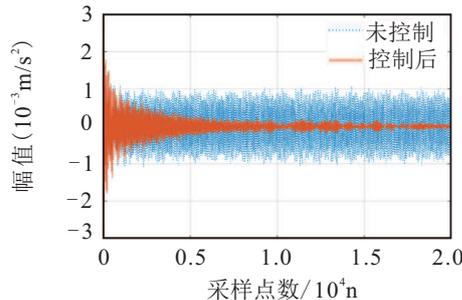


(a) FxLMS算法时域误差信号

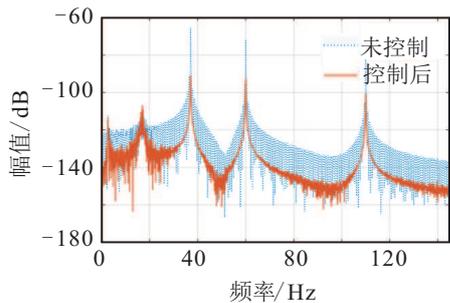


(b) FxLMS算法误差信号频谱

图8 FxLMS算法误差仿真控制效果



(a) WPx-LMS算法时域误差信号



(b) WPx-LMS算法误差信号频谱

图9 WPx-LMS算法误差仿真控制效果

## 4 振动主动控制实验研究

### 4.1 实验装置

本文搭建双层隔振实验系统验证 FxLMS 和 WPx-LMS 算法的控制效果,系统主要由隔振台架、信号发生器、作动器、激振器、dSPACE控制系统、PCB 加速度传感器、功率放大器(驱动激振器和作动器各一套)、直流稳压稳流电源、信号调理器等构成. 双层隔振台架及作动器如图 10 所示. 实验仪器具体情况如表 1 所示.



图 10 实验台架及作动器

表 1 实验设备

设备名称	型号/性能参数	厂商
dSPACE控制系统	DS1005、DS1004	德国 dSPACE 公司
信号发生器	EM1643V	上海倍源工贸公司
激振器	JZK-40	江苏联能
功率放大器(激振器)	LA-200	江苏联能
直流稳压稳流电源	WYK-20040K	鑫诺尔公司
功率放大器(作动器)	Junus JSP-180-30	Copley
加速度传感器	RYTRAN 3055	PCB
信号调理器	XK 343L-8	鑫华科技公司
dSPACE控制系统	DS1005、DS1004	德国 dSPACE 公司
作动器	HG-400	自主研发

实验过程中,信号发生器发出初始激励信号至功放驱动激振器,上层和上层 PCB 加速度传感器采集输入信号和误差信号,经 A/D 转化,输入至 dSPACE 控制器,由控制算法进行运算,输出控制信号经 D/A 转化至功率放大器,驱动作动器产生控制力,实现振动抑制.

### 4.2 误差通道辨识

为得到控制系统中较为精确的误差通道估计模型,采用横向 FIR 滤波器作为辨识模型,通过更新滤波器抽头系数来逼近实际传递函数,辨识滤波器阶数设为 128 阶. 辨识过程和结果如图 11 所示.

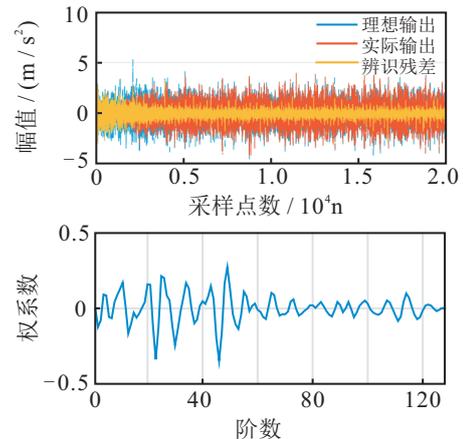


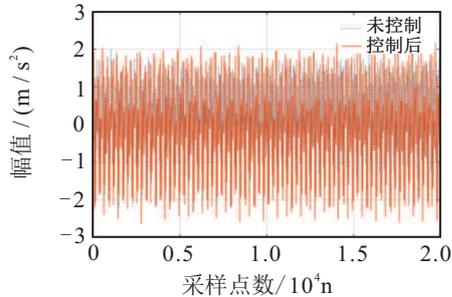
图 11 误差通道辨识结果

采用 20~300 Hz 的白噪声激励次级通道,采样频率为 1 kHz. 同时采集白噪声和误差信号分别作为辨识滤波器的输入信号和理想输出信号,完成次级通道离线辨识. 图 11 上图为辨识滤波器参数迭代过程,辨识残差满足精度要求,图 11 下图即为迭代完成后

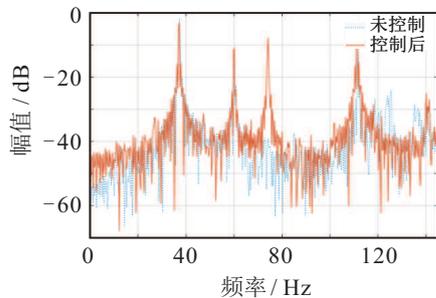
最终的抽头系数。

### 4.3 主动控制实验结果

将误差通道辨识放入控制模型中,分别用 FxLMS 算法和 WPx-LMS 算法进行控制实验,小波基采用 sym 20,分解层数为5,控制结果如图12和图13所示。

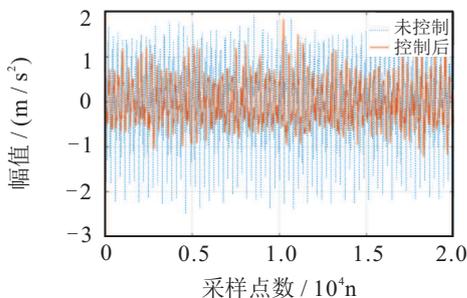


(a) FxLMS算法时域误差信号

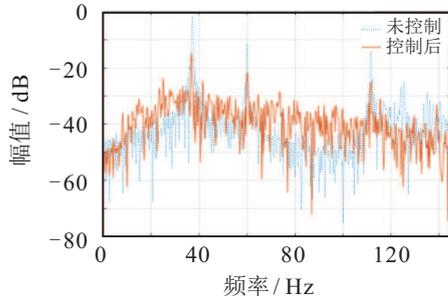


(b) FxLMS 算法误差信号频谱

图12 FxLMS算法误差实验控制效果



(a) WPx-LMS算法时域误差信号



(b) WPx-LMS 算法误差信号频谱

图13 WPx-LMS算法误差实验控制效果

由图12和图13可见,对于三频线谱输入信号, FxLMS 算法控制后误差信号变大,110 Hz 线谱振动加剧,由于该算法对频率耦合的输入信号不具备解耦能力,在74 Hz 倍频处出现明显的线谱振动,控制

失效; WPx-LMS 算法控制后误差信号明显减小,线谱振动衰减可达15 dB(37 Hz)、12 dB(60 Hz)和12 dB(110 Hz),且无明显的倍频线谱振动,控制效果良好。

## 5 结论

本文针对控制系统中频率成分复杂引起的收敛速度慢、控制失效等问题,提出一种 WPx-LMS 算法,将信号通过小波变换分解到互不重叠的带频上,分析小波基对信号分解的影响。为每个频带信号设计独立变步长和控制器,并搭建双层隔振控制系统验证算法的有效性,得出以下结论:

1) 当原始信号由37 Hz、60 Hz、110 Hz的正弦信号叠加信噪比40 dB的高斯白噪声构成时,sym 20小波基是其进行小波包分解的最佳小波基。

2) 对于频率成分复杂的输入信号, WPx-LMS 比 FxLMS 算法稳定性强,收敛速度快,对干扰信号有很强的抑制效果,能够极大地提高系统性能。

3) 用 WPx-LMS 算法设计的双层隔振控制系统,可在三频和随机噪声的干扰下取得稳定的控制效果,线谱振动衰减明显,且无明显的倍频振动。

## 参考文献(References)

- [1] Wen N, Yang S Z, Zhu C J. Adaptive contourlet-wavelet iterative shrinkage/thresholding for remote sensing image restoration[J]. Journal of Zhejiang University SCIENES C, 2014, 15(8): 664-674.
- [2] Sun H L, Zhang P, 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(1): 117-125.
- [3] 陈克安. 有源噪声控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 32-36.  
(Chen K A. Active noise control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 32-36.)
- [4] 浦玉学. 自适应振动噪声主动控制若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学研究生院航空宇航学院, 2015.  
(Pu Y X. Research on several key problems of adaptive vibration noise active control[D]. Nanjing: The Graduate School College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.)
- [5] Li Y, He L, Shuai C G. Time-domain filtered-x-Newton narrowband algorithms for active isolation of frequency-fluctuating vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 367: 1-21.
- [6] 郑军. 小波理论在系统建模与控制中的若干应用研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2005.  
(Zheng J. Issues on the applications of wavelets theory in

- system modeling and control[D]. Hangzhou: College of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2005.)
- [7] 张玉璘, 陈伟民, 杨建春, 等. 小波变换自适应滤波器及在主动噪声控制中的应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 107-110.  
(Zhang Y L, Chen W M, Yang J C, et al. Wavelet transformation adaptive filter and its application in active noise control[J]. Control and Decision, 2002, 17(1): 107-110.)
- [8] 张晓宇, 陈文卓. 带扰动离散非线性系统的小波自适应滑模控制[J]. 自动化仪表, 2015, 36(5): 1-6.  
(Zhang X Y, Chen W Z. Wavelet adaptive sliding mode control for discrete nonlinear systems with disturbances[J]. Process Automation Instrumentation, 2015, 36(5): 1-6.)
- [9] 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): 88-93.  
(Hou X G, Niu C, Yang Z L. Method to extract weak fault feature based on optimal Morlet wavelet adaptive envelope demodulation[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(10): 88-93.)
- [10] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1988, 41(7): 909-996.
- [11] 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): 62-67.  
(Xing F. Application of adaptive wavelet algorithm in active vibration control for vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 62-67.)
- [12] 曾繁玲. 基于小波分析水轮机导叶开度的自适应控制研究[J]. 大电机技术, 2012, 3: 45-48.  
(Zeng F L. Adaptive controlling study on the opening degree of the guide vane of hydroturbine generator based on wavelet analysis[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2012, 3: 45-48.)
- [13] Garcia P E, Núñez P J. Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 902-919.
- [14] Timothy P, Idris A E, Hernando C O. Dynamic classification using multivariate locally stationary wavelet processes[J]. Signal Processing, 2018, 152: 118-129.
- [15] 田岚, 侯正信, 孙晋松. 一种时间自适应阈值的小波包改进语音增强算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(6): 849-853.  
(Tian L, Hou Z X, Sun J S. Improved speech enhancement algorithm based on time-adaptive threshold wavelet packet transform[J]. Control and Decision, 2009, 24(6): 849-853.)
- [16] 魏明果. 实用小波分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 66-70.  
(Wei M G. Practical wavelet analysis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 66-70.)
- [17] Snyder S D, Hansen C H. The effect of transfer function estimation errors on the filtered-x LMS algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(4): 950-953.
- [18] 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): 128-131.  
(Chen S Q, Wang Y, Wei C C, et al. An active vibration isolation control method under excitation of multi-line spectra[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(23): 128-131.)
- [19] 李宁. LMS自适应滤波算法的收敛性能研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2009.  
(Li N. Convergence performance analysis and applications of the adaptive least mean square algorithm[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2009.)
- [20] Yang L H, Liu S Y, Zhang H P, et al. Hybrid filtered-x adaptive vibration control with internal feedback and online identification[J]. Shock and Vibration, 2018(2): 1-15.
- [21] Das D P, Moreau D J, Cazzolato B. A computationally efficient frequency-domain filtered-X LMS algorithm for virtual microphone[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 37(1/2): 440-454.
- [22] Chand S C. Performance analysis and design of FXLMS algorithm in broadband ANC system with online secondary-path modeling[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2012, 20(3): 982-993.

## 作者简介

高伟鹏(1992—), 男, 博士生, 从事舰船减振降噪的研究, E-mail: whgaowp@163.com;

贺国(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事舰船自动化仿真系统等研究, E-mail: heguo953760@163.com;

刘树勇(1975—), 男, 副教授, 从事舰船减振降噪等研究, E-mail: lsydh@sina.com;

杨理华(1985—), 男, 博士, 讲师, 从事机械振动主动控制等研究, E-mail: dreamfly4@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)