

# 基于权重优化 AF 的非线性主动噪声控制算法

赵男男<sup>1</sup>, 金 凤<sup>2</sup>, 丁宏钰<sup>3</sup>

(1. 广东海洋大学 计算机科学与工程学院, 广东 阳江 529500; 2. 国防科技大学试验训练基地, 西安 710106;  
3. 广东海洋大学 机械与能源工程学院, 广东 阳江 529500)

**摘要:**非线性噪声普遍具有不确定性高、频谱特性难以精确描述、稳态误差较大以及瞬态性能差等特点, 如何对非线性噪声进行有效控制是一个具有挑战性的任务, 为此本文提出基于权重优化 AF 的非线性主动噪声控制算法。该算法采用基准信号的正余弦分量进行直接频率分析, 分析一次噪声和窄带频率范围, 得到准确的噪声估计结果, 提高了噪声控制的精度和效果。通过对非线性主动噪声估计结果进行训练, 调整自适应滤波器的权重, 实现对期望输出信号的重构, 从而有效抑制了非线性噪声的影响, 提高了控制效果。实验结果表明: 该算法下信号噪声的均方误差较低、稳态误差小, 能够适应各种复杂的噪声环境, 有效改善了噪声控制的质量, 具有较高的实用性和可靠性。

**关键词:**权重优化; 自适应滤波器; 窄带噪声; 噪声估计; 非线性主动噪声

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)05-1722-06

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240294

## Nonlinear active noise control algorithm based on weighted optimization AF

ZHAO Nan-nan<sup>1</sup>, JIN Feng<sup>2</sup>, DING Hong-yu<sup>3</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529500, China; 2. Test Training Base National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China; 3. School of Mechanical and Energy Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529500, China)

**Abstract:** Nonlinear noise generally has high uncertainty, difficult to accurately describe spectral characteristics, large steady-state errors, and poor transient performance. Effective control of nonlinear noise is a challenging task. Therefore, a nonlinear active noise control algorithm based on weight optimization AF is proposed. This algorithm uses the sine and cosine components of the reference signal for direct frequency analysis, analyzes the primary noise and narrowband frequency range, obtains accurate noise estimation results, and improves the accuracy and effectiveness of noise control. By training the results of nonlinear active noise estimation and adjusting the weights of the adaptive filter, the reconstruction of the expected output signal is achieved, effectively suppressing the influence of nonlinear

收稿日期: 2024-03-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375048).

作者简介: 赵男男(1982-), 女, 副教授, 硕士. 研究方向: 计算机应用. E-mail: znn@gdou.edu.cn

noise and improving the control effect. The experimental results show that under this algorithm, the mean square error of signal noise is low and the steady-state error is small, which can adapt to various complex noise environments and effectively improve the quality of noise control, it has high practicality and reliability.

**Key words:** weight optimization; adaptive filter; narrowband noise; noise estimation; nonlinear active noise

## 0 引言

传统噪声控制算法往往只能处理线性噪声,而现实生活中的噪声通常是非线性的,如机械设备的噪声、自然环境中的噪声等<sup>[1,2]</sup>。非线性噪声对人类的健康和和生活质量造成严重影响,因此开展非线性主动噪声控制算法的研究具有重要意义。非线性主动噪声控制算法可应用于各种领域,如音频信号处理、声呐系统、无线通信等,为减少噪声干扰、提升信号质量和人机交互体验做出重要贡献<sup>[3,4]</sup>。

当前主动噪声控制方法的研究呈现出多样化和不断进步的趋势,吕收等<sup>[5]</sup>将标准化算法和G-SVSLMS方法相结合,提出了改进变步长算法的主动噪声控制算法,实现噪声信号控制。但该方法既能快速收敛,又能较好地适应基准信号的时变特性,但是在面向不同信号时,其稳态误差较大,不能取得较好的控制效果。卢焯华等<sup>[6]</sup>通过构建延时点数级通路模型,用索引延时点数运算代替卷积运算,用二级自适应陷波滤波器消除不相关频率成分的通带干扰,完成噪声控制。但该方法忽视了对输入信号进行自适应调节,噪声控制性能不佳,导致输出信号质量不高。Lu等<sup>[7]</sup>提出了基于共轭梯度的噪声控制方法,该方法通过第一类贝塞尔函数约束第二类贝塞尔函数算法的异常值,降低计算复杂度,实现噪声控制。但该方法没有对误差信号的权重进行更新,导致信号误差较大,影响噪声控制效果。王智豪等<sup>[8]</sup>分析车内噪声特性,根据分析结果采用FxLMAD算法进行噪声主动控制。但该算法具有实施步骤简单、计算量小的优点,但是该方法在噪声估计方面存在一定的不足,实用性还需进一步提升。

针对上述文献方法存在的不足,本文提出了一种基于权重优化AF的非线性主动噪声控制算法。该方法的主要研究内容如下:①该算法利用非线性主动噪声估计结果来训练自适应滤波器,

并调整滤波器的权重。通过比较期望输出信号和实际输出信号之间的差异,能够优化滤波器的性能并实现非线性主动噪声控制;②该算法能适应各种复杂的噪声环境,并通过训练自适应滤波器来实现噪声的控制。

## 1 复杂度窄带非线性主动噪声估计

由于实际环境中的噪声通常具有非线性特性,传统线性方法无法充分捕捉和模拟非线性噪声。因此,在非线性主动噪声控制中,对非线性主动噪声进行估计可以提供关键信息。基于噪声估计,可以更好地设计和优化非线性主动噪声控制算法,实现对非线性噪声的准确抑制,提高噪声控制效果。

假定基准信号表达式为:

$$x(n) = \sum_{i=1}^q [a_{x,i} \cos(\omega_i n) + b_{x,i} \sin(\omega_i n)] \quad (1)$$

式中: $b_{x,i}$ 和 $a_{x,i}$ 为基准信号正余弦分量<sup>[9]</sup>的直接频率; $\omega$ 为窄带频率; $q$ 为基准信号窄带频率系数; $n$ 为是噪声时变系数。

通常情况下,非线性声学通道可以通过Volterra模型进行系统近似表达,一次噪声 $d(n)$ 和基准信号之间的关系为:

$$d(n) = \sum_{i=1}^T h_i(x(n) + v_p(n)) \quad (2)$$

式中: $T$ 为非线性声通道的阶数<sup>[10]</sup>; $h_i$ 为噪声的功率谱密度; $v_p(n)$ 为附加噪声。

当 $T=1$ 时,一次路径是线性的,在 $T>1$ 时,一次路径是非线性的。需要重点关注的是,在线性一次声通道中,一次噪声与基准信号具有相同的频率,但在非线性一次声通道中,一次噪声频率会随着时间的推移<sup>[11]</sup>而改变,和基准信号频率不一致。因此,需要对非线性主动噪声控制系统的一次噪声进行分析。

只要知道基准信号的频率及一次路径的阶数,就可以得到一次噪声的频率范围。但一般不

知道一次路径阶数,在这种情况下,可使用取样频率 $f_s$ 确定一次噪声的频率范围:

$$0 < \left\{ |d_{i,1}\omega_1 + d_{i,2}\omega_2 + \dots + d_{i,q}\omega_q| \right\} \leq f_s \quad (3)$$

由于窄带基准信号通过非线性一次路径后的一次噪声仍然是窄带噪声,因此对窄带主动噪声控制系统展开扩展研究,以解决复杂度窄带非线性主动噪声控制问题。对复杂度窄带非线性主动噪声控制算法进行研究的重点就是如何精确地获得一次噪声频率,由于不知道实际的一次噪声,所以求取噪声估计值<sup>[12]</sup>,其表达式为:

$$g(n) = e(n)d(n) + \sum_{i=1}^T s_i y(n) \times f_s \quad (4)$$

式中: $e(n)$ 为误差噪声; $s_i$ 为脉冲响应系数; $y(n)$ 为待估计信号。

## 2 权重优化 AF 下非线性主动噪声控制

基于非线性主动噪声估计结果,通过自适应滤波器展开非线性主动噪声控制,但一般自适应滤波器可能无法根据实际的噪声环境动态调整参数,导致算法对复杂非线性噪声的控制效果不佳,稳态误差较大,限制了噪声控制方法的准确性和实用性。因此,通过权重优化使自适应滤波器更好地适应不确定性高、频谱特性难以精确描述的非线性噪声环境,从而提高控制效果和性能。通过训练调整自适应滤波器的权重,以减少控制过程中的计算量,提升信号稳定性<sup>[13,14]</sup>,利用训练后的自适应滤波器展开非线性主动噪声控制,重构出期望的输出信号<sup>[15]</sup>,实现非线性主动噪声控制。

在基于权重优化 AF 的非线性主动噪声控制算法研究中,自适应滤波器需要通过训练来获取合适的权重,自适应滤波器训练过程如下:

首先给出自适应滤波器的结构,如图 1 所示。图中, $z$ 为滤波器输入; $w$ 为滤波器的权重。

将滤波器的权重初始化为随机值,设置一个包含期望信号和输入噪声的训练信号 $t(n)$ ,将训练信号输入自适应滤波器,并根据当前权重计算输出信号,通过比较滤波器输出信号与期望信号之间的差异,得到误差信号,误差信号为一次噪声与噪声估计值之和,表达为:

$$e(n) = d(n) + g(n) \quad (5)$$

使用误差信号和输入信号更新权重,以使误差尽可能减小,权重更新公式为:

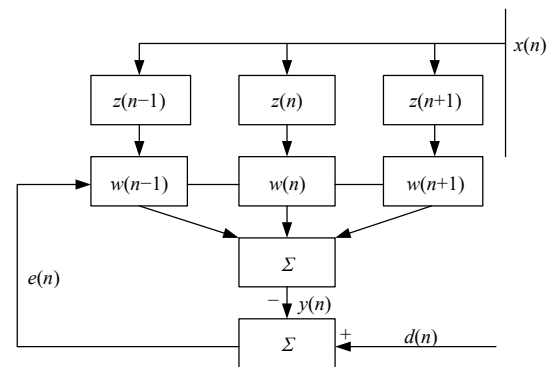


图 1 自适应滤波器结构图

Fig. 1 Adaptive filter structure diagram

$$w(n+1) = w(n) + \mu \times e(n) \quad (6)$$

式中: $w(n+1)$ 为下一时刻的信号权重; $w(n)$ 为当前时刻的信号权重, $\mu$ 为步长因子。

设定阈值 $\theta$ ,当误差信号的均方根误差达到该阈值时,认为自适应滤波器已经达到预期的性能水平,训练过程可以终止,由此实现自适应滤波器训练。

利用训练后的自适应滤波器展开非线性主动噪声控制,主动噪声控制是根据被控声场的特点,通过人工营造一种可控的声场,并结合声频干扰原理,改变声场的分布,达到主动降噪。

根据滤波器权重更新结果,得到重构信号 $E(n)$ ,同时,利用滤波器生成一个能控制声波的控制信号,由此构成控制声场, $E(n)$ 的表达式如下:

$$E(n) = D_1 d(n) + w(n+1) D_2 \quad (7)$$

式中: $D_1$ 、 $D_2$ 为噪声在滤波器中的传输函数。

利用 $E(n)$ 对滤波器的权重进行自适应调节,获得 $E(n)$ 误差的最小值,由此达到非线性主动噪声控制。

## 3 实验验证分析

为证明所提算法的非线性主动噪声控制效果,进行实验研究。

当对基于权重优化 AF 的非线性主动噪声控制算法进行有效性验证时,选择谐波信号和低通信号作为被控制的信号进行噪声控制。

(1)谐波信号:在频率为 1 kHz 的基准信号上添加具有不同幅度和相位的谐波成分,噪声源为高斯白噪声信号,振幅为 0.1,生成包含不同频率的谐波信号。

(2)低通信号:将信号中的高频成分滤除,得

到低通信号作为基准信号,高频部分截断在 2 kHz,噪声源为添加在低通信号上的高斯白噪声信号,振幅为 0.1。

在上述条件下,对本文所提算法的控制效果进行验证。

通过  $R_1$ 、 $R_2$  曲线反映噪声控制效果的瞬态性能以及在全时域内噪声的整体控制性能指数,表达式如下:

$$R_1 = -10 \lg \left( \frac{\sum_{n=1}^T E(n) \times V}{\omega(n)} \right) \quad (8)$$

$$R_2 = -10 \lg \left( \frac{\sum_{n=1}^T E(n) \times V}{\sum_{i=1}^n \omega(n)} \right) \quad (9)$$

式中:  $V$  为信号采样频率。

除此之外,通过计算估计信号和参考信号之间每个样本值之差的平方,并取其平均值,得到均方误差。较小的均方误差意味着估计信号与参考信号之间的差异较小,表明信号控制效果较好。

### 3.1 谐波信号噪声控制

图 2 是本文算法控制前后谐波信号噪声的均方误差曲线;图 3、图 4 是本文算法控制下谐波信号的  $R_1$ 、 $R_2$  曲线变化情况。

由图 2 可以观察到,在噪声信号是谐波信号的情况下,未控制前信号均方误差数值大,且波动剧烈,经过控制后均方误差值减小。通过图 3 也

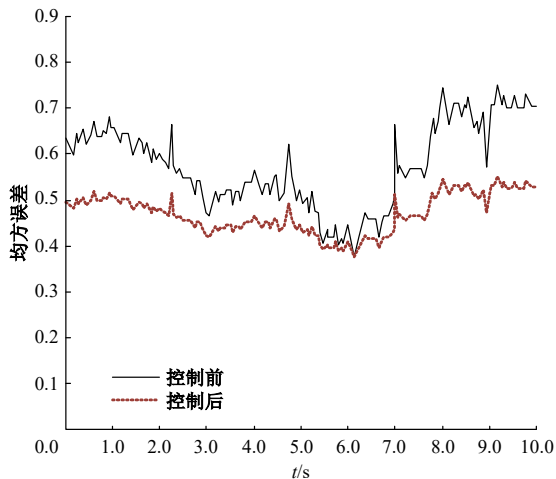


图 2 本文算法控制前后谐波信号噪声的均方误差曲线

Fig. 2 Mean square error curve of harmonic signal noise before and after control by the proposed algorithm

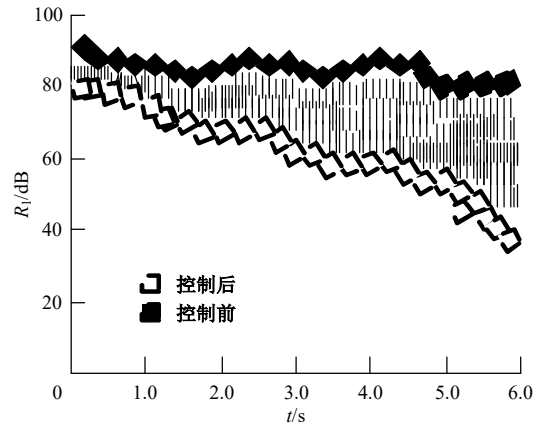


图 3 本文算法控制下谐波信号的  $R_1$  变化曲线

Fig. 3  $R_1$  variation curve of harmonic signal under the control of the proposed algorithm

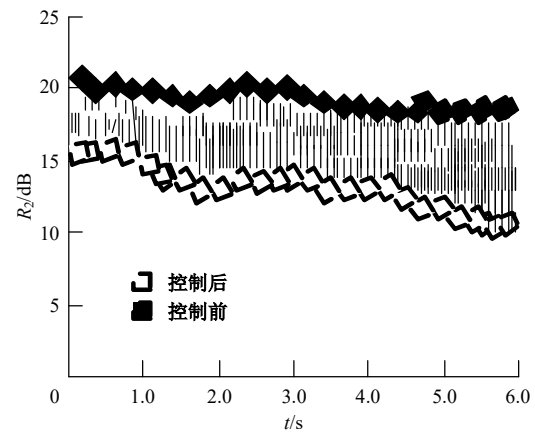


图 4 本文算法控制下谐波信号的  $R_2$  变化曲线

Fig. 4  $R_2$  variation curve of harmonic signal under the control of the proposed algorithm

能得知,控制前的稳态误差较大,瞬态性能差;利用本文算法控制后的稳态误差明显变小。由图 4 得知,控制后相对于控制前的稳态误差小,整体噪声控制性能较好,由此说明本文算法噪声控制效果较好。

### 3.2 低通信号噪声控制

图 5 是本文算法控制前后低通信号噪声的均方误差曲线;图 6、图 7 是本文算法控制下低通信号的  $R_1$ 、 $R_2$  曲线变化情况。

通过图 5~7 能观察到,在噪声信号是低通信号的情况下,控制后的均方误差低于控制前的均方误差,并且控制后的稳态误差较小,控制前的稳态误差较大,进一步证明了本文算法的噪声控制效果较好。

综上所述,在信号是谐波、低通信号的情况下,控制后比控制前的均方误差更低,稳态误差更

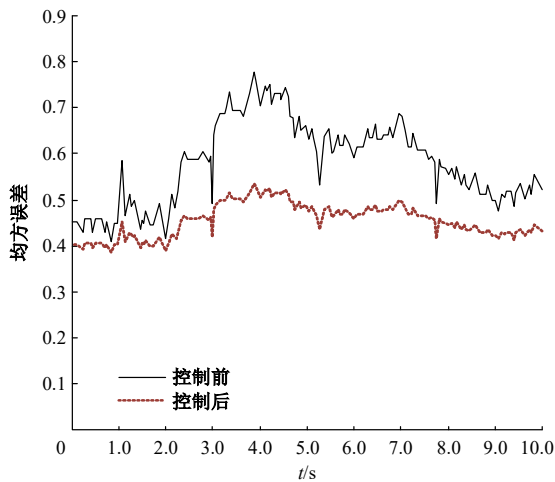


图 5 本文算法控制前后低通信号噪声的均方误差曲线

Fig. 5 Mean squared error curve of low-pass signal noise before and after control by the proposed algorithm

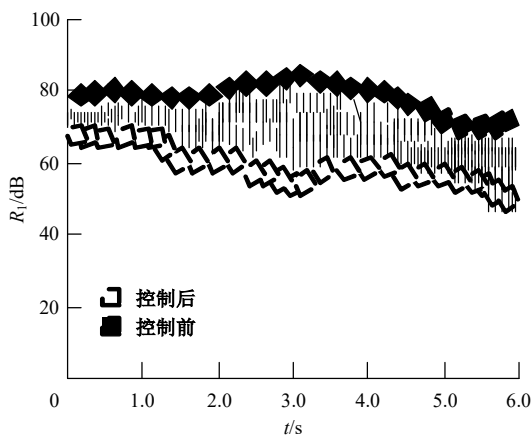


图 6 本文算法控制下低通信号的  $R_1$  变化曲线

Fig. 6  $R_1$  variation curve of low-pass signal under the control of the proposed algorithm

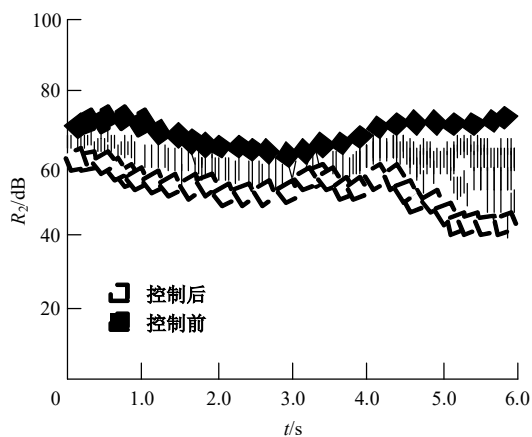


图 7 本文算法控制下低通信号的  $R_2$  变化曲线

Fig. 7  $R_2$  variation curve of low-pass signal under the control of the proposed algorithm

小,说明本文算法能取得较好的控制效果。这是因为本文算法在进行噪声控制之前,通过训练自适应滤波器,调整滤波器权重,优化了滤波器的性能,使非线性主动噪声控制效果得到提升。

### 4 结束语

为提升主动噪声控制效果,本文提出一种基于权重优化 AF 的非线性主动噪声控制算法,通过获取噪声信号,分析噪声误差,调整滤波器权重,得到重构的期望最小误差输出信号,实现非线性主动噪声控制。实验结果表明:该算法具有较低的信号噪声均方误差和稳态误差,能有效提高噪声控制效果。表明该算法能准确地估计噪声,并通过自适应滤波器的训练来重构期望输出信号,从而实现有效的非线性主动噪声控制。

### 参考文献:

[ 1 ] Lasota A, Meller M. Iterative learning approach to active noise control of highly autocorrelated signals with applications to machinery noise[J]. IET Signal Processing, 2020, 14(8): 560-568.

[ 2 ] 肖玮, 刘思蔚, 唐宇龙, 等. 基于对称非线性函数的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(2): 66-72.  
Xiao Wei, Liu Si-wei, Tang Yu-long, et al. Variable step size LMS adaptive filtering algorithm based on the symmetric nonlinear function[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(2): 66-72.

[ 3 ] Dongwook K, Vignesh S, Hyunkee K, et al. Development of active noise control simulation with virtual controller based on computational aeroacoustics[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2023, 153(5):2789-2802.

[ 4 ] 夏婷, 谢维信, 陈富健, 等. 基于核相关滤波器的高置信度自适应融合目标跟踪算法研究[J]. 信号处理, 2021, 37(4): 669-679.  
Xia Ting, Xie Wei-xin, Chen Fu-jian, et al. Research on high-confidence adaptive fusion target tracking algorithm based on kernel correlation filter[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(4): 669-679.

[ 5 ] 吕收, 李居伟, 郭昕钰. 基于 FXLMS 算法的直升机旋翼主动噪声控制的研究[J]. 电子技术应用, 2023, 49(5): 99-104.  
Lyu Shou, Li Ju-wei, Guo Xin-yu. Research on active noise control of helicopter rotor based on FXLMS algorithm [J]. Application of Electronic Technique,

- 2023, 49(5): 99-104.
- [6] 卢焯华, 吴方博, 刘志恩, 等. 液压挖掘机驾驶舱窄带主动噪声控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(11): 167-175.
- Lu Chi-hua, Wu Fang-bo, Liu Zhi-en, et al. Research on narrowband active noise control in the hydraulic excavator cabin [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(11): 167-175.
- [7] Lu L, Yang X, Zhu G, et al. Conjugate gradient-based FLANN algorithms in nonlinear active noise control[J]. Journal of the Franklin Institute, 2022, 359(9): 4468-4488.
- [8] 王智豪, 徐中明, 夏子恒, 等. 路面冲击输入下车内噪声主动控制[J]. 汽车工程, 2023, 45(1): 119-127.
- Wang Zhi-hao, Xu Zhong-ming, Xia Zi-heng, et al. Active control of road noise in vehicles running on impulsive road[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(1): 119-127.
- [9] Muhammad, Lim C W, Yaw Z, et al. Periodic and aperiodic 3-D composite metastructures with ultra-wide bandgap for vibration and noise control[J]. Composite Structures, 2022, 287(5): 1153241.
- [10] 尹智帅, 何嘉雄, 聂琳真, 等. 基于优化算法的自动驾驶车辆纵向自适应控制[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(2): 409-420.
- Yin Zhi-shuai, He Jia-xiong, Nie Lin-zhen, et al. Longitudinal adaptive control of autonomous vehicles base on optimization algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 409-420.
- [11] 火元莲, 丁瑞博, 齐永锋, 等. 基于混合熵的分数阶归一化子带自适应滤波算法[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(5): 28-34.
- Huo Yuan-lian, Ding Rui-bo, Qi Yong-feng, et al. Fractional normalized subband adaptive filtering algorithm based on mixture correntropy [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(5): 28-34.
- [12] Drant J, Micheau P, Berry A. Active noise control of higher modes in a duct using near field compensation and a ring of harmonic acoustic pneumatic sources [J]. Applied Acoustics, 2022, 188(1): 108583.
- [13] 阙鸿杰, 全力, 张丽, 等. 基于自适应滤波器在线解耦的磁场增强型永磁电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 344-354.
- Que Hong-jie, Quan Li, Zhang Li, et al. Sensorless control of flux-intensifying permanent magnet synchronous motor based on adaptive notch filter online decoupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 344-354.
- [14] 李帅永, 谢现乐, 毛文平, 等. 基于变分贝叶斯双尺度自适应时变噪声容积分卡尔曼滤波的同步定位与建图算法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(3): 1006-1014.
- Li Shuai-yong, Xie Xian-le, Mao Wen-ping, et al. Simultaneous localization and mapping based on variational Bayes double-scale adaptive time-varying noise cubature Kalman filter[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(3): 1006-1014.
- [15] 李涛, 贺钰瑶, 王宁, 等. 基于前馈信号参考的可变收敛列车噪声主动控制算法[J]. 机车电传动, 2022(1): 25-30.
- Li Tao, He Yu-yao, Wang Ning, et al. Variable convergence train noise active control algorithm based on feedforward reference [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(1): 25-30.