

基于 DA - VMD 联合小波阈值的排种器田间振动信号去噪方法

刘正道 马壮红 张军昌 闫小丽 黄玉祥 张志强

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 播种机作业过程中排种器会受到非平稳随机振动,对排种性能产生较大的影响,对振动信号采集和分析具有重要意义,而田间振动信号采集过程中受到诸多噪声干扰,难以从中获取有效的信息。本文提出了一种结合蜻蜓算法(Dragonfly algorithm, DA)、变分模态分解(Variational mode decomposition, VMD)和小波阈值的去噪方法,可通过不断迭代更新蜻蜓个体位置和速度,寻找使得 VMD 分解效果最优的参数组合。以仿真得到的时域随机路面信号为初始信号,分别采用 DA - VMD 联合小波阈值、小波阈值去噪、经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)、VMD 和小波联合 EMD 方法对其进行去噪处理,结果表明本文所提出的去噪方法对非平稳随机振动信号去噪效果更优,去噪后信噪比、均方根和相关系数分别为 21.570、0.094 和 0.833。采集田间播种过程不同地表和作业速度下排种器振动信号,并采用 DA - VMD 联合小波阈值去噪方法对其进行去噪处理,以平滑度、信号能量比和噪声模为评价指标分析去噪效果,结果表明本文所提出方法去噪后信号更加平滑,信号能量比和噪声模更高,且在不同工况条件下均具有较好的去噪效果。

关键词: 排种器; 振动; 去噪; DA - VMD; 小波阈值

中图分类号: S126; S223

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)11-0262-11

OSID:



Denoising Method for Seed Feeder Field Vibration Signal Based on Combination of DA - VMD and Wavelet Thresholding

LIU Zhengdao MA Zhuanghong ZHANG Junchang YAN Xiaoli HUANG Yuxiang ZHANG Zhiqiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: During the operation of the seeder, the discharge device will experience non-stationary random vibration, which significantly affects seed discharge performance and holds great importance for acquiring and analyzing vibration signals. A denoising method was proposed that combined dragonfly algorithm (DA), variational mode decomposition (VMD), and wavelet threshold to continuously update the location and speed of dragonfly individuals through iterative processes. The optimal parameter combination for VMD decomposition effect was determined. A simulated random road signal in the time domain served as the initial signal and underwent denoising by using DA - VMD combined wavelet threshold, wavelet threshold denoising, empirical mode decomposition (EMD), VMD, and wavelet combined EMD methods respectively. The results demonstrated that the proposed method achieved superior denoising effects on non-stationary random vibration signals with post-denoising signal-to-noise ratio, root-mean-square value, and correlation number measuring 21.570, 0.094, and 0.833, respectively. Furthermore, vibration signals from seeders under different surface conditions and operating speeds during field seeding were collected and subjected to denoising by using the DA - VMD combined wavelet threshold denoising method. The effectiveness of denoising was evaluated based on smoothness index, signal energy ratio, and noise mode indices. The results indicated smoother signals with higher signal energy ratios after denoising across various working conditions.

Key words: seeding device; vibration; denoising; DA - VMD; wavelet threshold

收稿日期: 2024-05-30 修回日期: 2024-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101629)和中国博士后基金项目(2021M692657)

作者简介: 刘正道(1992—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备与技术研究, E-mail: liuzd@nwf.edu.cn

通信作者: 张军昌(1972—),男,副教授,主要从事现代农业装备与技术研究, E-mail: zhangjunchang@126.com

0 引言

精量播种技术是保护性耕作的核心,但受地表起伏、土壤阻力、拖拉机振动及部件运动等因素影响,播种机工作过程排种器必然会产生颠簸和振动,对排种性能产生较大影响^[1-2]。有利的振动可以避免排种口堵塞、促进充种,提高排种质量,不利的振动则会影响排种有序性、均匀性,从而降低排种器排种质量^[3]。研究播种过程中排种器振动规律,可为播种机关键部件优化和振动调控领域研究提供依据,对提升播种作业质量具有重要意义^[4-7]。排种器田间振动受作业条件、机具结构等多种因素影响,其振动信号非常复杂且具有典型瞬态、非平稳性。田间振动信号采集过程中工作环境复杂,加之机械内部结构、传感器误差等因素影响,采集的原始振动信号中往往包含大量噪声,使得振动信号更加复杂,从复杂的振动信号中去除噪声成分并提取有用信息成为排种器田间振动分析的关键^[8-11]。

由于排种器振动信号属于瞬态、非平稳信号,不能用确定的时间函数来表示^[12-13]。但从总体来看,其内在存在着一定的统计规律性,可通过概率论和统计学的方法进行描述。在信号分析领域,特别是对非平稳随机信号而言,短时傅里叶变换、小波变换、经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)等均取得了一定的成果^[14-16]。短时傅里叶变换通过加窗技术将信号的全局性质转换为局部性质,并利用傅里叶变换在每个时间窗口内提取频域信息。小波变换通过尺度与中心频率以及基函数支撑区间的关系进行交互,实现时间与频率的联合分析,但不具有自适应性,无法同时分辨时间和频率^[17]。经验模态分解将任意信号分解为一系列基本模式分量及一个余项的和,利用噪声主要存在于高频信号、有效信号主要存在于低频信号的特点,设定阈值对信号进行降噪,徐方慧等^[18]基于 EMD 和小波阈值去噪法,并应用于电成像测井的电导率曲线,使孔洞特征更加容易识别。秦敏敏^[19]针对小波阈值去噪适应性弱的问题,提出了最大相关峭度反卷积联合多尺度集合经验模态分解,适用于不同类型的轴承和故障场景。以上方法均可以实现去噪的效果,但存在端点效应和模态混叠等问题,对信号细节造成损失。变分模态分解通过构造和求解变分问题得到信号的最优模态函数和中心频率,实现对信号的自适应分解,孙砚飞等^[20]基于新小波阈值与 VMD 对轴承故障特征进行提取,在轴承故障诊断中具有较高的故障诊断精度和鲁棒性。但由于 VMD 去噪方法适应性较弱,通常需要根据经验或者通过

试错法来选择分解层数和惩罚因子,增加了算法复杂性和不确定性^[21-23]。

本文提出一种基于蜻蜓算法改进变分模态分解联合小波阈值的去噪方法,通过对比不同去噪方法对仿真田间地面激励信号和实际采集振动信号的去噪处理,以验证 DA - VMD 联合小波阈值去噪方法的准确性;采用所提出的去噪方法,对不同作业速度下排种器田间振动信号进行去噪处理及时频分析,以期排种器结构优化及振动调控系统研究提供参考。

1 DA - VMD 联合小波阈值算法

1.1 变分模态分解

变分模态分解是一种准正交多分量自适应信号分解方法,在计算过程中舍弃传统递归求解的思想,采用完全非递归的模态分解,同时可以自主选择模态数量,采用交替方向乘子法对各模态不断更新其中心频带和带宽,自适应分解信号频带,最终得到各个模态函数分量以及相应的中心频率。该算法可以将任意信号分解为 K 个中心角频率为 ω_k 的本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF)。其中 K 为人为制定的模态分量数量。与 EMD 不同, VMD 将每个 IMF 定义为调幅调频函数,可表示为

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\phi_k(t)) \tag{1}$$

式中 $u_k(t)$ ——模态分量
 $A_k(t)$ ——IMF 包络幅值
 $\phi_k(t)$ ——IMF 瞬时相位

VMD 算法的核心思想是通过构建和求解变分问题来实现信号的自适应分解,主要包括变分问题构造和求解两部分。变分问题构造流程为:

(1) 利用希尔伯特变换计算每一个模态分量 $u_k(t)$ 对应的单边频谱函数 $\eta(t)$,描述信号在频域中的成分和幅度,计算式为

$$\eta'(t) = \left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \tag{2}$$

式中 $\delta(t)$ ——冲击函数

(2) 与预估中心频率 $e^{-jw_k t}$ 相乘,将各个模态的单边频谱移动到估算的中心频率上,即

$$\eta(t) = \left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) e^{-jw_k t} \tag{3}$$

式中 w_k ——各模态分量中心频率集

(3) 通过信号梯度的二范数平方进行计算,计算每个模态信号带宽。最终得到含有约束的最优化变分问题

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k = f \end{cases} \tag{4}$$

式中 k ——迭代次数 f ——原始信号

变分问题求解流程为：

(1)引入二次惩罚因子 α 和增广拉格朗日函数,惩罚因子 α 用于控制模态函数带宽的约束程度,拉格朗日函数用于将原问题转换为无约束变分问题。增广的 Lagrange 表达式为

$$L(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda)=$$
$$\alpha\sum_k\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\right)u_k(t)\right]e^{-j\omega_k t}\right\|_2^2+$$
$$\left\|f(t)-\sum_k u_k(t)\right\|_2^2+\left\langle\lambda(t),f(t),\sum_k u_k(t)\right\rangle$$

(5)

式中 $\lambda(t)$ ——拉格朗日乘子

(2)采用乘法算子交替方向法对增广拉格朗日表达式进行迭代优化。每次迭代中根据

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega)=\frac{\hat{f}(\omega)-\sum_{i\neq k}\hat{u}_i(\omega)+\frac{\lambda(\omega)}{2}}{1+2\alpha(\omega-\omega_k)^2}$$

(6)

$$\omega_k^{n+1}=\frac{\int_0^{+\infty}|\hat{u}_k(\omega)|^2d\omega}{\int_0^{+\infty}|u_k(\omega)|^2d\omega}$$

(7)

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega)=\hat{\lambda}^n(\omega)+\tau\left(\hat{f}(\omega)-\sum_k\hat{u}_k^{n+1}(\omega)\right)$$

(8)

式中 $\hat{f}(\omega)$ ——傅里叶变换

ω ——随机频率 τ ——保真系数

更新模态函数、中心频率和拉格朗日乘子,以最小化增广拉格朗日表达式的值,最终通过检查连续迭代之间的解的差异是否小于阈值,即

$$\frac{\sum_{k=1}^K\left\|\hat{u}_k^{n+1}-\hat{u}_k^n\right\|_2^2}{\left\|\hat{u}_k^n\right\|_2^2}<\varepsilon$$

(9)

式中 ε ——噪声容限参数,取 0

结束迭代,得到各个模态函数分量及其中心频率。

1.2 蜻蜓算法

蜻蜓优化算法具有寻优能力强、收敛速度快等特点^[24],其算法流程如图 1 所示。其核心原理源于蜻蜓分离、结队、结盟、捕食和躲避天敌 5 种行为方式。首先初始化形成不同功能的蜻蜓种群,包括主种群负责全局搜索,次种群负责局部搜索,以及随机种群增加搜索多样性。迭代过程中,蜻蜓会根据周围蜻蜓信息调整自身位置,利用种群间的交互和迁移实现信息共享,并根据目标函数计算权重系数进行排序和更新。最终,通过不断迭代,算法能够逐渐逼近最优解,当满足终止条件时输出 VMD 分解参数组合的最优解(K,α)。在此过程中,包络熵用于

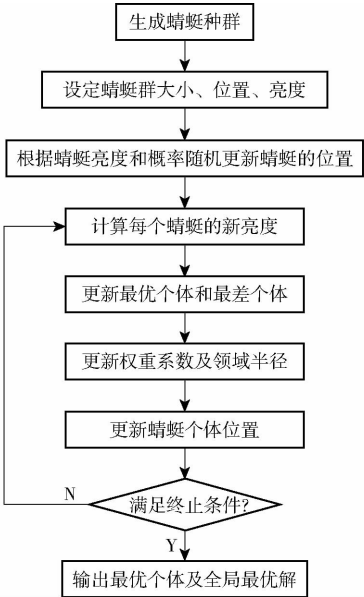


图 1 蜻蜓算法流程图

Fig. 1 Dragonfly algorithm flowchart

反映信号稀疏性。当信号中噪声含量越高时,有效成分越少,包络熵越大;相反,信号中有效成分越多、噪声含量越低时,包络熵越小,此时所对应的参数组合最优^[25]。因此,采用包络熵的最小值为评价指标。包络熵 E_p 计算式为

$$E_p=-\sum_{j=1}^Np_j\lg p_j$$

(10)

其中

$$p_j=a(j)\bigg/\sum_{j=1}^Na(j)$$

(11)

$$a(j)=\sqrt{x^2(j)+H^2[x(j)]}$$

(12)

式中 p_j —— $a(j)$ 的归一化形式

$a(j)$ ——信号 $x(j)$ 经 Hilbert 解调后的包络信号

1.3 小波阈值去噪

小波变换通过将信号分解为一系列小波函数的叠加来分析信号局部特性,相比于傅里叶变换更适用于不规则和不对称的信号。小波去噪是利用小波变换对信号进行去除噪声过程,包括分解、阈值处理和重构等步骤。小波分解过程中(图 2),信号被分为低频信息(cA)和高频细节(cD),通过设置合适的阈值区分信号和噪声。去噪后小波系数被用来重构信号,以获得去除噪声的结果。

小波阈值降噪作为非平稳信号的主要降噪手段已经广泛应用于众多领域。其处理过程中重要的选择有阈值选择、阈值法选择、小波分解层数选择以及小波基函数选择。对于微振动信号而言,在阈值选择中,固定式阈值较其他方法有较为明显的优势^[26];在阈值法选择时,软阈值法较硬阈值法在微振动信号有较好的处理效果^[27];在小波分解层数和

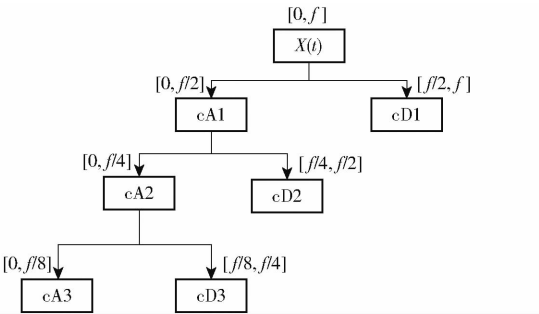


图 2 小波分解过程

Fig. 2 Wavelet decomposition process

小波基函数选择时,小波分解层数主要取决于传感器最小采样频率。DB 小波系列可以较好地反映微振动信号在时域和频域中的变化过程。因此选取 DB8 小波基。

1.4 基于 DA - VMD 联合小波阈值去噪

在变分模态分解中,分解层数 K 和惩罚因子 α 是两个至关重要的参数。分解层数 K 决定分解精细程度,如果 K 过小,可能会导致原始信号的多个分量混叠在同一个模态函数中,产生模态混叠现象。相反,如果 K 过大,则可能使得某一分量出现在多个模态函数中,导致中心频率发生混叠。惩罚因子 α 具有调节分解精度的作用,对模态函数的带宽进行约束,使得分解后的模态函数在频域中具有紧凑的带宽。因此,寻找最优分解层数 K 和二次惩罚因子 α 参数是 VMD 的关键。

基于 DA - VMD 与小波阈值去噪的方法通过蜻蜓算法优化 VMD 参数,同时结合 VMD 的自适应分解能力和小波阈值去噪优势,旨在提高信号去噪性能和效率。计算式为

$$\begin{cases} \text{fitness} = \min_{y=(K,\alpha)} \{E_p\} \\ \text{s. t.} \begin{cases} K \in [5, 16] \\ \alpha \in [500, 5\,000] \\ K, \alpha \in \mathbf{N} \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中 fitness——目标函数
y——优化 VMD 的参数组合

具体流程为:利用 DA 算法通过迭代过程计算出最优的 VMD 参数,应用 VMD 方法对振动信号进行分解,得到一系列模态函数,计算每个 IMF 的方差贡献率,通过阈值滤除方差贡献率较小的分量,保留方差贡献率大的分量,对剩余的 IMF 分量进行小波阈值去噪,将去噪后 IMF 进行重构,得到最终去噪信号。具体流程如图 3 所示。

2 仿真试验

采用 Matlab/Simulink 进行仿真试验,验证基于 DA - VMD 联合小波阈值去噪方法的有效性,以仿

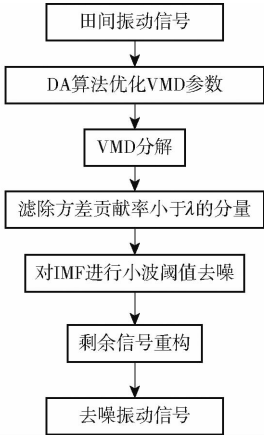


图 3 DA - VMD 流程图

Fig. 3 DA - VMD flowchart

真生成的时域随机地面信号为初始信号。结合田间实际路况,选择仿真地面等级为 G 级,速度为 8 km/h,限带白噪声模块噪声功率为 20 dBW,信噪比为 10 dB,采样频率为 500 Hz,采用修正后的随机激励时域模型生成随机路面信号,修正后随机激励时域模型^[28]为

$$\dot{w}(t) = -2\pi n_{d0}vw(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_w(n_0)}vq(t) \quad (14)$$

式中 $\dot{w}(t)$ ——路面不平度垂直速度
 $w(t)$ ——路面位移输入
 $G_w(n_0)$ ——路面不平度系数,取 0.065 536 m³
 $q(t)$ ——带限白噪声
 v ——播种机行驶速度
 n_{d0} ——路面空间截止频率,取 0.011 m⁻¹
 n_0 ——参考空间截止频率,取 0.1 m⁻¹

采用 Matlab 对生成的随机路面信号进行分解,设定 K 搜索范围为 5 ~ 16, α 搜索范围为 500 ~ 5 000^[29]。初始化蜻蜓算法,设定迭代次数为 10,种群规模为 20,得到最优参数组合 $\{K, \alpha\} = \{15, 2\,470\}$ 。根据 DA 算法优化的参数组合对仿真信号进行 VMD 分解,经过 VMD 分解得到 15 个 IMF 分量后分析结果如图 4 所示。

当方差贡献率非常低时,该成分对整体数据的解释力非常有限,很可能只是数据中的噪声,无法反映信号本质特征的重要信息。因此,设置阈值为 0.05,保留下来的 IMF 分量方差贡献率总和为 92.7%,可以认为该方法在保留信号特征的前提下尽可能完成去噪。

为验证本文提出方法的优越性,分别使用小波去噪(DB8 小波基)、经验模态分解(分解层数为 15,阈值为 0.1)、变分模态分解(分解层数为 15,惩罚因子为 2 470)以及 EMD + 小波阈值去噪 5 种方法对仿真信号进行去噪处理,采用信噪比

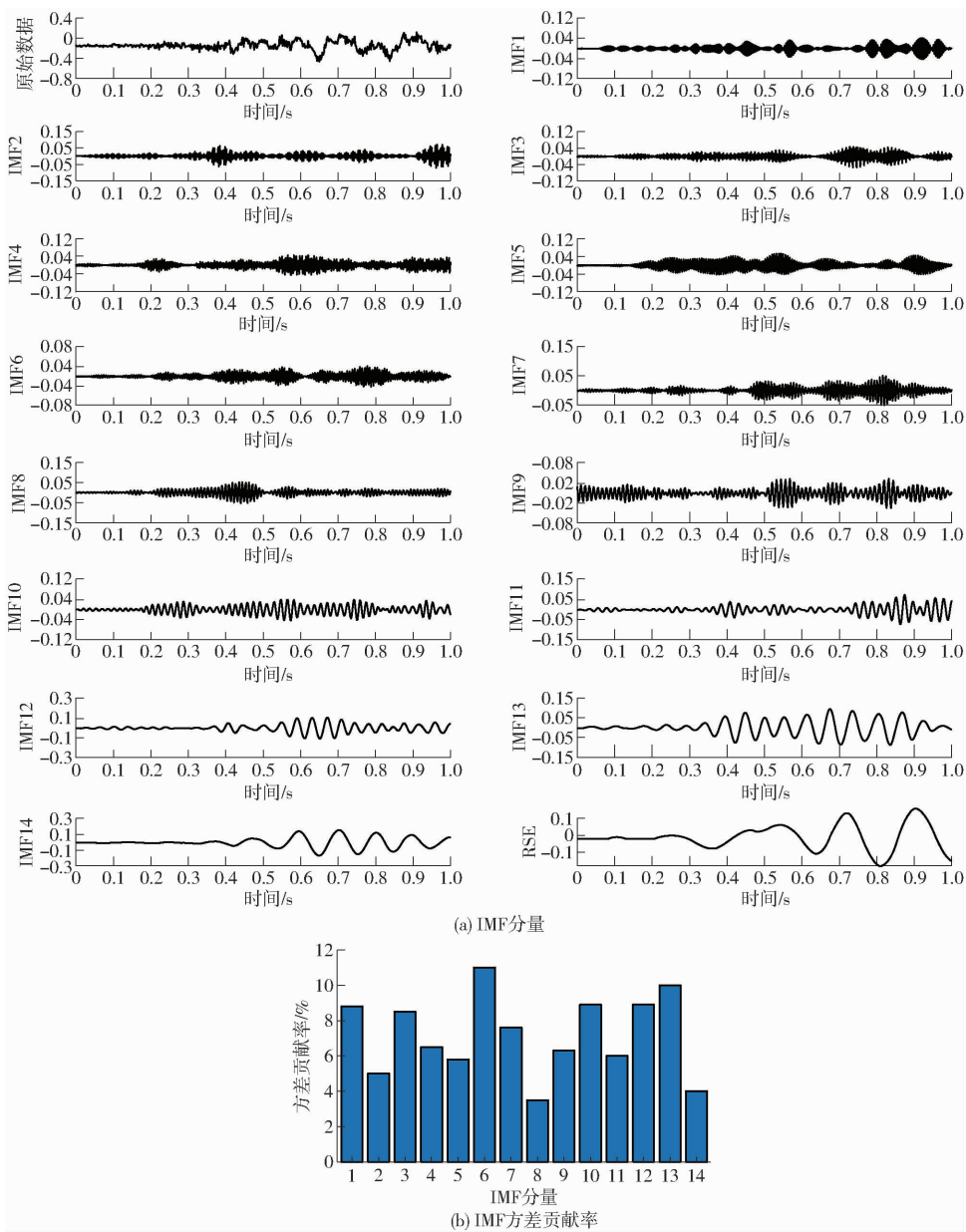


图 4 各阶 IMF 分量及其方差贡献率

Fig. 4 IMF components of each order and their variance contribution rates

(SNR)、均方根 (RMS) 以及相关系数 (Cor) 为评价指标。

当信号信噪比越高,均方根越小,与初始信号相关系数越大时,表明该算法对原始信号的去噪效果

好,还原程度高。原始信号以及各算法去噪后信号如图 5 所示。从图 5 可以看出,5 种方法均能有效地消除仿真信号中的大部分噪声,使用本文方法去噪后得到的信号与原信号相比,虽在部分峰值有较

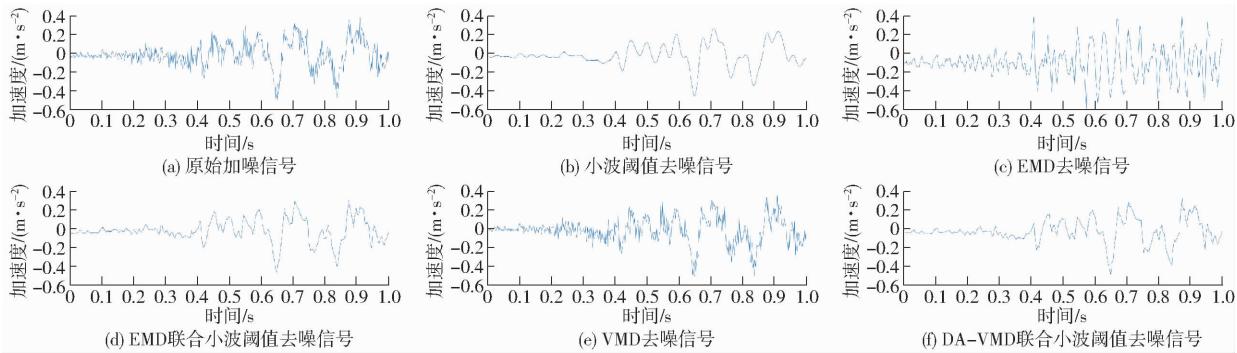


图 5 5 种去噪方法效果

Fig. 5 Effect of five denoising methods

小的偏差,但总体趋势保持一致。观察其余 4 种去噪方法得到的去噪信号可知:小波阈值去噪尽管能够有效去除噪声,但在去噪的同时也抹除了信号中的大部分特征,EMD、EMD 联合小波阈值以及 VMD 3 种方法去噪信噪比较低,去噪后仍难以清晰地揭示出原始信号特征,处理效果不够理想。为了进一步比较上述方法性能,在雷达图中对比 5 种去噪方法的信噪比、均方根以及相关系数(图 6)。由图 6 可知,DA-VMD 联合小波阈值去噪方法可以最大程度地还原田间振动信号,在 5 种去噪方法中信噪比最大、均方根最小、相关系数最大,在保留信号细节的同时有效抑制了大部分噪声,对田间随机不平稳振动信号具有更好的去噪能力。

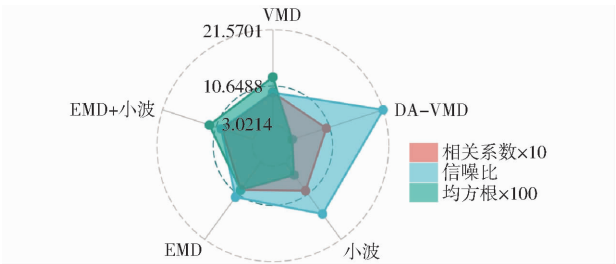


图 6 不同去噪方法处理效果雷达图

Fig. 6 Performance comparison of denoising algorithms

3 田间振动信号分析

为验证所提出去噪方法对排种器田间振动信号的适应性,并对不同工况下排种器田间振动信号进行分析,通过实际田间播种试验,采集播种机作业过程中排种器的振动信号,对比不同去噪方法处理效果并进行时频分析。

3.1 试验条件

于 2023 年 7 月 5 日在杨凌农业机械化新技术新机具试验示范园进行播种试验,试验地前茬作物为小麦,收获后秸秆全量还田,试验前采用土壤坚实度测定仪和土壤墒情测定仪分别测定 0~20 cm 土壤坚实度和含水率。免耕地表土壤平均含水率为 35.8%,平均紧实度为 237.2 kPa;旋耕地表土壤平均含水率为 28.5%,平均紧实度为 90.4 kPa。动力机械采用路通 554 型轮式拖拉机,播种机采用潍柴雷沃 2BMQE-2B 型免耕精量播种机,排种器类型为指夹式排种器。传感器选择维特智能九轴加速度传感器,采样频率为 500 Hz,加速度检测精度为 0.001 g,可以同时采集竖直、水平和竖直 3 个方向加速度信号,传感器安装在排种器外壳靠近指夹位置,如图 7 所示,通过 Type-C 数据线和上位机进行通信。为采集不同地表条件中不同作业速度下排种器振动信号,设置 3、6、9、12 km/h 共 4 个作业速度。

试验过程中播种机需经历起步加速、稳定行驶以及减速停止 3 个阶段,为提高试验准确性,截取稳定行驶阶段数据进行分析。

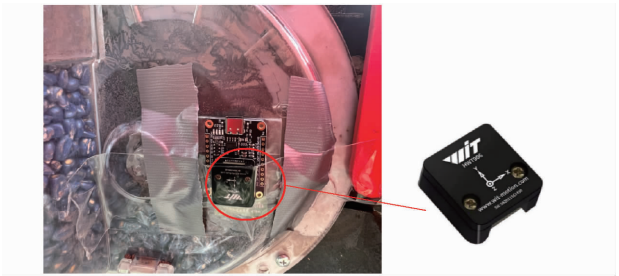


图 7 传感器及其安装位置

Fig. 7 Sensors and their installation positions

3.2 去噪效果

使用 DA-VMD 联合小波阈值去噪方法对所采集的不同工况下振动信号进行去噪处理,以免耕地表工作速度为 9 km/h 时竖直方向的振动信号为例,首先利用 DA 算法寻找 VMD 最优参数组合,优化得到最优参数组合 {K,α} 为 {12,4 472},随之通过 VMD 得到各 IMF 分量及其方差贡献率如图 8 所示,通过设定阈值去除掉非必要 IMF 分量后重构信号,得到降噪前后信号时域和频域波形如图 9 所示。

由图 9 可知,通过本文方法去噪后的信号去掉了大部分高频噪声,降噪后振动信号波形较降噪前呈现出更为清晰的特征,同时,降噪后信号在整体特征以及峰值等方面与原信号基本保持一致;从频谱分布角度来看,降噪后振动信号能量分布更为集中,有助于更准确地识别和分析振动信号的频率特征。

采用小波阈值去噪、经验模态分解、变分模态分解以及 EMD+小波阈值去噪这 5 种方法对振动信号进行降噪处理。由于无法获取无噪声信号,因此难以继续以信噪比、均方根以及相关系数作为评价标准,引入平滑度指标^[30](RVR)、信号能量比(SER)和噪声模^[31](NM)3 种评价指标,RVR 反映去噪后信号的评价程度,越趋近于 0,表明信号越光滑,SER 和 NM 能够反映去噪前后能量变化情况,SER 和 NM 越大,表明去噪效果越好。去噪后各方法评价指标如表 1 所示。由表 1 可知,使用本文方法去噪后 SER 和 NM 值更高,RVR 值更趋近于 0,表明去噪后信号能量更大、更平滑,去噪效果更优。由此可见,本文方法对田间地面振动信号去噪效果更优。

为验证本文去噪方法的适用性,对不同工况下振动信号的处理效果进行分析。采用 DA-VMD 联合小波阈值去噪方法对所采集到的不同地表和作业

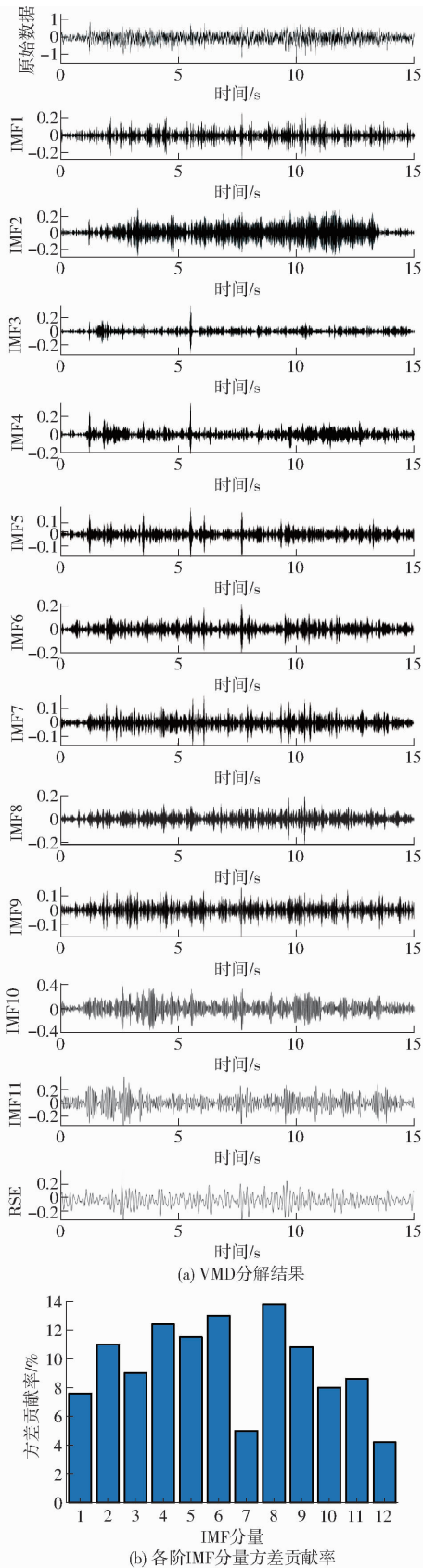


图8 各阶IMF分量及其方差贡献率

Fig.8 Each IMF component and its variance contribution rate

速度下的振动信号进行时频分析,免耕地表作业速度为9 km/h 条件下排种器不同方向上振动信号的

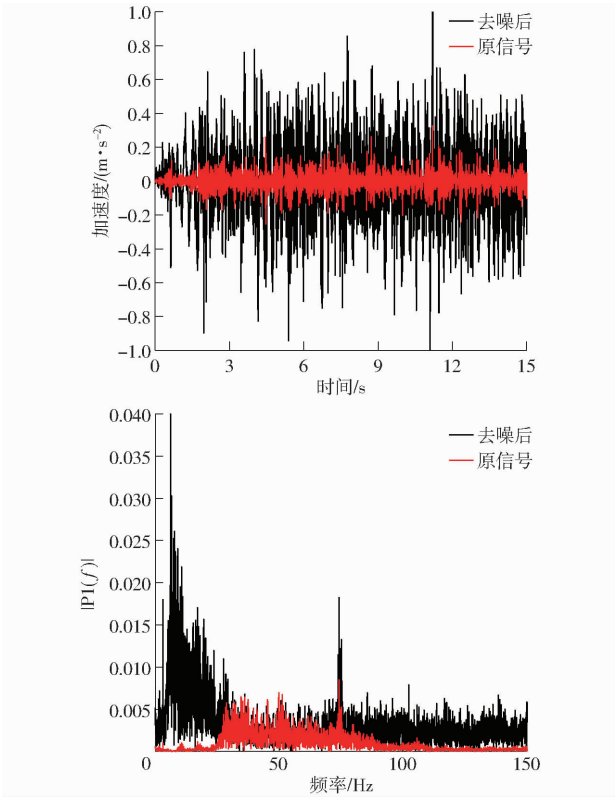


Fig.9 Signal comparison before and after denoising

表1 振动信号降噪效果分析

Tab.1 Vibration signal noise reduction effect analysis			
降噪方法	RVR	SER	NM
小波阈值	0.156	0.778	9.768
EMD	0.224	0.814	9.949
EMD + 小波阈值	0.197	0.835	9.986
VMD	0.176	0.875	10.054
DA - VMD 联合小波阈值	0.139	0.922	10.476

时域和频域如图10所示。将分析结果导入Matlab软件,计算各工况条件下去噪前后RVR、SER、NM和振动加速度均方根如表2所示。

由表2可知,各工况下本文方法平滑度指标(RVR)均不大于0.182,信号能量比(SER)均不小于0.894,噪声模(NM)均不小于9.324,由此可见,本文方法对排种器不同工况下振动信号去噪效果均具有较好的去噪能力,可以应用于田间振动信号的去噪分析。

排种器在竖直方向上的振动均方根均明显高于水平和前进方向;在竖直方向上,当工作速度为3、6、9、12 km/h 时,免耕地表加速度峰值为0.426、0.871、0.808、1.284 m/s²,均方根为0.064、0.071、0.093、0.147 m/s²。而旋耕地表加速度峰值分别为0.246、0.372、0.334、0.478 m/s²,均方根为0.051、0.062、0.085、0.099 m/s²;随着工作速度的不断增加,排种器的振动均方根也呈逐渐上升。频域图中,

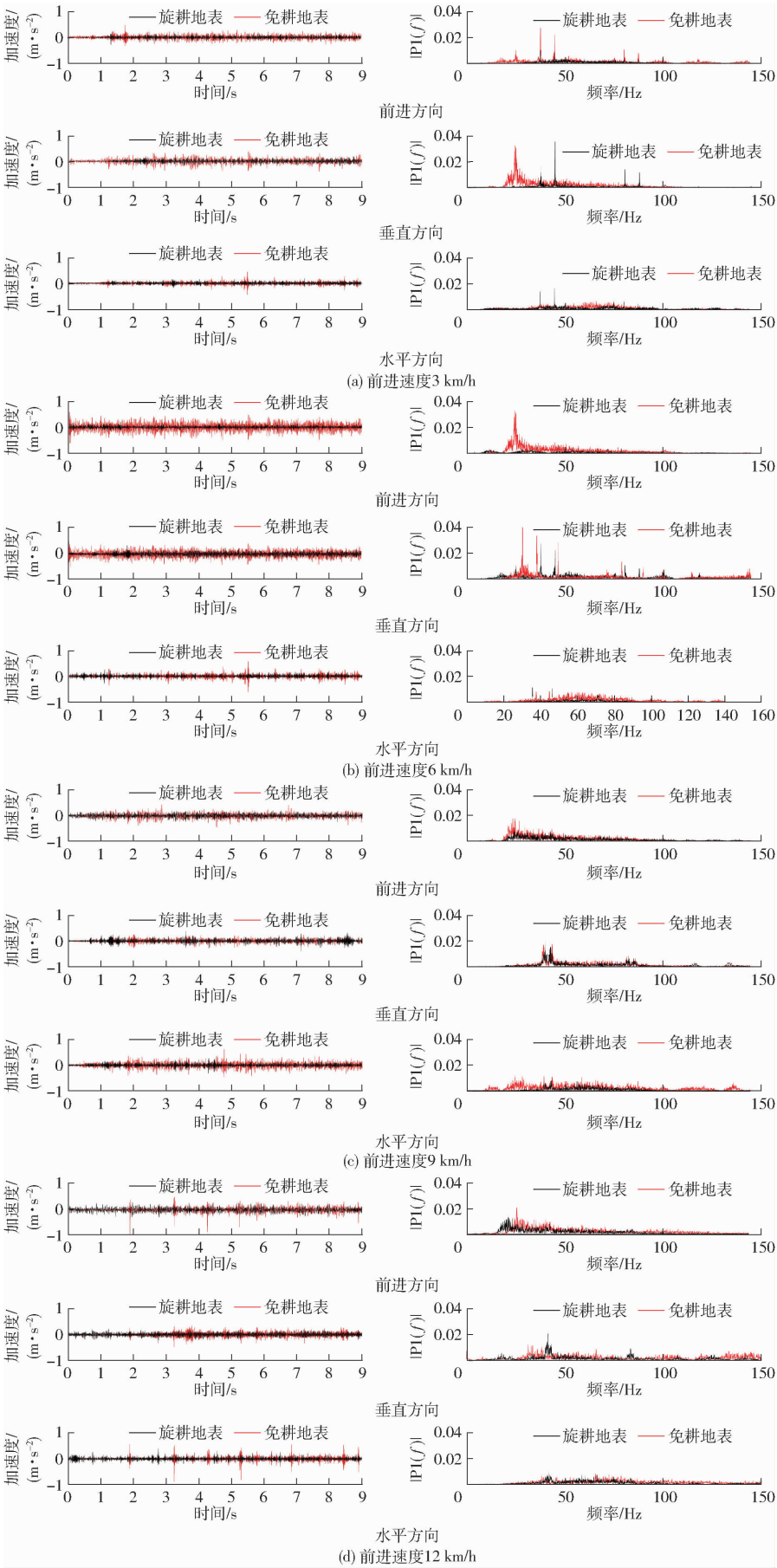


图 10 不同工作速度下时域图和频域图

Fig. 10 Time domain and frequency domain diagrams at different working speeds

表 2 不同工况下去噪效果评价

Tab.2 Evaluation of denosing effect under different working conditions

作业条件			加速度			
地表 条件	振动 方向	作业速度/ (km·h ⁻¹)	RVR	SER	NM	均方根/ (m·s ⁻²)
免耕	竖直 方向	3	0.127	0.918	10.573	0.064 0
		6	0.142	0.921	9.438	0.071 8
		9	0.139	0.922	10.476	0.092 8
		12	0.154	0.925	10.683	0.146 8
	水平 方向	3	0.138	0.911	9.672	0.058 1
		6	0.151	0.913	9.824	0.055 3
		9	0.158	0.919	10.243	0.082 9
		12	0.162	0.921	10.352	0.099 4
	前进 方向	3	0.143	0.905	9.324	0.031 4
		6	0.157	0.913	9.736	0.036 6
		9	0.167	0.909	9.783	0.079 7
		12	0.182	0.916	10.054	0.080 6
旋耕	竖直 方向	3	0.124	0.928	9.573	0.050 6
		6	0.129	0.913	10.673	0.061 8
		9	0.133	0.924	10.243	0.085 1
		12	0.164	0.916	10.075	0.099 3
	水平 方向	3	0.148	0.926	9.715	0.033 4
		6	0.136	0.917	10.575	0.041 4
		9	0.157	0.916	10.327	0.076 8
		12	0.169	0.901	9.675	0.068 9
	前进 方向	3	0.128	0.913	9.753	0.030 1
		6	0.135	0.934	10.587	0.039 4
		9	0.144	0.909	10.385	0.058 4
		12	0.167	0.894	10.879	0.050 3

排种器所受到的振动频率主要集中在 10 ~ 50 Hz,且振动幅值相对较小;免耕地表振动能量均大于旋耕地表,排种器竖直方向所受到的振动能量强于水平和前进方向。

4 结论

(1)提出了基于 DA 算法优化 VMD 联合小波阈值的去噪方法,通过模拟蜻蜓的群体行为构建优化模型来迭代出 VMD 分解效果最优的参数组合,提高 VMD 的分解精度和效率。

(2)以仿真得到的时域随机路面信号为初始信号,分别采用 DA - VMD 联合小波阈值、小波阈值去噪、EMD、VMD 和小波联合 VMD 方法对其进行去噪处理,结果表明本文所提出去噪方法对非平稳随机振动信号去噪效果更优,去噪后信噪比、均方根和相关系数分别为 21.570 1、0.094 和 0.833。

(3)采用 DA - VMD 联合小波阈值去噪方法对田间作业过程中排种器振动信号进行去噪处理,并验证处理效果。结果表明,该方法去噪后的信号更加平滑、信号能量比和噪声模更高,且在不同工况条件下均具有较好的去噪效果。

参 考 文 献

[1] 邵雪冬, 杨子涵, 宋正河, 等. 不同旋耕作业载荷下拖拉机动力输出传动系振动特性分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 332 - 339.
SHAO Xuedong, YANG Zihan, SONG Zhenghe, et al. Analysis of influence of tractor rotary tillage load on power take-off driveline[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 332 - 339. (in Chinese)

[2] 郑娟, 廖宜涛, 齐天翔. 振动对气力式油菜精量排种器性能影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 233 - 242.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, QI Tianxiang. Effect of vibration on performance of pneumatic rapeseed precision metering device [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(2): 233 - 242. (in Chinese)

[3] 陈幸, 贺智涛, 姬江涛, 等. 低频振动信号对玉米播种监测系统的影响[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 197 - 200, 215.
CHEN Xing, HE Zhitao, JI Jiangtao, et al. Influence of low frequency vibration signal on maize seeding monitoring system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 197 - 200, 215. (in Chinese)

[4] 王小勇, 余志, 倪德江. 往复式茶叶振动抖筛机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 143 - 153.
WANG Xiaoyong, YU Zhi, NI Dejiang. Optimization design and experiment of reciprocating tea vibrating-sifting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 143 - 153. (in Chinese)

[5] 尚书旗, 李成鹏, 何晓宁, 等. 高酸苹果振动式采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 115 - 125, 168.
SHANG Shuqi, LI Chengpeng, HE Xiaoning, et al. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 115 - 125, 168. (in Chinese)

[6] 丁翰韬, 陈树人, 周巍伟, 等. 喂入量扰动下联合收获机振动特性机理研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 20 - 27.
DING Hantao, CHEN Shuren, ZHOU Weiwei, et al. Mechanism analysis of combine harvester's vibration characteristics under feeding interference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 20 - 27. (in Chinese)

[7] 张东兴, 于天成, 杨丽, 等. 基于振动排序的玉米种子胚面定向装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 122 - 131.
ZHANG Dongxing, YU Tiancheng, YANG Li, et al. Design and experiment of embryo side orientation device of maize seed based on vibration sorting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 122 - 131. (in Chinese)

[8] ZHOU X, WANG X, WANG H, et al. Method for denoising the vibration signal of rotating machinery through VMD and MODWPT[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6904.

[9] ZHOU T, ZHANG G, LU N, et al. A rotating machinery fault feature extraction approach based on an adaptive wavelet denoising method and synthetic detection index[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(7): 075102.

[10] OLALERE I O, OLANREWAJU O A. Tool and workpiece condition classification using empirical mode decomposition (EMD)

with Hilbert-Huang Transform (HHT) of vibration signals and machine learning models[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(4): 2248.

[11] MANIKUMAR R, SINGAMPALLI R S. Application of EMD based statistical parameters for the prediction of fault severity in a spur gear through vibration signals[J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, 8(2): 2152 – 2170.

[12] 王冬梅, 路敬祎. 非平稳信号的去噪技术研究[J]. *内燃机与配件*, 2017(6): 133 – 134.
WANG Dongmei, LU Jingyi. Research on nonstationary signal denoising technology[J]. *Internal Combustion Engine and Parts*, 2017(6): 133 – 134. (in Chinese)

[13] 谢锋云, 汪淦, 赏鉴栋, 等. 基于自适应变分模态分解的齿轮箱故障诊断[J]. *推进技术*, 2024, 45(9): 230805.
XIE Fengyun, WANG Gan, SHANG Jiandong, et al. Gearbox fault diagnosis based on adaptive variational modal decomposition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(9): 230805. (in Chinese)

[14] 曹伟. 基于小波包分解重构的微震信号降噪方法研究与实现[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
CAO Wei. Research and implementation of denoising method for microseismic signals based on wavelet packet decomposition and reconstruction[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[15] 陈志新, 刘鑫, 卢成林, 等. 基于经验小波变换的复杂强噪声背景下弱故障检测方法[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 202 – 208.
CHEN Zhixin, LIU Xin, LU Chenglin, et al. Weak fault detection method in complex strong noise condition based on empirical wavelet transform[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20): 202 – 208. (in Chinese)

[16] 李伟, 季磊磊, 施卫东, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的混流泵流动诱导振动试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 47 – 54.
LI Wei, JI Leilei, SHI Weidong, et al. Experiment of flow induced vibration of mixed-flow pump based on Hilbert-Huang transform[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2): 47 – 54. (in Chinese)

[17] 袁超, 张浩, 凌云汉, 等. 基于小波变换和 S-G 滤波的多尺度平滑预处理方法[J]. *锻压技术*, 2023, 48(6): 140 – 155.
YUAN Chao, ZHANG Hao, LIN Yunhan, et al. Multiscale smoothing preprocessing method based on wavelet transform and S-G filtering[J]. *Forging and Stamping Technology*, 2023, 48(6): 140 – 155. (in Chinese)

[18] 徐方慧, 王祝文, 刘菁华, 等. 联合 EMD 及小波阈值去噪在电成像测井数据中的应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(3): 56 – 65.
XU Fanghui, WANG Zhuwen, LIU Jinghua, et al. Application of de-noising method on electrical imaging logging data based on joint EMD and wavelet threshold[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(3): 56 – 65. (in Chinese)

[19] 秦敏敏. 基于振动信号的滚动轴承故障诊断[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
QIN Minmin. Fault Diagnosis of rolling bearing based on vibration signal[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[20] 孙砚飞, 邹方豪, 纪俊卿, 等. 新小波阈值法与 VMD 相结合的滚动轴承特征提取[J]. *机械设计与制造*, 2024, 3(3): 90 – 93.
SUN Yanfei, ZOU Fanghao, JI Junqing, et al. Feature extraction of rolling bearings based on the combination of new wavelet threshold method and VMD[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2024, 3(3): 90 – 93. (in Chinese)

[21] 何勇, 王红, 谷穗, 等. 一种基于遗传算法的 VMD 参数优化轴承故障诊断新方法[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(6): 184 – 189.
HE Yong, WANG Hong, GU Sui, et al. New fault diagnosis approach for bearings based on parameter optimized VMD and genetic algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(6): 184 – 189. (in Chinese)

[22] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺, 等. 基于改进变分模态分解和 Hilbert 变换的变压器局部放电信号特征提取及分类[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(9): 221 – 235.
ZHU Yongli, JIA Yafei, WANG Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on improved variational mode decomposition and Hilbert transform [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(9): 221 – 235. (in Chinese)

[23] 张杏莉, 卢新明, 贾瑞生, 等. 基于变分模态分解及能量熵的微震信号降噪方法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 356 – 363.
ZHANG Xingli, LU Xinming, JIA Ruisheng, et al. Micro-seismic signal denoising method based on variational mode decomposition and energy entropy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 356 – 363. (in Chinese)

[24] 张韬, 王阳, 王言子, 等. 蜻蜓算法优化的高斯过程回归对锂电池健康状态预测[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, 37(11): 352 – 361.
ZHANG Tao, WANG Yang, WANG Yanzi, et al. Dragonfly algorithm optimized Gaussian process regression for lithium battery health state prediction[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(11): 352 – 361. (in Chinese)

[25] FISCHER J, DOOLAN C. An improved eigenvalue background noise reduction method for acoustic beamforming [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106702.

[26] 王海波, 叶如珊, 杜武. 一种基于 EMD 和小波阈值的桥梁振动信号混合去噪方法[J]. *公路*, 2021, 66(12): 110 – 116.
WANG Haibo, YE Rushan, DU Wu. A hybrid denoising method for bridge vibration signal based on EMD and wavelet threshold[J]. *Highway*, 2021, 66(12): 110 – 116. (in Chinese)

[27] 曲中党, 吴蔚, 贺日政, 等. 基于 S 变换的软阈值滤波在深地震反射数据处理中的应用[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3157 – 3168.

QU Zhongdang, WU Wei, HE Rizheng, et al. Soft threshold filter based on S transform and its application to data processing of deep seismic reflection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3157 – 3168. (in Chinese)

[28] 陈雨. 高地隙喷雾机独立式立轴空气悬架设计方法与特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
CHEN Yu. Research on design methods and characteristics of independent strut type air suspension system for high clearance sprayer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[29] WANG D, ZHU L, YUE J, et al. Application of variational mode decomposition based on particle swarm optimization in pipeline leak detection[J]. Engineering Research Express, 2020, 2(4): 045036.

[30] 陈强,黄声享,王韦. 小波去噪效果评价的另一指标[J]. 测绘地理信息, 2008(5): 13 – 14.
CHEN Qiang, HUANG Shengxiang, WANG Wei. An evaluation indicator of wavelet denoising[J]. Journal of Geomatics, 2008(5): 13 – 14. (in Chinese)

[31] 吕立蕾. 多光谱激光雷达小波去噪效果评价体系[J]. 海洋测绘, 2016, 36(4): 72 – 75.
LÜ Lilei. Evaluation system of wavelet de-noising effect for multispectral LiDAR[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(4): 72 – 75. (in Chinese)

(上接第 230 页)

[12] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT – Connect: an efficient approach to single-query path planning[C] //Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.

[13] 王坤,黄勃,曾国辉,等. 基于改进 RRT – Connect 的快速路径规划算法[J]. 武汉大学学报(理学版),2019,65(3):283 – 289.
WANG Kun, HUANG Bo, ZENG Guohui, et al. Faster path planning based on improved RRT – Connect algorithm[J]. Journal of Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2019, 65(3): 283 – 289. (in Chinese)

[14] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846 – 894.

[15] 姚立健,丁为民,陈玉仑,等. 茄子收获机器人机械臂避障路径规划[J]. 农业机械学报,2008,39(11):94 – 98.
YAO Lijian, DING Weimin, CHEN Yulun, et al. Obstacle avoidance path planning of eggplant harvesting robot manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(11):94 – 98. (in Chinese)

[16] CAO X, ZOU X, JIA C, et al. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 105 – 118.

[17] 张勤,乐晓亮,李彬,等. 基于 CTB – RRT* 的果蔬采摘机械臂运动路径规划[J]. 农业机械学报,2021,52(10):129 – 136.
ZHANG Qin, YUE Xiaoliang, LI Bin, et al. Motion planning of picking manipulator based on CTB – RRT* algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):129 – 136. (in Chinese)

[18] 马冀桐,王毅,何宇,等. 基于构型空间先验知识引导点的柑橘采摘机械臂运动规划[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 100 – 108.
MA Jitong, WANG Yi, HE Yu, et al. Motion planning of citrus harvesting manipulator based on informed guidance point of configuration space[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 100 – 108. (in Chinese)

[19] 熊春源,熊俊涛,杨振刚,等. 基于深度强化学习的柑橘采摘机械臂路径规划方法[J]. 华南农业大学学报,2023,44(3): 473 – 483.
XIONG Chunyuan, XIONG Juntao, YANG Zhen'gang, et al. Path planning method for citrus picking manipulator based on deep reinforcement learning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023,44(3): 473 – 483. (in Chinese)

[20] SADHU A K, KONAR A, BHATTACHARJEE T, et al. Synergism of firefly algorithm and Q-learning for robot arm path planning[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 43: 50 – 68.

[21] HUANG S. Path planning based on mixed algorithm of RRT and artificial potential field method[C] //2021 4th International Conference on Intelligent Robotics and Control Engineering, 2021: 149 – 155.

[22] HU Y, KE W, CHANG L, et al. Research on multi-objective path planning of a robot based on artificial potential field method[J]. International Journal of Wireless and Mobile Computing, 2018, 15(4): 335 – 341.

[23] 胡广锐,孔微雨,齐闯,等. 果园环境下移动采摘机器人导航路径优化[J]. 农业工程学报, 2021,37(9): 175 – 184.
HU Guangrui, KONG Weiyu, QI Chuang, et al. Optimization of the navigation path for a mobile harvesting robot in orchard environment[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 175 – 184. (in Chinese)

[24] 陈秋莲,蒋环宇,郑以君. 机器人路径规划的快速扩展随机树算法综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(16):10 – 17.
CHEN Qiulian, JIANG Huanyu, ZHENG Yijun. Summary of rapidly-exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(16): 10 – 17. (in Chinese)

[25] AN H, HU J, LOU P. Obstacle avoidance path planning based on improved APF and RRT[C] //2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering, 2021: 1028 – 1032.

[26] 吕太之,周武,赵春霞. 采用粒子群优化和 B 样条曲线的改进可视图路径规划算法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018,39(1):103 – 108.
LÜ Taizhi, ZHOU Wu, ZHAO Chunxia. Improved visibility graph method using particle swarm optimization and B-Spline curve for path planning[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2018, 39(1): 103 – 108. (in Chinese)