

基于 CEEMDAN-小波阈值的电容式棉种监测信号降噪方法

杨苗^{1,2} 任玲^{1,2} 王双^{1,2} 李韬^{1,2} 张玉泉^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 针对电容式棉花排种监测中产生的信号含噪声导致排种信息不易提取的问题,提出 CEEMDAN-小波阈值联合降噪方法。根据棉花排种质量检测原理构造含噪仿真信号,对比经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)、集合经验模态分解(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)和自适应噪声完备集合经验模态分解(Complementary ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)去噪法3种传统方法对正常播种、漏播、重播仿真信号的降噪效果;其次将小波阈值去噪法融入 CEEMDAN 去噪法,设计相关系数阈值公式,区分大量含噪的本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF)分量与含有效信号的 IMF 分量,去除含噪 IMF 分量中的噪声且保留更多原始信号的形状特征,漏播、重播信号信噪比(SNR)分别增加 4.950 9、6.849 3 dB,曲线相似度(NCC)分别增加 0.028 0、0.054 9,平滑度(SR)分别减小 0.002 4、0.004 5,改善了单独使用 CEEMDAN 去噪法对漏播、重播信号降噪效果不优的问题。搭建排种信号采集试验平台对所提方法进行验证,结果表明,该方法具有良好的降噪及信号特征还原能力,降噪后可实现对排种数量监测。

关键词: 电容式棉种监测信号; CEEMDAN 去噪; 小波阈值去噪; 齿盘式穴播器

中图分类号: S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0071-11

OSID:



Noise Reduction Method of Capacitive Cotton Seed Monitoring Signal Based on CEEMDAN – Wavelet Threshold

YANG Miao^{1,2} REN Ling^{1,2} WANG Shuang^{1,2} LI Tao^{1,2} ZHANG Yuquan^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China)

Abstract: Aiming at the problem that the signal generated in capacitive cotton seeding monitoring contained noise and thus the seeding information was not easy to be extracted, the CEEMDAN – wavelet threshold joint noise reduction method was proposed. Firstly, according to the detection principle of cotton seedling quality, the noisy simulation signal was constructed, and the empirical mode decomposition (EMD), ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and complementary ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) denoising effects of three traditional methods were compared on normal seeding, missed seeding, and repeat seeding simulation signals. Secondly, the wavelet threshold denoising method was integrated into the CEEMDAN denoising method, and the threshold formula of the correlation coefficient was designed to differentiate a large number of intrinsic mode function (IMF) component with a large number of noisy and IMF components with effective signals, and the noise in the noisy IMF components was removed and more of the shape characteristics of the original signal were retained, and the signal-to-noise ratio (SNR) of the omitted rebroadcasting was increased by 4.950 9 dB and 6.849 3 dB, respectively. The similarity of the curve (NCC) was increased by 0.028 0 and 0.054 9, and smoothness (SR) was decreased by 0.002 4 and 0.004 5, respectively, which improved the problem of the poor noise reduction effect of the CEEMDAN

收稿日期: 2024-10-21 修回日期: 2024-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52165036)、石河子大学高层次人才项目(RCZK2021B17)和石河子大学自主资助校级科研项目(ZZZC202105)

作者简介: 杨苗(1999—),女,硕士生,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: 1952396208@qq.com

通信作者: 任玲(1978—),女,教授,主要从事农业自动化与信息化研究,E-mail: 2542958572@qq.com

denoising method alone on the omitted replay signal. Finally, a rowing signal acquisition test platform was built to validate the proposed method, and the results showed that the method had good noise reduction and signal feature reduction capability, and after noise reduction, it implemented a noise reduction effect on the number of distinguished seeds. The results showed that the method had good noise reduction and signal feature reduction ability, and the noise reduction could realize monitoring of number of sown seeds.

Key words: capacitive cotton seed monitoring signal; CEEMDAN denoising; wavelet threshold denoising; toothed plate dibblers

0 引言

新疆是我国的主要产棉区,获取精确的棉花播种量信息是实现精量播种的重要基础。新疆地区普遍采用穴播器进行棉花播种,存在漏播和重播现象。常用的排种状态检测方法有光电检测法^[1-2]、机器视觉检测法^[3-4]、压电检测法^[5-6]以及电容检测法^[7-12],但目前针对齿盘式穴播器的检测方法主要为光电式和电容法^[13-17]。其中光电式检测法需将激光发射模块和接收模块分别固定在隔种圈内外侧挡板上,通过光线通路是否被切断来判断穴孔内是否携带棉种。此方法精度高但只能判断有无棉种,不能判断棉种数量,因此不能检测到重播现象。电容法检测时依靠其极板间感应电场中棉种体积引起的电量变化,据此可准确判断漏播和重播情况,但其作业现场环境复杂,获得的原始数据夹杂无用信号,如棉种与传感器之间阻抗变化引起的基线漂移、信号采集过程中电源线电容和电感耦合引起的工频干扰等,且棉种为中小粒径种子,产生的电容变化量微小,难以识别和处理,若不及时去除噪声,将会影响棉种数量判定。因此,在电容式排种质量检测中对采集的原始监测数据进行降噪预处理尤为重要。

目前,在电容式播种量检测领域,周利明^[18]使用滑动中值平均滤波算法实现监测籽棉产量电容信号降噪,经过降噪处理后数据波动变小,削弱了假峰信号,提高了寻峰的准确性;刘坤^[19]应用小波阈值去噪法对玉米播种信号进行滤波降噪处理,并在此基础上结合经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)算法进一步对信号进行分解去噪,经去噪处理后,基本滤除了信号中的干扰噪声,后续进行了寻峰处理。

在其他检测领域,针对传感器中的随机噪声,常用的信号去噪方法主要有小波阈值去噪、小波包阈值去噪、EMD算法,其中EMD算法主要用于非线性非平稳信号处理,诸多学者在此基础上进行算法改进,主要有集合经验模态分解(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法、互补集合经验模态分解(Complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)方法以及自适应噪声完备

集合经验模态分解(Complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)方法。由于小波阈值去噪法可以很好地保存信号中的尖峰和突变部分,EMD去噪法可以根据原始信号特点分解成高频到低频分布的有限个本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF),因此常将小波去噪法与EMD及改进EMD算法共同用于信号降噪处理,如EMD-小波阈值、EEMD-小波阈值、CEEMD-小波阈值、CEEMDAN-小波阈值去噪法等算法分别应用于桥梁监测信号^[20]、脉搏波信号^[21]、地震信号^[22]、心电信号^[23]的降噪处理中,均取得了较好的降噪效果。

其中CEEMDAN-小波阈值去噪法将CEEMDAN算法与小波分析法结合,只对含噪多的高频IMF分量进行降噪,在剔除噪声的同时,还较好地保留信号中的有用特征,解决了CEEMDAN分解后直接舍去噪声分量会造成缺失有效信号的缺陷。费鸿禄^[24]、别锋锋^[25]和蔡贫贫^[26]分别将该方法用于爆破振动信号去噪、滚动轴承故障诊断和球磨机振动信号去噪,显著提高了信号分析的准确性。本文提出将CEEMDAN分解法联合小波分析的降噪方法解决电容式排种监测信号的噪声问题,提升检测精度。

针对齿盘式穴播器在棉花播种检测时,输出的漏播、重播电容信号的噪声问题,本文探究一种降噪方法。由于传感器检测位置和信号类型与前人降噪处理时不同,需构造“梯形波”信号,并针对此信号进行处理,提出CEEMDAN分解和小波阈值联合去噪的方法对电容信号进行分解和处理。首先构造仿真信号,加入随机噪声模拟现场采集信号情况,然后分别采用小波阈值去噪与EMD、EEMD、CEEMDAN去噪法对信号进行处理,并分析对比;再采用CEEMDAN-小波阈值结合方法对模拟的原始信号进行仿真降噪,从曲线相似度和信噪比等指标验证该方法有效性。最后搭建试验平台,采集真实电容信号对其进行降噪处理,验证其可行性。

1 齿盘式穴播器结构与工作原理

目前新疆地区棉花播种机中大都采用机械式精

量穴播器,新疆地区普遍使用的棉花精量穴播器类型有齿盘式、夹持式和型孔式3种。由于齿盘式穴播器结构简单,用取种盘代替了以前型孔穴播器中取种盒、拐臂、扭簧等多个零件,且农户可自行更换取种盘以达到不同穴数的要求,经久耐用,作业质量稳定,因此被广泛使用。本文以15穴齿盘式棉花精量穴播器为例,其整体结构如图1所示,主要由定盘总成、取种盘、隔种盘、压盘、分穴盘、鸭嘴总成、动盘总成、种圈总成等组成。

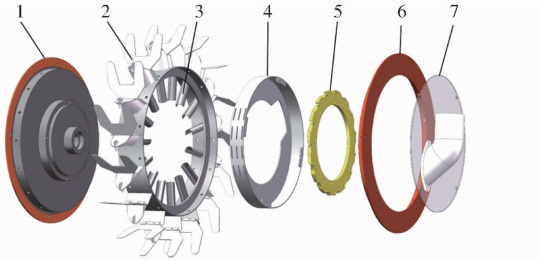


图1 齿盘式穴播器结构图

Fig.1 Structure diagram of toothed disk hole seeder

1. 动盘总成 2. 鸭嘴总成 3. 分种导槽 4. 隔种盘 5. 取种盘
6. 压盘 7. 定盘总成

其工作原理为棉种从定盘上的导种管进入穴播器后,堆积在下方的棉种在取种盘转动下被取种盘带入取种窝,并随之转动至上方,如图2中白色棉种所示;隔种盘固定不动,每个穴孔中的种子会通过隔种盘上方留空部位,即种子暂存区,种子在齿盘转动过程中暂时停留在此处,随后通过齿盘的转动将种子带入相应分种导槽中,因自身重力落入导槽根部。当导槽随动盘从左上方转动至左下方时,棉种通过自身重力落入鸭嘴中,如图2中黑色棉种所示,最后当鸭嘴接触地面,鸭嘴张开棉种落下,实现播种。

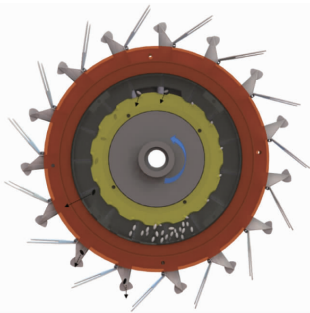


图2 齿盘式穴播器内部工作原理图

Fig.2 Internal working principle of toothed disk hole seeder

电容传感器若监测并识别出棉种每次经过传感器时产生的电容信号变化量,标定出电容变化量与棉种数量之间的关系,则实现农作物的播种检测。但电容式精量穴播器棉花排种监测系统为非平稳非线性系统,且其现场工作环境嘈杂多变,导致其内部传感器所得原始数据包含大量噪声数据,会影响传感器异常信号检测,导致重播漏播检测率不高,因此

本文提出采用 CEEMDAN-小波阈值降噪方法对原始数据进行特征提取与去噪处理,以提高数据质量和检测精度。

2 棉种监测信号降噪方法

2.1 CEEMDAN 分解原理

CEEMDAN 分解是基于 EMD 算法改进后的方法。其中 EMD 分解思想为将一个复杂信号 $x(t)$ 分解为若干有规律可循的信号之和,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中 $x(t)$ ——原始信号

$C_i(t)$ ——分解获得的第 i 个固有模态函数 (IMF)

$r_n(t)$ ——经过分解筛除得到 n 个 IMF 后的信号残余分量

其中, $C_i(t)$ 需满足两个条件:①信号关于时间轴局部对称。②零点与极点数相等或最多相差1。将 $x(t)$ 分解的方法为用插值法找到信号 $x(t)$ 的极大值与极小值,据此得到上包络线 $u(t)$ 和下包络线 $v(t)$,求上下包络曲线的平均曲线

$$m(t) = \frac{1}{2}(u_0(t) + v_0(t)) \quad (2)$$

令 $h_1(t) = x_0(t) - m_0(t)$,若 $h_1(t)$ 满足 IMF 条件,则为 $C_1(t) = h_1(t)$,否则用 $h_1(t)$ 代替 $x(t)$,重复以上步骤得到 $h_2(t)$,再进行判断,直到找到满足 IMF 条件的 $h_k(t)$,此时 $h_k(t)$ 为原信号首个 IMF,设为 $C_1(t)$ 。 $r_1(t) = x(t) - C_1(t)$,若 $r_1(t)$ 不满足条件; $r_1(t)$ 为单调信号和 $r_1(t)$ 小于预先给定值,则将 $r_1(t)$ 看作新的 $x(t)$ 再进行分解,得到新的 $C_2(t)$ 和 $r_2(t)$,有 $r_1(t) = C_2(t) + r_2(t)$,直到得到满足条件的 $r_n(t)$,则有

$$\begin{aligned} x(t) &= C_1(t) + r_1(t) = C_1(t) + C_2(t) + r_2(t) = \\ &= C_1(t) + C_2(t) + \cdots + C_n(t) + r_n(t) = \\ &= \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \end{aligned} \quad (3)$$

CEEMDAN 分解是在 EMD 算法基础上在分解过程中加入正态分布的高斯白噪声,具体步骤如下:确定添加噪声的数量 M ,得到 M 个新的原始信号

$$x_m(t) = x(t) + \beta E_M(w(t)) \quad (4)$$

式中 β ——噪声强度 $w(t)$ ——白噪声

E_M ——第 M 次加入的噪声

对 M 个初始量采用 EMD 算法得到第 1 阶剩余分量 $r_1(t), r_2(t), \dots, r_M(t)$,求均值得到一阶平均剩余分量

$$\overline{r_1(t)} = \frac{1}{M}(r_1(t) + r_2(t) + \cdots + r_M(t)) \quad (5)$$

由公式

$$\overline{C_1(t)} = x(t) - \overline{r_1(t)} \quad (6)$$

可求出第 1 阶平均 IMF 分量,再令 $\overline{r_1(t)} = x(t)$,重复以上步骤,依次得到第 2 阶平均 IMF 分量 $\overline{C_2(t)}$ 、第 3 阶平均 IMF 分量 $\overline{C_3(t)}$ 、 $\dots$,直到 $\overline{r_k(t)}$ 不能再被分解为止,其中 k 为平均剩余分量阶数。

2.2 小波阈值去噪基本原理

小波阈值去噪基本思想为:将信号进行小波变换后,有效信号所产生的小波系数较大,并且大于噪声的小波系数,这样就能通过设置一个合适的阈值,来保留大于阈值的小波系数。小于阈值的则认为是噪声产生的,将小波系数置为 0,就能较好地抑制噪声,同时只是稍微损伤有效信号。

小波阈值去噪过程中的重点在于小波基及阈值函数选择。在工程中最常用的两种去噪小波基为 sym N 小波和 db N 小波,其中 N 为小波基的消失矩,支撑集(下文简称为支集)长度为 $2N - 1$ 。sym N 小波由 db N 小波改进而来,在连续性、支集长度、滤波器长度等方面与 db N 小波一致,当 N 大于 3 时, sym N 小波相对 db N 小波具有更好的对称性,一定程度上能够减少对信号进行分析和重构时的相位失真,考虑到支集长度过长会引起边界问题,因此选用 sym4 小波作为小波基。阈值函数常用的有软阈值和硬阈值,硬阈值函数是指对于给定的阈值 T ,当小波系数绝对值小于 T 时令其为零,当小波系数绝对值大于阈值时保持该小波系数不变;软阈值函数是指对于给定阈值 T ,当小波系数绝对值小于 T 时,将该小波系数置零,大于 T 时令其值减去阈值。但硬阈值去噪不光滑,而软阈值去噪连续性好,光滑度较好。通过综合对比,选择软阈值去噪。

对待去噪信号 $S(n)$ 消噪过程一般步骤分为:①选择一个合适的小波函数,然后对 $S(n)$ 进行 N 层小波分解。②选择一个合适的阈值,用阈值函数对每一层系数进行量化。③根据小波分解的第 N 层低频系数和每一层的高频系数,实现信号的小波重构。

2.3 CEEMDAN-小波阈值去噪方案

小波阈值去噪法和 CEEMDAN 降噪法联合的方法有 3 种:①先将信号 CEEMDAN 分解,再对每个 IMF 分量及残余项进行小波阈值去噪。②信号先 CEEMDAN 去噪,再对处理后信号小波阈值去噪。③信号先小波阈值去噪,再对处理后信号 CEEMDAN 去噪。其中方法①去噪稳定性效果最好,本文将采用此方法进行仿真分析。结合该方法先通过 CEEMDAN 分解得到多个本征模态分量,利用相关系数筛选出包含噪声的模态分量,然后利用

小波阈值降噪方法对含有噪声的模态分量进行处理。最后将未经处理的模态分量与去噪完成的分量重构得到最终纯净的棉种监测信号。

综上所述,本文所提出的基于小波阈值去噪和自适应添加噪声的完整集合经验模态分解的特征提取方法如图 3 所示,具体步骤为:①将原始信号进行 CEEMDAN 分解。②根据相关系数阈值法确定 IMF 分量分界点,识别有用分量和噪声分量。③将全噪声的 IMF 分量剔除,对含有有用信号的噪声分量进行小波去噪。④将去噪后的噪声 IMF 分量与有用信号主导的 IMF 分量进行合并,重构出降噪后信号。

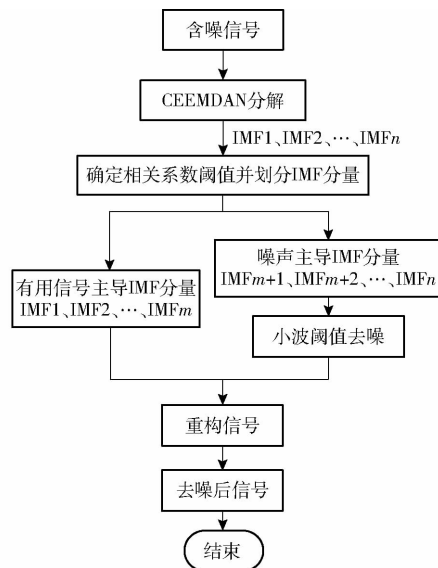


图 3 CEEMDAN-小波阈值去噪流程图

Fig. 3 Flowchart of CEEMDAN-wavelet thresholding denoising

3 仿真分析与验证

为验证 CEEMDAN-小波阈值联合去噪方法对于本信号特征的可行性,构造一组含噪仿真信号,然后分别对含噪信号进行 EMD、EEMD、CEEMDAN 去噪,并使用信噪比(SNR)、曲线相似度(NCC)以及平滑度指数(SR)3个评价指标对以上方法的降噪效果进行分析对比,根据分析结果采用 CEEMDAN-小波阈值降噪方法对信号进行处理并对仿真结果进行分析。

3.1 仿真信号构造

仿真信号以叉指电容传感器对棉种播种量进行检测的过程为背景,其中传感器镶嵌在 15 穴齿盘式棉花精量穴播器隔种盘上。当棉种随穴播器携种结构(穴孔)经过叉指电容传感器时,会周期性产生电容变化,穴播器结构及传感器安装位置如图 4a 所示,棉种经过传感器过程如图 4b 所示。

将 Maxwell 仿真软件中棉种从开始进入传感器检测区域到完全离开产生的电容变化量数据作为一

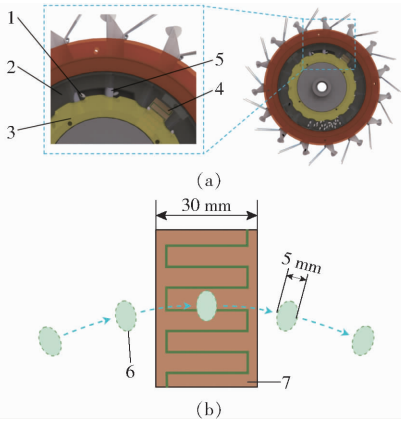


图 4 穴播器结构及检测过程示意图

Fig. 4 Schematics of hole seeder structure and process

1、6. 棉种 2. 隔种盘 3. 取种盘 4、7. 叉指电容传感器 5. 分穴盘

个周期的原始数据。原始数据变化规律类似梯形, 选取边沿可变、脉宽可控的梯形波作为仿真信号进行考察, 将梯形波用傅里叶级数表示, 则仿真信号表达式为

$$\begin{cases} f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{+\infty} (a_m \cos(m\Omega t) + b_m \sin(m\Omega t)) \\ a_m = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \cos(m\Omega t) dt \\ b_m = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) \sin(m\Omega t) dt \\ a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} f(t) dt \end{cases} \quad (7)$$

其中 $f(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t)$

$$f_1(t) = \frac{A}{m_1} t \quad f_2(t) = A$$

$$f_3(t) = -\frac{A}{P} t + \frac{A}{P} m_1 + \frac{A}{P} h$$

$$\Omega = 2\pi/T$$

式中 A ——振幅 t ——时间

m ——谐波次数 T ——周期

t_1 ——积分区间起点 m_1 ——上升时间

Ω ——基频 h ——正脉宽

a_m, b_m ——余弦、正弦分量幅度

P ——下降时间

a_0 ——函数 1 个周期内平均值

穴播器角速度 ω 为 3.14 ~ 4.17 rad/s, 选取最大值 4.17 rad/s, 则棉种运动一周时间为 0.24 s; 棉种运动轨迹半径为 105 mm, 则两穴孔间距离约为 43.96 mm; 叉指传感器宽度为 30 mm, 棉种最大宽度为 5 mm; 棉种从进入传感器检测区域到下一粒棉种进入检测区域的过程为一个周期, $T = 0.10048$ s, 棉

种进出传感器时间即梯形波的上升下降时间, 为 $m_1 = P = 0.0114$ s, 棉种完全处在传感器中的时间即梯形波的正脉宽, $h = 0.069$ s, 棉种完全处在传感器中的电容变化量约为 0.06 pF, 则梯形波的振幅 $A = 0.06$ pF。用梯形波 5 个周期模拟出 5 粒棉种随取种齿盘依次经过传感器的工作状态, 结果如图 5a 所示。在理论波形上加入方差为 0.005 的扰动噪声, 加入噪声后原始信号信噪比为 2.5798 dB, 加噪信号如图 5b 所示。

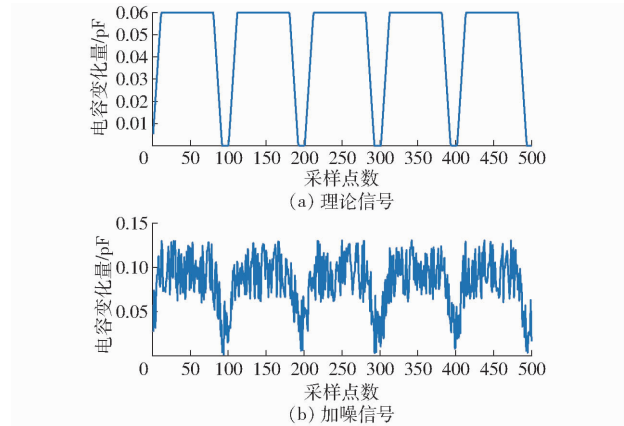


图 5 理论信号及加噪信号变化曲线

Fig. 5 Theoretical signal and added noise signal

3.2 仿真信号去噪性能分析

3.2.1 降噪指标与 IMF 分量阈值公式

良好的去噪方法需保持去噪信号的特征位置和形状不变, 并且得到的曲线尽可能平滑。为研究各算法降噪效果, 选用 SNR、NCC、SR 进行降噪效果评价。SNR 反映算法去噪能力, 值越大去噪能力越好。NCC 反映两曲线相似度, 其值在 -1 ~ 1 之间, 其值越靠近 1 说明两曲线整体趋势越相似。SR 可衡量信号曲线平滑度, 其值越小说明平滑度越好。

通过大量仿真验证发现, 信号被分解后, 相邻 IMF 分量的相关系数向上发生跃变最大的 IMF 分量以及之后的分量是具有原始信号特征的分量, 据此得出相关系数阈值公式为

$$\lambda = \max(|y_{i-1} - y_i| - |y_i - y_{i+1}|) \quad (2 \leq i \leq N_1) \quad (8)$$

式中 y_i ——第 i 阶分解 IMF 分量与原信号相关系数

λ ——相邻相关系数变化差值

N_1 ——总分解阶数

将 λ 取最大值时的 i 记为 i' , i' 即为相关系数阈值, 大于等于 i' 的则为有用分量, 小于 i' 则为噪声分量。以此判断噪声主导分量和有用信号主导分量。

3.2.2 不同降噪方法仿真

为验证算法有效性, 利用 Matlab 仿真平台进行

仿真。数据采样点数取 500,采样时间取 100 ms,并且在波形上叠加标准白噪声,以降低信号信噪比。分别采用 EMD 去噪方法、EEMD 去噪方法和 CEEMDAN 去噪方法对仿真信号进行去噪处理。图 6 为含噪信号与 EMD、EEMD、CEEMDAN 去噪效果图,其中 CEEMDAN 算法参数为:噪声权重 Nstd 为 0.4,噪声添加次数 NR 为 7,分解出分量的最大数量 MaxIter 为 500;EEMD 算法参数为:噪声权重 Nstd 为 0.5,噪声添加次数 NE 为 500;计算出 3 种降噪算法各 IMF 分量的相关系数,根据式(8)剔除噪声主导的 IMF 分量,合并剩余有效信号主导分量。

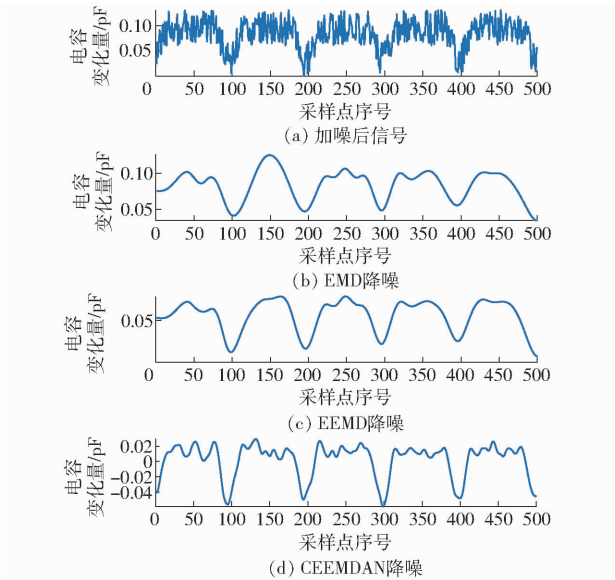


图 6 EMD、EEMD、CEEMDAN 降噪对比
Fig. 6 Comparison of EMD, EEMD, CEEMDAN noise reduction

分别计算 EMD 和 EEMD、CEEMDAN 去噪方法处理后信号的 SNR、NCC、SR 指标,如表 1 所示。结合图 6 可得出,EMD 和 EEMD 受信号序列端点效应的影响较大,使分解产生端点摆动和虚假模式,将会导致在波峰判定中出现误差;在同样的重构方法下,CEEMDAN 去噪法的 SNR 为 11.356 6 dB,与 EMD 和 EEMD 相差不大,SR 为 0.010 2,说明其光滑性相对较差;CEEMDAN 去噪法的 NCC 为 0.776 3,比 EMD 去噪法高 0.108 3,比 EEMD 高 0.105 0。因本文对电容信号降噪目的是通过去噪处理后能够清楚划分出不同数量棉种相对应的电容量范围,确定阈值,以便通过阈值判定棉种的播种情况,所以更侧重去噪方法对信号形状特征的还原能力,因此 NCC 为最重要的判定依据。在指标上,CEEMDAN 去噪法 NCC 优于其他两种算法,更利于对电容阈值的划分,如图 6 中 CEEMDAN 去噪结果所示,电容变化幅值可以相对平稳地维持在“梯形”上底,据此可确定

出一粒棉种产生的电容量范围,符合去噪目标。因此本文采用 CEEMDAN 作为信号降噪主方法。

表 1 各类降噪算法降噪评价指标
Tab. 1 Evaluation indexes of noise reduction by various types of denoising algorithm

评价指标	EMD	EEMD	CEEMDAN
SNR/dB	11.666 1	11.535 7	11.356 6
NCC	0.668 0	0.671 3	0.776 3
SR	0.002 5	0.002 7	0.010 2

以上处理均针对正常排种时一穴一粒棉种的信号特征进行仿真分析,但棉花实际排种时会产生漏播和重播情况,即空穴和一穴两粒棉种,此时监测信号不是规律的“梯形”,信号会产生突变,因此还需要验证此时 CEEMDAN 去噪法对突变信号的降噪情况。模拟 5 穴中有 1 个空穴和重播的含噪信号,对此信号使用 CEEMDAN 去噪法进行降噪。其中 CEEMDAN 算法参数中阈值方差为 0.2,第 1 次迭代阈值为 7,迭代次数为 500。

图 7 表明,CEEMDAN 去噪法在提取漏播信号时会出现轻微的端点摆动,在提取重播信号时对原信号的形状还原效果不好,信号失真,影响对棉种数量的判定,因此需要将含有噪声的高频 IMF 分量先进行降噪再重构信号,而不是直接将其舍去,采用小波阈值法对高频 IMF 分量进行降噪。

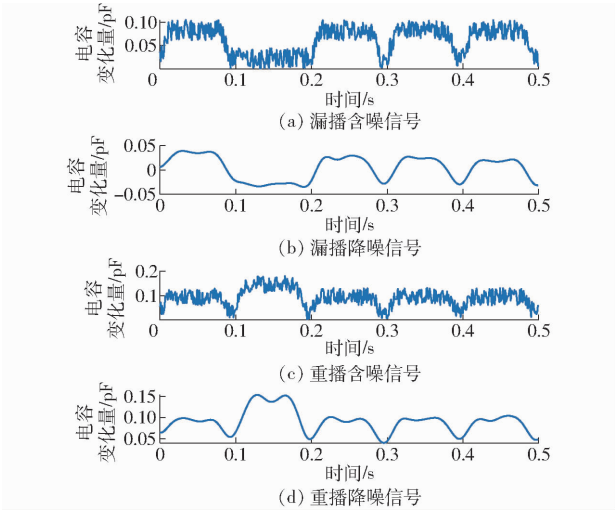


图 7 CEEMDAN 算法重播、漏播时降噪结果
Fig. 7 CEEMDAN algorithm replay and missed broadcast noise reduction results

3.2.3 CEEMDAN-小波阈值法去噪

将两种算法有效结合,能更好地保留原信号形状特征。对漏播、重播信号进行 CEEMDAN-小波阈值法去噪。上述仿真中已经对含噪信号进行 CEEMDAN 分解,以漏播信号为例,将漏播信号分解为若干子信号,得到 8 个 IMF 分量,分解后的各个

IMF 分量如图 8 所示。

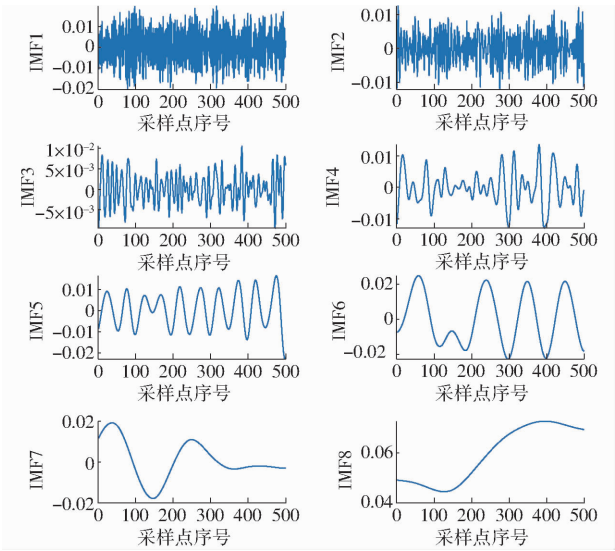


图 8 CEEMDAN 分解结果

Fig. 8 CEEMDAN decomposition results

为区分出噪声主导分量和有用信号主导分量，用相关系数 R 计算 CEEMDAN 分解后的每一个 IMF 分量与未去噪信号的相关程度，若 R 绝对值越接近 1，则表明此分量以有用信号为主导信号，需要保留；若 R 绝对值越接近 0，则表明此分量含噪声信号较多，与原信号为弱相关关系，需要对此分量进行进一步去噪。IMF1 ~ IMF8 与去噪信号相关系数分别为 0.474 0、0.319 0、0.235 9、0.358 6、0.338 2、0.594 6、0.477 3、0.255 2，如图 9 所示。

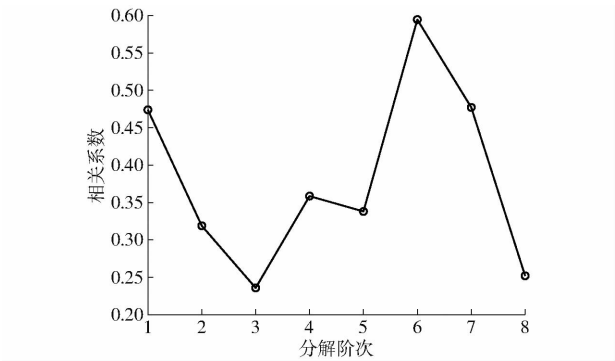


图 9 CEEMDAN 各 IMF 分量相关系数

Fig. 9 Correlation coefficient for each IMF component of CEEMDAN

由式(8)计算可得 $i' = 5$ ，将 CEEMDAN 分解后 IMF1 ~ IMF4 分量进行小波阈值去噪处理，其中小波基选择 sym4 小波，阈值函数选择软阈值函数，经处理后与 IMF5 ~ IMF8 相加进行重构，作为去噪信号，结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出，CEEMDAN-小波阈值联合降噪后的信号与理想信号形状基本相似，尤其在波谷处，几乎与理想信号重合，还原了漏播重播的信号特征。根据表 2，漏播、重播信号的 SNR 分别增加

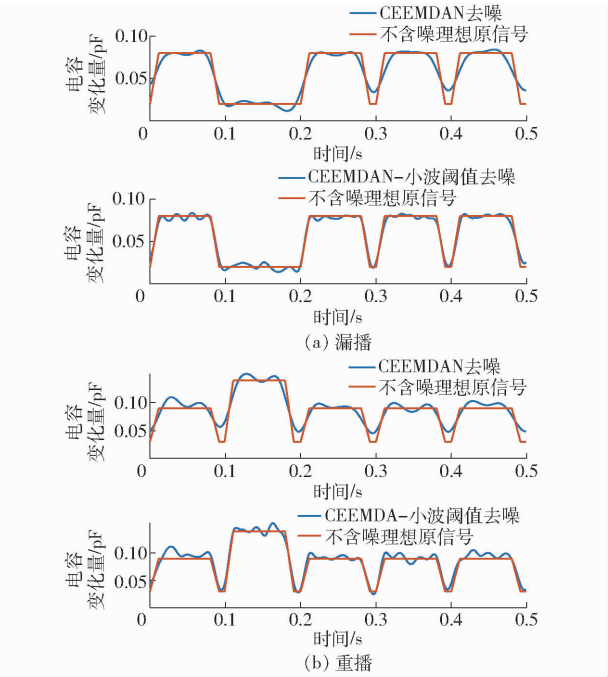


图 10 CEEMDAN-小波阈值算法漏播、重播降噪结果

Fig. 10 CEEMDAN-wavelet thresholding algorithm leakage and replay noise reduction results

4.950 9、6.849 3 dB，NCC 分别增加 0.028 0、0.054 9，SR 分别减小 0.002 4、0.004 5，各指标均有不同程度改善，说明 CEEMDAN-小波阈值去噪后的信号与原始信号更为接近，更能保留原始信号中的信息，也证明了 CEEMDAN-小波阈值去噪方法对突变信号的有效性。

表 2 重播、漏播时信号降噪评价指标

Tab.2 Evaluation indexes of signal noise reduction in case of repeated seeding and missed seeding

处理方法	信号特征	SNR/dB	NCC	SR
CEEMDAN	漏播	7.486 2	0.903 8	0.006 1
	重播	6.694 3	0.790 9	0.013 8
CEEMDAN-小波阈值	漏播	12.437 1	0.931 8	0.003 7
	重播	13.543 6	0.845 8	0.009 3

4 试验验证

4.1 信号采集与处理系统设计与集成

4.1.1 信号采集系统结构设计

为进一步验证本文所提方法的有效性，设计电容脉冲信号采集系统，对实际电容信号进行去噪。系统主要包括单片式 E 型叉指电容传感器和微小电容检测电路组成的信号采集模块、STM 单片机模块、电源模块、显示模块组成。STM32 单片机通过 SPI 协议与 PCAP04 进行通讯，测得电容后通过 GPIO 对显示模块进行控制，使其显示测量结果。外部通过 USB 接口连接单片机内 SWD 进行下载调

试,同时 USB 接口也可用来充电。采集系统结构框图如图 11 所示。

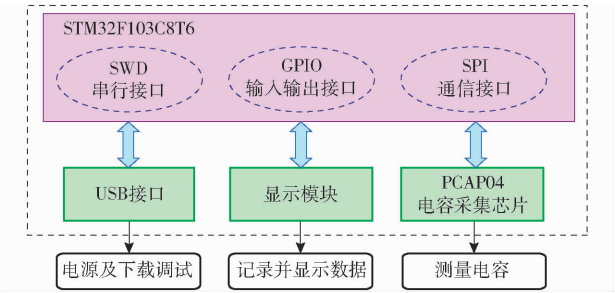


图 11 微电容检测系统结构框图

Fig. 11 Microcapacitance detection system

在检测系统总体结构中,微小电容检测电路核心为专用集成微小电容检测芯片,能够将皮法级的待测微小电容转换成数字信号,单片机用来将接收的数字信号通过串口传送给计算机,在串口助手中采集电容脉冲信号。检测原理为电容极板间的介质由空气变成一定体积的棉种,电容信号采集模块通过同步采集电容极板间的电容信号,实现棉种有无的精准检测。在此过程中,当电容采集模块依据采样频率采集到一个电容信号时,电容采集芯片给单片机一个下降沿信号而产生中断,单片机读取电容信号,再将采集到的电容信号进行处理,处理结束后得到棉种电容信息。根据叉指电容传感器检测种子产生电容变化量的精度,选取德国 ACAM 公司 PCAP04-AD 型微小电容采集芯片,单片机选择 STM32F103C8T6。

4.1.2 信号采集电路设计

为准确对棉种所引起的电容变化量信号进行分析和处理,进行信号采集电路设计,如图 12 所示。在右侧的 PCAP04 芯片外围电路中,PC0 和 PC1 接参考电容 T1、T2,PC2 与 PC3 接待测电容 C_test,通

过屏蔽线与 PCAP04 连接;通过 SSN_PG0 接口采用 SPI 总线实现电容检测芯片与 STM32 单片机的通讯;PCAP04 芯片需要 1.8 V 和 3.3 V 电压供电,因此采用 RT9166 线性稳压器,可将 3.3 V 降压转为 1.8 V;信号采集与处理主要电路原理图如图 12 所示。

4.1.3 信号处理与数据显示方法

上述过程可通过传感器将电容信号采集到单片机,此时需要单片机对数字信号进行降噪处理。首先将 CEEMDAN-小波阈值降噪方法编译为单片机嵌入式程序烧录存储到 Flash 中,当监测数据传输到下位机,通过 DMA 控制器进行中断处理,然后下位机使用降噪程序对数据进行降噪处理,同时需要将这些采集到的数据上传到 Matlab,并借助 Matlab 对数据实时绘制成曲线通过图窗界面显示,并可以存放在 Excel 表格中。

4.2 排种检测装置与系统验证

4.2.1 验证平台搭建

为验证微小电容采集模块检测性能和降噪方法有效性,搭建系统性能试验台,试验台主要由电机驱动模块、微小电容采集模块、上位机、下位机、叉指电容传感器、15 穴齿盘式棉花穴播器试验模型机组成,如图 13 所示。选用适宜北疆早熟棉区域种植的“新陆早 78 号”品种籽棉作为试验样品,该样品取自石河子市,含水率约为 10%。微小电容采集模块通过屏蔽式线缆与传感器相连,实时采集传感器电容输出值,电机驱动模块控制电机转速,模拟取种盘工作状态。

4.2.2 平台准确性测试

在上述信号采集模块中测试本试验平台有效性。根据课题组已有研究,所采用的叉指电极空场

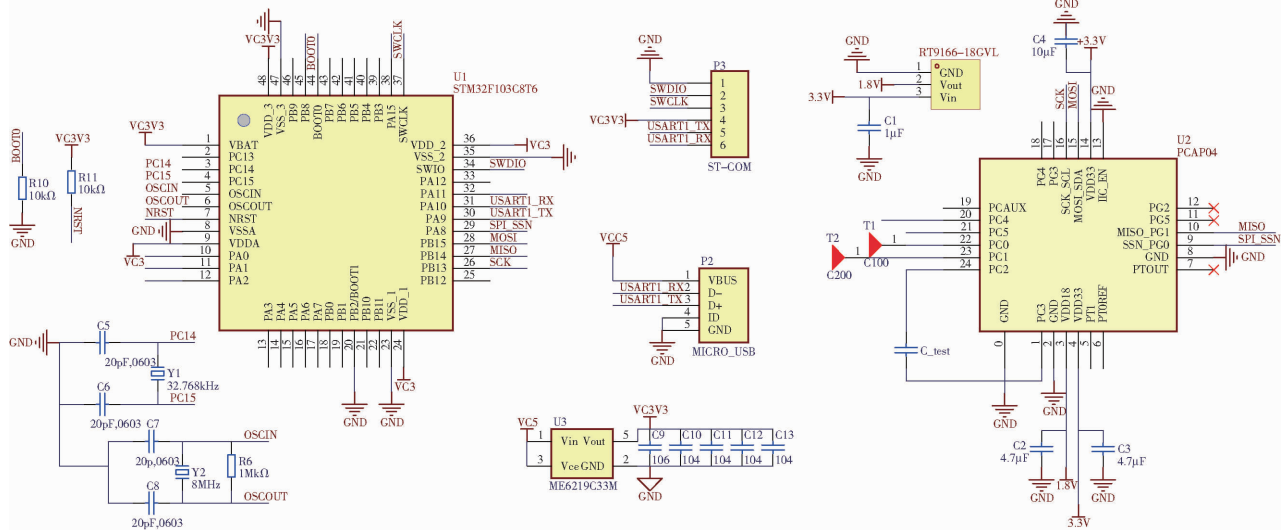


图 12 电容信号采集电路

Fig. 12 Capacitance signal acquisition circuit diagram

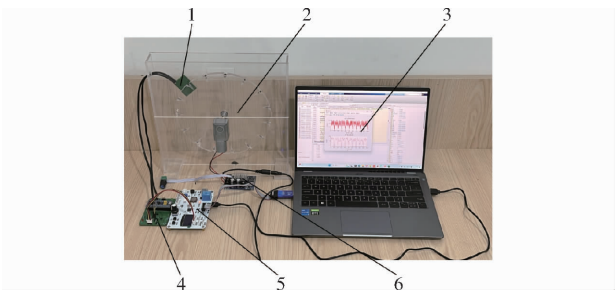


图 13 试验平台

Fig. 13 Test platform

1. 叉指电容传感器 2. 齿盘式棉花穴播器试验模型机 3. 上位机 4. 微小电容采集模块 5. 下位机 6. 电机驱动模块

电容为 6 pF,因此重点测试检测系统在空场时电容附近的检测准确度。并选用 3 个标称电容 5.6、6.0、6.8 pF,将叉指电容传感器换为以上标称电容进行检测,验证设计电路功能。各电容重复检测 5 次,结果如表 3 所示。

表 3 标称电容测量值及与标称值误差

Tab.3 Nominal capacitance measurements and errors from nominal value

参数	标称电容/pF		
	5.600 0	6.000 0	6.800 0
测量电容/pF	5.655 3	6.010 2	6.821 4
	5.656 7	6.010 6	6.822 2
	5.658 1	6.009 5	6.820 9
	5.657 9	6.010 3	6.821 5
	5.658 8	6.012 8	6.820 3
相对误差/%	1.024 3	0.166 0	0.312 6

由表 3 可见,在 6 pF 附近,相对误差为 0.166 0%,棉种可带来约 10^{-2} pF 数量级的电容变化量,满足后续测量要求。

4.3 检测装置降噪性能试验

4.3.1 电容变化量与棉种数量关系

为验证本文降噪方法应用在棉花排种信号特征时检测系统的有效性和准确性,开展棉种数量与电容变化量关系试验。电容变化量与棉种体积呈线性关系,因此可通过检测电容变化量来判别棉种数量,采用 4.2.1 节试验装置模拟排种器在转动时正常播种、空穴和重播时是否可以根据电容输出量准确判定棉种数量。

根据播种机规定作业速度计算出穴播器转速为 25 ~ 40 r/min,因此将电机速度调到 30 r/min,符合新疆地区棉花播种农艺要求。分别设计穴盘穴孔内空穴、1 粒棉种、2 粒棉种 3 种情形,使取种盘携带棉种匀速转动,使 5 个穴孔都经过传感器检测区域 1 次,观察输出的电容变化量情况。分别对以下 3 种情况进行降噪处理:留 1 个空穴其余放置 1 粒棉种、

1 个放置 2 粒棉种其余放置 1 粒棉种和 5 穴皆放置 1 粒棉种。不同情况电容变化量及降噪结果如图 14 所示。

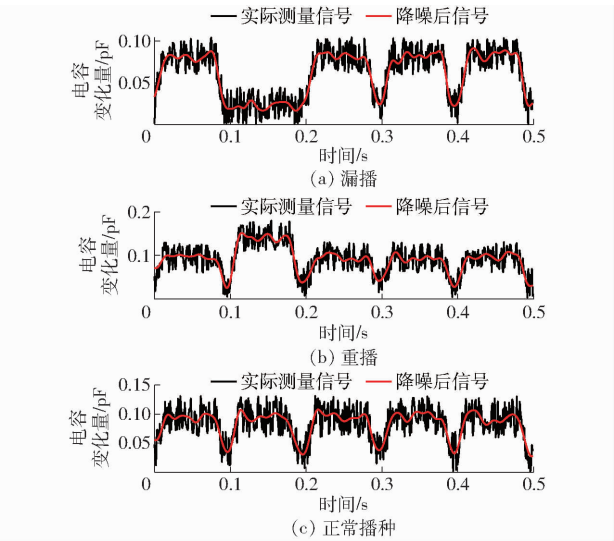


图 14 不同排种情况下电容变化量及降噪结果

Fig. 14 Capacitance change values and noise reduction results for different row types

从降噪后信号中取不同排种情况下的电容输出波峰值,得到棉种数量与电容的响应曲线,如图 15 所示。其中从空穴时电容中随机采样一组数值,结果如图 15 中红色曲线所示;1 粒和 2 粒棉种分别采样 3 组数值,1 粒棉种电容结果如图 15 中蓝色曲线所示,2 粒棉种电容如图 15 中绿色曲线所示。

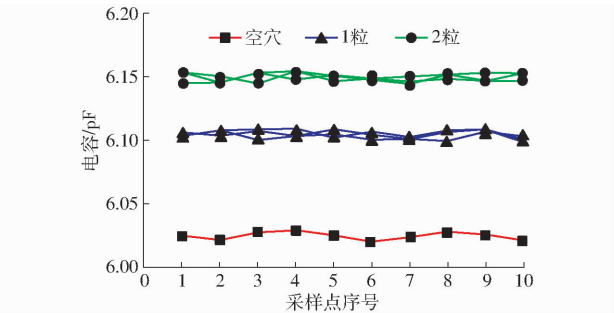


图 15 不同棉种数电容变化曲线

Fig. 15 Capacitance for different numbers of cotton types

4.3.2 试验结果

图 15 为当棉种处在检测区域时,1 粒棉种和 2 粒棉种通过传感器时产生的电容峰值采样点,可看出电容均达到了基本平稳的状态,其中不同数组中的电容增量存在波动,分析其原因是棉种体积不一致造成。由此可根据输出的电容信号判定棉种数量,以及判别漏播、重播情况,这证明采用本文降噪方法对实际测量信号进行处理后可判别棉种数量,方法合理可行。

5 结 论

(1)分析了齿盘式穴播器工作过程和棉花排种监测过程中叉指电容传感器检测原理,根据棉种运动轨迹和在 Maxwell 中产生的电容变化量构造了梯形波作为理想信号,并将添加高斯随机噪声后的梯形波作为原始仿真信号。

(2)对构造的仿真信号分别进行小波阈值去噪、EMD 去噪、EEMD 去噪以及 CEEMDAN 去噪,通过信噪比(SNR)、曲线相似度(NCC)以及平滑度指数(SR)3个参数对降噪效果进行分析,结果表明 CEEMDAN 去噪法去噪效果最好,尤其在曲线相似度最有优势,更利于对真实电容变化量的判定。

(3)考察了 CEEMDAN 去噪方法在突变信号即漏播、重播时信号的降噪效果,结果表明会产生信号

失真现象,因此考虑在 CEEMDAN 分解后加入小波阈值去噪对高频分量进行进一步去噪再重构。为此设计了相关系数阈值公式以区分噪声主导的分量和有用信号主导的分量。结果表明:CEEMDAN-小波阈值联合去噪法漏播重播信噪比分别增加 4.950 9、6.849 3 dB,曲线相似度分别增加 0.028 0、0.054 9,平滑度分别减小 0.002 4、0.004 5,在信噪比和信号曲线相似度上得到了很好的改善,证明了联合去噪方法对突变信号的有效性。

(4)搭建了棉种电容信号采集系统作为试验平台,并对其进行系统准确性试验,结果表明系统相对误差为 0.166 0%,满足测量要求。采用此试验平台对 CEEMDAN-小波阈值联合去噪法的实际信号降噪效果进行验证,试验结果表明经过处理后电容变化量明显,可根据棉种数量进行分层,便于后续阈值划分并实现排种质量的实时监测。

参 考 文 献

- [1] 张顺,王浩宇,苑严伟,等.腔道式水稻排种器漏播检测系统设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(4):51-62.
ZHANG Shun, WANG Haoyu, YUAN Yanwei, et al. Design and performance test of loss sowing detection system for cavity-type rice seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 51-62. (in Chinese)
- [2] 和贤桃,郝永亮,赵东岳,等.玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(10):19-27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19-27. (in Chinese)
- [3] 陈进,边疆,李耀明,等.基于高速摄像系统的精密排种器性能检测试验[J].农业工程学报,2009,25(9):90-95.
CHEN Jin, BIAN Jiang, LI Yaoming, et al. Performance detection experiment of precision seed metering device based on high-speed camera system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 90-95. (in Chinese)
- [4] 赵郑斌,刘昱程,刘忠军,等.基于机器视觉的穴盘精密播种性能检测系统[J].农业机械学报,2014,45(增刊):24-28.
ZHAO Zhengbin, LIU Yucheng, LIU Zhongjun, et al. Performance detection system of tray precision seeder based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 24-28. (in Chinese)
- [5] 王金武,张翌,王菲,等.基于压电冲击法的水稻穴直播监测系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(6):74-84,99.
WANG Jinwu, ZHANG Zhao, WANG Fei, et al. Design and experiment of monitoring system for rice hill-direct-seeding based on piezoelectric impact method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 74-84, 99. (in Chinese)
- [6] 丁幼春,陈礼源,董万静,等.油菜宽幅播种作业监测系统设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(13):38-45.
DING Youchun, CHEN Liyuan, DONG Wanjing, et al. Design and experiment of the sowing monitoring system for a wide-width rapeseed planter[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 38-45. (in Chinese)
- [7] 周利明,张小超,苑严伟.小麦播种机电容式排种量传感器设计[J].农业工程学报,2010,26(10):99-103.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Design of capacitance seed rate sensor of wheat planter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 99-103. (in Chinese)
- [8] 周利明,王书茂,张小超,等.基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J].农业工程学报,2012,28(13):16-21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16-21. (in Chinese)
- [9] 周利明,李树君,张小超,等.基于电容法的棉管籽棉质量流量检测[J].农业机械学报,2014,45(6):47-52.
ZHOU Liming, LI Shujun, ZHANG Xiaochao, et al. Detection of seedcotton mass flow based on capacitance approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 47-52. (in Chinese)
- [10] 周利明,马明,苑严伟,等.基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(24):44-51.
ZHOU Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 44-51. (in Chinese)
- [11] 田雷.基于电容传感器的玉米精量播种机排种性能监测系统研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2018.
TIAN Lei. Research on monitoring system for performance of corn precision seeder based on capacitance sensor seeding[D].

Daqing:Heilongjiang Bayi Agricultural University,2018. (in Chinese)

[12] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1) :66 – 74.
CHEN Jianguo,LI Yanming,QIN Chengjin,et al. Design and test of capacitive detection system for wheat seeding quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1) :66 – 74. (in Chinese)

[13] 张学军,张海涛,史增录,等. 棉花精量穴播器取种状态监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(5) :9 – 19.
ZHANG Xuejun,ZHANG Haitao,SHI Zenglu,et al. Design and experiments of seed pickup status monitoring system for cotton precision dibblers[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(5) :9 – 19. (in Chinese)

[14] 焦丙炎,史增录,张学军,等. 棉花播种监测系统设计与试验[J]. 浙江农业学报,2024,36(6) :1 – 15.
JIAO Bingyan,SHI Zenglu,ZHANG Xuejun,et al. Design and experimentation of cotton sowing monitoring system[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2024,36(6) :1 – 15. (in Chinese)

[15] 徐洛川,胡斌,罗昕,等. 又指电容式棉花穴播取种状态监测系统研制[J]. 农业工程学报,2022,38(23) :50 – 60.
XU Luochuan,HU Bin,LUO Xin,et al. Development of a seeding state monitoring system using interdigital capacitor for cotton seeds[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(23) :50 – 60. (in Chinese)

[16] XU Luochuan,HU Bin,LI Junwei,et al. An efficient seeding state monitoring system of a pneumatic dibbler based on an interdigital capacitive sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,209:1 – 12.

[17] REN Ling, WANG Shuang, HU Bing,et al. Seed state-detection sensor for a cotton precision dibble[J]. Agriculture,2023, 13(8) :1515.

[18] 周利明. 基于电容法的棉花产量和播种量检测技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
ZHOU Liming. Research on detection of yield and seeding rate of cotton based on capacitive method[D]. Beijing: China Agricultural University,2014. (in Chinese)

[19] 刘坤. 玉米精量播种装置排种性能电容法检测机理与方法研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2019.
LIU Kun. Detection mechanism and methodology of seeding performance of corn precision seeding device based on capacitive method[D]. Daqing:Heilongjiang Bayi Agricultural University,2019. (in Chinese)

[20] 石安平,周吕,王成,等. 结合 EMD 与小波阈值去噪的 GB – RAR 桥梁监测信号去噪[J]. 测绘通报,2022(增刊 2) : 227 – 232,240.
SHI Anping,ZHOU Lü,WANG Cheng,et al. GB – RAR bridge monitoring signal denoising based on EMD and wavelet threshold denoising[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2022(Supp. 2) :227 – 232,240. (in Chinese)

[21] 陈真诚,吴贤亮,赵飞骏. EEMD 结合小波阈值的光电容脉搏波信号降噪[J]. 光学精密工程,2019,27(6) :1327 – 1334.
CHEN Zhencheng,WU Xianliang,ZHAO Feijun. Denoising and implementation of photoplethysmography signal based on EEMD and wavelet threshold[J]. Optics and Precision Engineering,2019,27(6) :1327 – 1334. (in Chinese)

[22] 王姣,李振春,王德营. 基于 CEEMD 的地震数据小波阈值去噪方法研究[J]. 石油物探,2014,53(2) :164 – 172.
WANG Jiao,LI Zhenchun,WANG Deying. A method for wavelet threshold denoising of seismic data based on CEEMD[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2014,53(2) :164 – 172. (in Chinese)

[23] 徐阳,罗明璋,李涛. 基于 CEEMDAN 和小波阈值的 ECG 去噪算法研究[J]. 现代电子技术,2018,41(7) :45 – 48,53.
XU Yang,LUO Mingzhang,LI Tao. Study on ECG signal denoising algorithm based on CEEMDAN and wavelet threshold[J]. Modern Electronics Technique,2018,41(7) :45 – 48,53. (in Chinese)

[24] 费鸿禄,山杰. CEEMDAN –小波阈值法在爆破振动信号处理中的应用[J]. 爆破,2022,39(3) :41 – 47,164.
FEI Honglu,SHAN Jie. Application of CEEMDAN – wavelet threshold method in blasting vibration signal processing[J]. Blasting,2022,39(3) :41 – 47,164. (in Chinese)

[25] 别锋锋,张仕佳,裴峻峰,等. 基于小波阈值与 CEEMDAN 联合去噪的滚动轴承故障模式识别方法研究[J]. 机械设计与制造,2020(2) :68 – 71.
BIE Fengfeng,ZHANG Shijia,PEI Junfeng,et al. Study on the method of wavelet threshold and CEEMDAN in rolling bearing recognize[J]. Machinery Design & Manufacture,2020(2) :68 – 71. (in Chinese)

[26] 蔡改贫,赵小涛,胡显能,等. CEEMDAN –小波阈值联合的球磨机筒体振动信号去噪方法研究[J]. 机械科学与技术, 2020,39(7) :1077 – 1085.
CAI Gaipin,ZHAO Xiaotao,HU Xianneng,et al. Denoising method of vibration signal of ball mill based on CEEMDAN – wavelet threshold combination[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2020,39(7) :1077 – 1085. (in Chinese)