

面向江苏农作的电驱精量播种机工况检测与精准控制优化研究

于佳宁

泰州市农林畜水产品质量检测中心, 江苏 泰州

收稿日期: 2026年1月21日; 录用日期: 2026年2月19日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

本文以江苏高强度耕作、紧凑播种窗口为背景, 从粒距、播深、下压力等关键指标入手, 提出多传感器协同检测和闭环控制方案。依靠NI-CompactDAQ和LabVIEW, 把GNSS、光电、角度、轴销力、微压差、振动和CAN数据融合起来, 形成同步采集、在线解算、可视化监测和TDMS/CSV存储的一体化链路, 给整机性能评价和优化设计赋予连续的数据支撑。根据静态和田间试验结果, 给出耦合补偿、参数整定、工况适配思路, 为江苏稻麦轮作区、苏北旱作区高速精播质量提升提出优化路径。

关键词

电驱精量播种机, 多传感器融合, 工况检测平台, 闭环控制

Optimization of Condition Detection and Precision Control for Electric Drive Precision Seeder for Jiangsu Farming

Jianing Yu

Taizhou Agricultural, Livestock and Aquatic Products Quality Testing Center, Taizhou Jiangsu

Received: January 21, 2026; accepted: February 19, 2026; published: February 26, 2026

Abstract

This paper, set against the backdrop of high-intensity cultivation and compact sowing windows in Jiangsu, proposes a multi-sensor collaborative detection and closed-loop control solution by focusing on key metrics such as row spacing, sowing depth, and downward pressure. Leveraging NI-CompactDAQ and LabVIEW, it integrates GNSS, photoelectric, angular, pin force, micro-differential pressure, vibration, and CAN data to establish an integrated chain of synchronous acquisition, online

calculation, visual monitoring, and TDMS/CSV storage, providing continuous data support for machine performance evaluation and optimization design. Based on static and field test results, it offers insights on coupling compensation, parameter tuning, and operational condition adaptation, proposing optimization pathways to enhance the quality of high-speed precision sowing in Jiangsu's rice-wheat rotation zones and northern dryland areas.

Keywords

Electro-Drive Precision Seed Drill, Multi-Sensor Fusion, Working Condition Detection Platform, Closed-Loop Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

江苏农业机械化基础较好，稻麦两熟与规模化旱作并存，播种窗口短、作业节奏快。高速作业场景里，地表起伏、秸秆回弹与机具振动叠加，容易引起播深漂移与株距波动，进而出现缺苗、断垄。电驱精量播种装备具备独立驱动与可编程优势，能够把“车速变化-排种响应”做成可控链路；但传感器、控制器、执行器之间耦合更紧，标定、调参、评价难度同步上升[1]。围绕“可测-可控-可优化”，本文搭建田间工况智能检测平台，构建速度-转速匹配控制、速度冗余融合与播深-下压力联动补偿思路，并给出湿黏土、秸秆还田与丘陵岗地工况的适配建议，为电驱精播装备提质增效提供支撑。

2. 工况智能检测与数据链路设计

2.1. 参数检测原理与传感器配置



Figure 1. Hardware connection and power supply structure diagram of the detection platform

图 1. 检测平台硬件连接与供电结构图



Figure 2. Physical installation and sensor layout diagram of the detection platform
图 2. 检测平台实物安装与传感器布置图

检测平台以玉米电驱精量播种机典型田间工况为对象，选取速度/位置、排种量、播深、下压力、风压、单体振动、排种盘转速七类参数，形成“质量 - 工况”联合监测体系[2]。作业速度与位置由 GNSS 解析 RS-232 语句获取，用作速度前馈输入与多源数据时序基准；排种量采用对射式光电传感器输出脉冲信号，实现粒数统计与漏播识别；播深由角度传感器采集限深臂摆角，利用标定模型换算播深；下压力采用轴销力传感器替换原限深轴销，依据力 - 下压力映射模型实时解算；风压采用微压差传感器表征气吸稳定性；振动采用单轴加速度传感器监测关键部位扰动强度；排种盘转速由电驱系统 CAN 报文读取电机转速并结合减速比换算得到。平台采用统一 12 V 供电并配合屏蔽布线，降低电磁干扰与机械耦合噪声；量程配置覆盖角度 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 、轴销力 $0\sim 6000\text{ N}$ 、微压差 $\pm 15\text{ kPa}$ 、振动 $0\sim 50\text{ g}$ ，满足高速作业下动态量测与耦合分析需求。传感器、采集控制器、显示终端之间信号流向与供电关系见图 1，田间安装位置与接口布置见图 2。

2.2. 硬件架构与供电方案

平台以数据采集控制器为核心，多源信号同步接入并共享统一采样时钟。采集主机选用 NI-cDAQ9189 八插槽机箱，具备板载触发能力，适配 $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 环境，向各模块提供统一采样时钟，保证跨通道同步。模拟量采集采用 NI-9205 (32 通道、 $\pm 10\text{ V}$)，用于播深、下压力、风压、排种脉冲整形信号采集；动态采集采用 NI-9234 (4 通道、 $\pm 5\text{ V}$)，用于振动信号采集并提供激励；CAN 通讯采用 NI-9862 (1 Mbps)，读取拖拉机 CAN 与播种系统 CAN 的关键变量，保证车速、转速与系统状态同源可追溯。供电采用分层方式：12 V 蓄电池直接给传感器供电；逆变器把 12 V 转换成 220 V 给采集控制器与显示终端供电，减少车辆电源波动对采样稳定性的影响。

2.3. 软件系统与数据管理机制

软件系统基于 LabVIEW 开发，采用模块化采集与可配置界面结构，按参数设置、信号接收、信号处理、数据存储、数据展示组织功能链路，见图 3。

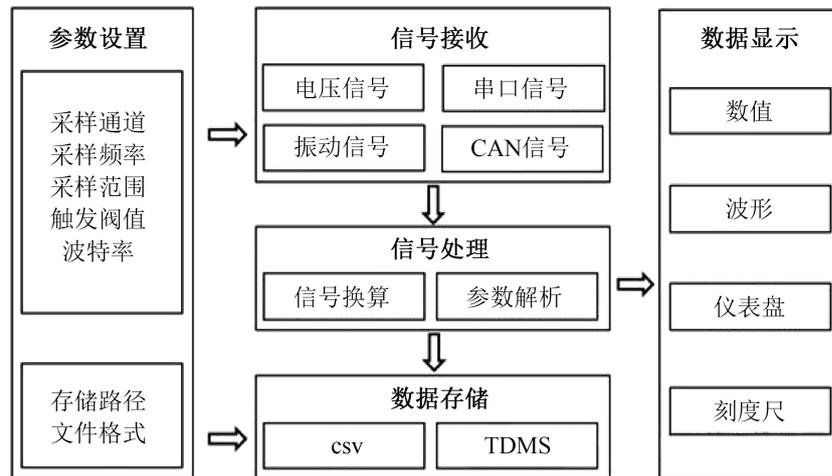


Figure 3. Functional block diagram of the detection platform software
图 3. 检测平台软件功能框图

参数设置区支持采样通道、采样频率、波特率、存储路径配置；信号接收区完成串口、模拟量、CAN、振动信号连续采集；信号处理区在线解算 RS-232 语句与 CAN 帧，输出速度、位置、转速工程量，并对模拟量执行标定换算、滤波、阈值触发，实现排种脉冲统计、风压波动识别、下压力跟踪；数据存储区采用 TDMS 连续写入，保证长时段记录完整性，同时支持 CSV 导出用于统计分析；数据显示区以数值、波形、仪表盘、刻度尺呈现关键参数，方便现场调参与异常定位。系统使用统一时间戳完成多源对齐，支持速度、转速、排种脉冲与力学参数同步分析，为控制策略验证与优化归因提供数据基础。

3. 精准控制策略与性能优化验证

3.1. 排种盘转速匹配与误差抑制

排种盘转速稳定，株距更均匀，漏播风险更低。株距与速度、盘转速存在直接关系，可用简化表达式描述：设目标株距为 s_r ，排种盘每转有效孔数为 Z ，作业速度为 v ，排种盘角速度为 ω_p ，则理想匹配满足

$$\omega_{p,r} = \frac{2\pi v}{Zs_r}.$$

电机角速度为 ω_m ，减速比为 i ，则 $\omega_p = \omega_m/i$ 。控制采用“速度前馈 + 转速闭环”：GNSS/融合速度生成目标盘转速 $\omega_{p,r}$ ，换算成电机目标 $\omega_{m,r} = i\omega_{p,r}$ ；电机转速反馈形成误差 $e_\omega = \omega_{m,r} - \omega_m$ ，PI 校正输出驱动量：

$$u = K_p e_\omega + K_i \int e_\omega dt + u_f.$$

静态试验在 3、6、9、12、15 km·h⁻¹ 速度下对比系统检测值与参考值，平均绝对误差不大于 0.44 r/min，平均相对误差不大于 3.56%，转速获取与解算链路满足精度需求。误差来源集中在 CAN 报文刷新周期差异、采样抖动、机械负载扰动；高速段振动增强时负载波动更明显，容易带来轻微转速起伏。为抑制抖动扩散风险，控制侧加入两类约束：一类是输出变化率限制，避免目标转速突跳带来过冲；一类是基于振动幅值的增益调整，振动升高时适当降低 K_p, K_i ，提升稳态性。排种量脉冲统计结果用于核对“速度 - 转速匹配”效果[3]。

3.2. 作业速度感知与协同控制

作业速度是排种控制与力控策略的共同变量。田间试验结果显示, 0~15 km/h 范围内速度检测平均相对误差为 4.42%, 曲线形态与参考测量一致, 满足速度前馈与质量评价需求。遮挡、多路径场景下 GNSS 存在短时漂移, 速度异常会传递到目标转速, 诱发株距波动。为提升稳定性, 引入 GNSS 与 CAN 车速/轮速冗余融合。融合思路保持简洁: GNSS 作为绝对速度来源, CAN 速度作为连续速度来源; 当 GNSS 质量下降或两者差值异常, 融合权重向 CAN 偏移, 并触发控制降级限制(目标转速变化率收紧)。融合可用如下规则表达:

$$\hat{v} = wv_g + (1-w)v_c,$$

$$w = \text{clamp}(q_g, w_{\min}, w_{\max}),$$

其中 v_g 为 GNSS 速度, v_c 为 CAN 速度, q_g 为 GNSS 质量因子(由卫星数、DOP、状态映射), \hat{v} 用作控制输入。效验流程图如图 4 所示。

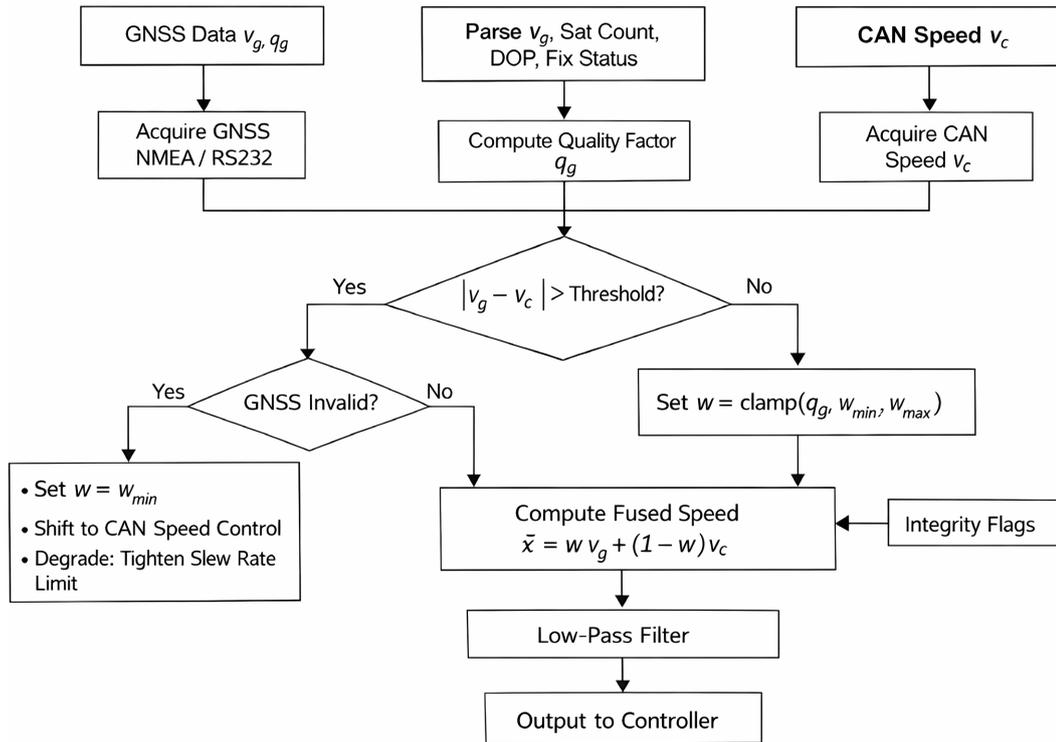


Figure 4. Flowchart of GNSS-CAN speed fusion and integrity check

图 4. GNSS-CAN 速度融合与完整性校验流程图

粒距真值: 选定作业小区, 沿行方向连续测量粒距, 单行不少于 100 个粒距, 记录合格粒距、漏播、重播数量; 多行重复以减小偶然误差。播深真值: 采用开沟剖面法或扒开覆土法, 在小区内按固定间距取点, 测量种子位置到地表的深度, 形成播深均值与离散度统计。真值数据与系统检测结果在同一时间段内对齐, 避免位置漂移造成错配。播深随速度变化的离散性统计结果见表 1。

时间对齐依靠采集控制器统一时钟给多源数据打时间戳, 显示终端插值对齐, 可开展速度、转速、排种脉冲同频分析, 有助于区分“速度变化引起的株距波动”与“转速扰动造成的排种异常”。

Table 1. Field test results of sowing depth
表 1. 播种深度田间试验结果

评价项	数据来源	3 km/h	6 km/h	9 km/h	12 km/h	15 km/h
平均值(mm)	系统检测	41.58	39.01	42.53	43.92	44.12
平均值(mm)	田间检测	38.70	37.85	40.76	41.97	41.03
平均值相对误差(%)	—	7.44	2.70	4.34	4.65	7.53
标准差(mm)	系统检测	2.19	2.31	3.21	5.18	4.71
标准差(mm)	田间检测	2.96	2.85	3.64	5.76	5.42
标准差相对误差(%)	—	26.56	19.29	11.81	10.07	13.10
变异系数(%)	系统检测	5.37	5.97	7.55	11.80	11.02
变异系数(%)	田间检测	7.52	7.23	8.94	13.72	13.21
变异系数相对误差(%)	—	28.59	17.42	15.55	13.99	16.58

3.3. 播深 - 下压力闭环与结构协同优化

播深与下压力共同决定出苗一致性与根系环境，湿黏土与秸秆还田条件下更易出现波动。播深检测采用限深臂摆角换算模型：

$$h = f(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2,$$

下压力由轴销力映射得到：

$$F = g(F_{pin}) = b_0 + b_1F_{pin}.$$

为把“深度稳定”变成可调变量，控制采用播深一下压力联动补偿：播深误差 $e_h = h_r - h$ 修正下压力设定值，形成

$$F_r = F_0 + K_h e_h + \Delta F,$$

F_0 为基准下压力， ΔF 为动态补偿项。动态补偿不做复杂建模，直接把“跳动强度”作为修正依据：

$$\Delta F = K_\theta |\dot{\theta}| + K_a a_{rms},$$

$|\dot{\theta}|$ 由摆角差分获得并滤波， a_{rms} 为振动滑窗均方根。保护逻辑采用上下限与变化率约束，避免过压导致沟底压实：

$$F_r \in [F_{min}, F_{max}], \quad |\dot{F}_r| \leq \dot{F}_{max}.$$

田间播深结果显示，系统检测平均值相对误差约 2.70%~7.53%，速度提升后标准差与变异系数差异增大，反映高速段地面跟随能力与动态响应仍是关键瓶颈。下压力试验中，静态条件下两组单体平均差值相对误差不大于 5.93%；高速作业下平均差值相对误差可达 14.91%与 19.30%，冲击载荷与滞后效应对力控精度影响明显。如表 2 所示，控制侧联动补偿用于削弱短时跳动引起的深浅波动；结构侧优化限深轮接地与开沟器支撑刚度匹配，降低高频振动传递，提高顺应性与稳定性。

Table 2. Test results of sowing density
表 2. 排种量测试结果

作业速度 km/h	检测值(粒)	实际值(粒)	准确率%
3	311	311	100.00
3	316	316	100.00
3	305	305	100.00
6	312	314	99.36
6	308	309	99.68
6	323	323	100.00
9	330	333	99.10
9	313	317	98.74
9	302	302	100.00
12	306	308	99.35
12	329	334	98.50
12	299	301	99.33
15	323	327	98.78
15	314	323	99.68
15	317	325	99.06

设置两组工况：A 组关闭联动补偿与速度融合，仅保留基础转速闭环；B 组启用速度融合、增益调整、播深 - 下压力联动补偿与保护约束。两组在同一地块、同一设定播深、同一速度档位下重复作业，小区数量增加，粒距与播深真值按 3.2 节方法获取。评价指标增加合格粒距指数、重播指数、漏播指数、合格粒距变异系数(CV)，并给出速度分档对比，结果见图 5，图 6。

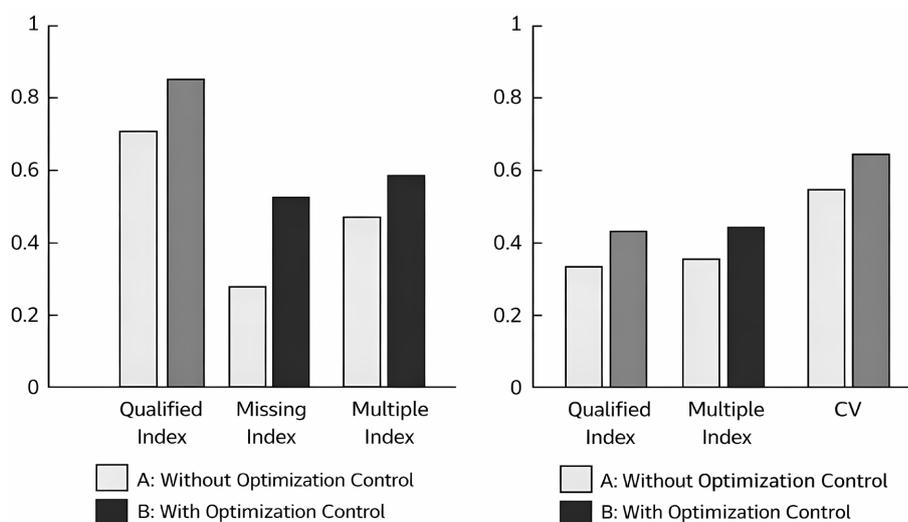


Figure 5. Comparison chart of qualified index/missing index/multiple index/CV (A vs B)
图 5. 无优化控制(A)与优化控制(B)粒距指标与 CV 对照图

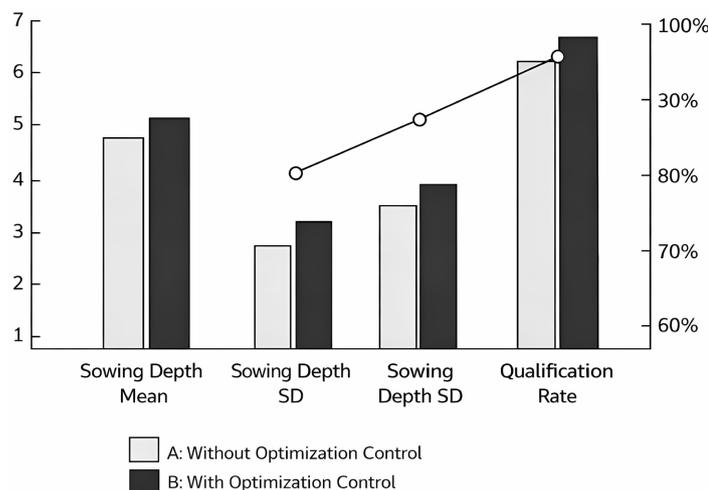


Figure 6. Comparison chart of sowing depth mean/SD/qualification rate (A vs B)
图 6. 无优化控制(A)与优化控制(B)播深均值、标准差、合格率对照图

4. 结论

面向电驱精量播种机多参数强耦合与高速作业需求, 本文构建基于 NI-cDAQ 与 LabVIEW 的工况智能检测平台, 实现多源信号同步采集、在线解算与数据留存, 支撑排种盘转速、作业速度、播深与下压力多指标的量化评估。围绕车速—转速匹配控制, 引入速度前馈与转速闭环, 结合输出变化率限制与振动关联增益调整, 提高高速作业稳定性; 围绕速度可靠性, 提出 GNSS 与 CAN 冗余融合与完整性校验, 降低漂移对控制输入的影响; 围绕播深稳定性, 给出播深—下压力联动补偿与振动驱动动态修正, 并配套保护约束减少沟底压实风险; 结构侧提出限深轮接地与支撑刚度匹配思路, 降低高频振动传递, 提高地面跟随能力。面向江苏湿黏土、秸秆还田与丘陵岗地工况, 上述检测与控制方案具备现场可实施性; 结合“无优化/有优化”对照与指标化评价, 可把控制收益以图表形式直观呈现, 为电驱精量播种装备提质增效提供依据。

致 谢

陈春杳杳, 来岁昭昭。不知不觉, 又是一年春来到。作为一名在职从事专业技术工作的研究者, 本论文的完成, 是学术探索与实践积累的双向奔赴, 更离不开一路上所有给予支持与帮助的同事与亲友。感谢所在单位的领导与同事们, 工作之余的研究之路充满挑战, 是领导给予的时间支持与资源协调, 让我得以兼顾岗位职责与学术探索; 是同事们在技术细节上的探讨、实践案例中的分享, 为论文提供了鲜活的现实依据, 也让我在协作中收获了成长。最真挚的谢意给予我的家人, 他们的理解与包容, 消解了我深夜伏案的疲惫, 他们的鼓励与信任, 给予了我攻坚克难的勇气, 这份无声的支持, 是我前行路上最坚实的力量。论文落笔不是终点, 而是新的起点。我将带着这份感恩, 立足江苏实际, 继续扎根农业领域探索精进, 以更扎实的能力回馈所有期许。

参考文献

- [1] 郭禹彤. 农业电气自动化播种设备中无线传感器网络的应用研究[J]. 农业开发与装备, 2025(7): 59-61.
- [2] 鲁汉昌. 玉米播种机械自动化控制与性能优化[J]. 中国农机装备, 2025(5): 23-25.
- [3] 何静洁. 小麦自动化播种技术与精密播种机的协同应用分析[J]. 农机科技推广, 2025(4): 45-48.
- [4] 宋湘云. 玉米播种机械自动化控制与性能优化[J]. 农业工程技术, 2024, 44(23): 46-47.