

基于北斗容错策略的小麦小区播种机控制系统研究

薛晨¹ 陈黎卿^{1,2} 张春岭^{1,2} 刘策^{1,2} 张留洋¹ 朱俊文¹

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 智能绿色农业装备安徽省联合共建学科重点实验室, 合肥 230036)

摘要: 随着智能化作业的发展,北斗系统已广泛应用于小麦小区智能播种作业,但由于田间作业工况复杂,易出现北斗系统信号丢失或偏移等异常,导致播种精度下降,本文提出了一种基于容错策略的小麦小区播种机控制系统。首先,建立北斗报文解析模型,确定排种电机转速影响因素,进而提出一种基于趋势移动平均法的北斗容错策略;其次,应用基于粒子群改进算法的模糊神经网络 PID 算法实现对电机的精准控制;最后进行试验验证。台架试验结果表明,人为修改北斗报文模拟异常时,小麦各行排量一致性变异系数平均值为 3.87%,满足排种要求。将该容错策略应用于小麦小区田间播种作业,结果表明,当小区长度为 4、5、6 m 时,多行播种均匀性变异系数分别为 19.94%、20.76% 和 21.79%,单行播种均匀性变异系数分别为 19.93%、20.87% 和 22.26%,满足国家标准和小麦小区播种农艺要求,验证了本文提出的基于容错策略的小麦小区播种控制系统的可靠性与准确性。

关键词: 小麦小区播种机; 控制系统; 报文异常; 北斗容错策略; 播种均匀性

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)03-0240-07

OSID:



Design and Experiment of Wheat Plot Seeder Control System Based on Beidou Fault-tolerant Strategy

XUE Chen¹ CHEN Liqing^{1,2} ZHANG Chunling^{1,2} LIU Ce^{1,2} ZHANG Liuyang¹ ZHU Junwen¹

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Key Laboratory of Intelligent and Green Agricultural Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: With the development of intelligence, Beidou system has been widely used in agricultural machinery, but there is a problem of Beidou signal loss during operation. In response to the problem of Beidou signal loss in the electric control seeding system of the wheat plot, which leads to abnormal Beidou system messages and a decrease in seeding accuracy, a wheat plot seeding control system was proposed based on fault-tolerant strategy. Firstly, by establishing a Beidou message parsing model, the factors affecting the speed of the seeding motor were determined, and a Beidou fault-tolerant strategy based on trend moving average method was proposed. Secondly, the fuzzy neural network PID algorithm improved by particle swarm optimization algorithm was applied to achieve precise control of the motor. Finally, experimental verification was carried out. The results of the bench test showed that when artificially modifying the Beidou message to simulate anomalies, the average coefficient of variation for the consistency of wheat row displacement was 3.87%, which met the seeding requirements. The fault-tolerant strategy was applied to field sowing operations in a wheat plot. The experimental results showed that the coefficient of variation of multi row sowing uniformity in three sets of experiments were 19.94%, 20.76%, and 21.79%, respectively. And the coefficient of variation for uniformity of single row sowing was 19.93%, 20.87%, and 22.26%, respectively, which met the national standards and agricultural requirements for the wheat plot, and verified the reliability and accuracy of the seeding control system based on fault-tolerant strategy.

Key words: wheat plot seeder; control system; abnormal message; Beidou fault-tolerance strategy; seeding uniformity

收稿日期: 2024-02-05 修回日期: 2024-02-27

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)和安徽省高校协同创新项目(GXXT-2023-042)

作者简介: 薛晨(1997—),男,博士生,主要从事智能农机研究, E-mail: Xuechen@stu.ahau.edu.cn

通信作者: 张春岭(1989—),男,讲师,主要从事机械设计与智能农业装备研究, E-mail: zhangcl@ahau.edu.cn

0 引言

小麦小区播种是小麦育种的关键环节,其作业质量直接影响选育种子品质,对粮食安全意义重大^[1-3]。当前,国内外都是通过小区播种机进行小区播种,很大程度上解放了人力^[4-6]。我国小麦小区播种机以机械式作业为主,智能化水平不高,一定程度上制约了小麦小区播种高效精细化水平的发展。

为提高排种性能,国内外学者开展诸多研究^[7-10],程修沛等^[11]通过分析离心分种器转速、分种面夹角和分种距离3个因素,确定了这些因素对分种均匀性的影响规律;杨薇等^[12]针对小区株行条播机手动上种人工劳动量大、工作效率低等情况,设计了株行条播机弹匣式上种装置;陈海涛等^[13]设计了一种三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器,能在每个小区之间不停机快速清理剩余种子和更换种子。上述研究集中于小麦小区播种装备机械机构的设计与优化,对关键零部件作业性能的提升意义重大。

为进一步提高播种精度,控制系统研究也逐渐成为热点^[14-16]。为此,国内外学者在控制方面对小区播种机开展一系列研究,龚丽农等^[17]设计了小区播种机电控系统,得出播种不同种子时分配器的最佳转速;程修沛等^[18]基于STM32设计了小区播种机电控系统,提升了小区作业精度。随着科学技术的发展,北斗系统已广泛应用于农业领域^[19],其主要作用为通过定位系统确定机具作业速度,进而完成对其它关联零部件的调控^[20-21],对农机作业精度起决定性作用。然而,实际播种作业过程中,受天气、建筑物和田间其它遮挡物等影响,易造成北斗报文异常,使获取的速度不准确,进而导致播种精度下降。

针对上述问题,本文设计一种基于北斗容错策略的小麦小区播种机控制系统,该系统可在北斗报文出现丢失、数值突增或突减3种情况下对数据进行修正,使之符合实际田间作业工况,避免因北斗报文异常造成播种精度下降甚至出现电机运转卡顿等极端现象。

1 小麦小区播种机整机结构与工作原理

以XBJ-150型小麦小区播种机为搭载平台开展北斗容错策略研究,其整机结构由电控排种装置、均匀分种装置、行走装置和北斗容错控制系统等组成,如图1所示。

整机作业控制系统框图如图2所示,其作业原

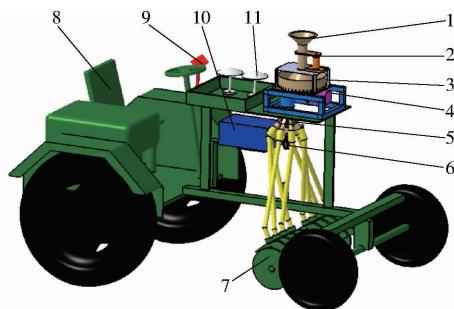


图1 小麦小区播种机整机结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of wheat plot seeder

1. 存种筒 2. 电动推杆 3. 锥体格盘 4. 步进电机及减速器
5. 离心分种装置 6. 直流电机 7. 开沟器 8. 驾驶座椅 9. 人机交互显示屏
10. 控制箱 11. 北斗天线

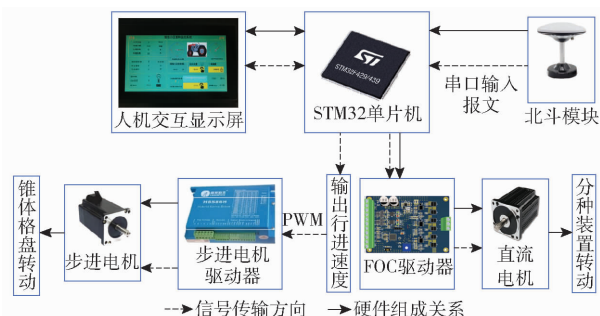


图2 整机作业控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of electrical and mechanical control system

理为:用无线遥控器控制电动推杆升降从而控制存种筒升降落种,通过北斗模块获取报文,以STM32控制器为核心^[22],使用C语言控制,通过容错策略将获取的报文解析得到小区播种机行进速度,将获取的速度信息通过公式计算改变脉冲发射频率来控制步进电机转速,从而能够精准控制锥体格盘转速;人机交互系统主要设置小区长度和将离心分种器转速发送到控制器,控制直流电机转速,从而控制离心分种器转速,同时实时显示小区播种机作业信息。

2 基于容错策略的小区播种机控制系统设计

2.1 北斗报文解析模型建立

小麦小区播种机排种装置主要由锥体格盘、步进电机、直流电机、离心分种装置等组成,如图3所示。其中,选用86HBM120-EC-1000型步进电机,并配备HBS86H型数字式混合伺服驱动器,细分类型有16种,细分范围为200~51200 p/r,脉冲频率为200 kHz,控制器PWM脉冲控制引脚与驱动器间增设脉冲放大电路TSX0108E模块,进行2 MHz电平转换,形成5 V电平的PWM驱动信号。采用57BL75S10-230TF9型永磁无刷直流电机,其额定转速、额定转矩、额定功率和额定电压分别为3000 r/min、0.5 N·m、150 W和24 V,直流电机通过

自制的矢量控制器驱动,实现 600 ~ 2 000 r/min 无级调速,与控制器通过 CAN 总线通信,波特率为 500 kbit/s。

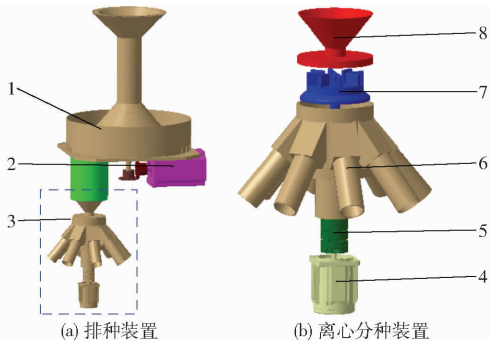


图3 排种装置结构图

Fig.3 Structure diagrams of seeding device

1. 锥体格盘 2. 步进电机及减速器 3. 离心分种装置 4. 直流电机 5. 联轴器 6. 分种管 7. 离心分种器 8. 落种漏斗

锥体格盘由 40 个相同槽格组成,其旋转由步进电机控制,旋转速度对于均匀播种起着至关重要的作用。锥体格盘目标转速与脉冲频率之间关系为^[20]

$$n_0 = \frac{60f}{N_0 i} \quad (1)$$

式中 n_0 ——锥体格盘转速, r/min

f ——脉冲频率, Hz

N_0 ——步进电机驱动器转一圈的脉冲数

i ——与电机匹配的减速机减速比

步进电机转速是由脉冲(PWM)进行控制^[23], PWM 控制频率与自动重装载寄存器有关,关系式为

$$f = \frac{N_T}{(N_{psc} + 1)(N_{arr} + 1)} \quad (2)$$

式中 N_T ——定时器时钟频率, MHz

N_{psc} ——预分频系数

N_{arr} ——寄存器自动重装载值

联立式(1)、(2)可得

$$n_0 = \frac{60N_T}{N_0 i (N_{psc} + 1)(N_{arr} + 1)} \quad (3)$$

试验采用 STM32F405RG 的 TIM8 定时器,其中 $N_T = 68$ MHz, $N_{arr} = 336$ 。减速机减速比 $i = 40$, $N_0 = 10\,000$ 。代入式(3)可得

$$n_0 = \frac{30.267}{N_{psc} + 1} \quad (4)$$

根据小麦小区机械化播种要求,小区播种机在规定长度区域行走所需时间应与锥体格盘转动一圈时间一致,因此

$$t = \frac{L}{v_i} = \frac{60}{n_0} = \frac{3.6L}{v_d} \quad (5)$$

式中 v_d ——北斗报文解析的播种机前进速度, km/h

v_i ——小区播种机前进速度, m/s

t ——小区播种所用时间, s

L ——小区长度, m

设计时采用北斗模块基站和移动站 UB480、UB482,定位精度为 2 cm,移动站速度漂移为 0.006 ~ 0.28 km/h,误差均值为 0.06 km/h。漂移误差会对测试精度产生一定的影响,因此需减去速度误差。由此可得

$$N_{psc} = \frac{90.801L}{50v_d} - 0.94 \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)可得锥体格盘转速与北斗报文解析的播种机前进速度关系式为

$$n_0 = \frac{1\,513.35v_d}{90.801L + 3v_d} \quad (7)$$

2.2 北斗信息解算

小区播种机行进速度由北斗报文解析得到,北斗设备输出 GNVTG 报文,根据 NMEA-0183 协议标准,通过 STM32 单片机解析并提取报文速度信息。北斗移动站每秒输出近 1 KB ASCII 字符数据到控制器串口,采用 DMA 方式绕过 CPU 而将数据直接由串口寄存器搬运到内存数组;利用环形数组对北斗数据进行缓存,并周期性调用解析函数;对环形缓冲区数据采用有限状态机法解析出一帧完整 GNVTG 数据帧,基于 NMEA-0183 的 C 开源库实现解析 GNVTG 数据帧,得到播种机前进速度,为后续精准控制锥体格盘转速提供了时速信息。

2.3 北斗报文解析容错策略

小麦小区播种作业时,受乌云和建筑物等影响,北斗报文易出现丢失、数值突增或突减等情况,造成速度检测异常,进而导致播种精度下降。

为解决上述问题,本文提出一种基于趋势移动平均法的北斗解析容错策略。当控制器在解析报文的同时,根据之前解析的历史数据对下一时刻速度进行预测,当北斗报文出现异常时,控制器使用预测速度来控制步进电机转速,趋势移动平均法是以最近实际值的一次移动平均速度和二次移动平均速度建立预测模型,一次移动平均速度为

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{N}(y_t + y_{t-1} + \dots + y_{t-N+1}) \quad (8)$$

式中 $M_t^{(1)}$ —— t 时刻播种机一次移动平均速度, m/s

N ——移动平均速度数量,取 7

y_t —— t 时刻北斗解析速度, m/s

在一次移动平均的基础上再进行一次移动平均即为二次移动平均,其计算公式为

$$M_t^{(2)} = \frac{1}{N} (M_t^{(1)} + M_{t-1}^{(1)} + \dots + M_{t-N+1}^{(1)}) = M_{t-1}^{(2)} + \frac{1}{N} (M_t^{(1)} - M_{t-N}^{(1)}) \quad (9)$$

式中 $M_t^{(2)}$ —— t 时刻播种机二次移动平均速度, m/s

根据之前解析的历史数据建立趋势预测模型, 计算公式为

$$y_{t+T} = a_t + b_t T \quad (10)$$

式中 y_{t+T} —— $t + T$ 时刻播种机预测速度

a_t ——预测截距平滑系数

b_t ——预测斜率平滑系数

T ——趋势预测期数

联立式(8)、(10)可得

$$M_{t-N}^{(1)} = y_{t-N} - \frac{N-1}{2} b_t \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)、(10)可得

$$\begin{cases} a_t = 2M_t^{(1)} - M_{t-N}^{(1)} \\ b_t = \frac{2}{N-1} (M_t^{(1)} - M_{t-N}^{(1)}) \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)可得 $t + T$ 时刻预测速度为

$$y_{t+T} = 2M_t^{(1)} - M_{t-N}^{(1)} + \frac{2}{N-1} (M_t^{(1)} - M_{t-N}^{(1)}) T \quad (13)$$

当北斗报文出现丢失、数值突增或突减等异常时, 系统将根据式(13)计算预测速度, 进而对电机转速进行调控, 使其符合实际播种作业。

2.4 容错策略仿真验证

为验证容错策略有效性, 在安徽农业大学教学示范基地通过便携式移动站采集数据, 将采集的串口数据通过 Visual Studio 进行数据解析, 根据报文异常的 3 种情况, 将采集数据选择部分报文人工改为相对应的异常情况, 并将容错前后速度进行对比, 如图 4 所示。

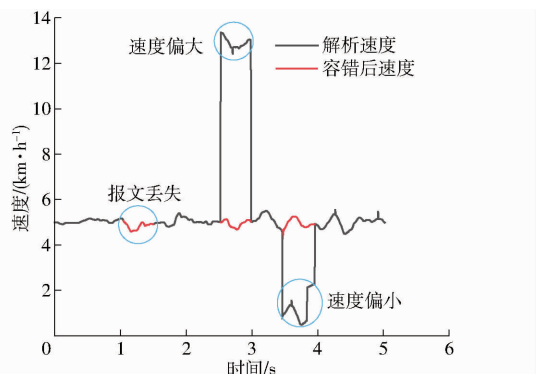


图 4 不同异常情况下容错前后速度对比

Fig. 4 Comparison of speed before and after fault-tolerance in different abnormal situations

由图 4 可知, 加入容错策略后速度有很大改变, 为了验证容错策略有效性, 以相对误差 (RE) 为评价指标, 对采集的正常数据结果与容错结果进行误差分析^[24]。根据计算可得, 采集的正常数据结果与容错结果相对误差为 4.7%, 误差在 5% 以内, 验证了容错策略有效性。

3 排种电机控制系统设计

3.1 基于 PSO 算法改进的 PID 设计

为了提高步进电机的工作稳定性, 实现对步进电机转速的高效控制, 利用基于粒子群 (PSO) 算法改进的模糊神经网络 PID 算法进行步进电机的转速控制^[25], 通过粒子群优化算法确定比例调节系数 K_p 、积分调节系数 K_i 、微分调节系数 K_d 最佳值, 从而使步进电机能够精准工作。为了验证控制算法的有效性, 基于 Simulink 搭建模型, 如图 5 所示。

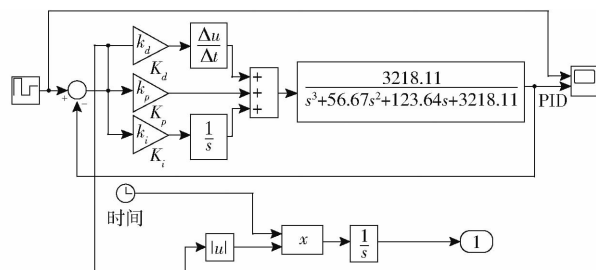


图 5 基于 PSO 的 PID 步进电机控制器 Simulink 仿真模型

Fig. 5 Simulink simulation model of PID stepper motor controller based on PSO

给定步进电机阶跃信号为 6 r/min, 分别基于普通 PID、模糊神经网络 PID (模糊 PID) 和 PSO 模糊 PID (PSO - PID) 3 种算法进行系统仿真, 3 种控制算法均输入相同的 PID 参数, 仿真结果如图 6 所示。

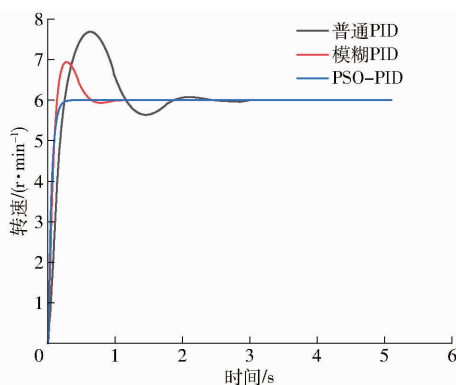


图 6 3 种不同算法仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves based on three different algorithms

由图 6 可得, 基于 PSO 的模糊 PID 控制系统响应速度最快, 约为 0.45 s, 相比于普通 PID 和模糊 PID 控制算法, 基于 PSO 的模糊 PID 控制算法控制效果理想, 满足系统稳态性。

为了进一步验证算法跟踪性能, 对模型进行转

速跟踪试验。首先,步进电机以转速 6 r/min 转动,从 0 s 运行至 2 s,接着将目标转速降至 4 r/min 并运行 2 s,然后再将目标转速升至 5 r/min,继续运行 2 s。运行结果如图 7 所示。

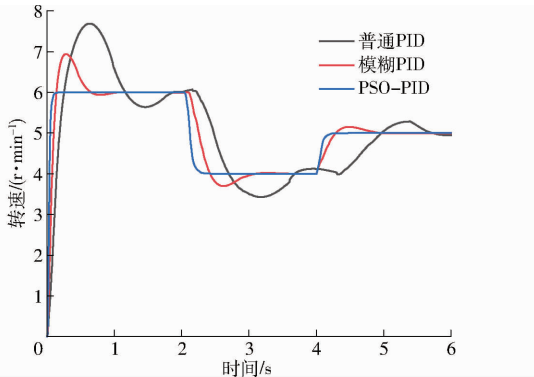


图 7 3 种不同算法信号跟踪仿真曲线

Fig. 7 Simulation curves of signal tracking based on three different algorithms

由图 7 可得,基于 PSO 的模糊 PID 控制算法能够使步进电机快速到达目标转速。相比于普通 PID 和模糊 PID 控制算法,基于 PSO 的模糊 PID 控制算法达到稳态的时间分别缩短 1.62 s 和 0.76 s,因此基于 PSO 的模糊 PID 控制算法对步进电机转速有更好的控制能力。

3.2 试验

为了更好地验证基于 PSO 的模糊 PID 控制算法的有效性,通过 STM32 控制器控制步进电机转速,并用编码器测量锥体格盘转速,比较 3 种控制算法性能。编码器安装如图 8 所示。给定步进电机转速为 6 r/min,将编码器放在转轴上测量步进电机转速,结果如图 9 所示。



图 8 编码器安装示意图

Fig. 8 Encoder installation diagram

1. 编码器 2. 转轴 3. 锥体格盘 4. 计算机

由于摩擦力等外界环境的影响,测量的转速有误差。由图 9 可知,在基于 PSO 的模糊 PID 控制算法下,产生的激荡比普通 PID 和模糊 PID 控制算法分别减少 82.4% 和 58.4%,达到稳态时间最短。

为了进一步验证算法可行性,对锥体格盘进行转速跟踪试验。首先,步进电机以转速 6 r/min 转动 2 s,接着将目标转速降至 4 r/min 运行 2 s,最后目标转速升至 5 r/min 运行 2 s。运行结果如图 10 所示。

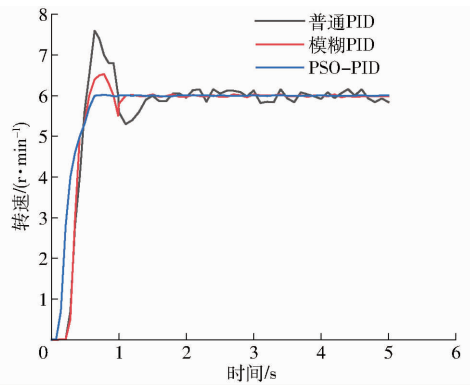


图 9 3 种不同算法锥体格盘转速变化曲线

Fig. 9 Comparison curves of rotational speed of cone tray based on three different algorithms

由图 10 可知,基于 PSO 的模糊 PID 控制算法到达稳态时间最短,激荡最小。通过计算可得,基于 PSO 的模糊 PID 控制算法到达稳态时间约为 0.58 s,比普通 PID 和模糊 PID 控制算法分别减少 1.81 s 和 0.63 s,有效验证了算法的跟踪性能。

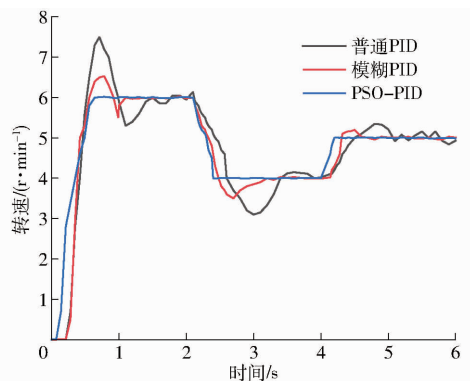


图 10 3 种不同算法信号跟踪对比

Fig. 10 Comparison of signal tracking based on three different algorithms

4 试验验证

4.1 台架试验

在安徽农业大学智能农机装备工程实验室 JPS-12 型排种器性能试验台进行 8 组台架试验,如图 11 所示,小麦品种选用济麦 22。为模拟实际作业过程出现的北斗报文丢失、数值突增和数值突减 3 种异常情况,先在安徽农业大学教学示范基地通过便携式移动站采集稳定数据,然后对其进行人为修改,即将异常报文通过 sscom 串口输入到单片机中,进而模拟实际田间作业,统计并比较容错前后各行排量一致性变异系数。

台架试验结果如表 1 所示,容错前变异系数平均值为 10.87%,容错后变异系数平均值为 3.87%,符合 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》,验证了仿真结果的可行性。

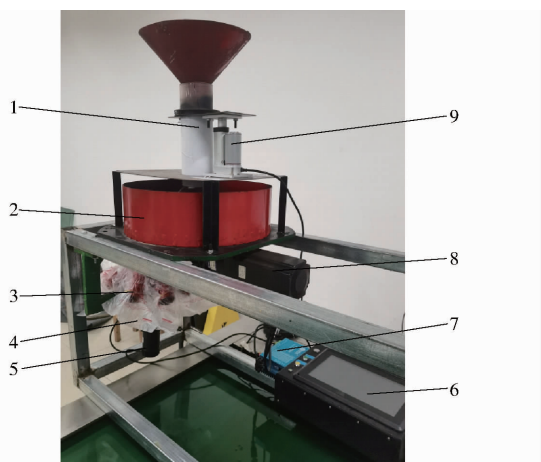


图 11 台架试验

Fig. 11 Bench test

- 1. 存种筒 2. 锥体格盘 3. 离心分种装置 4. 套种袋 5. 直流电机
- 6. 控制箱 7. 步进电机驱动器 8. 步进电机及减速器
- 9. 电动推杆

表 1 台架试验结果

Tab.1 Result of test bench %

试验序号	容错前变异系数	容错后变异系数
1	8.71	4.11
2	15.53	3.66
3	8.92	3.89
4	10.43	5.13
5	13.21	3.61
6	8.48	3.16
7	12.23	4.28
8	9.45	3.77
平均值	10.87	3.87

4.2 田间试验

田间试验在安徽农业大学教学示范基地进行, 试验现场如图 12 所示。试验共分为 3 组, 每组小区长度分别为 4、5、6 m, 将每一行等长连续取 10 段区域(1#~10#), 每组试验 3 次, 统计每一段小麦数量, 以多行播种均匀性变异系数和单行播种均匀性变异系数为评价指标, 如图 13 所示。

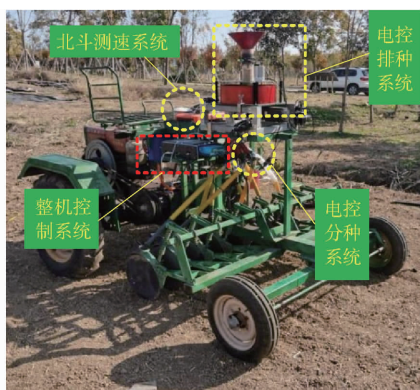


图 12 田间试验

Fig. 12 Field test

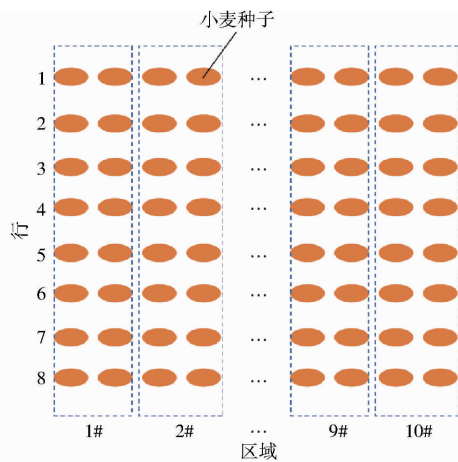


图 13 采样示意图

Fig. 13 Sampling diagram

中, 每一个区域各行种子分布的差异程度; 单行播种均匀性变异系数是指在某一行的相同长度的区域 1#~10#内, 各个区域种子分布的差异程度。

多行播种均匀性变异系数 V_1 计算公式为

$$V_1 = \frac{\sigma_1}{\mu_1} \times 100\% \quad (14)$$

式中 σ_1 ——8 行标准差, 粒

μ_1 ——8 行相同对应位置的 10 个区域小麦种子平均数量, 粒

单行播种均匀性变异系数 V_2 计算公式为

$$V_2 = \frac{\sigma_2}{\mu_2} \times 100\% \quad (15)$$

式中 σ_2 ——单行标准差, 粒

μ_2 ——单行各区域内平均小麦种子数量, 粒

试验测得多行播种均匀性变异系数和单行播种均匀性变异系数如表 2 所示。由表 2 可得, 第 1 组、第 2 组和第 3 组多行播种均匀性变异系数均值分别为 19.94%、20.76% 和 21.79%, 单行播种均匀性变异系数均值分别为 19.93%、20.87% 和 22.26%, 满足国家标准和小麦小区播种农艺要求, 验证了本文设计的北斗容错策略可靠性与准确性。

5 结论

(1) 设计了一套基于容错策略的小麦小区播种机控制系统, 当北斗报文出现异常情况时, 根据历史解析数据, 利用趋势移动平均法对下一时刻速度进行预测, 进而对步进电机进行调控, 并通过 Visual Studio 软件进行仿真验证, 验证了容错策略有效性。

(2) 使用基于 PSO 算法改进的模糊神经网络 PID 控制算法对步进电机作业进行控制, 利用 Matlab/Simulink 建立了控制模型。试验结果表明, 基于 PSO 的模糊 PID 控制算法产生的激荡比普通 PID 和模糊 PID 控制算法分别减少 82.4%、58.4%,

多行播种均匀性变异系数是指在区域 1#~10#

表2 变异系数

Tab.2 Coefficient of variation

分组	区域编号	$V_1/\%$	行号	$V_2/\%$	分组	区域编号	$V_1/\%$	行号	$V_2/\%$	分组	区域编号	$V_1/\%$	行号	$V_2/\%$
第1组	1#	21.17	1	19.38	第2组	1#	19.66	1	23.03	第3组	1#	18.28	1	22.37
	2#	17.42	2	21.92		2#	20.87	2	17.42		2#	29.13	2	16.42
	3#	21.61	3	17.73		3#	23.05	3	18.52		3#	21.11	3	26.61
	4#	16.30	4	16.30		4#	24.28	4	16.30		4#	19.62	4	16.44
	5#	23.53	5	18.28		5#	18.62	5	21.73		5#	20.15	5	26.53
	6#	18.67	6	23.13		6#	23.24	6	18.43		6#	22.00	6	22.67
	7#	19.59	7	21.11		7#	20.17	7	21.45		7#	18.37	7	27.23
	8#	22.54	8	19.62		8#	17.21	8	22.54		8#	21.91	8	22.54
	9#	21.17				9#	19.66				9#	18.28		
	10#	17.42				10#	20.87				10#	29.13		

达到稳态的时间分别减少 1.81、0.63 s。

(3)对安装北斗报文容错策略控制系统的小麦小区播种机开展台架试验和田间试验。台架试验结果表明,排种器各行排量一致性变异系数均值为 3.87%,验证了电控排种系统的可行性。田间试验

结果表明,小区长度为 4、5、6 m 的多行播种均匀性变异系数均值分别为 19.94%、20.76%、21.79%,单行播种均匀性变异系数均值分别为 19.93%、20.87%、22.26%,验证了北斗报文容错策略的可行性与准确性。

参 考 文 献

- [1] 尚书旗,吴秀丰,杨然兵,等. 小区育种播种装备与技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2):1-20. SHANG Shuqi, WU Xiufeng, YANG Ranbing, et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):1-20. (in Chinese)
- [2] WANG Weiwei, WU Kunpeng, ZHANG Yin, et al. The development of an electric-driven control system for a high-speed precision planter based on the double closed-loop fuzzy PID algorithm[J]. Agronomy, 2022, 12(4): 12040945.
- [3] JIN Minfeng, DING Yongqian, YU Hongfeng, et al. Optimal structure design and performance tests of seed metering device with fluted rollers for precision wheat seeding machine[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17):509-514.
- [4] CHENG X P, LU C Y, LI H W, et al. Research progress and development trend of plot seeding mechanization [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(4):136-144.
- [5] 尚书旗,杨然兵,殷元元,等. 国际田间试验机械的发展现状及展望[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1):5-8. SHANG Shuqi, YANG Ranbing, YIN Yuanyuan, et al. Current situation and development trend of mechanization of field experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1):5-8. (in Chinese)
- [6] 朱明,陈海军,李永磊. 中国种业机械化现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14):1-7. ZHU Ming, CHEN Haijun, LI Yonglei. Investigation and development analysis of seed industry mechanization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14):1-7. (in Chinese)
- [7] WAEL M F. Development and performance evaluation of a plot seeder to suit some different certified seed production [D]. Tanta: Tanta University, 2017.
- [8] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166:1-12
- [9] 李兆东,王晴晴,张亚兰,等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5):116-124. LI Zhaodong, WANG Qingqing, ZHANG Yalan, et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):116-124. (in Chinese)
- [10] ZHAO Huihui, ZHANG Dongxing, LI Yang, et al. Optimal design and experiment of critical components of hand-pushing corn plot precision planter[J]. Agriculture, 2022, 12(12):2103.
- [11] 程修沛,李洪文,卢彩云,等. 小麦小区条播机离心分种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20):1-9. CHENG Xiupai, LI Hongwen, LU Caiyun, et al. Parameter optimization and experiment of centrifugal seed dispenser in wheat plot drill[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20):1-9. (in Chinese)
- [12] 杨薇,方宪法,李建东,等. 种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6):64-73. YANG Wei, FANG Xianfa, LI Jiandong, et al. Design and experiment of air-suction precision seed meter with self-clearing seed chamber for corn plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):64-73. (in Chinese)
- [13] 陈海涛,王洪飞,王业成,等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12):75-85. CHEN Haitao, WANG Hongfei, WANG Yecheng, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace seeds features for soybean plot test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12):75-85. (in Chinese)

- [29] DONG Y, QIN S J. A novel dynamic PCA algorithm for dynamic data modeling and process monitoring[J]. Journal of Process Control, 2018, 67: 1 – 11.
- [30] 宫德宁, 吴琳娜, 李荣华, 等. 改进直通滤波 SAC-IA 粗配准算法[J]. 大连交通大学学报, 2022, 43(2): 78 – 84.
GONG Dening, WU Linna, LI Ronghua, et al. Improved direct filtering SAC-IC coarse registration algorithm[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2022, 43(2): 78 – 84. (in Chinese)
- [31] 李鹏飞, 吴海娥, 景军锋, 等. 点云模型的噪声分类去噪算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(20): 188 – 192.
LI Pengfei, WU Hai'e, JING Junfeng, et al. Noise classification denoising algorithm for point cloud model[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(20): 188 – 192. (in Chinese)
- [32] OH S, LEE D, KIM M, et al. Building component detection on unstructured 3D indoor point clouds using RANSAC-based region growing[J]. Remote Sensing, 2021, 13(2): 161.
- [33] 陈崇成, 李旭, 黄洪宇. 基于无人机影像匹配点云的苗圃单木冠层三维分割[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 149 – 155, 206.
CHEN Chongcheng, LI Xu, HUANG Hongyu, et al. 3D segmentation of individual tree canopy in forest nursery based on drone image-matching point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 149 – 155, 206. (in Chinese)
- [34] 杨雪娇. 点云的边界提取及角点检测算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
YANG Xuejiao. Research on the algorithms of point cloud boundary extraction and corner detection[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)

(上接第 246 页)

- [14] 杨硕, 王秀, 翟长远, 等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 145 – 153.
YANG Shuo, WANG Xiu, ZHAI Changyuan, et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 145 – 153. (in Chinese)
- [15] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51 – 59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51 – 59. (in Chinese)
- [16] 隋铭明, 沈飞, 徐爱国, 等. 基于北斗卫星导航的秸秆机械化还田作业管理系统[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 23 – 28.
SUI Mingming, SHEN Fei, XU Aiguo, et al. Management system for mechanized straw returning based on BDS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 23 – 28. (in Chinese)
- [17] 龚丽农, 员玉良, 尚书旗, 等. 小区播种机电控系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 122 – 126.
GONG Linong, YUAN Yuliang, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment on electronic control system for plot seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 122 – 126. (in Chinese)
- [18] 程修沛, 李洪文, 王庆杰, 等. 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 30 – 38.
CHENG Xiupai, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of wheat seeding control system in plot seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 30 – 38. (in Chinese)
- [19] 杨文超, 何进, 周靖凯, 等. 基于机器视觉和北斗定位的小麦变量喷雾系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 150 – 161.
YANG Wenchao, HE Jin, ZHOU Jingkai, et al. Design of wheat variable spray system based on machine vision and Beidou positioning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 150 – 161. (in Chinese)
- [20] 俞传阳, 陈状, 陈黎卿. 小麦小区条播机电控排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 75 – 83.
YU Chuanyang, CHEN Zhuang, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for wheat plot drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 75 – 83. (in Chinese)
- [21] 王浩, 郝凤琦, 董振振, 等. 基于北斗定位的小麦播种机控制系统优化[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 31 – 34.
WANG Hao, HAO Fengqi, DONG Zhenzhen, et al. Research on control system of wheat planter based on Beidou positioning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 31 – 34. (in Chinese)
- [22] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42 – 49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42 – 49. (in Chinese)
- [23] 陈文强. 简析 PWM 在电机控制系统的应用[J]. 机电技术, 2017(1): 43 – 45, 53.
- [24] LIU Ce, ZHANG Yihao, ZHANG Xiaozheng, et al. Source contribution analysis of vehicle pass-by noise using a moving multi-band model based OPAX method[J]. Measurement, 2023, 218: 113170.
- [25] 贾蒙蒙, 胡东芳, 许启跃, 等. 基于粒子群算法优化的步进电机转速控制方法研究[J]. 中国计量大学学报, 2022, 33(2): 221 – 227.
JIA Mengmeng, HU Dongfang, XU Qiyue, et al. Research on a speed control method of stepping motors based on particle swarm optimization[J]. Journal of China University of Metrology, 2022, 33(2): 221 – 227. (in Chinese)