

基于模糊 PID 的电控精量播种系统与试验研究

赵晓顺, 赵达卫, 闫青, 胡雨裳, 于华丽, 于凤超

(河北农业大学 机电工程学院, 河北 保定 071001)

摘要: 为解决传统播种机地轮打滑导致播种质量下降的问题, 设计了电控精量播种系统, 并确定了电机控制数学模型。通过 Z-N 法和模糊控制完成 PID 参数整定, 借助 MATLAB 完成模糊 PID 控制的设计和 Simulink 仿真, 将系统响应时间缩短了 0.23 s, 提高了控制精度。土槽试验台对比试验表明, 电控精量播种系统较传统播种系统播种合格指数提高了 6.04%, 漏播指数下降了 4.57%, 重播指数下降了 0.61%, 合格粒距变异系数下降了 2.23%, 播种均匀性得到了大幅度提高。系统的合格指数、重播指数、漏播指数和合格粒距变异系数均满足 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》的要求, 播种质量指标的变化均在 6% 以内, 具备较好的播种稳定性。

关键词: 精量播种; 电控系统; 参数整定; 模糊 PID; Simulink 仿真; 试验

中图分类号: S24

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文献标志码: A



Design and testing study on electronical controlled precision seed-metering system based on fuzzy PID

ZHAO Xiaoshun, ZHAO Dawei, YAN Qing, HU Yushang, YU Huali, YU Fengchao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: Traditional seed-metering device is driven by the ground wheel for seeding. However, the quality of seeding is reduced due to the slipping of the ground wheel. Aimed at the above problem, a dual-mode electronically controlled precision seed-metering system was designed and the mathematical model of motor control was determined. PID parameters were set by Z-N method and fuzzy control. Design of fuzzy PID control and Simulink simulation were completed by MATLAB, which reduced the response time of the system by 0.23 s and improved the control accuracy. The comparison test of soil-tank test bench showed that compared with the traditional sowing system, its qualification index increased by 6.04%, the leak-sowing index decreased by 4.57%, the replay-sowing index decreased by 0.61%, and the coefficient of variation of qualified seed spacing decreased by 2.23%. The uniformity of seeding has been greatly improved. Qualification index, replay-sowing index, leak-sowing index and coefficient of variation of qualified seed spacing of the system all meet the standard JB/T 10293—2013 “Specifications of Single Seed Drill (precision drill)”. Under different setting grain distances and different seeding speeds, the variation range of seeding quality index is within 6%, indicating good seeding stability.

Keywords: precision seeding; electronically controlled system; parameter tuning; fuzzy PID control; Simulink simulation; testing

收稿日期: 2020-07-23

基金项目: 国家重点研发计划——国家粮食丰产增效科技创新专项(2018YFD0300505); 河北省引进留学人员资助项目(C20200337)。

第一作者: 赵晓顺(1980-), 男, 河北康保人, 博士, 副教授, 主要从事精量播种技术及智能装备研究。

E-mail: zhao_xsh@126.com.

本刊网址: <http://hauxb.hebau.edu.cn:8080/CN/volumn/home.shtml>

智能化精量播种技术是未来精准农业发展的必然趋势^[1-2], 但目前国内播种机的核心部件——排种器仍然是由地轮驱动的传统机械形式, 由于田间作业环境复杂, 地轮会频繁打滑^[3-7], 导致播种均匀性下降。电控播种系统由电机驱动排种器, 不仅可以提高播种均匀性, 而且符合播种机械装备轻量化发展的趋势。张春岭等^[8]研究了使用 PWM 调速方式和基于遗传算法的 PID 参数整定对直流无刷电机的控制实现; 丁友强等^[9-10]设计了基于 PID 控制算法和 GPS 测速的玉米播种机电控系统; 何洁等^[11]运用 PID 速度控制算法和联合导航技术, 设计了插秧机自动作业系统; 丁幼春等^[12]设计了 1 种油菜播种机导航控制器, 该控制器基于免疫 PID 控制算法, 使用北斗定位系统和电子罗盘, 实现对油菜播种机的导航控制; 杨硕等^[13]设计了 1 种基于分段 PID 控制方法的电动排种系统, 该系统使用 CAN 总线通讯的方式实现系统信号传输; 付卫强等^[14]在玉米播种单体上设计了 1 套由仿形机构、液压系统和电控系统组成的播深控制系统; 程修沛等^[15]设计了基于 STM32 单片机的小麦小区播种电控系统, 系统可由作业人员设定小区播种作业参数, 通过控制步进电机和直流电机, 实现对椎体格盘和分种器转速的控制。总之, 国内学者针对 PID 控制算法与电控播种系统的研究比较广泛^[16-21], 但电控播种系统均用于玉米、小麦等单一作物播种, 且控制精度和稳定性有待进一步提高。

针对上述问题, 设计了基于模糊 PID 控制的精播和条播双模式电控播种系统, 以进一步提升播种均匀性和播种质量, 提高系统利用率。

1 系统结构和工作原理

电控播种系统主要由 STC89C52RC 单片机、直

流无刷电机、电机驱动器、旋转编码器和 LCD 显示屏等构成, 如图 1 所示。在播种作业过程中, 用户设定播种作业参数, 系统通过安装在测速轮上的旋转编码器实时检测播种作业速度和电机转速, 由单片机计算得出电机理论转速, 并向电机驱动器发出一定频率 PWM 信号驱动电机运行, 在此过程中通过模糊 PID 控制算法将电机转速与理论转速进行对比, 并调节 PWM 信号频率, 直至转速达到理论转速, 完成播种作业。

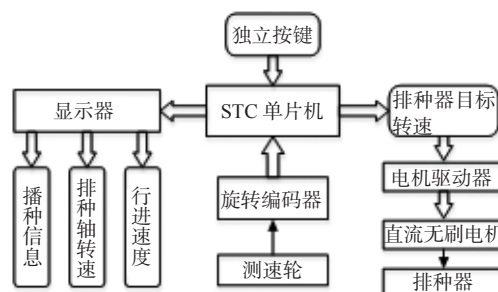


图 1 电控播种系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of electronically controlled seed-metering system

2 系统设计

2.1 系统硬件设计

电控播种系统的硬件设计主要包括单片机系统电路设计、电源电路设计、RS485 通信电路设计、按键显示电路设计、直流无刷电机控制电路设计。系统选用 HN3806-AB-400N 旋转编码器, 按照扭矩和转速要求, 选用 80BL02 直流无刷电机, 同时使用减速比为 1:20 的减速器配合使用, 配套选用 BLD-300B 电机驱动器。图 2 为本系统的电机控制电路。

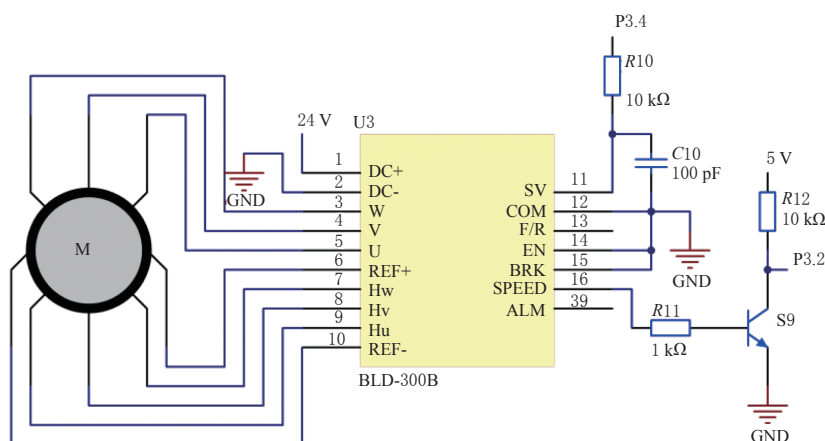


图 2 电机控制电路

Fig.2 Control circuit of motor

U_3 为电机驱动器, DC+、DC- 接 24 V 直流电源, 为电机驱动器供电; W、V、U、Hw、Hv、Hu、RBF+、RBF- 分别与直流电机相连, 为电机提供电源, 实现霍尔传感器信号的传输; COM、EN、BRK 共地, 控制电机正转, 不使用刹车控制功能; SV 通过由电容与电阻组成的滤波电路与单片机的 P3.4 口相连, 完成 PWM 信号的传输; SPEED 通过滤波电路与单片机的 P3.2 口相连, 实现电机转速信号的传输, 由单片机获取脉冲信号并计算电机转速。

2.2 系统软件设计

系统软件开发环境为 Keil μ Vision4, 使用 C 语言编写, 采用模块化编程。系统上电, 程序初始化后, 需要用户依次进行播种模式选择、播种信息输入、启动电机的操作, 之后系统通过旋转编码器检测车速信息, 实时检测、控制电机转速, 当需要停止播种时, 由拖拉机驾驶员按键停止。系统总流程如图 3 所示。

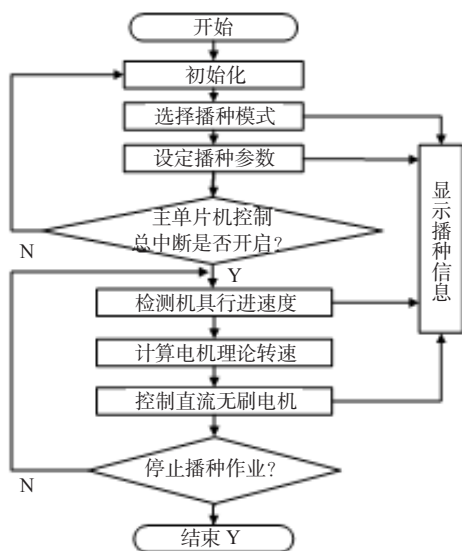


图 3 系统总流程图

Fig.3 The flow chart of electronically controlled seed-metering system

2.3 控制系统的数学模型

播种监控系统可实现玉米等作物的单粒精播和小麦等作物的精量条播, 播种作业速度、排种轴转速和播种作业信息之间的数学关系模型分为单粒精播模式和条播模式。

2.3.1 单粒精播模式 以玉米播种单体为研究对象, 已知排种盘转动一圈可播下的种子数为 m , 相邻 2 粒种子下落时间间隔为:

$$\Delta t = \frac{60}{nm} \quad (1)$$

式中 Δt —相邻 2 粒种子下落时间间隔, s;

n —排种盘转速, r/min。

粒距为:

$$Z = 277.8v \Delta t = \frac{1.67 \times 10^4 v}{nm} \quad (2)$$

式中 Z —设定粒距, mm;

v —机具行进速度, km/h。

由公式 (2) 得:

$$n = \frac{1.67 \times 10^4 v}{Zm} \quad (3)$$

被测轮的半径为 R , 单位为 mm, 则公式 (3)

可化为:

$$n = \frac{2\pi R}{Zm} n_1 \quad (4)$$

式中 n_1 —被测轮转速, r/min;

R —被测轮半径, mm;

Z —设定粒距, mm。

2.3.2 条播模式 以槽轮式小麦精量排种器为研究对象, 播种作业时, 经过时间 t (s) 可得:

$$\frac{Q}{10\,000} \times \frac{2\pi R d L \frac{n_1 t}{60}}{1 \times 10^6} = \frac{h \frac{nt}{60}}{1 \times 10^3} \quad (5)$$

将式 (5) 化简得:

$$n = \frac{Q d L \pi R}{5 \times 10^6 h} n_1 \quad (6)$$

式中 n —排种器转速, r/min;

n_1 —测速轮转速, r/min;

Q —设定播种量, kg/hm²;

d —播种行距, mm;

L —播种行数, 行;

R —被测轮半径, mm;

h —排种器旋转一圈排种量, g。

3 PID 控制的实现

3.1 增量式 PID 控制

PID 控制原理是将偏差的比例、积分和微分, 通过线性组合构成的控制量控制被控对象, 包括位置式 PID 和增量式 PID 2 种^[22-24]。PID 控制的一般公式为:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] + u_0 \quad (7)$$

式中: K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数, $e(t)$ 为给定值与实际输出值的偏差, u_0 为控制量初值, t 为时间, 单位 s。将 PID 控制用于单片机控制系统中, 需将公式 (7) 离散化处理得:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e_j + K_d (e(k) - e(k-1)) + u_0 \quad (8)$$

式中: $K_i=K_p(T/T_i)$, $K_d=K_p(T_d/T)$, T 为采样周期, k 为采样时刻。

由式 (8) 可得在 $k-1$ 个采样时刻的输出值为:

$$u(k-1)=K_p e(k-1)+K_i \sum_{j=0}^{k-1} e_j+K_d(e(k-1)-e(k-2))+u_0 \quad (9)$$

将式 (9) 与式 (8) 相减可得增量式 PID 控制算法公式:

$$\Delta u(k)=K_p(e(k)-e(k-1))+K_i e(k)+K_d(e(k)-2e(k-1)+e(k-2)) \quad (10)$$

增量式 PID 控制算法在单片机系统中不需要累加计算, 减少运算时间, 当系统被干扰导致误差较大时, 可以使用逻辑判断的方法来进行误差判断和消除。

3.2 临界振荡法 (Z-N 法) 整定 PID 参数

3.2.1 Simulink 仿真 Simulink 作为 MATLAB 的 1 个组件, 可以对动态系统进行建模、仿真和综合分析, 电控播种系统的核心是实现对于直流无刷电机的控制, Simulink 仿真的搭建需要控制系统的传递函数, 即为直流无刷电机的传递函数, 由电机学原理可知直

流无刷电机的微分方程为^[7]:

$$T_d T_m \frac{d^2 n_1}{dt^2} + T_m \frac{dn_1}{dt} + n_1 = \frac{1}{C_e} U_0 \quad (11)$$

式中: T_d 为电磁时间常数, T_m 为机电时间常数, n_1 为电机转速, C_e 为电机反电动势系数, U_0 为电枢电压。对式 (11) 进行拉氏变换得传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{T_m T_d s^2 + T_m s + 1} \quad (12)$$

系统选用型号为 80BL02 直流无刷电机, 相关参数为: $T_d=0.01$ s, $T_m=0.978$ s, $C_e=0.075$ [V·(r/s)⁻¹], 代入式 (12) 得:

$$G(s) = \frac{13.3}{0.00978s^2 + 0.978s + 1} \quad (13)$$

电控播种系统 Simulink 模型如图 4 所示, 输入为机具行进速度, 输出为电机转速, 模型中 KP 、 KI 、 KD 分别代表增量式 PID 控制算法公式 (10) 中的 K_p 、 K_i 、 K_d 。

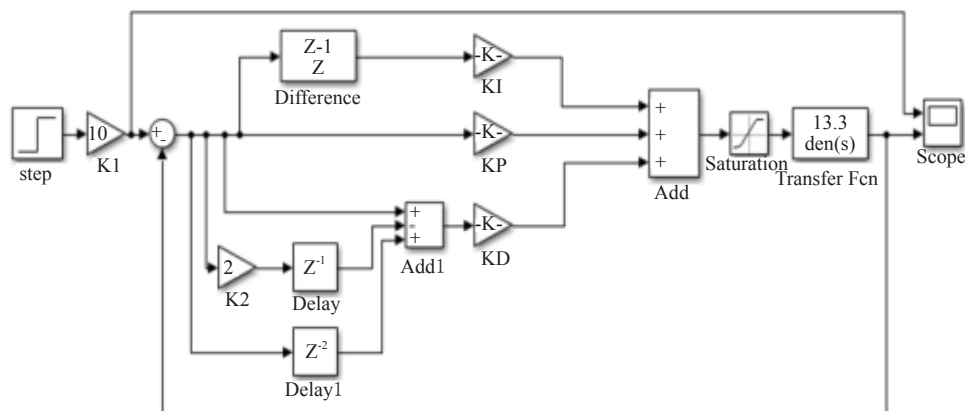


图 4 Simulink 模型

Fig.4 Simulink model

3.2.2 PID 参数整定 传统的 PID 参数整定方法可得到 1 组固定的最优参数, 但在实际运用中 PID 控制的最优参数往往随着系统的运行会产生变化, 固定的参数不能满足控制精度的需求, 故本文使用临界振荡法, 即 Z-N (Ziegler-Nichols) 法, 得到 1 组 PID 参数作为初值, 通过模糊控制实现 PID 参数的自整定, 以提高控制系统性能。

Z-N 法参数整定步骤为: 首先将 KI 与 KD 置零, 调节 KP , 使系统产生振荡; 其次调节 KP , 直至系统开始出现等幅振荡, 找到临界振荡点, 记录 KP 的临界值 K_{pcrit} 和振荡周期 T_{crit} ; 再次参照 Z-N

公式计算出相应的 KI 与 KD 的值, Z-N 公式如表 1 所示, 表中 T_i 和 T_d 分别代表积分时间常数和微分时间常数; 最后对 KP 、 KI 、 KD 进行适当调整。

表 1 Z-N 法参数计算公式

Table 1 Parameter calculation formula based on Z-N method

控制器类型 Controller type	KP	T_i	T_d	KI	KD
P	$0.5 \cdot K_{pcrit}$				
PD	$0.8 \cdot K_{pcrit}$		$0.12 \cdot T_{crit}$		$KP \cdot T_d$
PI	$0.45 \cdot K_{pcrit}$	$0.85 \cdot T_{crit}$		KP/T_i	
PID	$0.6 \cdot K_{pcrit}$	$0.5 \cdot T_{crit}$	$0.12 \cdot T_{crit}$	KP/T_i	$KP \cdot T_d$

对 K_P 进行由大到小的调整, 观察响应曲线, 当 $K_{pcrit}=25$ 时, 系统响应曲线出现等幅振荡, 振荡周期 $T_{crit}=0.2$ s 如图 5 所示。系统使用 PID 控制器, 依照表 1 中 PID 控制器对应公式可得: $K_P=15$, $K_I=150$, $K_D=0.36$, 并输入到 Simulink 模型中仿真, 得到系统响应曲线如图 6 所示。

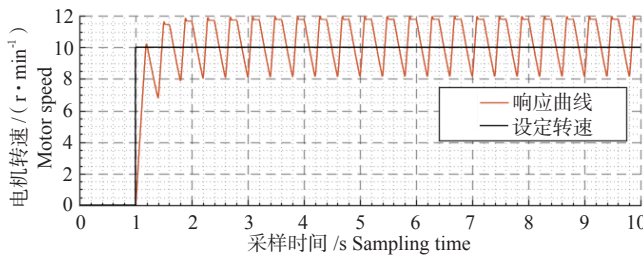


图 5 等幅振荡响应曲线

Fig.5 Constant amplitude response curve

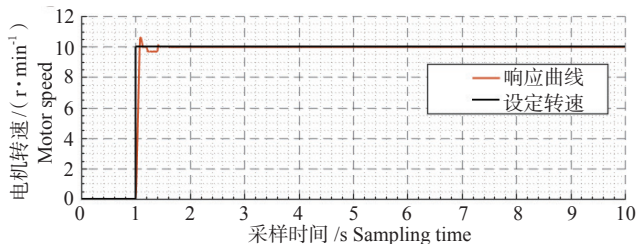


图 6 Z-N 法参数整定后响应曲线

Fig.6 Response curve after parameter tuning based on Z-N method

使用 Z-N 法整定后的 PID 参数得到的系统响应曲线, 响应时间为 0.45 s, 但系统仍有超调量, 为了进一步缩短响应时间、减少超调量、提高系统稳定性, 在 Z-N 法基础上对 PID 参数进行调整, 最后得到 1 组参数为 $K_P=19$, $K_I=115$, $K_D=0.15$, 对应系统响应曲线如图 7 所示, 系统响应时间为 0.38 s, 基本无超调量。

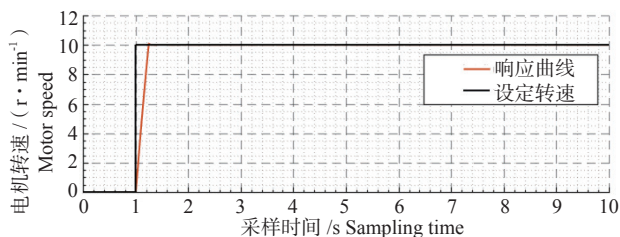


图 7 调整 PID 参数后响应曲线

Fig.7 Response curve after adjusting PID parameters

3.3 模糊 PID 控制

在播种作业中, 机具行进速度实时变化, 使用 1 组固定的 PID 参数存在适应性差、控制稳定性不高的缺点, 为提高排种控制稳定性和精度, 使用模糊 PID 控制方法^[25-26], 实现 PID 参数自适应调节。

3.3.1 控制原理与设计 模糊控制基本过程是, 先将变化量模糊化, 再进行模糊推理, 最后解模糊得到控制量, 过程中需要使用知识库 (包括数据库和规则库)。模糊 PID 控制的原理是使用模糊控制器完成对 PID 参数的整定, 控制策略结构如图 8 所示。

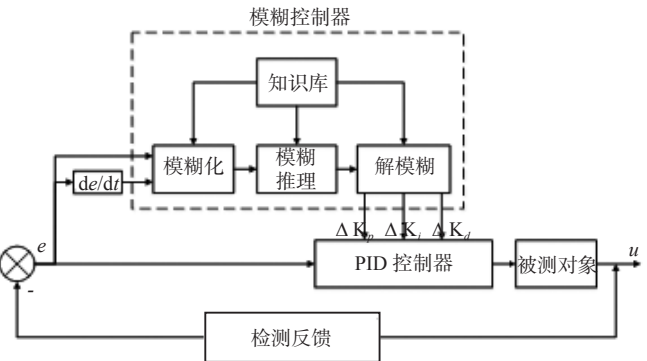


图 8 模糊 PID 控制器结构图

Fig.8 Structure diagram of fuzzy PID controller

3.3.2 控制策略的实现 模糊 PID 控制器的输入量为误差 e 与误差变化率 e_c , 模糊化过程需要将输入变量经过量化因子与变量论域相对应, 依据量化结果和模糊子集得到输入量对子集的隶属度, 模糊子集与输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊子集相同, 均为:

{NB,NM,MS,Z0,PS,PM,PB}

各变量的论域均选取为 $[-6,6]$, 量化因子为

$$K_e = \frac{n_e}{e_{\max}}, K_{e_c} = \frac{n_{e_c}}{e_{c\max}} \quad (14)$$

n_e 、 n_{e_c} 为模糊级数, e_{\max} 、 $e_{c\max}$ 为变量 e 与 e_c 的最大值, 解模糊过程需要经过比例因子, 将模糊量转化成精确量, 比例因子为:

$$K_{K_p} = \frac{K_{p\max}}{L}, K_{K_i} = \frac{K_{i\max}}{L}, K_{K_d} = \frac{K_{d\max}}{L} \quad (15)$$

$K_{p\max}$ 、 $K_{i\max}$ 、 $K_{d\max}$ 分别为 PID 参数变化的最大值, L 为输出量的模糊级数。模糊化、解模糊均需得到变量在模糊子集上的隶属度, 使用 MATLAB 软件可得到隶属度函数曲线, 例如输入量 e 的隶属度函数如图 9 所示。

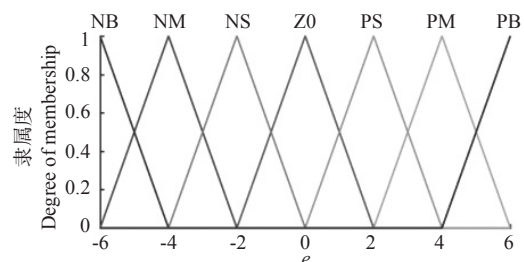


图 9 隶属度函数曲线

Fig.9 Membership function curve

根据 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊规则, 并进行解模糊过程, 将模糊量转化为精确量, 分别得到 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊控制查询表, ΔK_p 的查询表如表 2 所示。通过 Simulink 仿真得到模糊 PID 控制的系统响应时间为 0.15 s, 缩短了 0.23 s。

表 2 ΔK_p 模糊控制查询表

Table 2 The query form of ΔK_p for the fuzzy control	
偏差 (e) Deviation	偏差变化率 (e_c) Deviation rate
	-6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6
-6	0 0 0 4 4 4 4 3 2 1 0 0 0
-5	0 0 0 4 4 3 3 3 2 1 0 0 0
-4	0 0 0 4 4 3 2 2 2 1 0 0 0
-3	4 4 4 4 4 3 2 1 1 0 -1 -1 0
-2	4 4 4 4 4 3 2 1 0 -1 -2 -2 0
-1	4 4 4 3 3 2 1 0 -1 -2 -3 -3 0
0	4 4 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -4 0
1	3 3 3 2 1 0 -1 -1 -2 -3 -4 -4 0
2	2 2 2 1 0 -1 -2 -2 -2 -3 -4 -4 0
3	2 1 1 0 -1 -2 -3 -3 -3 -4 -4 -4 0
4	2 1 0 -1 -2 -3 -4 -4 -4 -4 -4 -4 0
5	2 1 0 -1 -2 -3 -4 -4 -4 -4 -4 -4 0
6	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

4 电控系统播种试验

试验以‘郑丹 958’玉米种子为研究对象, 进行玉米单粒精播试验。试验设备包括: 电控播种系统 1 套, 80BL02 直流无刷电机 1 台, BLD-300B 电机驱动器 1 台, HN3806-AB-400N 旋转编码器 1 个, 12 V 直流蓄电池 1 台, 220 V 转 24 V 电源模块 1 个, 匀轮式玉米排种器和单体各 1 台。参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[27], 选择合格指数、重播指数、漏播指数和合格粒距变异系数为评价指标,

4.1 土槽试验台试验

4.1.1 试验设计 土槽试验台试验设备安装示意图如图 10 所示。

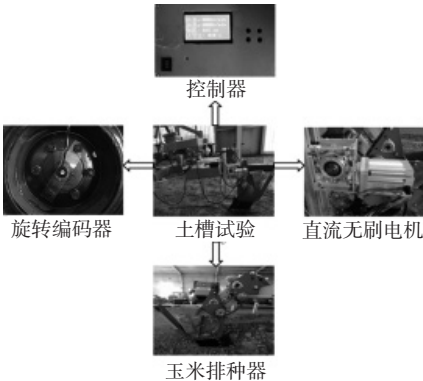


图 10 土槽试验台试验设备安装示意图

Fig.10 Test equipment installation pictures on soil tank test bench

试验选取 3、6、9 km/h 3 个水平的行进速度, 在每个速度下进行设定粒距分别为 100、150、200、250、300 mm 的播种试验, 每组试验重复 3 次, 试验结果如表 3 所示。

4.1.2 试验结果与分析 由表 3 可知, 在不同设定粒距试验情况下, 系统的合格指数、重播指数、漏播指数和合格粒距变异系数均满足 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》^[28]。如图 11 和图 12 所示, 在不同设定粒距和不同播种作业速度下, 播种质量指标的变化均在 6% 以内, 设定粒距在 250 mm 时, 合格粒距变异系数最小为 15.03%, 播种均匀性最好。变速作业中, 合格粒距变异系数较高, 但试验结果满足行业标准要求, 播种效果良好。

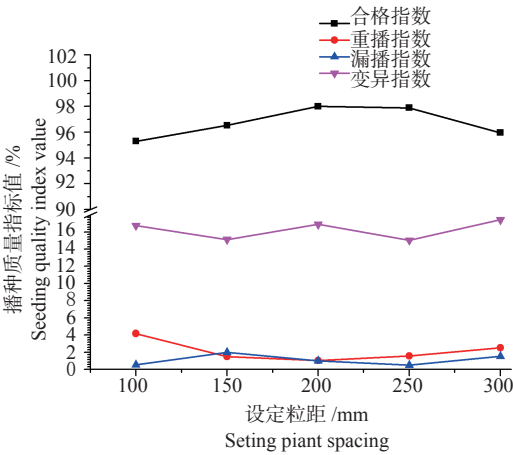


图 11 不同设定株距下播种质量指标

Fig.11 Seeding quality indicators under different planting distances

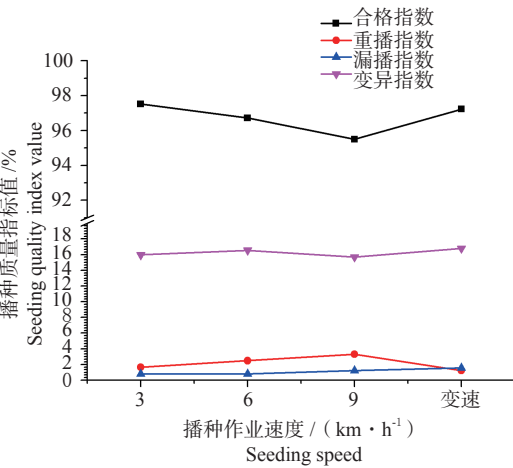


图 12 不同作业速度下播种质量指标

Fig.12 Seeding quality indicators at different operating speeds

表 3 土槽试验结果
Table 3 Testing results on the soil tank test bench

%

设定粒距/mm Setting plant spacing	性能指标 Performance	播种作业工况 Sowing operation conditions			
		3 km/h	6 km/h	9 km/h	变速作业/(km·h ⁻¹) Variable speed operation
100	合格指数	97.96	93.62	91.67	97.96
	重播指数	2.04	6.38	6.25	2.04
	漏播指数	0.00	0.00	2.08	0.00
	合格粒距变异系数	16.65	15.21	18.35	16.78
150	合格指数	100.00	96.00	96.00	94.12
	重播指数	0.00	2.00	2.00	1.96
	漏播指数	0.00	2.00	2.00	3.92
	合格粒距变异系数	18.25	15.83	10.61	15.80
200	合格指数	98.04	97.96	97.96	98.04
	重播指数	0.00	2.04	2.04	0.00
	漏播指数	1.96	0.00	0.00	1.96
	合格粒距变异系数	15.41	19.05	14.69	18.40
250	合格指数	97.69	100.00	95.83	98.04
	重播指数	2.04	0.00	4.17	0.00
	漏播指数	0.00	0.00	0.00	1.96
	合格粒距变异系数	16.65	16.16	15.51	11.81
300	合格指数	93.88	96.00	96.00	97.96
	重播指数	4.08	2.00	2.00	2.04
	漏播指数	2.04	2.00	2.00	0.00
	合格粒距变异系数	12.86	16.43	19.23	21.18

4.2 土槽试验台对比试验

在土槽试验台上同时进行了不加装电控系统和加装电控系统的对比试验，不加装电控系统的玉米播种单体的合格指数为 90.7%，漏播指数为 5.67%，重播指数为 1.76%，合格粒距变异系数为 18.47%。加装电控系统的播种质量较之得到了大幅提高：

合格指数提高了 6.04%，漏播指数下降了 4.57%，重播指数下降了 0.61%，合格粒距变异系数下降了 2.23%。如图 13 所示，播种作业速度为 6 km/h，设定粒距为 250 mm，分别选取 150 个粒距测量结果进行对比，加装电控播种系统的播种效果明显优于不加装电控播种系统。

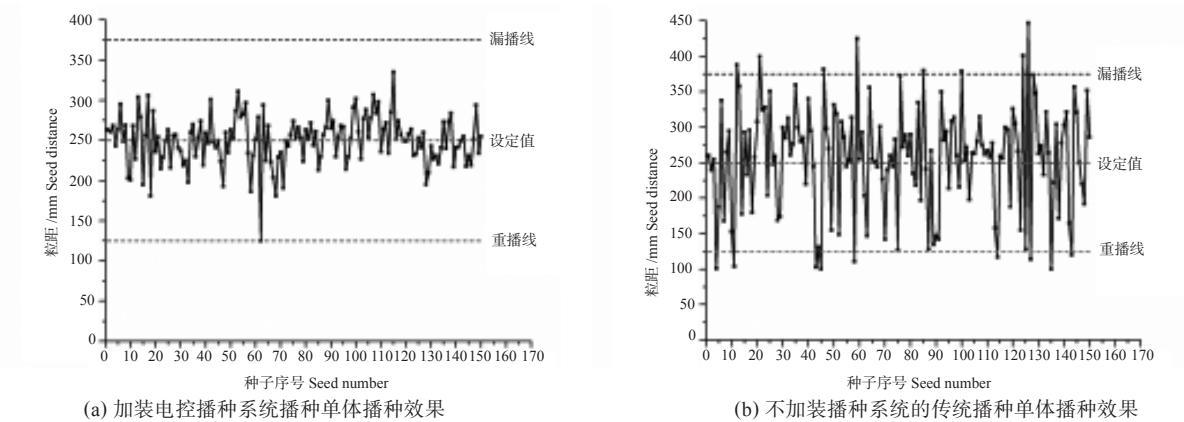


图 13 土槽试验台播种效果对比试验
Fig.13 Comparative test of seeding effect on soil tank test bench

5 结论

(1) 为解决传统播种机由于地轮打滑导致播种均匀性下降的问题,设计了1套电控播种系统,使用直流无刷电机驱动排种器,可实现玉米等作物的单粒精播和小麦等作物的精量条播。

(2) 运用Z-N法和模糊控制相结合的方式实现PID参数的自整定,建立了直流电机数学模型,并使用模糊PID控制算法实现对电机转速的控制,借助MATLAB完成模糊PID控制的设计并使用Simulink仿真,将系统响应时间缩短了0.23 s,提高了控制精度。

(3) 通过加装与不加装电控系统土槽对比试验表明:播种合格指数提高了6.04%,漏播指数下降了4.57%,重播指数下降了0.61%,合格粒距变异系数下降了2.23%,播种均匀性得到了明显提升,系统满足JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》的要求,具有良好的播种效果,可用于示范推广。

参考文献:

- [1] 隋斌,张庆东,张正尧.论乡村振兴战略背景下农业工程科技创新[J].农业工程学报,2019,35(4):1-10.
- [2] 罗锡文,廖娟,邹湘军,等.信息技术提升农业机械化水平[J].农业工程学报,2016,32(20):1-14.
- [3] 杨丽,颜丙新,张东兴,等.玉米精密播种技术研究进展[J].农业机械学报,2016,47(11):38-48.
- [4] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等.玉米播种与测控技术研究进展[J].农业机械学报,2018,49(9):1-18.
- [5] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J].农业机械学报,2017,48(9):1-16.
- [6] 刘俊孝,王庆杰,李洪文,等.针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J].农业工程学报,2019,35(11):10-18.
- [7] 金鑫,李倩文,苑严伟,等.2BFJ-24型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(5):84-92.
- [8] 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.
- [9] 丁友强,杨丽,张东兴,等.玉米变量播种机单体驱动器的设计[J].农业工程学报,2019,35(11):1-9.
- [10] 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.
- [11] 何杰,朱金光,张智刚,等.水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3):17-24.
- [12] 丁幼春,何志博,夏中州,等.小型履带式油菜播种机导航免疫PID控制器设计[J].农业工程学报,2019,35(7):12-20.
- [13] 杨硕,王秀,高原源,等.电动机驱动玉米气吸排种器总线控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):57-67.
- [14] 付卫强,董建军,丛岳,等.基于玉米播深控制的农田地形模拟系统设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(S1):58-65.
- [15] 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.
- [16] 李莉,王俊衡,孟繁佳,等.基于二次混合机构的营养液调控模型与PID算法实现[J].农业工程学报,2016,32(22):100-106.
- [17] 王由之,张宏文,王磊,等.基于模糊PID控制的棉花采摘性能试验台测控系统研制[J].农业工程学报,2018,34(23):23-32.
- [18] 韩豹,杨亚楠,王宏伟,等.苗间除草部件入土深度PID自动控制系统设计与台架试验[J].农业工程学报,2018,34(11):68-77.
- [19] 姚建峰,卢军,郑一力,等.基于变论域模糊控制算法的树木年轮测量仪直流电机转速控制[J].农业工程学报,2019,35(14):57-63.
- [20] 刘浩蓬,龙长江,万鹏,等.植保四轴飞行器的模糊PID控制[J].农业工程学报,2015,31(1):71-77.
- [21] 陈进,汪树青,练毅.稻麦联合收获机割台参数按键电控调节装置设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(16):19-26.
- [22] 陈黎卿,解彬彬,李兆东,等.基于双闭环PID模糊算法的玉米精量排种控制系统设计[J].农业工程学报,2018,34(9):33-41.
- [23] 孙永佳,沈景新,窦青青,等.基于Cortex-M3的免耕播种机监控系统设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(8):50-58.
- [24] 袁玲合,古冬冬,王万章,等.三轮高架作业车玉米变量施肥系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(S1):170-175.
- [25] 汪小岳,陈满,孙国祥,等.冬小麦变量施肥机控制系统的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(S2):88-92.
- [26] 曹付义,李豪迪,闫祥海,等.液压机械复合传动阶跃输入恒转速输出双前馈模糊PID控制[J].农业工程学报,2019,35(1):72-82.
- [27] 中国国家标准化管理委员会.GB/T6973-2005,单粒(精密)播种机试验方法[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [28] 全国农业机械标准化技术委员会.JB/T10293-2013,单粒(精密)播种机技术条件[S].北京:机械科学研究院,2013.

(责任编辑:张月清)