

赵天才, 余洪锋, 郝向泽, 等. 基于 PID 算法的水稻直播机播量控制系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 118-125.
ZHAO Tiancai, YU Hongfeng, HAO Xiangze, et al. Design and experiment of sowing control system for rice direct seeder based on PID algorithm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(2): 118-125.

基于 PID 算法的水稻直播机播量 控制系统的设计与试验

赵天才¹, 余洪锋¹, 郝向泽², 何丽楠¹, 何瑞银¹, 李 询¹, 窦祥林¹

(1 南京农业大学 工学院/江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031; 2 苏州市相城区农业局, 江苏 苏州 215100)

摘要:【目的】为了解决现有的机械式水稻直播机镇压轮传动播种导致的漏播以及播量无法同步均匀调节的问题, 实现水稻直播机播量自动精准调节。【方法】对现有苏南地区传统机械式水稻直播机进行自动化改造, 设计了基于 PID 调速算法的水稻直播机播量控制系统。该系统在田间播种作业时, 由设计的测速轮采集机具作业速度, 结合设定的目标播种量和机具作业速度, 依据播量控制策略得到排种轴理论转速; 利用 PID 调速算法和编码器测到的排种轴反馈转速对直流电机进行闭环控制, 可在线无极调节播量, 从而实现精准播种。【结果】该系统排种电机空载时转速调整时间小于 0.63 s, 最大超调量 8.21%, 施加 12.5 N·m 负载时, 排种电机最长回调时间为 0.32 s。目标设计播量对应转速范围内, 转速控制误差最大值小于 7.21%, 转速误差小于 5.21%, 田间播量误差小于 4.92%。田间车速阶梯变化时, 排种转速跟随响应及时, 具有较高的排种同步性, 与传统机械式水稻直播机相比播量调节性能显著提高。【结论】该系统自动化改造简便, 重点改进了播量调节机构, 提高了传统播种机播种性能, 对传统机械直播机具有较高适配性。

关键词: 水稻直播机; PID 调速算法; 控制系统; 播种量; 自动调节; 精准农业
中图分类号: S223.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)02-0118-08

Design and experiment of sowing control system for rice direct seeder based on PID algorithm

ZHAO Tiancai¹, YU Hongfeng¹, HAO Xiangze², HE Li'nan¹, HE Ruiyin¹, LI Xun¹, DOU Xianglin¹
(1 College of Engineering/Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2 Suzhou Xiangcheng District Agricultural Bureau, Suzhou 215100, China)

Abstract: 【Objective】 In order to solve the problem of the missed sowing and the uniform adjustment for sowing amount by the driven wheel existing in traditional mechanical rice direct seeder, and realize automatic and precise adjustment to the sowing amount of rice direct seeder. 【Method】 A traditional mechanical rice direct seeder, commonly used in the Southern Jiangsu area, was modified by incorporating an automatic seeding control system based on the PID speed control algorithm. During sowing, the working speed of implement was obtained by the designed speedometer. The theoretical rotational speed of sorting shaft was obtained according to sowing control strategy combining the set target sowing amount with the operational speed. The measured feedback speed of seeding axis closed the control loop of the DC motor using a PID speed regulation algorithm and an encoder, which could be adjusted on-line to achieve accurate seeding. 【Result】 The speed adjustment time of seeding motor without load was less than 0.63 s and the maximum overshoot was 8.21%. The longest

time for the motors to be recharged was 0.32 s when a load of 12.5 N·m was applied to the device. For the target sowing amount, the maximum value of speed control error was less than 7.21%, speed error was less than 5.21%, and sowing amount error in field was less than 4.92%. When field speed of vehicle varied in step, the seeding speed responded in time and the vehicle had a higher seeding synchronization. The seeding adjustment performance was significantly improved using the automatic release meter compared with the conventional direct seeder. 【Conclusion】 The automation transformation of this system is easy, which focuses on improving the adjustment mechanism of sowing amount, improves the sowing performance of traditional seeder, and has a high adaptability to traditional rice direct seeder machine.

Key words: rice direct seeding machine; PID algorithm; control system; automatic regulation; sowing quantity; precision agriculture

水稻直播栽培技术便于实现机械化, 具有降低劳动强度, 缓解农时, 节本增效等优点^[1-3], 随着人们对水稻直播理念的深入了解^[4], 水稻直播机在各地得到广泛推广。但现有的机械式水稻直播机大多采用镇压轮传动播种, 这种播种方式普遍存在一些不足: 镇压轮易于裹草堵转, 导致漏播; 播量靠手动调节且控制精度低; 无法实时依据机具车速变化自动调节播种量; 自动化程度较低。目前国内外针对播种机播量调节已有一些相关研究, 国外直播装备研究和运用起步较早, 基本实现自动化、智能化作业^[5], 如 LEMKEN 公司生产的 Saphir 系列播种机通过配备电脑控制终端 Easytronic 系统, 可以预设播种量并对播种量、施肥量进行校对, 可完成多种作物播种; 日本矢崎公司生产了一种直接配套插秧机进行播种作业的 SYG-8 型水稻直播机, 播种量、穴距可精准调节, 但该机具作业效率较低, 价格高昂, 使其推广受到限制。国内现有水稻直播机的研究主要集中在机械结构的设计改进以及关键部件的参数优化^[6-8], 未能从根本上解决镇压轮传动播种导致的漏播以及播种量无法同步均匀调节问题。

本文以现有苏南地区机械式水稻播种机为基础, 设计了一种基于 PID 控制算法^[9-11]的水稻直播机播量控制系统。该系统可以在线无极调节排种量, 实现排种转速的闭环控制, 达到同步播种目的, 提高播量控制精度, 为现有的水稻直播机播量自动化改造提供了一种可靠途径。

1 同步排种系统设计

1.1 同步排种控制原理

播量控制系统工作原理如图 1 所示。播种作业时, 通过电位器设定目标播量, 结合安装在测速轮上的编码器采集实时机具车速以及排种转速, 计算

出排种目标转速; 同时安装在排种轴上的编码器实时检测排种轴转速; 决策系统将目标播量、机具车速、排种转速作为控制系统的输入量, 得到当前排种器的转速控制量, 然后通过 PID 调速算法使控制器输出相应 PWM 波^[12-13], 再经过放大调理后, 驱动排种电机在线调节排种转速, 实现同步排种作业。

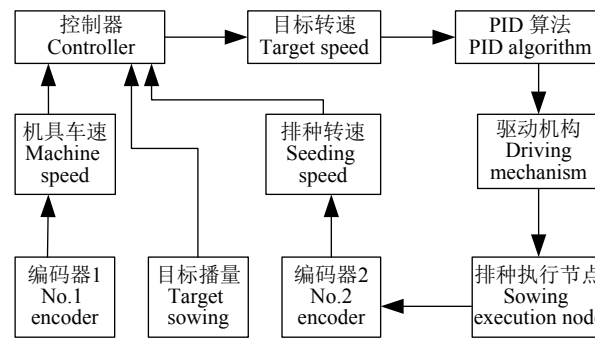


图 1 控制原理结构图
Fig. 1 Schematic diagram of control principle

1.2 排种转速控制策略

单位面积上的播种量 $[Q(t)]$ 可以表示为^[14-15]:

$$Q(t) = \frac{0.06q(t)n}{Lv(t)}, \tag{1}$$

式中, $q(t)$ 为单个排种器播种量, g/min; n 为播种行数; L 为排种通道所能覆盖的作业幅宽, m; $v(t)$ 为机具作业车速, km/h; 0.06 是各变量单位换算产生的系数; $q(t)$ 和排种电机转速 (a) 的标定公式为:

$$q(t) = ka + b, \tag{2}$$

式中, k 和 b 是标定试验测定系数。根据目标播种量, 排种电机转速和机具车速之间关系可以表示为:

$$a = \frac{Q(t)Lv(t)}{1000kn} - \frac{b}{k}. \tag{3}$$

根据公式 (3), 机具车速发生变化时, 控制器可以同步调整排种轴转速, 确保实际单位面积排种量

与目标播种量一致。

1.3 控制系统设计

1.3.1 机械结构 针对江苏丹阳欣田机械制造有限公司生产的 2BFGK-12 型播种机进行自动化改造, 改造后的播种机结构简图如图 2 所示。自动化改进保留了机械式播种开沟、旋耕、播种、镇压等功能, 重点改进了排种驱动方式, 将链轮传动改为直流电机驱动, 排种轴下方种箱内侧安装直流电机驱动, 通过链轮驱动排种轴, 播种行数为 12 行, 机具宽度 230 mm, 取消地轮与排种轴连接的链式结构; 设计增加了一种铁质测速轮, 直径为 400 mm, 测速轮表面均匀布设 15 个防滑齿^[16], 抓地性良好, 且具

有单铰链仿行机构, 弹簧支杆上方每隔 20 mm 开调节孔位 1 个, 共计 10 个, 可以通过开口销调节弹簧压缩长度, 减缓测速轮对地弹跳, 提高测速准确度; 弹簧压杆上方安装行程开关, 抬起机具可断停排种电机, 防止重播; 通过轴套分别在排种轴和地轮安装 2 个编码器用于测量排种轴转速和机具车速; 播量可按需无极调节, 简化了播量调节方法, 可实现同步播种。

1.3.2 控制系统结构 控制系统按照模块化设计思路, 由速度采集、人机交互、执行机构、主控单元等主要模块组成, 如图 3 所示。排种控制系统设计手动和自动 2 种模式: 手动模式可转动旋钮调节播量; 自动模式下, 控制系统可依据设定机具前进速度与播种量的比例系数, 在线调节排种转速。数码管采用三段式设计, 分别显示机具车速、播量档位、排种转速。速度采集模块采用 2 个编码器测速, 分别采集排种转速和机具车速, 信号经过 A/D 转换发送主控制器 STC12C5A60S2 单片机^[17]。驱动电路采用拖拉机 12 V 电源供电, 控制电路经 L7805 稳压芯片输出 5 V 供电, 强弱电分离, 提高电路板稳定性与可靠性, 控制系统主控原理图如图 4。

1.3.3 主要设计模块 1) 测速模块: 编码器是把角位移或直线位移等非电量信号转换为电量信号的装置^[18], 安装于具有单铰链仿行机构的测速轮, 实时检测机具行进速度, 产生脉冲信号经过调理电路将脉冲信号放大并滤掉杂波, 确保输出标准方波。选用欧姆龙增量式编码器 E6B2-CWZ6C, 旋转 1 周输出 600 脉冲数, 该编码器具有构造简单、性能稳

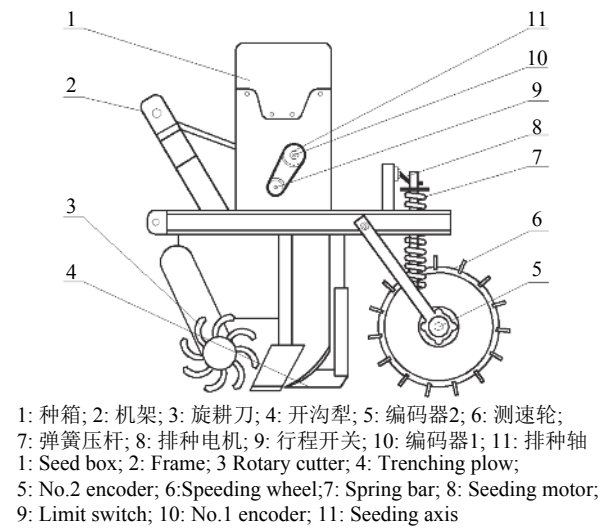


图 2 播种机结构图
Fig. 2 Seeder structure diagram

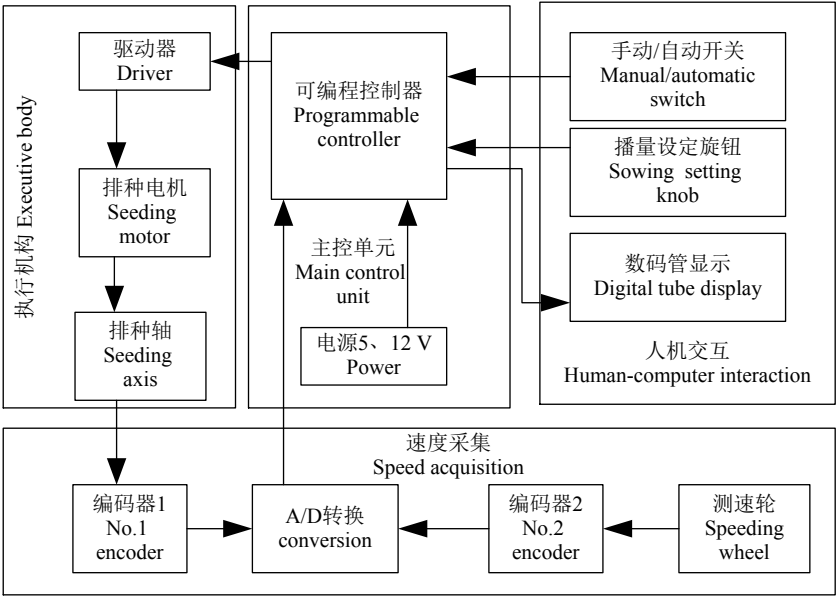


图 3 控制系统硬件结构框图
Fig. 3 Hardware structure diagram of control system

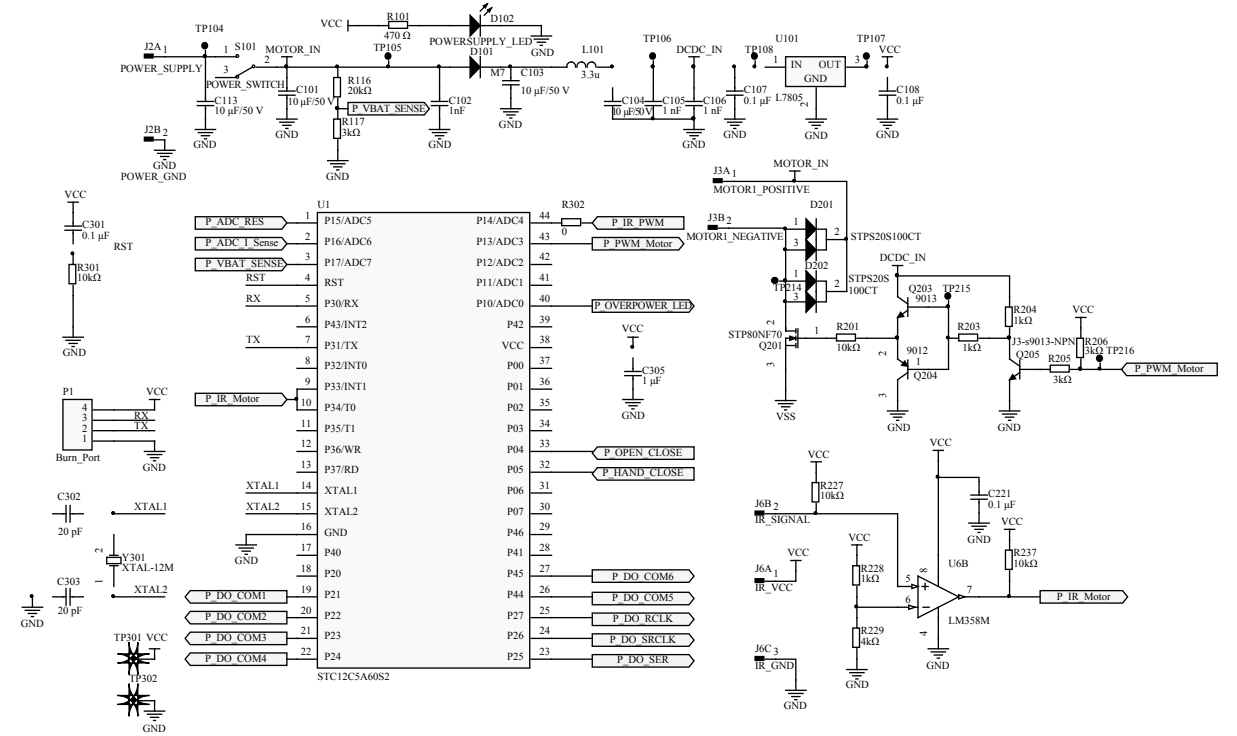


图 4 控制系统原理图

Fig. 4 The circuit diagram of control system

定, 测量精度高等优点^[19]。编码器采样频率为 5 Hz, 对每 5 个采样脉冲数据进行均值滤波, 输出 1 Hz 速度控制信号, 提高了测量速度的精度与稳定性。采用一个 0.2 μF 电容滤除采样信号过程中的杂波, 并对 LM358 放大器进行保护。

试验中设计直径为 400 mm 的测速轮模拟拖拉机后轮, 播种机测速轮的转速与脉冲频率的关系为:

$$N = \frac{60f_0}{ZM}, \quad (4)$$

式中, Z 表示编码器每转输出的脉冲个数; f_0 为准时钟的脉冲频率, Hz; M 为编码器 2 个脉冲之间的时钟脉冲的个数。

2) 直流电机驱动模块: 直流电机工作时需要驱动 12 个排种槽轮, 为了提高电路板驱动性能, 设计了二极驱动电路单元, 双 NPN 型三极管组合构成达林顿管, 提升了 SSF7509 增强型 MOS 管^[20]驱动电流, 有效提高了驱动效率, 最大漏极电流达 60 A, 漏源击穿电压为 80 V, 漏源导通电阻为 6.5 mΩ。PWM 信号经驱动模块调理运算控制排种电机, 为提高驱动模块可靠性与稳定性, 对 MOS 管电路铜箔表面走锡处理, 形成 3 mm 的焊锡导线, 增大有效走线截面, 提高电路板载荷电流, 驱动模块电路图如图 5。

3) 人机交互模块: 人机交互模块由按键、播量旋钮和数码管组成。74HC595 驱动 3 个 2 位 1.42 cm

的共阴极管数码管^[21], 将串行信号转为并行信号, 分别显示拖拉机速度 (km/h)、播量档位、排种轴转速 (r/min); 电源芯片实现了 DC12 V 与 DC5 V 的电压转换, 排种轴控制模式可手动自动切换, 按键输出端与 P0.5 引脚相连, 高电平为自动模式、低电平为手动模式, 墒情较为严重时, 可选用手动模式, 确保播种效果, 人机交互电路图如图 6。

1.4 系统建模与 PID 参数确定

排种器转速控制本质是一个直流电机控制系统, 测速轮转速作为系统输入量, 输出量为排种槽轮转速。在忽略微小电感的情形下^[22], 可将该排种器驱动电机看成经典的一阶系统, 其传递函数是一个典型积分环节和惯性环节串联^[23]:

$$G(s) = \frac{1/2\pi C_e}{s \left(\frac{J_a R_a}{C_e C_t} s + 1 \right)}, \quad (5)$$

式中, $G(s)$ 是原函数经过拉普拉斯变换后的复函数表达式; C_e 为电动势常数, 由电动机结构参数确定; J_a 为电动机转子转动惯量; R_a 为电动机电阻; C_t 为电磁力矩常数, 由电动机结构参数确定; s 为复频率。

选用邦瑞公司生产的 5D90-12GU 直流电机, 电机参数为 $C_e=12.04$, $J_a=4 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $R_a=6 \text{ } \Omega$, $C_t=0.115 \text{ N} \cdot \text{m/A}$, 代入式 (5) 得:

$$G(s) = \frac{8.69}{s(0.642s + 1)}。 \quad (6)$$

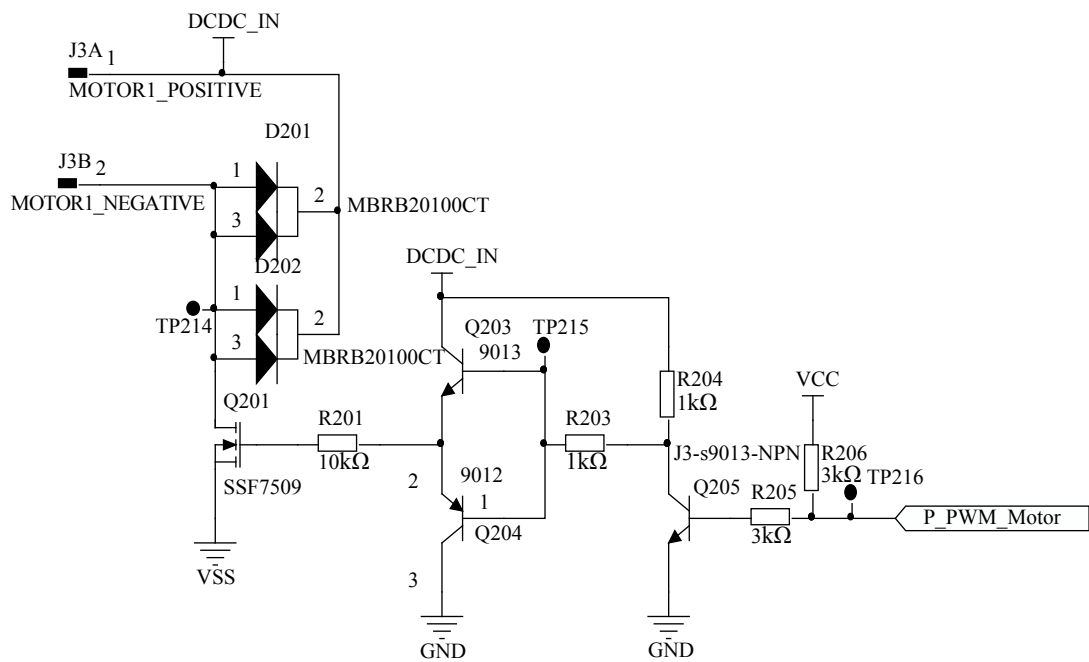


图 5 直流电机驱动电路图

Fig. 5 Driving circuit diagram of DC motor

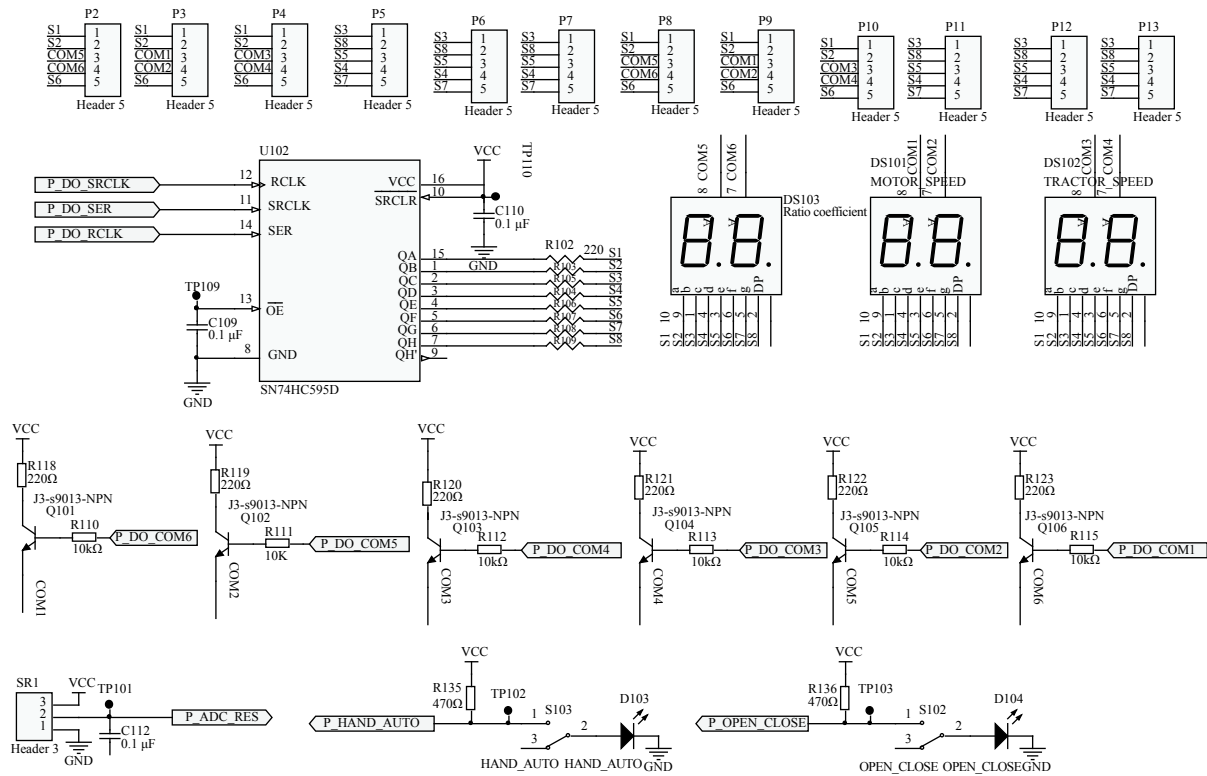


图 6 人机交互电路图

Fig. 6 Circuit diagram of human-computer interaction

本研究选用 PID 控制器模型,被控对象由排种电机、电机驱动器、执行机构组成。PID 控制系统输入信号 N_{in} , S_{in} 为经 PID 控制器输出的最佳转速控制量, N_{out} 为排种轴的作业转速;控制器执行过程中,编码器实时监测测速轮和排种轴转速,并将转速信号输入到控制系统中,与最佳转速控制量形

成偏差 (e),经 PID 调节器输出相应的控制量来调节排种转速,实现播量在线无极调节,达到控制目标。PID 控制器与电机数学模型、负反馈控制量组成闭环控制系统,其传递函数近似于二阶惯性环节,通过与标准惯性环节比较取 PID 参数: $k_p=15.216\ 2$, $k_i=0.319\ 3$, $k_d=1.012\ 1$, PID 控制系统结构图如图 7。

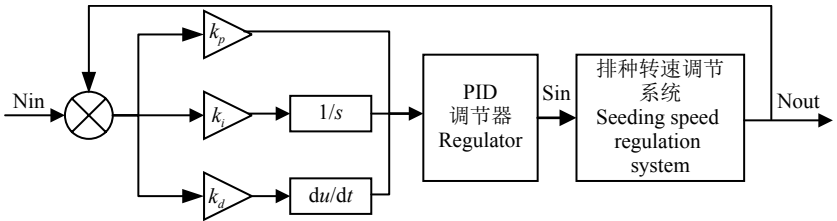


图 7 PID 控制系统结构图

Fig. 7 Structure diagram of PID control system

2 结果与分析

2.1 空载变速响应测试效果

电机空载下, 测试控制器变速调节电机转速响应变化效果, 排种轴转速选取农户常用播种量对应的 3 个转速, 分别为 20、30 和 40 r/min, 测试控制系统启动后的电机响应转速数据曲线如图 8, 性能参数如表 1 所示。结果表明: 控制系统在目标转速 40 r/min 下超调量最大, 不同转速下的调整峰值时间差距较小, 整体调整时间低于 0.63 s, 响应及时。

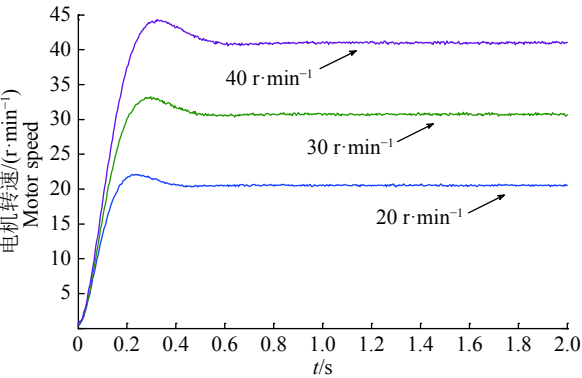


图 8 不同目标转速下电机空载转速响应曲线

Fig. 8 The response curve of motor velocity without load under different target speeds

表 1 空载响应试验数据			
Table 1 The experimental data of no-load response			
转速/(r·min ⁻¹)	超调量/%	峰值时间/s	调整时间/s
Speed	Overshoot	Peak time	Adjusted time
20	7.66	0.24	0.38
30	8.02	0.29	0.54
40	8.21	0.33	0.63

2.2 带负载性能测试结果

传统播种机由于制造工艺和加工精度的差异, 致使相同槽轮的排种轴阻力差距较大, 对控制系统带负载能力要求较高。依据排种轴扭矩标准^[24], 12 行以下播种机扭矩不大于 10 N·m, 通过磁负载装置给电机施加 7.5、10.0 和 12.5 N·m 负载, 测试控

制系统带负载能力及负载变化的调节能力, 记录排种电机实时转速值及驱动电路负载电流。变负载响应曲线如图 9 所示。施加负载 7.5 N·m 时, 电机瞬时转速回落较小, 转速回调时间短, 随着负载增大, 电机瞬时转速回落逐渐增大, 调整时间延长, 当负载 12.5 N·m 时, 转速瞬间下降了 23.5%, 控制系统迅速响应, 系统转速回调时间为 0.32 s, 最大负载电流为 6.5 A, 大负载作业条件下控制系统工作稳定, 性能可靠, 为控制系统适配不同播种机提供了理论依据, 带负载性能测试如图 10 所示。

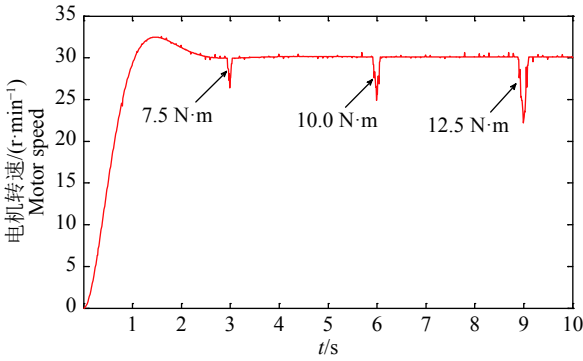


图 9 施加不同负载的电机转速曲线

Fig. 9 The curve of motor speed under different loads



图 10 负载性能试验台

Fig. 10 Test platform of load performance

2.3 田间试验结果

排种转速控制精度对于播种效果起关键作用, 为了综合测试播种机性能, 开展了排种转速及播量控制精度田间试验 (图 11)。试验地点位于南京高



图 11 田间试验图
Fig. 11 Field experiment chart

淳禾田家庭农场, 田间秸秆留茬高度 18.5 cm, 秸秆含水率(w)21.2%, 秸秆切碎长度 13.5 cm, 秸秆量 6 725.6 kg/hm²。土壤状况如表 2 所示, 试验品种为‘南粳 46’。设计机具车速和目标播量两因素三水平试验, 依据苏南地区农户实际播种要求, 选取试验机具车速为 0.8、1.2 和 1.6 m/s, 目标播量为 7.50、11.25 和 15.00 g/m²。水稻直播机有效播种幅宽 2.3 m, 由久保田 754 拖拉机牵引, 播种作业距离 140 m(田块长约 70 m) 视为 1 次试验, 记录排种轴实时转速、机

表 2 田间土壤状况			
Table 2 Soil condition in field			
土壤深度/cm	容重/(g·cm ⁻¹)	含水率(w)/%	坚实度/MPa
Soil depth	Density	Water content	Firmness
0~5	1.32	23.41	0.43
5~10	1.45	20.26	0.86
10~15	1.53	18.96	1.23

具车速、实际播量, 每个目标播量重复 2 次试验, 取平均值为最终数据, 结果见表 3。表 3 的结果表明, 3 种目标播量下的转速最大误差分别为 6.73%、6.59% 和 7.21%, 转速误差平均值分别为 4.67%、4.92% 和 5.31%, 对比传统播种机最大控制误差 24.54% 和平均控制误差 17.08%^[23], 本系统控制精度显著提高; 目标播量 15.00 g/m² 时, 机具车速提升后转速误差平均值降低较为明显且播量误差显著降低, 说明本控制系统在较高车速和较高目标播量下, 控制效果更好; 播种机整机转速控制精准, 能满足实际需求, 在不同的测试条件下, 播量控制系统性能稳定。

表 3 不同目标播量下田间试验的控制精度
Table 3 Control accuracy of speed and seeding amount in field under different target seeding amounts

播量/(g·m ⁻²)	机具车速/(m·s ⁻¹)	转速最大误差/%	转速误差均值/%	播量误差/%
Seeding amount	Vehicle speed	Max. speed error	Average speed error	Seeding amount error
7.50	0.8	6.73	4.67	3.86
	1.2	4.96	3.62	3.91
	1.6	4.13	2.74	3.66
11.25	0.8	6.59	4.92	3.25
	1.2	5.81	3.83	2.76
	1.6	5.34	2.32	2.12
15.00	7.21	5.21	3.96	7.21
	5.68	3.54	2.52	5.68
	4.08	1.63	1.04	4.08

机具行驶作业速度变化时需要排种轴快速同步响应, 为测试播量控制系统排种同步性, 设计了田间阶梯车速播种试验。选取目标播量 11.25 g/m², 测试机具行驶速度在 0.8~1.6 m/s 范围内阶梯变化, 实时记录排种轴转速和车速, 田间排种车速同步跟随效果如图 12。图 12 的结果表明, 田间播种车速变化时排种转速响应及时, 具有较高的排种同步性, 说明本研究设计改造的排种驱动机构和 PID 控制算法的引入措施起到了关键性的作用。

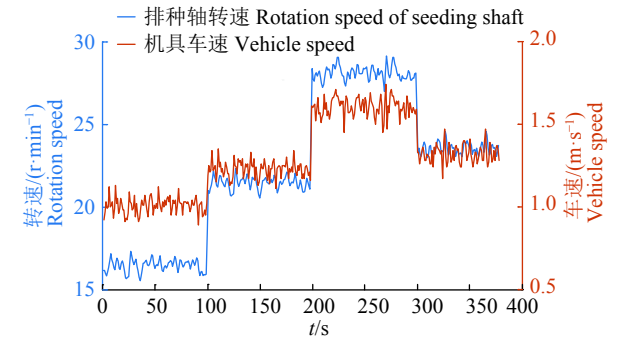


图 12 排种车速同步跟随图
Fig. 12 Synchronization follow map of seeding speed

3 结论

对传统水稻直播机进行自动化改造, 重点改进了播量调节机构, 并设计了配套的播量控制系统, 简化播量调节方式。控制系统引入 PID 控制策略, 并且建立了相应的传递函数, 针对设计目标播量下的转速范围内, 排种电机空载转速最大超调量为 8.21%, 转速调整最大时间为 0.63 s, 电机负载状况下最大回调时间为 0.32 s, 最大负载电流 6.5 A, 控制系统响应迅速, 满足实际播种需求。

田间试验转速最大误差为 7.21%, 最大转速误差均值 5.31%, 最大播量误差为 3.96%, 播种机整机转速控制精度较传统播种机显著提高, 田间播种车速变化时排种转速响应及时, 具有较高的排种稳定性和同步性, 实现了同步播种作业, 提高了传统播种机播种性能。

该控制系统自动化改造简便, 对传统机械直播机具有较高适配性, 为现有的机械式播种机低成本播量自动化改造提供了思路。

参考文献:

[1] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.

[2] 梁宝忠, 赵永亮, 赵金英, 等. 水稻直播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(s1): 63-66.

[3] 何瑞银, 罗汉亚, 李玉同, 等. 水稻不同种植方式的比较试验与评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 167-171.

[4] 许永磊. 勺式水稻直播机的设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.

[5] WANG S L, GAO A M, WANG B, et al. Comparative research and design of precision hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges[J]. AMM, 2015, 733: 497-500.

[6] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 稻麦联合收获开沟埋草一体机播种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 54-62.

[7] 曹成茂, 秦宽, 王安民, 等. 水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 66-72.

[8] 刘春波, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻直播机螺旋槽轮排种器设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(6): 734-

739.

[9] 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.

[10] 梁春英, 衣淑娟, 王熙, 等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 157-162.

[11] 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.

[12] DING X, LI P, ZHAO L, et al. Research and design of intelligent control and precision sowing simulation system for wheat[J]. JIFS, 2016, 31(4): 2313-2320.

[13] 李洁, 赵立新, 毕建杰, 等. 小麦双线精播智能控制系统的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(s1): 134-140.

[14] 余洪锋, 丁永前, 谭星祥, 等. 施肥机施肥性能检测装置的设计与试验[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3): 511-517.

[15] 余洪锋, 丁永前, 刘海涛, 等. 小田块变量施肥系统优化设计与应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 35-41.

[16] 赵艳忠, 张晨光, 王运兴, 等. 免耕播种机地轮摩擦力与滑移率试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(10): 58-66.

[17] 宋凤娟, 付侃, 薛雅丽. STC12C5A60S2 单片机高速 A/D 转换方法[J]. 煤矿机械, 2010, 31(6): 219-221.

[18] KIM Y J, KIM H J, RYU K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production[J]. Biosyst Eng, 2008, 100(4): 498-510.

[19] 郝向泽, 何旭鹏, 邹翌, 等. 基于光电传感器的精密播种机排种性能监测系统研究[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 120-124.

[20] 游志宇, 杜杨, 张洪, 等. 基于场效应管的直流电机驱动控制电路设计[J]. 电子设计工程, 2008, 16(2): 3-6.

[21] 翟震, 张春玲. 用 74HC595 芯片驱动 LED 的电路设计[J]. 机床与液压, 2004, 31(12): 151-152.

[22] 王艳颖, 王珍, 郭丽环. 直流电动机传递函数测定的实验研究[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(8): 38-40.

[23] 陈满, 鲁伟, 汪小岳, 等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 71-76.

[24] 中华人民共和国工业和信息化部. 谷物播种机技术条件: JB/T 6274. 1—2013[S]. 北京: 中国青年出版社, 2013: 1-9.

【责任编辑 周志红】