

电动机驱动玉米气吸排种器总线控制系统设计与试验

杨 硕^{1,2} 王 秀^{2,3} 高原源^{1,2} 赵学观² 窦汉杰² 赵春江^{1,3}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097;
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 车速对电动机驱动玉米气吸式排种器排种性能具有重要影响,为此设计了一种电动机驱动排种器 CAN 总线控制系统,采用 CAN 总线通讯的方法探究系统驱动排种器随车速的变化特性。该系统主要由人机交互设备、排种监测 ECU、排种驱动 ECU 组成,参照 ISO 11783 协议,对播种机具总线系统进行了设计。以 4 行气吸式玉米排种器为对象,搭建试验台,对总线控制排种盘转速精度进行了试验。通过总线提取的排种盘转速闭环调控结果得出,排种盘转速位置 PID 控制调整过程中存在低速调节时间长、超调量大的问题。采用分段 PID 参数控制的方法,由试验结果将排种盘转速设定值分为低速(15~20 r/min)、中速(20~40 r/min)、高速(40~55 r/min)3 个阶段,分阶段赋予对应闭环调节参数,得出排种盘目标转速在低速阶段时平均响应时间、平均超调量分别为 1.84 s、38.51%,与位置 PID 控制相比较,分别降低 1.63 s、34.41%;15~55 r/min 时平均稳态误差绝对值为 0.97 r/min,标准差为 0.76 r/min,平均稳态误差绝对值减小 0.13 r/min。进行了总线系统落种监测精度试验,设定粒距 20 cm,排种盘孔数为 26 个,车速 4~12 km/h 时,系统排种监测平均准确率为 97.53%,标准差为 0.48%。采用排种总线系统对车速影响排种器性能进行了试验,风机驱动轴转速为 540 r/min,车速范围为 4~8 km/h,测得风压范围为 -6.0~-5.9 kPa,播种合格指数平均为 95.68%,标准差为 2.29%;车速达到 9 km/h 时,合格指数降到 90% 以下,排种器漏播较严重。通过对播种总线系统车速和 4 行排种驱动电动机实时转速的监测,进行了车速阶跃变化播种系统响应试验,结果表明在车速 4~12 km/h、2 km/h 间隔递增过程中,系统对排种盘目标转速平均响应时间为 2.00 s,标准差为 0.34 s;2 km/h 间隔递减过程中,系统对排种盘目标转速平均响应时间为 1.83 s,标准差为 1.07 s,表明按照车速阶跃变化,该总线控制系统具有较好的响应性能。

关键词: 玉米气吸排种器; 电动机驱动; 总线控制系统

中图分类号: S24; S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0057-11

Design and Experiment of Motor Driving Bus Control System for Corn Vacuum Seed Meter

YANG Shuo^{1,2} WANG Xiu^{2,3} GAO Yuanyuan^{1,2} ZHAO Xueguan² DOU Hanjie² ZHAO Chunjiang^{1,3}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China
3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: The travel speed has great impact on motor driving planting performance. A motor driving planting system with CAN bus control was designed to explore the effect of travel speed on seed meter by using the method of CAN bus communication. The system mainly included an HMI, a planting monitoring ECU and a planting driving ECU, according to the ISO 11783 protocol, the planting machine bus system was designed. A four-channel air suction corn seed metering device was used as the test object, and a test platform was set up to test the bus control speed control accuracy of the seed plate. The problems of long regulation time at low speed and large overshoot in the traditional PID adjustment process were found from the bus extraction data. The piecewise PID parameter control method was adopted to optimize the control results. Based on the experimental results, the speeds of the seed plate were divided into three

收稿日期: 2018-11-05 修回日期: 2018-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700500-2017YFD0700502)

作者简介: 杨硕(1990—),男,博士生,主要从事播种施肥智能装备研究,E-mail: yangshuosjz@163.com

通信作者: 赵春江(1964—),男,研究员,中国工程院院士,主要从事农业信息化研究,E-mail: zhaojcj@nrcita.org.cn

parts; the low rotation speed (15 ~ 20 r/min), the middle rotation speed (20 ~ 40 r/min) and the high rotation speed (40 ~ 55 r/min). In each part, the PID control set different parameter values. The optimizing system results showed that the average regulating time and the average overshoot were 1.84 s and 38.51% with 1.63 s and 34.41% decreases, respectively, at low rotation speed, when within the range of 15 ~ 55 r/min, the absolute value of steady-state error was 0.97 r/min on average, the variance was 0.76 r/min, and the absolute value of steady-state error was reduced by 0.13 r/min on average. In the monitoring planting accuracy test of the bus system, the seed space was 20 cm, the number of holes of the seed plate was 26, the travel speed was 4 ~ 12 km/h, the results showed that the average accuracy of system monitoring was 97.53% with standard deviation of 0.48%. According to the experimental results of the planting bus system performance influenced by travel speed, when the rotational speed of fan was 540 r/min and the travel speed was 4 ~ 8 km/h, the wind pressure was -6.0 ~ -5.9 kPa and the mean qualified index of seeding was 95.68% with the standard deviation of 2.29%. When the travel speed reached 9 km/h, the qualified index dropped below 90%, and the miss-seeding index was high. The performance evaluation of planting bus system response performance influenced by a step change travel speed was done by monitoring the travel speed and four planting driving motors, when the travel speed was in the range of 4 ~ 12 km/h with an increment of 2 km/h, the average response time of the system to the speed of seed plate was 2.00 s with standard deviation of 0.34 s. When the travel speed was in the range of 4 ~ 12 km/h with a decrement of 2 km/h, the average response time of the system to the speed of seed plate was 1.83 s with standard deviation of 1.07 s, the planting bus control system had a short response time when influenced by travel speed step changing.

Key words: air suction corn seed metering device; motor driving; bus control system

0 引言

精密播种技术通过实现单粒播种、种距均匀和播深一致等手段达到减少种子投入量、增加产量的目标,因其突出的产量和效益优势得到大范围的推广^[1]。排种器是保证播种密度、粒距均匀一致的重要部件,而排种器的结构形式和驱动方式是保证排种性能的关键^[2]。排种器结构形式的不断优化,保证了在排种盘稳定转动的前提下提高排种性能^[3-4]。传统机械式地轮驱动排种器为被动式驱动方式,因受地表土壤情况和车速影响,出现地轮打滑、传动机构卡死的现象,造成漏播、株距不均匀。可控动力单元驱动排种器排种为解决该问题提供了方法,其中,电动机驱动排种器因具有转速易控、运行平稳的优点,成为精量播种的重要研究方向^[5-9]。文献[10-13]研究表明电动机驱动排种中,提高电动机转速精度可提高排种器的排种性能。播种状态的信息获取对保证播种作业的顺利进行具有重要作用。文献[14-19]采用线上或线下的方法对排种器的排种性能进行了研究,数据收集采用无线传输、RS232 串口传输、CAN 总线传输等特定传输协议,对电动机驱动排种系统性能进行调试和分析,随着农机具上电控部件的增多,布线繁杂,信息共享受到局限,控制系统之间信息交换成为急需解决的问题。为了实现农林车辆系统信息的标准化通讯,国际标准化组织制定了 ISO 11783 总线标准,为拖拉机或农机具上不同设备之间信息传输和交换提供了可

能。文献[20-21]依据 ISO 11783 标准,对拖拉机自动导航系统进行了研究;文献[22]采用 ISO 11783 标准对播深控制系统进行了研究,采集多传感器信息对播深的一致性进行控制;文献[23]采用 ISO 11783 标准搭建了 CAN 总线播种堵塞状态监测系统,对多路播种堵塞状况进行在线监测。国际知名农机企业已在播种机械上成熟应用了 CAN 总线通讯技术,而国内符合 ISO 11783 通讯标准的电动机驱动玉米精密播种技术发展较滞后。

为解决上述问题,本文设计一种电动机驱动排种器总线控制系统,以 4 行气吸式排种器为研究对象,采用无刷电动机驱动排种器;设计符合 ISO 11783 标准的通讯协议,监测播种系统工作状态,控制气吸式排种器工作,以期提高电驱排种系统的稳定性和可扩展性。

1 系统总体设计

1.1 控制系统设计

电动机驱动排种器控制系统采用 CAN 总线通讯方式,控制系统总体设计如图 1 所示。为满足气吸式播种机的现场工作性能,系统由人机交互设备(Human machine interface, HMI)、排种驱动集成控制单元(Electronic control unit, ECU)和排种监测 ECU 3 部分组成。HMI 以个人计算机(Personal computer, PC)为平台,主要完成播种设置参数输入、作业状态监测,进行播种作业现场信息交换。国内大多数播种监测传感器、排种驱动电动机都

未设置 CAN 接口,故需增加具有 CAN 接口的排种驱动 ECU 和排种监测 ECU,用于对排种相关部件的信息解析、处理,进行 CAN 总线信息传输。排种驱动 ECU 主要完成监测车速和排种驱动电动机转速信息,控制排种驱动电动机转速,驱动排种器进行精密排种。排种监测 ECU 主要用于监测气压传感器的压力、排种监测传感器的落种信息,对排种器的排种工况进行现场监测。CAN 总线协议参照 ISO 11783 标准,各 ECU 通过总线协议进行通讯。

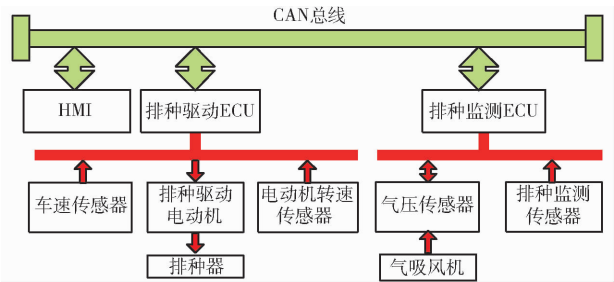


图1 控制系统总体框图

Fig.1 Structural diagram of overall system

1.2 硬件设计

系统硬件框图如图2所示。PC 经串口由 USB/CAN 转换器(北京乐电新南科技有限公司,隔离型)连接至 CAN 网络。

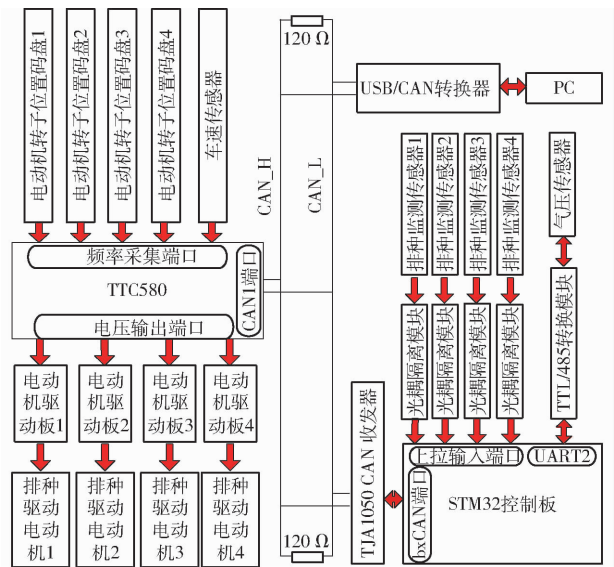


图2 控制系统硬件框图

Fig.2 Hardware block diagram of control system

排种驱动 ECU 主控器采用集成控制器 TTC580,通过频率采集端口(测频范围 0.1 Hz ~ 20 kHz)采集基于频率信号的车速传感器和四路电动机转子位置传感器反馈的电动机实际转速;采用电压输出端口控制 AQMD3608BLS 型驱动器,实现控制四路排种驱动电动机(100 W,2 000 r/min)的转速;通过 TTC580 的 CAN1 通讯端口与总线系统连接,设置通讯波特率为 500 Kb/s。排种监测 ECU 的主控器选用 STM32 控制板,主控芯片为 ATM32F105R8T6,该芯片具有双路 bxCAN (Basic extended CAN)接口,支持 CAN 2.0A 和 CAN 2.0B,能够满足 ISO 11783 - 3 和 ISO 11783 - 7 的要求;CAN 收发器采用 TJA1050 芯片,能够满足 ISO 11783 - 2 的要求。STM32 控制板通过 UART2 TTL/485 转换模块(ISO - RS485 - 1B 型)读取 CYYZ31 - 40 - RS - 14 - B - G 型气压传感器的压力;通过上拉输入端口经 PC817 型光耦(响应频率 0 ~ 4 kHz)采集排种监测传感器(河北中友机电设备有限公司)信号。

1.3 通讯协议设计

ISO 11783 基于 CAN 2.0B 标准。CAN 2.0B 帧格式根据帧标识符的位数定义了标准帧(11 位)和扩展帧(29 位)2 种格式,但 ISO 11783 只对扩展帧规定了标准化的信息帧。

本文主要对 ISO 11783 的仲裁场和数据场进行设计,ISO 11783 协议通过协议数据单元(Protocol data unit, PDU)实施和封装,PDU 由优先级 P(3 bit)、保留位 R(1 bit)、数据页 DP(1 bit)、协议数据单元格式 PF(8 bit)、特定协议数据单元 PS(8 bit)、源地址 SA(8 bit)和数据域 DATA(64 bit)7 部分组成。参照 ISO 11783 - 1:2007 附录 3 中规定的 SA 范围为 83 ~ 127 时为预留源地址定义,设计系统源地址。参照 ISO 11783 - 7:2007 应用层协议对某些通用量进行了规定,如附录 A.8 中基于行走轮车速数据帧建议 PGN 为 00FE48、数据长度为 2 bytes、更新周期 100 ms、分辨率 0.001 (m/s)/bit 等参数做出了规定。播种总线系统仲裁场地址分配如表 1 所示。

表 1 播种总线系统仲裁场地址分配

Tab.1 Arbitration field of planting bus system

ECU	P	R	DP	PF	PS	SA	参数组 PGN	PDU 标识
TTC580	6	0	0	0xE8	0x66	0x64	00E866	18E86664
TTC580	6	0	0	0xE8	0x65	0x64	00E865	18E86564
TTC580	6	0	0	0xE9	0x66	0x64	00E966	18E96664
STM32	6	0	0	0xE8	0x66	0X65	00E866	18E86665
PC	3	0	0	0xE7	0x64	0X66	00E764	0CE76466
PC	3	0	0	0xE7	0x65	0X66	00E765	0CE76566

根据设定的 PDU 标识,数据之间采用单帧模式传输,ECU 之间传输的数据应用场协议如表 2 所示。其中,反馈转速 1、2、3、4 和设定转速 1、2、3、4 分别为排种盘 1、2、3、4 的反馈转速、设定转速,数据长度 2 bytes,分辨率为 0.01 (r/min)/bit;车速数据长度 2 bytes,分辨率为 0.01 (km/h)/bit;落种速率

1、2、3、4 分别为排种盘 1、2、3、4 的监测落种数,数据长度为 1 byte;气压值数据长度为 2 bytes,分辨率为 0.01 kPa/bit;“STM32 发送报文启停”为 STM32 启停发送 PDU 标识为 18E86665 的报文控制指令,启动为 0x01,停止为 0x00;“PC 落种计数启停”为落种计数开启、停止标志报文,数据长度为 1 byte,启动

表 2 播种总线系统数据场协议
Tab.2 Data field of planting bus system

PDU 标识	数据长度	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7	Byte 8
18E86664	8	反馈转速 1		反馈转速 2		反馈转速 3		反馈转速 4	
0CE76466	8	设定转速 1		设定转速 2		设定转速 3		设定转速 4	
18E96664	8	车速							
18E86665	8	落种速率 1	落种速率 2	落种速率 3	落种速率 4	气压			
18E86564	1	STM32 发送 报文启停							
0CE76566	1	PC 落种计 数启停							

为 0x01,停止为 0x00。

1.4 控制系统软件设计

1.4.1 PC 端软件设计

采用 C + + 语言基于 MFC 框架,使用 VS2012 开发平台设计了 PC 人机交互界面(图 3),包括串口通讯参数设置、排种设置参数的输入和作业参数的监测。

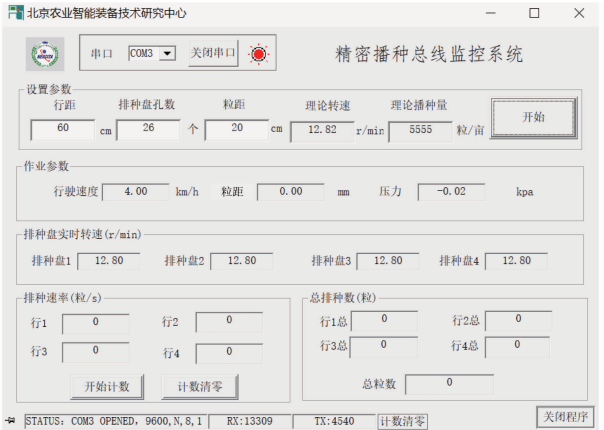


图 3 PC 界面

Fig.3 PC interface

为获得排种盘的目标转速,需要对行距、排种盘孔数、粒距参数进行设置,计算排种盘目标转速 n 为

$$n = \frac{100 \times 60v}{3.6PL} \tag{1}$$

式中 n ——排种盘目标转速,r/min

v ——车速,km/h

P ——排种盘孔数,个

L ——粒距,cm

由设置的行距和粒距获得理论播种量,用于设置株距时参考,理论播种量 Q 为

$$Q = \frac{10\,000}{0.000\,1HL} \tag{2}$$

式中 Q ——理论播种量,粒/hm²

H ——行距,cm

通过开始按钮,程序通过串口向外发送排种驱动电动机设置转速报文。作业参数监测主要包括车速、监测粒距、各路排种盘实时转速、落种速率、各行总数及总粒数,其中,监测粒距为 4 路排种监测粒距的平均值。监测粒距 L_r 为

$$L_r = \frac{100v}{3.6m} \tag{3}$$

式中 L_r ——监测粒距,cm

m ——落种速率,粒/s

USB/CAN 转换器的模式为包模式,该模式下串口数据长度固定为 16 bytes,数据不足自动补零,包首标识固定为 AA,用户可以任意对 CAN 数据进行发送和接收。程序中,串口接收到数据后,判断包首是否为 AA,若为 AA,截取固定 16 bytes 的数据长度,按照 USB/CAN 转换器包模式定义,截取报文 ID 和数据位。通过接收报文,按照 1.3 节中协议进行解析,获取各参数值。开始计数按钮用于启停 PC 端程序计数,同时通过串口发送 PC 落种计数启停报文,用于线下的数据分析,获得开始落种计数和停止落种计数的准确位置。计数清零按钮用于 PC 端的各路排种器落种计数和总计数值的参数清零。

1.4.2 排种驱动 ECU 程序设计

利用 CodesysV3.5 SP10 软件,使用 ST 语言对排种驱动 ECU 进行编程,程序流程如图 4 所示。排种驱动 ECU 程序启动后,首先完成端口初始化设

用 Keil5 软件进行编程,主要完成 CAN 报文收发、气压读取和落种速率的监测,程序流程图如图 5 所示。

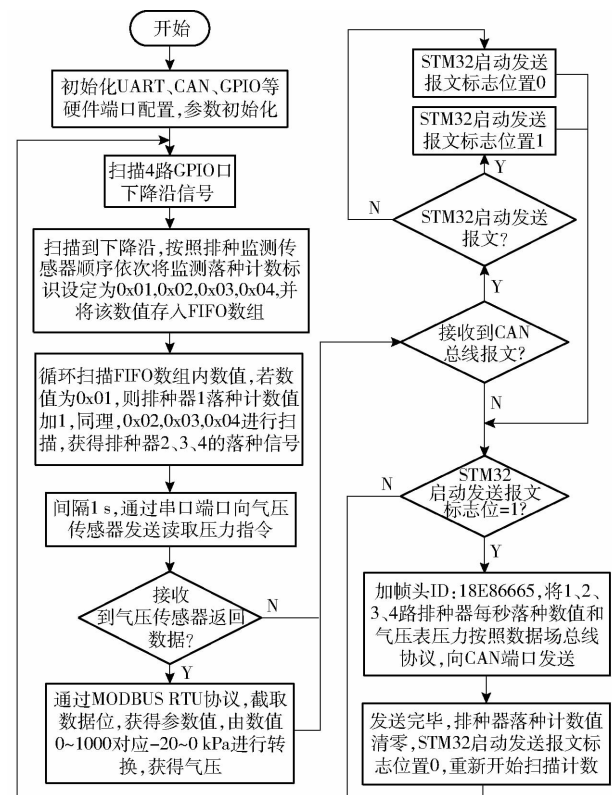


Fig. 5 Flow chart of planting monitoring ECU

端口初始化成功后,通过扫描 4 路 IO 端口电平状态,获得下降沿来获取排种监测传感器的排种脉冲信号。为了防止信号传输与端口扫描之间的相互干扰,将扫描到的下降沿信号按照落种监测传感器的顺序,依次赋予不同的落种计数标识值,存入 FIFO 数组中,通过判断 FIFO 数组内数值,当数值与对应落种计数标识值相等时,该路落种计数值加 1,获得落种信号等待发送。气体压力传感器支持 RS485 接口,通过 MODBUS RTU 协议对气压状态进行读取,响应频率小于等于 5 Hz,STM32 控制板间隔 1 s 向串口发送读取气压的指令,获得反馈数据,按照 0 ~ 1 000 对应 -20 ~ 0 kPa 进行数值转换,获得当前气压状态。接收 CAN 总线报文成功后,对 ID 进行判别,若 ID = 18E86564,则启动 STM32 发送报文,将各路每秒落种数和气压表压力按照 1.3 节协议, ID = 18E86665 向 CAN 口发送报文。报文发送完成后,将排种计数值清零,循环运行程序,直至结束。

2 试验平台搭建

排种监测 ECU 以 STM32F105RBT6 为核心,利

列气吸精密播种机中整机配件。风机配 10 倍增速带轮,由 YE2 - 132M - 6 型单相电动机 (4 kW, 940 r/min) 提供动力,选用 XD350 - 4.0G1 型变频器驱动,可控制电动机在 300 ~ 940 r/min 之间稳定调速,选用直径 45 cm 气管,长度 1 m。气吸排种器驱动轴通过联轴器与排种驱动电动机连接,排种器传动机构为直齿锥齿轮,减速比为 2:1,排种驱动电动机减速器减速比为 18:1。排种监测传感器固定于排种器排种出口位置,对射距离为 85 mm。气压传感器固定于风机分流装置中心位置。排种盘选用孔直径为 4.5 mm,孔个数为 26 个。USBCAN - E - U 型 CAN 分析仪,采用 CANTEST 软件,记录 CAN 总线数据,用于排种器作业状态的线下分析。车速传感器采用接近开关探测地轮转动输出频率信号,本试验台采用作业速度模拟器(北京农业智能装备技术研究中心,输出 1 ~ 150 kHz)用于模拟车速传感器信号。选用郑单 958(半马齿型)玉米种子进行试验,通过 PC 设置参数,经 USB/CAN 转换器将指令发送至 CAN 网络,TTC580 接收到指令后,控制电动机驱动板驱动排肥驱动电动机转动,经联轴器带动气吸排种器工作,同时将车速、排种盘转速及其他报文传送至 CAN 网络;STM32 控制板监测排种状态,并通过 TTL/485 转换模块与气压传感器通讯,获取气压,接收到发送报文指令后,将落种速率和气压传送至 CAN 网络;PC 接收报文,并实时显示车速、气压、落种速率、排种盘转速和总落种数;CAN 分析仪监测并记录 CAN 总线报文,进行线下数据分析。

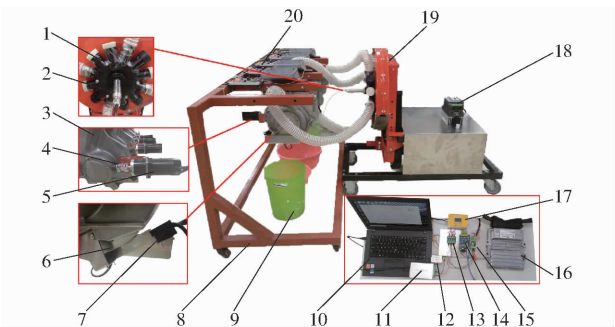


图 6 试验平台

Fig. 6 Test platform

1. 分流装置 2. 气压传感器 3. 排种器 4. 联轴器 5. 排种驱动电动机 6. 排种盘 7. 排种监测传感器 8. 台架 9. 收集桶 10. 计算机 11. CAN 分析仪 12. USB/CAN 转换器 13. PC817 光耦模块 14. STM32 控制板 15. TTL/485 转换模块 16. TTC580 17. 作业速度模拟器 18. 变频器 19. 风机 20. 电动机驱动板

3 试验与结果分析

3.1 排种盘转速控制精度试验

排种盘工作转速的精确控制是播种系统实现精

密播种的关键因素之一。为应对排种过程中,排种盘受到种子、排种机构等随机阻力的影响,系统通过排种驱动 ECU,利用位置 PID 闭环控制算法实现对 4 行排种器的驱动,控制原理如图 7 所示。

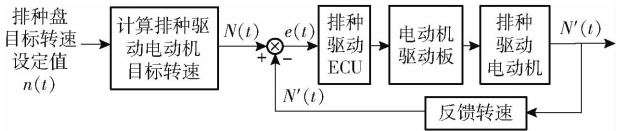


图 7 排种驱动电动机 PID 控制原理图

Fig. 7 Schematic of PID control for planting driving motor

控制器通过读取 t 时刻排种盘目标转速 $n(t)$ (r/min),乘以传动机构传动系数 36,得到排种驱动电动机目标转速 $N(t)$ (r/min),排种驱动 ECU 通过 PID 闭环控制,监测排种驱动电动机转子位置传感器获得反馈转速 $N'(t)$ (r/min),输出 0 ~ 5 V 模拟量控制电动机驱动板,驱动排种驱动电动机趋近目标转速,模拟量控制信号 $V(t)$ (mV) 与反馈量的控制关系式为

$$V(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中 $e(t)$ ——排种驱动电动机反馈转速 $N'(t)$ 与目标转速 $N(t)$ 差值

- K_p ——闭环系统比例系数
- K_i ——闭环系统积分系数
- K_d ——闭环系统微分系数

通过多次试验结果对比,采用试凑法确定 PID 参数,通过 PC 界面设置排种盘转速,通过 CAN 数据分析仪监测、记录在线作业报文,提取 PDU 标识为 0CE76466、18E86664 的报文数据,获取排种盘设定转速和反馈转速,排种盘反馈转速报文间隔 100 ms 循环发送。当排种盘孔数选择 26 个,行距为 60 cm,株距范围 15 ~ 30 cm,车速 4 ~ 12 km/h 时,计算得排种盘转速范围为 0 ~ 51.28 r/min,试验选定排种盘调速范围为 0 ~ 55 r/min。通过多次试验,调整 PID 参数,最终确定闭环系统比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 分别为 0.135、0.74、0.162。4 行排种器在设定目标转速下的响应性能如图 8 所示。

由试验结果可得,系统在控制 4 行排种器时,各排种器表现出较好的同步控制性能,目标转速在 15 ~ 55 r/min 的范围内,系统阶跃响应的超调量、稳态误差、调节时间如表 3 所示。

其中,调节时间为系统从开始调节至达到目标转速 $\pm 5\%$ 精度范围内的时间。由试验结果可知,系统在排种盘工作转速范围内具有较高控制精度,平均稳态误差绝对值为 1.10 r/min,标准差为

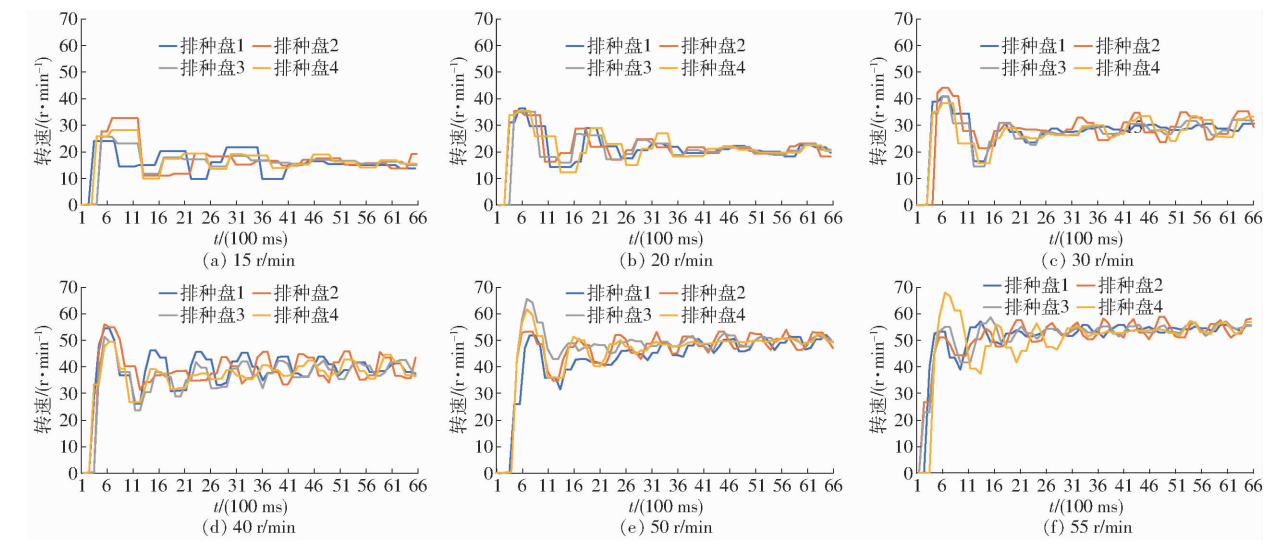


图8 4行排种盘转速阶跃响应结果

Fig. 8 Rotate speed step response results of four seed plates

表3 系统转速阶跃响应结果

Tab.3 Rotate speed step response results of system			
目标转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	超调量/%	稳态误差/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	调节时间/s
15	74.55	0.60	3.68
20	71.31	0.84	3.25
30	43.09	-1.20	1.90
40	35.58	-1.10	2.03
50	18.76	-1.70	2.10
55	11.94	-1.13	1.88

0.37 r/min。目标转速范围为15~20 r/min时,平均调节时间为3.47 s,明显大于目标转速范围为30~55 r/min的平均调节时间1.98 s。系统在15~20 r/min、30~40 r/min、50~55 r/min的目标转速范围内平均超调量分别为72.93%、39.33%、15.35%,具有较大差别,原因可能是排种驱动电动机在启动瞬间受到较大阻力影响。

3.2 排种盘转速控制优化试验

为了优化因电动机启动过程中阻力大造成的低转速下阶跃响应调节时间长、超调量大的问题,使排种盘在设定转速范围内具有较稳定的阶跃响应性能,采用分段PID控制的方法对系统进行优化。

根据图8试验结果,将排种盘设定目标转速按照低速(15~20 r/min)、中速(20~40 r/min)、高速(40~55 r/min)分段进行变参数的PID控制,进行了排种盘转速控制优化试验。在3个目标转速设定范围内,分别通过试凑法测定最佳的PID调整参数,试验结果如图9所示。通过试验,最终确定系统不同目标转速阶段内的3组PID调节系数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为:0.02、0.155、0.002;0.129、2、0.162;0.135、0.74、0.162。由试验结果可知,系统在低转速情况下超调量得到了有效的控制,通过整理、去除异常点,系统分段PID优化后的排种盘转速阶跃响应性能如表4所示。

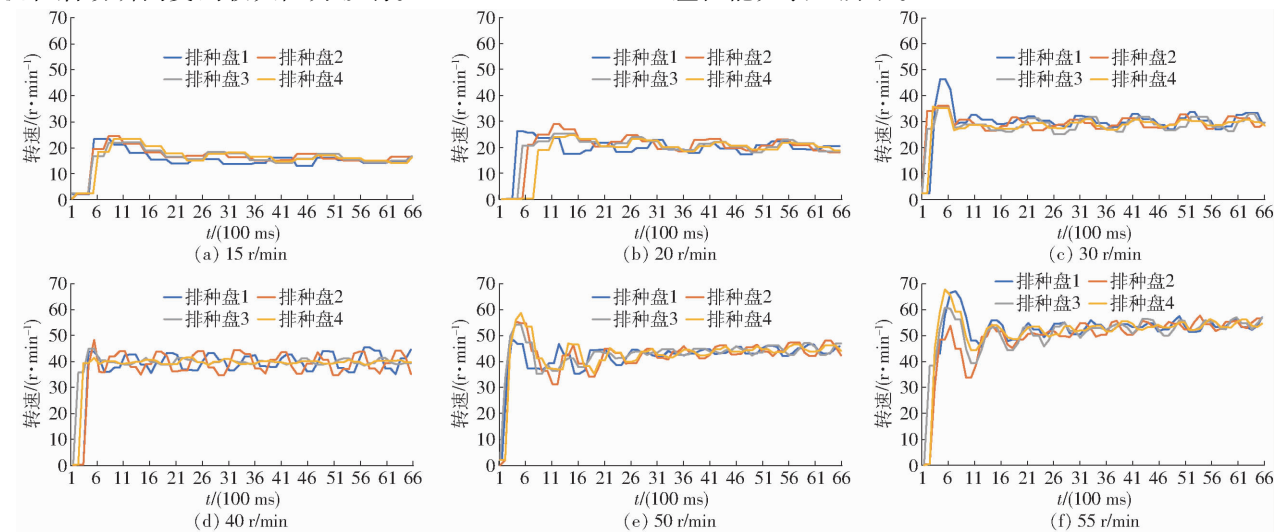


图9 分段PID转速阶跃响应结果

Fig. 9 Rotate speed step response results of piecewise PID control

表 4 系统阶跃响应优化结果

Tab. 4 Step response optimal results of system

目标转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	超调量/ %	稳态误差/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	调节时间/ s
15	48.73	0.39	1.83
20	28.29	0.57	1.85
30	22.15	-0.92	1.68
40	12.01	-0.19	0.68
45	25.04	-1.67	1.55
55	18.43	-2.09	1.30

由试验结果得,系统在 15 ~ 55 r/min 目标转速内,平均稳态误差绝对值为 0.97 r/min,标准差为 0.76 r/min,与优化前相比,平均稳态误差绝对值减少 0.13 r/min;目标转速范围为 15 ~ 20 r/min 时,系统响应时间平均为 1.84 s,与优化前相比,系统响应时间平均减少 1.63 s;在目标转速为 15 ~ 20 r/min 和 30 ~ 40 r/min 范围时,平均超调量分别为 38.51%、17.08%,与优化前相比,平均超调量分别降低 34.41%、22.26%。由试验结果得,分段 PID 调节使系统在工作转速范围内的排种盘闭环调速性能趋于一致。

3.3 车速影响排种器性能试验

为了探究多路气吸排种器排种时,选定排种盘孔数情况下,车速对排种性能的影响,利用总线系统进行了排种监测试验。试验时,采用计算机界面在线监测落种速率、各行排种数和排种总数,利用 USB/CAN 分析仪记录总线报文数据,线下进行分析。排种盘孔数 26 个,风机驱动轴转速 540 r/min,

行距为 60 cm,株距为 20 cm,车速调节范围为 4 ~ 12 km/h,间隔 1 km/h 递增。

利用计算机界面开始计数控制按钮触发的报文确定播种计数的起始和停止时间,首先对各车速下排种计数监测精度进行验证,试验结果如表 5 所示。由试验结果可得,设定株距为 20 cm,车速范围为 4 ~ 12 km/h 时,排种监测平均准确率为 97.53%,标准差为 0.48%,排种监测准确率未随车速的增加而降低。由试验结论可得,该总线监测系统具有较高的排种监测精度和稳定性,可作为在线分析玉米排种器性能的依据,在此基础上,对排种器孔数为 26 个的气吸式排种器在不同车速下的排种性能进行了研究。4 ~ 12 km/h 车速下,每个车速下同时采集 50 s 内 4 行排种器的落种速率,由公式(3)获得粒距,测得试验时风机风压范围为 - 6.0 ~ - 5.9 kPa 之间,试验结果如图 10 所示。

表 5 排种计数监测试验结果

Tab. 5 Test results of planting counting monitoring

车速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	目标转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	监测排种 数/个	实际排种 数/个	准确率/ %
4	12.82	1 039	1 069	97.11
5	16.03	1 278	1 304	97.97
6	19.23	1 477	1 512	97.63
7	22.44	1 660	1 693	98.01
8	25.64	1 855	1 894	97.90
9	28.85	2 019	2 061	97.92
10	32.05	2 109	2 162	97.49
11	35.26	2 136	2 206	96.72
12	38.46	2 045	2 106	97.02

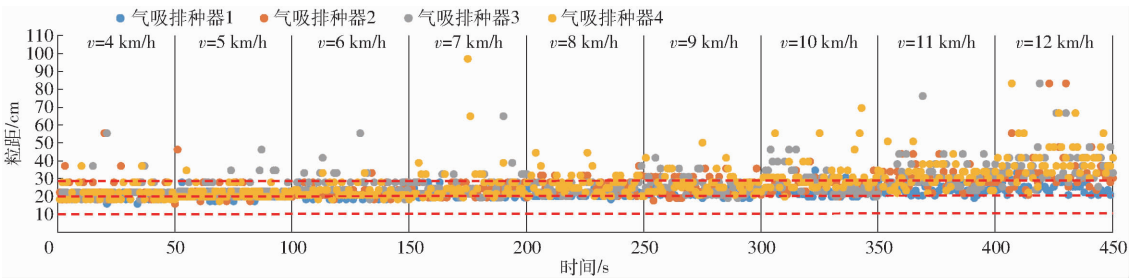


图 10 粒距随车速变化散点图

Fig. 10 Scatter diagram of changes of seed spacing with travel speed

由图 10 可得,当排种盘孔数为 26 个时,排种器随车速的增加粒距分散越来越剧烈,当车速大于 9 km/h 时,粒距大于 30 cm 的情况明显增多,漏播现象显著。

参照国标 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,获得合格指数、漏播指数和重播指数,对气吸式排种器在不同车速下的排种性能进行了分析,结果如图 11 和图 12 所示。可得排种器在车速为 4 ~ 12 km/h 的范围内,合格指数平均值为

89.59%,标准差为 8.01%,漏播指数平均值为 10.41%,标准差为 8.01%,重播指数为 0%。

排种器在车速增加过程中,合格指数变化明显,车速范围为 4 ~ 8 km/h 时,合格指数平均值为 95.68%,标准差为 2.29%;而车速范围为 9 ~ 12 km/h 时,合格指数平均值为 81.99%,标准差为 5.03%,车速达到 9 km/h 时,合格指数降到 90% 以下。综上数据分析可得,车速对气吸排种器的排种性能具有重要的影响,当排种盘孔数为 26 个,设定

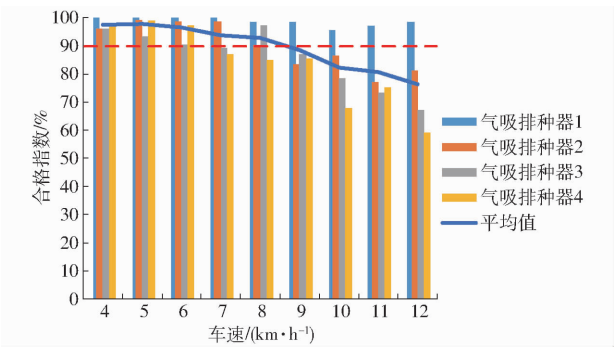


图 11 合格指数随车速变化柱状图

Fig. 11 Changes of quality of feed index with travel speed

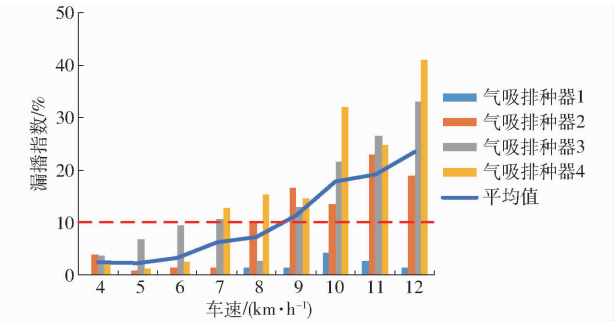


图 12 漏播指数随车速变化柱状图

Fig. 12 Changes of miss-seeding index with travel speed

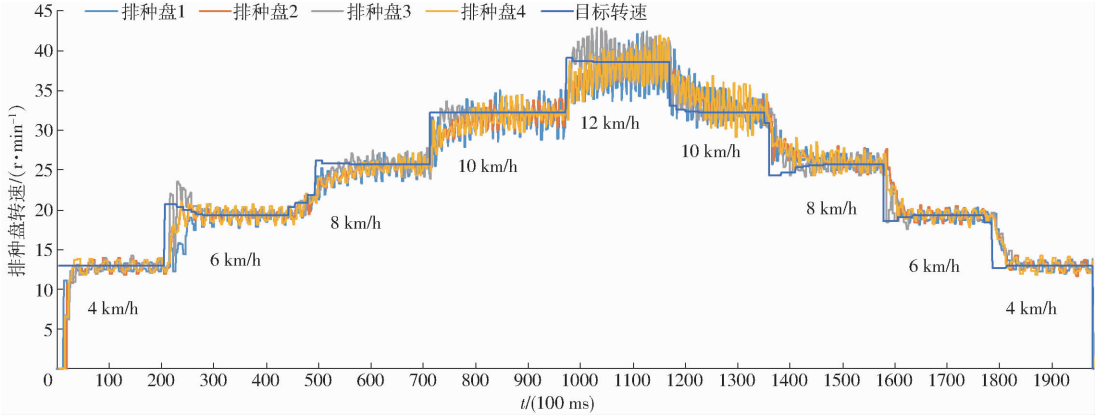


图 13 系统排种盘目标转速随车速阶跃响应结果

Fig. 13 Travel speed step response results of system to target rotation speed of seed plate

表 6 系统车速阶跃响应特性

Tab. 6 Travel speed step response characteristics of system

加速					减速				
车速变化/ (km·h ⁻¹)	目标转速/ (r·min ⁻¹)	超调量/ %	稳态误差/ (r·min ⁻¹)	调节时间/ s	车速变化/ (km·h ⁻¹)	目标转速/ (r·min ⁻¹)	超调量/ %	稳态误差/ (r·min ⁻¹)	调节时间/ s
0→4	12.82	3.48	0.22	1.75	4→0	0	0	0	0.10
4→6	19.23	5.02	0.15	2.43	6→4	12.82	-3.10	0.04	2.63
6→8	25.64	2.37	-0.34	2.30	8→6	19.23	-3.46	-0.01	1.68
8→10	32.05	3.01	-0.95	1.68	10→8	25.64	-3.52	0.13	2.78
10→12	38.46	4.77	-0.39	1.83	12→10	32.05	-3.36	0.48	1.95

可得,系统在车速阶梯递增过程中,排种盘平均转速响应时间为 2.00 s,标准差为 0.34 s;平均稳态误差的绝对值为 0.41 r/min,标准差为 0.45 r/min;平均超调量为 3.73%,标准差为 1.14%;系统在车速阶

梯距为 20 cm,风压为 -6.0 ~ -5.9 kPa 时,建议车速范围为 4 ~ 8 km/h,此时,排种合格指数大于 90%。

3.4 车速阶梯变化播种系统响应试验

由于驾驶人员、拖拉机功率等因素影响,目标播种速率相同时因车速不同会造成目标排种盘转速的随动变化。为探究系统应对车速变化的性能,对播种系统与车速的随动性能进行了实验室模拟试验。试验时,播种株距为 20 cm,排种盘孔数为 26 个,行距为 60 cm,通过人为改变作业速度模拟器的输出频率,使系统测量车速在 4 ~ 12 km/h 范围内,公差为 2 km/h,依次递增、递减阶梯变化,通过 CAN 分析仪记录系统车速、目标转速、4 行排种盘转速,排种盘转速与目标转速在车速阶梯变化下响应的试验结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出,在车速递增和递减的过程中,系统按照目标转速的变化,具有较好的跟随性能,曲线变化基本一致。车速加速、减速过程中,分别对 4 行排种盘随车速响应的超调量、稳态误差、调节时间取平均值,系统车速响应结果如表 6。由试验结果

梯递减过程中,排种盘平均转速响应时间为 1.83 s,标准差为 1.07 s;平均稳态误差的绝对值为 0.13 r/min,标准差为 0.20 r/min;平均超调量为 -2.69%,标准差为 1.51%。车速递增过程与车速递减过程相比,

系统平均调节时间增加 0.17 s, 主要由于电动机启动延迟造成; 平均稳态误差增加 0.28 r/min; 平均超调量绝对值增加 1.04%。由试验结果得出, 车速对电动机驱动排种性能具有重要影响, 受田间车速测定波动、田间土壤情况等因素的影响, 系统仍需进行田间试验验证。

4 结论

(1) 设计了一种电动机驱动玉米气吸播种机总线控制系统。系统总线标准参照 ISO 11783 进行了设计, 有利于电动机驱动精密排种系统的标准化信息传输, 能够完成按照设定播种粒距等参数, 对多路排种盘转速进行车速随动调节, 监测落种速率、播种量和气压状态, 可以对排种器性能进行分析。

(2) 车速影响排种器性能试验中, 对车速在 4 ~ 12 km/h 范围内, 系统排种监测准确率进行了验证,

实验室结果表明, 排种监测平均准确率为 97.53%, 标准差为 0.48%, 验证了落种速率监测可靠性。当设定粒距为 20 cm, 排种盘孔数为 26 个时, 利用总线系统对车速影响排种器排种性能进行了探究, 建议车速范围为 4 ~ 8 km/h, 此时播种合格指数高于 90%。

(3) 采用分段 PID 的控制方法对排种驱动电动机的转速进行闭环控制, 不仅提高了系统稳定性和控制精度, 而且有效优化了排种盘在低目标转速下超调量大的问题。在设定粒距为 20 cm, 排种盘孔数为 26 个时, 车速在 4 ~ 12 km/h 阶梯变化过程中, 系统控制排种盘转速表现出较好的随动性能, 车速阶梯递增和阶梯递减过程中, 排种盘转速的平均响应时间分别为 2.00、1.83 s, 标准差分别为 0.34、1.07 s。由试验结果可知, 本文所用气吸排种器排种性能由排种盘转速、车速、排种盘孔数等因素综合决定。

参 考 文 献

- [1] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [2] 苑严伟, 白慧娟, 方宪法, 等. 玉米播种与测控技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 1-18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001. (in Chinese)
- [3] 崔涛, 韩丹丹, 殷小伟, 等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 8-16.
CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8-16. (in Chinese)
- [4] 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 43-47.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009. (in Chinese)
- [5] YANG L, HE X, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1-9.
- [6] 程卫东, 张国海, 阮培英, 等. 国内玉米(大豆)精密播种机排种器电驱应用分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(8): 13-16.
CHENG Weidong, ZHANG Guohai, RUAN Peiying, et al. Application review on electric driven seed metering device of domestic precision seeder for maize or soybean[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(8): 13-16. (in Chinese)
- [7] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007. (in Chinese)
- [8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180805&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-

- 1298.2018.08.005. (in Chinese)
- [9] 印祥,杨腾祥,金诚谦,等.玉米精量播种智能控制系统研制[J].农机化研究,2018,40(9):125-128,133.
YIN Xiang, YANG Tengxiang, JIN Chengqian, et al. Development of an intelligent control system for precision corn seeding [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(9):125-128,133. (in Chinese)
- [10] CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part I: design and laboratory simulation[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 144:71-79.
- [11] CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part II: field performance[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 145:11-17.
- [12] 和贤桃,丁友强,张东兴,等.玉米精量排种器电驱PID控制系统设计与性能评价[J].农业工程学报,2017,33(17):28-33.
HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Design and evaluation of PID electronic control system for seed meters for maize precision planting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17):28-33. (in Chinese)
- [13] 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.
CHEN Liqing, XIE Binbin, LI Zhaodong, et al. Design of control system of maize precision seeding based on double closed loop PID fuzzy algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9):33-41. (in Chinese)
- [14] 孙伟,王关平,吴建民.勾链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(11):8-15.
SUN Wei, WANG Guanping, WU Jianmin. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):8-15. (in Chinese)
- [15] 安霆,杨旭海,邓赞石,等.气吸式排种器监测系统设计[J].农机化研究,2018,40(11):69-73.
AN Ting, YANG Xuhai, DENG Zanshi, et al. Air suction seed metering device monitoring system design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11):69-73. (in Chinese)
- [16] 丁幼春,王雪玲,廖庆喜.基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J].农业工程学报,2014,30(24):11-21.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24):11-21. (in Chinese)
- [17] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(10):19-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161003&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003. (in Chinese)
- [18] 吴南,林静,李宝筏,等.免耕播种机漏播补偿系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(7):69-77,120.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on no-tillage planter reseeding system for miss-seeding [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(7):69-77,120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170709&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.009. (in Chinese)
- [19] KOSTIĆ M, RAKIĆ D, RADOMIROVIĆ D, et al. Corn seeding process fault cause analysis based on a theoretical and experimental approach[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 151(C):207-218.
- [20] 周建军,郑文刚,李素,等.基于ISO 11783的拖拉机导航控制系统设计与试[J].农业机械学报,2010,41(4):184-188.
ZHOU Jianjun, ZHEN Wen'gang, LI Su, et al. Automatic navigation control system for tractor based on ISO 11783 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(4):184-188. (in Chinese)
- [21] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Applicability of the ISO 11783 network in a distributed combined guidance system for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3):306-317.
- [22] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 116:30-35.
- [23] 田辉辉,王熙,林二东.CAN总线在大豆精播机播种监测系统中的应用[J].农机化研究,2015,37(1):223-227.
TIAN Huihui, WANG Xi, LIN Erdong. Application of CAN BUS in the seeder monitoring system of soybean precision seeding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(1):223-227. (in Chinese)