

# 支持转速现场标定的玉米精密排种器电驱控制系统研究

杨 硕<sup>1,2</sup> 王 秀<sup>2,3</sup> 高原源<sup>1,2</sup> 翟长远<sup>2,3</sup> 赵学观<sup>2</sup> 赵春江<sup>1,3</sup>

(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:** 针对现有玉米精密电驱排种控制系统无法快速适应多类型排种器排种控制的问题,在玉米 CAN 总线电动排种的基础上,设计了一种对玉米排种器排种驱动进行现场标定的电驱控制系统。系统在排种驱动电动机控制信号与排种盘转速之间的对应关系中,采用分段线性插值的方法现场获取排种器驱动曲线,实现排种盘转速标定与控制。以国产气吸式玉米精密排种器和指夹式玉米精密排种器为试验对象,在模拟车速下,对系统排种盘转速现场标定的控制准确性进行试验。电驱气吸式排种器排种盘转速控制性能试验中,株距设定为 25 cm,车速设定为 3 ~ 12 km/h(间隔 3 km/h),结果表明,系统调节时间最长为 0.80 s,稳态误差最大为 0.81 r/min,控制精度最低为 97.42%。电驱指夹式排种器排种盘转速控制性能试验中,株距分别设定为 20、25、32 cm,车速设定为 4 ~ 9 km/h(间隔 1 km/h),结果表明,总体排种盘转速平均调节时间为 1.09 s,标准差为 0.26 s;总体平均稳态误差为 0.38 r/min,标准差为 0.23 r/min;总体平均控制精度为 98.30%,标准差为 1.01%。与分段 PID 排种转速控制系统控制性能进行对比得出,支持转速现场标定的系统具有更好的适应性,平均调节时间减少 0.51 s,平均稳态误差增大 0.16 r/min,平均控制精度降低 0.63 个百分点。选用指夹式排种器,进行了播种均匀性田间试验,株距为 20 cm,车速范围为 4 ~ 7 km/h(间隔 1 km/h),结果表明,播种合格指数大于等于 84.26%,变异系数小于等于 18.29%,说明系统能够完成对玉米精密排种器排种转速控制曲线的高控制精度现场标定,能够精准控制电驱排种转速。

**关键词:** 玉米; 精密排种器; 现场标定; 播种均匀性; CAN 总线

中图分类号: S24; S223.2<sup>+</sup>3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)01-0047-09

OSID:



## Investigation on Motor-driving Maize Precision Seed Meter System Supporting On-site Calibration of Rotate Speed of Seed Plate

YANG Shuo<sup>1,2</sup> WANG Xiu<sup>2,3</sup> GAO Yuanyuan<sup>1,2</sup> ZHAI Changyuan<sup>2,3</sup> ZHAO Xueguan<sup>2</sup> ZHAO Chunjiang<sup>1,3</sup>

(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:** Facing the problem of existing maize precision planting control system cannot quickly drive the seed sowing of multiple types corn precision seed meters, an on-site seeding rate calibration system was designed based on the controller area network (CAN) bus motor-driving corn planting technology. From the corresponding relationship between the motor control signal and the rotate speed of seed plate, the system got the seed meter driving curve in the field using piecewise linear interpolation to realize the seeding rate control. Taking a domestic corn air-suction seed meter and a corn finger pick-up seed meter as the test objects, the speed control performance of seed plate in simulative travel speed was respectively evaluated. In the experiment of rotate speed control performance of corn air-suction seed meter, the seed spacing was set to be 25 cm and the travel speed was set to be 3 ~ 12 km/h with increment of 3 km/h, the greatest response time was 0.80 s, the biggest steady-state error was 0.81 r/min and the lowest accuracy of seed plate rotate speed control was 97.42%. In the experiment of rotate speed control performance of corn finer pick-up seed meter, the seed spacing was set to be 20 cm, 25 cm and 32 cm and the travel

收稿日期: 2019-09-11 修回日期: 2019-11-07

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: zhaocj@nrcita.org.cn

speed was set to be 4 ~ 9 km/h with increment of 1 km/h, the results showed that the average response time of the whole rotate speed of seed meter was 1.09 s with standard deviation of 0.26 s; the average steady-state error of the whole experiments was 0.38 r/min with standard deviation of 0.23 r/min; the average accuracy of rotate speed control of the whole experiments was 98.30% with standard deviation of 1.01%. Compared the seed plate rotate speed control system with the sectional proportion integration differentiation (PID) method, the system supported seed plate rotate speed on-line calibration had a better adaptability, the average response time was decreased by 0.51 s, the average steady-state error was increased by 0.16 r/min and the average accuracy of rotate speed control was decreased by 0.63 percentage points. The planting uniformity experiment in field was performed, taking the finger pick-up seed meter as the material. In the experiment of planting uniformity in field, the seed spacing was set to be 20 cm and the travel speed was 4 ~ 7 km/h with increment of 1 km/h, the results showed that the quality of feed index was greater or equal to 84.26%, and the coefficient of variation was less than or equal to 18.29%. The above results indicated that the system can precisely control the rotate speed of motor driving planting through the way of calibrating the planting rotate speed control curve of corn precision seed meter on site with high accuracy.

**Key words:** maize; precision seed meter; on-site calibration; seed spacing uniformity; CAN bus

## 0 引言

保证玉米播种均匀性对玉米根系发展,获取水分、养分和光照具有积极作用,是提高玉米产量的重要方法<sup>[1-3]</sup>。播种作业过程中,播种机具行距多为固定值,根据播量、车速进行调整,播种均匀性主要通过改变排种速率来实现。在玉米免耕精密播种高产要求的背景下,对播种提出了向播种量更大、播种均匀性更好的方向发展的新要求。为了实现这一目标,主要采取提高精密排种器性能和改进排种驱动模式两种方法。在提高排种器性能方面,研究者对现有排种器的关键结构参数进行了研究<sup>[4-5]</sup>,利用软件仿真的方式研制新型排种器<sup>[6-7]</sup>,设计新型排种器进行试验验证<sup>[8-9]</sup>,对高速下玉米精密排种器的排种性能进行研究<sup>[10-11]</sup>。高速精密排种器在保证播种质量的同时提高播种速度,具有增大播种效率的优势,但目前多处于试验阶段,受排种器加工流程、工作稳定性、可靠性等因素影响,商品化大规模推广仍需数据支撑,因此国内农机企业开始对现有商品化精密排种器进行驱动方式升级,优先保证精密播种机的播种均匀性。在改进排种驱动方式方面,研究者对电驱排种试验系统进行研究,证明在实验室环境下电驱排种能够提高播种均匀性<sup>[12]</sup>,采用PID控制方法对电动机驱动玉米精密排种进行了田间验证<sup>[13-15]</sup>,并逐渐优化排种转速控制策略<sup>[16-17]</sup>,电动机驱动排种技术因排种播量易控、播种均匀性好的特点,将逐渐取代传统玉米精密播种机中地轮传动的方式<sup>[18]</sup>。不同播种机排种器的排种驱动电动机多样,给播种电驱系统的排种盘转速精确控制带来困难。目前国内播种系统多针对专一类型排种器,而国外农机企业的电驱动系统集成度高,不适

应国内农机企业对玉米电驱动应用系统的要求,国内玉米精密播种机进行电动机驱动升级的难点主要体现在排种盘转速控制系统与排种器的融合程度上。播种机目前多为多行单体式布置,电驱排种系统的现场通信对保证工作可靠性至关重要。一些利用CAN总线通信技术研制了播种机监测系统,但通信协议缺乏标准化<sup>[19]</sup>。一些遵循标准化的CAN总线通信技术在拖拉机导航系统<sup>[20]</sup>、玉米播深监控系统<sup>[21]</sup>、玉米收获系统<sup>[22]</sup>、玉米电驱系统<sup>[23]</sup>等方面进行研究,农业装备的CAN总线通信模式成为目前农业装备的主要现场通信模式<sup>[24]</sup>,但国内精密播种装备的CAN总线通信发展仍相对滞后。

为解决上述问题,在CAN总线通信的基础上,本文设计一种能够对排种盘转速快速标定的电驱播种控制系统。以国产气吸式玉米排种器和指夹式玉米排种器为试验对象,对电驱排种转速现场标定方法进行研究,设计试验,对电驱玉米精密排种器进行现场快速排种盘转速标定,并对系统性能进行验证,通过CAN总线进行信息传输,增加电驱排种系统的适应性,为地轮传动玉米精密播种机进行电动机驱动排种升级提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验平台

选用国产指夹式玉米精密排种器,设计了玉米总线电驱播种试验样机,如图1所示。系统主要由人机交互设备、排种驱动ECU和排种监测ECU 3部分构成。人机交互设备选用PPC-GS1051T-JK4型车载计算机,运行Windows 7系统,用于现场播种控制、播种状态监测、排种驱动曲线标定等人机交互平台。排种驱动ECU选用TTC32型车载控制

器,用于监测排种驱动电动机转速、控制排种驱动器排种。指夹式排种器的排种驱动器选用 AQMD3620NS 型有刷直流电动机驱动器,最大输出功率 240 W (DC12V 时),适合标识额定功率 95 W 及以下或标识额定电流 16 A 以下电动机长时间满额工作。指夹式排种器排种驱动电动机选用 80 W 有刷直流电动机,最大转速 60 r/min,转速反馈编码器选用 K38-08-0600-B-M-T-526 电压输出型编码器。



图 1 试验样机

Fig. 1 Experimental prototype

1. 车载计算机 2. 指夹排种器 3. 排种监测传感器 4. 排种驱动器 5. 测速码盘 6. 排种监测 ECU 7. 排种驱动 ECU 8. 排种驱动电动机

车速探测采用地轮测速,测速码盘分辨率为 48P/r。排种监测 ECU 基于 STM32F105RBT6 型微控制器设计,用于接收排种监测传感器的信号进行排种质量监测,转换为总线信号传送。总线通信设计在文献[23]已有详细描述,本文不再描述。试验时,车载计算机运行上位机软件,对系统进行播量、行距和排种标定等参数设置,利用 CAN 分析仪记录系统在不同车速下对指夹式排种器的田间车速、排种数据,记录玉米出苗后的株距变化,对系统田间播种均匀性进行评价。

## 1.2 软件界面设计

使用 C++ 语言 MFC 功能库设计了车载计算机的上位机界面,如图 2 所示。主要包括排种标定、工作两种模式。处于工作模式时,系统进行电动机驱动排种车速随动作业,实时监测排种粒数、排种盘转速、株距、车速、播种质量等状态,出现故障的播种单体通过颜色变化显示在界面上,提醒用户进行排除。选择标定模式时,系统拟合排种驱动曲线,获得不同种类和工况下排种器排种控制曲线。排种标定界面如图 3 所示,通过密码验证(图 3a)进入参数设置(图 3b),由于本系统中电动机驱动器的驱动信号选择 0~3.3 V 的单端模拟电压信号,确定单端模拟电压与排种盘转速对应驱动曲线即能够完成排种曲

线标定。参数设置界面包括模拟电压初值  $V_i$ 、模拟电压峰值  $V_p$  和转换系数  $K_v$ 。电动机受排种盘转动启动所需扭矩的影响,当电动机输出扭矩大于排种盘转动所需扭矩时,排种盘才能稳定转动,模拟电压初值设置的目的是设置排种最低稳定转速时的模拟电压驱动值。在 0~3.3 V 的模拟电压驱动信号范围内,受到电动机功率和排种器类型的影响,电动机转速与模拟电压驱动信号并不是始终呈现正相关性,在电动机驱动器到达一定数值后,功率继续增大,电动机驱动转速并不会继续增加,将该最高模拟电压值设置为模拟电压峰值。转换系数为排种驱动电动机转速反馈频率(单位为 Hz)除以排种盘实际转速(单位为 r/min)所得的倍数。

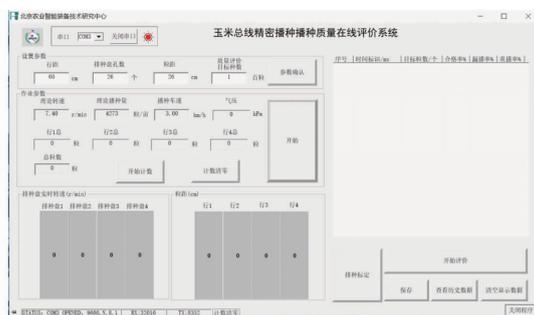


图 2 系统主界面

Fig. 2 System main interface

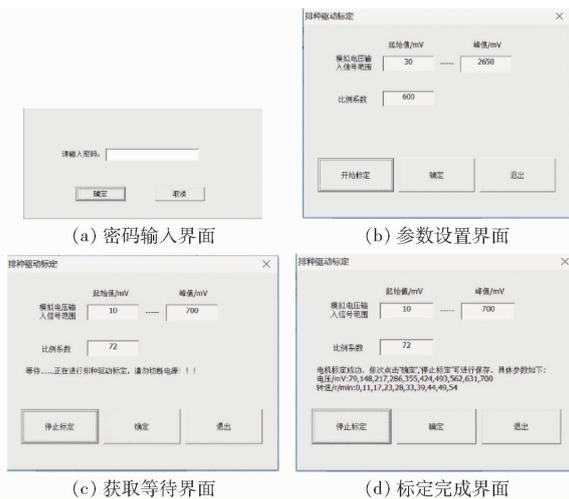


图 3 排种盘转速标定界面

Fig. 3 Seed plate rotate speed calibration interface

开始标定时,上位机通过总线向排种驱动 ECU 发送包含开始标定和该 3 个参数数值的报文,等待标定完成(图 3c),排种驱动 ECU 根据设置的模拟电压范围划分为 11 个区间依次进行输出,标定程序流程见 1.3 节。排种标定完成,排种驱动 ECU 将系统标定结果上传并显示至标定完成界面(图 3d)。

## 1.3 分段线性插值排种盘转速标定程序设计

分段线性插值排种盘转速标定方法如图 4 所示。 $N'$  为目标转速, $V'$  为对应电压输出。

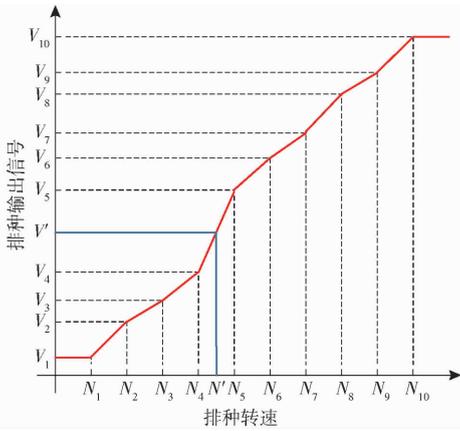


图4 分段线性插值排种盘转速标定方法

Fig. 4 Seed plate rotate speed calibration method by piecewise linear interpolation

根据排种驱动模拟电压的设置范围,令  $V_p = V_{10}$ ,  $V_i = V_0$ , 根据等差数列求出公差

$$d = \frac{V_{10} - V_0}{10} \quad (1)$$

根据式(1), 获得驱动模拟电压  $V_1$  为

$$V_1 = V_0 + d \quad (2)$$

由式(2)获得  $V_1$ , 按照等差数列求值的方式依次求出  $V_2, V_3, \dots, V_{10}$  对应输出, 同时, 获取各个驱动模拟电压对应的排种盘转速  $N_1, N_2, \dots, N_{10}$ 。以排种盘转速为横坐标, 驱动模拟电压为纵坐标, 得到10个点的坐标, 以该10个坐标点作为分界点, 分为11段线性区域, 区域划分为

$$\begin{cases} N' \leq N_1 & V' = V_1 \\ N_1 < N' \leq N_2 & V' = k_1 N' + b_1 \\ N_2 < N' \leq N_3 & V' = k_2 N' + b_2 \\ \vdots & \\ N_9 < N' \leq N_{10} & V' = k_9 N' + b_9 \\ N' > N_{10} & V' = V_{10} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中 } k_n = \frac{V_{n+1} - V_n}{N_{n+1} - N_n} \quad (n = 1, 2, \dots, 9) \quad (4)$$

$$b_n = \frac{N_{n+1} V_n - N_n V_{n+1}}{N_{n+1} - N_n} \quad (n = 1, 2, \dots, 9) \quad (5)$$

系统获得目标转速  $N'$  进行输出时, 根据式(3)对  $N'$  所处的线性区域进行判断, 对应区域内的直线

控制方程进行  $V'$  的输出。

排种标定子程序如图5所示, 根据总线报文指令(表1), 进入排种标定模式或者排种驱动模式。排种标定模式中, 能够完成对排种驱动曲线的更新, 根据总线报文中解析的排种驱动模拟电压初值和模拟电压峰值, 按照上述排种标定方法计算出10个等差数列分布的模拟电压, 针对每一个模拟电压, 持续输出3s, 待排种盘转速稳定后, 读取排种驱动电动

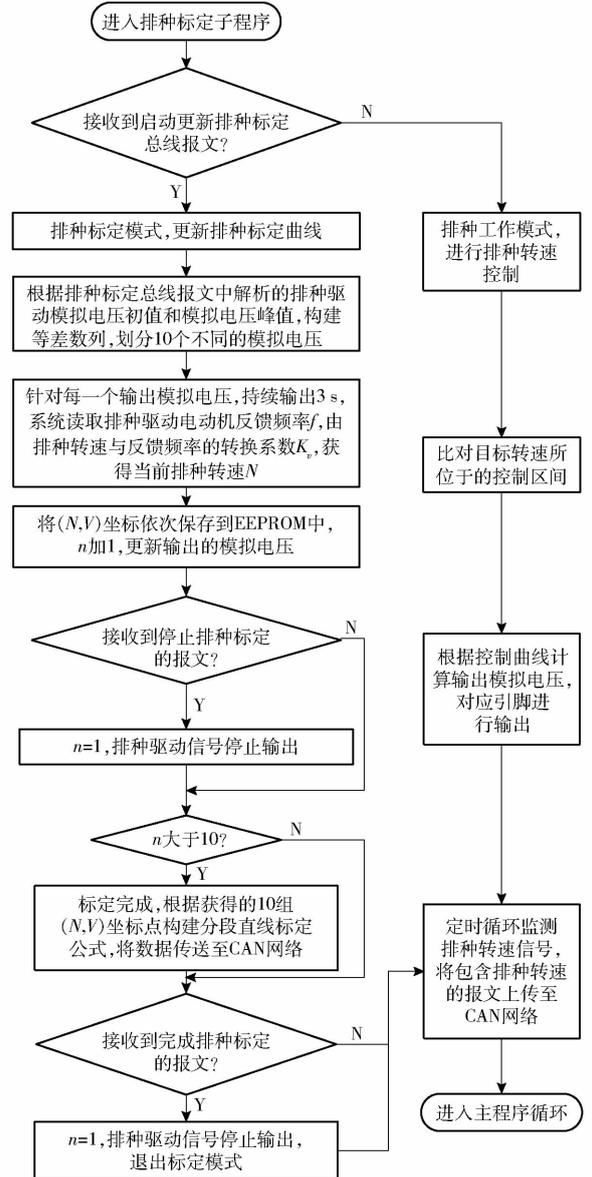


图5 排种驱动 ECU 排种标定子程序

Fig. 5 Planting calibration subroutine of planting driving ECU

表1 排种标定子程序相关报文

Tab. 1 Related messages of planting calibration subroutine

ECU	参数组 PGN	PDU 标识	有效数据长度	数据含意
PC 机	00EA64	0CEA6466	8	DATA1:启动排种标定 0x01, 停止排种标定 0x00; DATA2、DATA3:模拟电压初值; DATA4、DATA5:模拟电压峰值; DATA6、DATA7:转换系数; DATA8:预留
PC 机	00EC64	0CEC6466	1	DATA1:完成排种标定 0x01
TTC32	00EB66	18EB6664	8	DATA1、DATA2:排种标定反馈转速; DATA3、DATA4:排种标定反馈模拟电压; DATA5、DATA6:排种标定反馈转速; DATA7、DATA8:排种标定反馈模拟电压

机反馈频率  $f$ , 由总线报文中读取的当前排种盘转速  $N$  与反馈频率之间的转换系数  $K_v$ , 得出当前模拟电压输出值下驱动排种盘转速为

$$N = \frac{f}{K_v} \quad (6)$$

根据式(6)计算的结果, 将坐标  $(N, V)$  保存到 EEPROM, 模拟电压输出坐标点数标志位  $n$  增加 1, 更新排种驱动 ECU 输出的排种驱动模拟电压。当  $n$  增加到 10 时, 系统即获得了 10 组  $(N, V)$  坐标点, 根据式(3)~(5)构建分段直线标定公式, 并将 10 个坐标点数据依次传送至 CAN 网络, 用户通过上位机界面观察排种盘转速标定结果在最大值或最小值时, 是否具有重复值, 逐渐调整模拟电压设置范围, 消除重复值, 最终获得排种转速标定曲线。

排种标定完成后, 切换至排种工作模式, 根据排种目标转速的数值范围确定位于排种驱动曲线的控制区间, 对应控制方程计算模拟电压输出数值, 排种驱动 ECU 对应引脚进行输出, 定时采集排种盘转速, 并将包含该转速信息的报文发送至 CAN 网络, 便于用户进行系统排种故障筛查。

#### 1.4 试验设计

选取国产指夹式排种器(图 6a)和国产气吸式排种器(图 6b), 通过系统电驱转速控制试验、现有系统电驱排种盘转速控制性能对比试验、系统田间播种均匀性验证试验对系统性能进行试验验证。

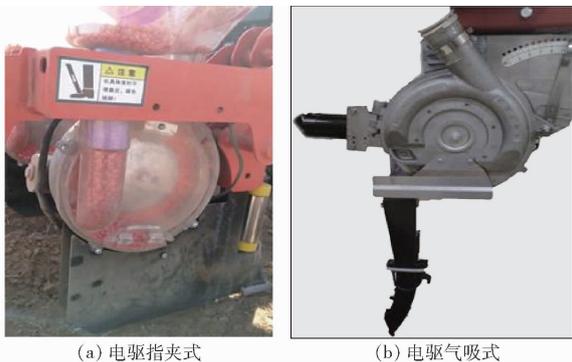


图 6 电驱玉米精密排种器

Fig. 6 Motor driving corn precision seed meter

为了验证采用分段线性插值排种盘转速标定方法的系统对不同类型玉米精密排种器进行电驱转速控制的性能, 进行模拟车速下电驱转速控制性能试验。系统对气吸式排种器电驱转速控制性能试验中, 排种器驱动电动机选择 100 W 无刷直流电动机, 配 AQMD3608BLS 型驱动器, 排种盘孔数 26 个, 对排种器充种下的分段线性控制曲线进行现场拟合, 根据拟合的控制曲线, 行距设置为 60 cm, 株距设置为 25 cm, 模拟作业速度为 3、6、9、12 km/h, 利用

USB/CAN-E-U 型分析仪记录 4 s 内间隔 100 ms 的电驱排种盘转速数据, 重复进行 3 次试验, 对不同车速下的排种电驱转速控制性能进行分析。

指夹式排种器电驱转速控制性能试验中, 排种盘指夹数 18 个, 进行了车速、株距变化对排种盘转速响应性能试验。试验时, 国产指夹式排种器充满种状态下进行排种曲线标定, 获得排种驱动曲线。完成标定后, 通过车速模拟器模拟车速码盘信号, 通过计算机界面设定行距为 60 cm, 株距设置为 20、25、32 cm, 车速范围为 4~9 km/h(间隔 1 km/h), 针对每个株距、车速试验组合, 记录总线报文, 采集 10 s 内间隔 100 ms 的排种盘转速变化。验证株距、车速两因素变化下, 系统对指夹式排种器电驱排种盘转速控制的性能。

与现有系统电驱排种盘转速控制性能对比试验中, 利用文献[23]中对气吸排种器调控的排种驱动分段 PID 控制参数对上述两种类型排种器进行转速调控试验, 将排种盘转速分别设定为 15、20、30、40、45 r/min, 通过分段 PID 控制参数对两种排种器排种盘的转速控制, 作为本文支持转速现场标定的系统性能对比。为了对系统的田间播种均匀性进行性能验证, 选取上述指夹式排种器设计试验样机, 在河北省赵县进行系统田间播种均匀性验证试验。在车速对系统播种均匀性影响的试验中, 株距设置为 20 cm, 车速区间为 4~7 km/h(间隔 1 km/h), 田间播种作业中全程记录播种车速, 采集时间周期为 1 s。将播种车速与试验地块的地理位置对应(图 7), 测量出苗后上述车速对应区域的玉米株距, 每个车速取 200 个株距, 进行系统田间播种均匀性分析。

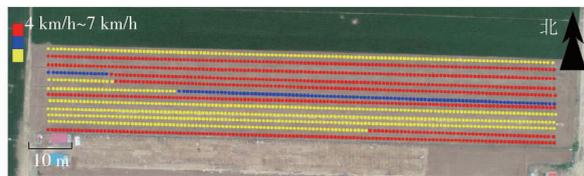


图 7 试验地块播种车速分布图

Fig. 7 Planting working velocity distribution map in test field

## 2 结果与讨论

### 2.1 电驱气吸式排种器排种盘转速控制性能

由气吸排种器驱动电动机测速码盘分辨率为 2P/r, 减速比为 36:1, 确定电驱气吸式排种器转换系数为 72, 对电驱气吸排种器控制曲线进行拟合, 拟合结果如图 8 所示。由标记结果可知, 电驱气吸排种器在充种状态下排种盘有效转速范围为 5.5~65.86 r/min, 系统有效输出电压为 81~720 mV。

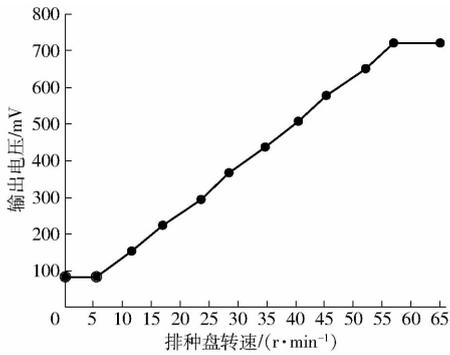


图8 电驱玉米气吸式排种器排种驱动曲线

Fig.8 Motor driving curve of corn air-suction seed meter

依据上述获取的排种驱动曲线,电驱气吸式排种器排种盘转速对车速阶跃响应结果如图9所示。由结果可得,同一车速下,排种器多次启动具有较好的稳定性和准确性,排种盘转速稳定后能够维持在目标排种盘转速附近波动。

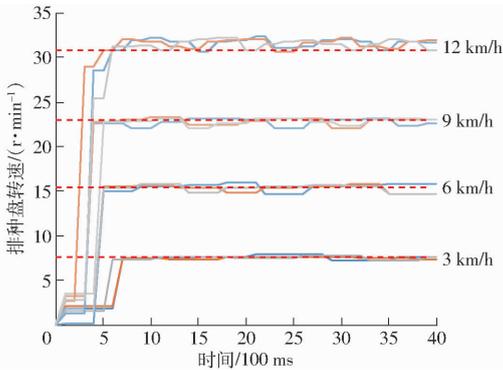


图9 电驱气吸式排种器排种盘转速对车速阶跃响应曲线

Fig.9 Step response curves of seed plate rotate speed of motor driving air-suction seed meter to travel speed

由表2可知,当株距设定为25 cm时,随上述车速阶跃变化,目标转速逐渐增大,系统对排种盘转速的调节时间平均为0.65 s,最大为0.80 s,标准差为0.12 s;稳态误差逐渐增大,稳态误差平均值为0.41 r/min,稳态误差最大为0.81 r/min,标准差为0.27 r/min;控制精度逐渐降低,控制精度平均值为98.59%,控制精度最小为97.42%,标准差为0.93%。

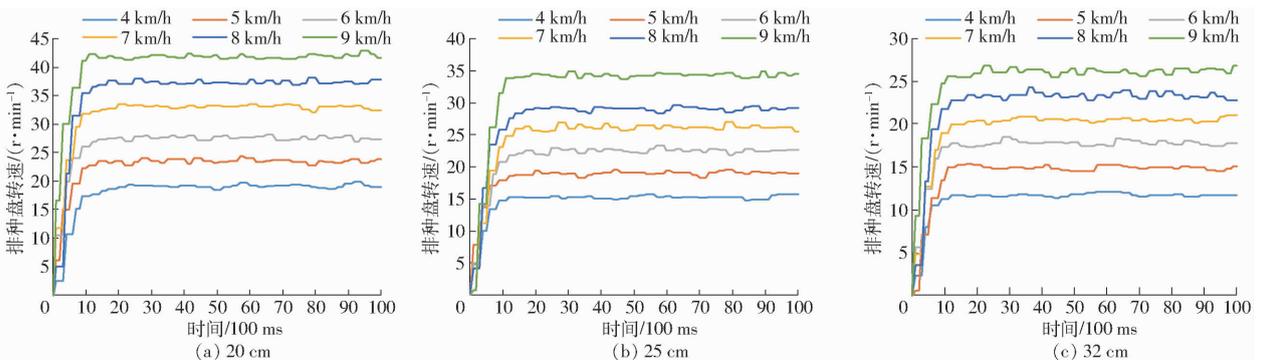


图11 电驱指夹式排种器排种盘转速对车速阶跃变化响应曲线

Fig.11 Step response curves of seed plate rotate speed of motor driving finger pick-up seed meter to travel speed

表2 电驱气吸式排种器排种盘转速对车速变化响应性能  
Tab.2 Step response performance of seed plate rotate speed of motor driving air-suction seed meter to travel speed

性能指标	车速/(km·h <sup>-1</sup> )			
	3	6	9	12
调节时间/s	0.80	0.60	0.53	0.67
稳态误差/(r·min <sup>-1</sup> )	0.18	0.32	0.34	0.81
控制精度/%	98.45	99.65	98.84	97.42

## 2.2 电驱指夹式排种器排种盘转速控制性能

由指夹式排种器驱动电动机测速码盘分辨率为600 P/r,减速比为1:1,确定电驱指夹式排种器转速系数为600,现场拟合指夹式排种器排种驱动曲线如图10。由图10可得,电驱指夹式排种器在充种状态时,排种盘有效转速范围为5.2~39.60 r/min,有效输出电压范围为355~2650 mV。系统在株距20、25、32 cm,车速4~9 km/h(间隔1 km/h)时,排种盘转速响应结果如图11所示。车速对排种盘转速控制精确性分析中,株距分别为20、25、32 cm时,对应的调节时间平均值分别为1.12、1.10、0.95 s,标准差分别为0.31、0.19、0.23 s。

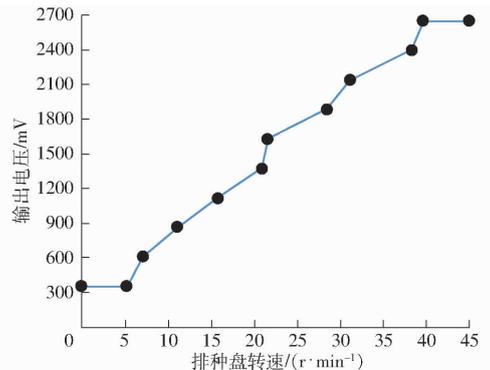


图10 电驱指夹式排种器排种驱动曲线

Fig.10 Motor driving curve of corn finger pick-up seed meter

排种盘转速调节达到稳态后有轻微的波动,排种盘转速调节基本没有超调量的产生,最终达到稳定的转速输出。

株距分别为20、25、32 cm,随车速变化,排种盘

平均转速稳态误差分别为 0.25、0.51、0.38 r/min, 标准差分别为 0.15、0.27、0.19 r/min; 排种盘转速控制精度平均值分别为 98.51%、97.84%、98.51%, 标准差分别为 1.08%、0.95%、0.99%。试验结果表明, 车速对排种盘转速响应分析中, 随车速的增加, 排种电动机驱动器启动功率增大, 使得转速启动上升斜率增大, 设定株距 20、25、32 cm 对应的调节时间平均值分别为 1.12、1.10、0.95 s, 调节时间较短; 随车速的增加, 排种盘转速稳态误差平均值在 (0.38 ± 0.13) r/min 的范围内变化, 稳态误差影响较小, 排种盘转速控制精度平均值在 (98.29 ± 0.45)% 的范围内变化, 排种盘转速的控制精度较高。

株距为变量, 系统排种盘转速响应分析中, 随着车速依次增加, 系统调节时间平均值分别为 1.03、1.00、1.13、1.00、1.37、1.00 s, 标准差为 0.15、0.17、0.12、0.36、0.45、0.10 s (表 3); 排种盘转速稳态误差平均值分别为 0.40、0.44、0.29、0.35、0.37、0.42 r/min, 标准差为 0.21、0.07、0.11、0.26、0.24、0.48 r/min。

表 3 电驱指夹式排种器排种盘转速控制性能试验结果  
Tab. 3 Experimental results of seed palte rotate speed control performance of motor driving finger pick-up seed meter

设定株距/ cm	车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	调节时间/ s	稳态误差/ (r·min <sup>-1</sup> )	控制精度/ %
20	4	1.00	0.16	98.59
	5	1.20	0.46	96.84
	6	1.00	0.41	97.63
	7	1.30	0.20	99.00
	8	1.80	0.17	99.27
25	9	1.00	0.08	99.71
	4	0.90	0.47	96.84
	5	0.90	0.50	97.29
	6	1.20	0.28	98.75
	7	1.10	0.21	99.20
32	8	1.40	0.64	97.84
	9	1.10	0.97	97.09
	4	1.20	0.57	96.94
	5	0.90	0.37	98.39
	6	1.20	0.19	99.32
	7	0.60	0.65	98.00
	8	0.90	0.29	99.21
	9	0.90	0.20	99.53

排种盘转速控制精度平均值分别为 97.46%、97.51%、98.57%、98.73%、98.77%、98.78%, 标准差分别为 0.98%、0.80%、0.86%、0.64%、0.81%、1.46%。在不同车速下, 株距变化引起的调节时间

标准差最大为 0.45 s, 排种盘转速误差的最大标准差为 0.48 r/min, 排种盘转速控制精度平均值不小于 97.46%。所有设定株距、车速组合试验中, 系统总体排种盘转速调节时间平均值为 1.09 s, 标准差为 0.26 s; 总体稳态误差平均值为 0.38 r/min, 标准差为 0.23 r/min; 总体排种盘转速控制精度平均值为 98.30%, 标准差为 1.01%。

### 2.3 现有电驱排种盘转速控制性能试验

利用分段 PID 控制方法<sup>[23]</sup>, 采用相同的 PID 调节参数, 分别对气吸式排种器和指夹式排种器进行排种盘转速控制, 试验结果如图 12 所示。

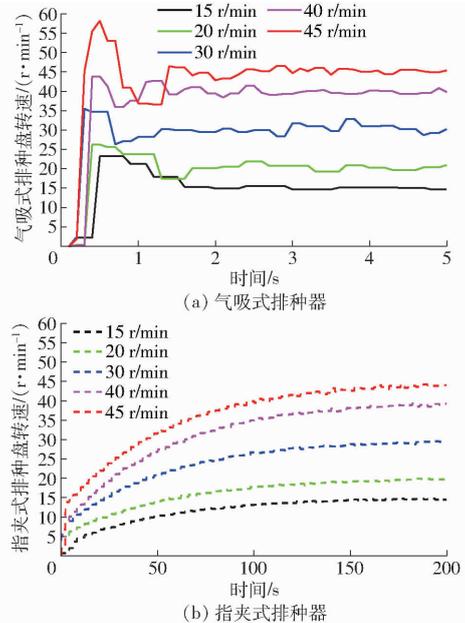


图 12 两种排种器排种盘转速分段 PID 控制试验结果  
Fig. 12 Experimental results of two types seed plate rotate speed with sectional PID control

由试验结果可得, 气吸式排种盘分段 PID 调节参数应用于指夹式排种盘转速调节时, 转速调节时间过长, 通过 2.1、2.2 节中气吸式排种盘有效转速范围和有效输出电压范围的对比, 得出在目标转速相同时, 指夹式排种盘有效输出电压范围远大于气吸式排种盘转速控制的有效输出范围, 这是造成采用气吸式排种器的分段 PID 调节参数对指夹式排种盘转速进行调节时, 指夹式排种器的转速调节时间过长的原因。在上述设定转速时, 指夹式排种盘的调节时间大于 150 s, 试验证实利用气吸式排种器分段 PID 调节参数不能满足指夹式排种盘转速控制的要求, 需要设置新的调节参数, 进一步说明了系统支持现场排种盘转速标定的必要性。气吸式排种盘转速分段 PID 控制性能如表 4 所示。

由试验结果可得, 气吸式排种盘转速分段 PID 调节时间平均值为 1.38 s, 标准差为 0.16 s; 平均稳态误差为 0.24 r/min, 标准差为 0.14 r/min; 平均控

表4 气吸式排种盘转速分段PID控制性能

Tab.4 Performance of seed plate rotate speed of air-suction seed plate with sectional PID control

设定转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	调节时间/s	稳态误差/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	控制精度/%
15	1.50	0.07	99.51
20	1.60	0.40	97.98
30	1.20	0.37	98.78
40	1.30	0.20	99.49
45	1.30	0.18	99.61

制精度为 99.07%，标准差为 0.70%。通过与 2.1 节中气吸式排种盘转速控制性能的对比可得，采用分段线性插值进行排种盘转速控制，平均调节时间减少 0.73 s，平均稳态误差增加 0.17 r/min，平均控制精度降低 0.48 个百分点。通过与 2.2 节中指夹式排种盘转速控制性能的对比可得，平均调节时间减少 0.29 s，平均稳态误差增加 0.14 r/min，平均控制精度降低 0.77 个百分点。综上可得，针对上述两种排种盘转速控制，本文支持转速现场标定的系统与分段 PID 调节系统相比，具有更好的适应性，平均调节时间减少 0.51 s，平均稳态误差增加 0.16 r/min，平均控制精度降低 0.63 个百分点。

## 2.4 田间播种均匀性试验

对指夹式排种器的田间播种均匀性进行试验，用于对系统排种转速控制精度进行验证。根据图 7 中试验地块与播种车速叠加位置，获取不同车速的地理位置分布，采集不同车速下出苗株距。株距为 20 cm 时，系统出苗株距随车速变化分布如图 13 所示。

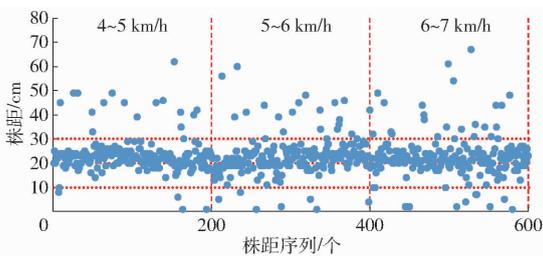


图 13 田间播种株距随车速变化分布图

Fig. 13 Distribution map of seed spacing in field with variation of travel speed

由图 13 可知，对于车速变化，播种株距能够集中在设定株距的合格粒距范围内 ( $20 \pm 10$ ) cm 出苗。依据国标 GB/T 6973—2005，对不同车速下的播种情况进行播种均匀性质量评价 (图 14)，随着车速的增加，播种合格指数下降幅度为 5.36%，变

异系数变化幅度为 4.55%，变化幅度较小，随车速播种均匀性较好。

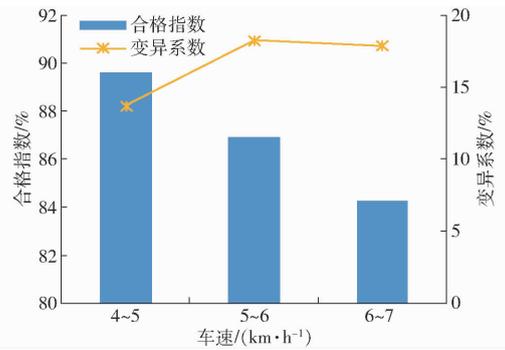


图 14 车速对系统播种均匀性的影响

Fig. 14 Effect of travel speed on planting uniformity

车速为 4 ~ 7 km/h 时，系统田间播种的合格指数平均为 86.93%，最小为 84.26%；变异系数平均为 16.64%，最大为 18.29%，满足农业行业标准 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》对精密播种合格指数和变异系数的要求。

## 3 结论

(1) 基于 CAN 总线通信，设计了一种支持玉米电驱动排种在线标定的控制系统，该系统不受排种器类型和传动方式的限制，通过分段线性插值排种盘转速标定的方法，对排种器充种后的电驱动排种盘转速控制曲线进行现场标定。

(2) 利用国产气吸式玉米排种器和指夹式玉米排种器，分别进行充种后的电驱排种盘转速标定，通过改变模拟车速、株距对排种盘转速响应控制精度进行试验，试验结果表明，系统对两种玉米精密排种器排种盘转速控制精度，受株距、车速变化影响较小，与分段 PID 排种转速控制系统性能对比得出，支持转速现场标定的系统具有更好的适应性，调节时间缩短，控制精度稍低，总体上具有较好的排种盘转速控制性能。

(3) 利用国产指夹式排种器设计样机进行田间试验，株距为 20 cm，车速 4 ~ 7 km/h 时，结果表明，播种合格指数大于等于 84.26%，变异系数小于等于 18.29%，针对小株距玉米精密播种，系统对国产指夹式排种器进行电驱排种仍能达到均匀精密播种的要求。该系统能够对不同类型的电驱玉米精密排种器排种盘转速控制进行现场标定，精确驱动排种器进行田间均匀播种。

## 参 考 文 献

- [1] LU Y, ZHANG X, CHEN S, et al. Increasing the planting uniformity improves the yield of summer maize [J]. Agronomy Journal, 2017, 109(4): 1463 - 1475.
- [2] MCMASTER G S, BUCHLEITER G W, BAUSCH W C. Relationships between sunflower plant spacing and yield: importance of uniformity in spacing [J]. Crop Science, 2012, 52(1): 309 - 319.

- [3] GESCH R W, KIM K I, FORCELLA F. Influence of seeding rate and row spacing on cuphea seed yield in the Northern Corn Belt[J]. *Industrial Crops and Products*, 2010, 32(3):692 - 695.
- [4] YAZGI A, DEGIRMENCIÖGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. *Measurement*, 2014, 56:128 - 135.
- [5] YAZGI A, DEGIRMENCIÖGLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(3):347 - 356.
- [6] HAN Dandan, ZHANG Dongxing, JING Huirong, et al. DEM - CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150:426 - 438.
- [7] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3):62 - 69.  
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3):62 - 69. (in Chinese)
- [8] 崔涛, 韩丹, 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)
- [9] 颜丙新, 张东兴, 崔涛, 等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(23):15 - 23.  
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(23):15 - 23. (in Chinese)
- [10] 陈玉龙, 贾洪雷, 王佳旭, 等. 大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(8):95 - 104.  
CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8):95 - 104. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170810&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170810&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.010. (in Chinese)
- [11] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22):1 - 11.  
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22):1 - 11. (in Chinese)
- [12] ZHAI J B, XIA J F, ZHOU Y, et al. Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2014, 7(3):13 - 18.
- [13] YIN X, NOGUCHI N, YANG T X, et al. Development and evaluation of a low-cost precision seeding control system for a corn drill[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, 11(5):95 - 99.
- [14] 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.
- [15] YANG Li, HE Xiantao, CUI Tao, 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.
- [16] 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)
- [17] 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](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)
- [18] 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](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)
- [19] RUICHENG D, BINGCAI G, NINGNING L, et al. Design and experiment on intelligent fuzzy monitoring system for corn planters[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, 6(3):11 - 18.
- [20] 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.
- [21] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 116:30 - 35.
- [22] 张真, 迟瑞娟, 杜岳峰, 等. 基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊):275 - 281.  
ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.):275 - 281. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s036&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s036&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.036. (in Chinese)
- [23] 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/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(2):57 - 67.  
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design and experiment of motor driving bus control system for corn vacuum seed meter[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2):57 - 67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190207&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190207&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.007. (in Chinese)
- [24] PARAFOROS D S, SHARIPOV G M, GRIEPENTROG H W. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 163:104863.