

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.017

基于双测速模式的玉米追肥机控制系统设计与试验

赵学观^{1,2} 金鑫³ 邹伟^{1,2} 翟长远^{1,2} 张春风^{1,2} 王秀^{1,2}(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097;
3.河南科技大学机电工程学院,洛阳 471003)

摘要:针对玉米追肥机北斗单点测速方式存在延时,造成测速准确性低的问题,提出了北斗单点测速与地轮测速相结合的双测速模式。搭建了玉米追肥机控制系统并开发配套控制界面,完成了双测速模式规则建立及控制器程序设计。重点对加减速过程判定与地轮稳定测速的速度范围进行了研究,试验确定了双测速模式切换条件,并验证了双测速模式的可行性。试验结果表明,地轮稳定测速的最大速度为6.0 km/h,地轮测速队列长度 N 的最佳值为5,模式切换速度变异系数临界值为4.2%;3.5、5.5、6.0、8.0 km/h 4种不同目标速度测速性能对比试验结果表明,双测速模式与北斗单点测速在加速阶段相对响应时间均值为1.6 s,减速阶段均值为1.8 s,实际施肥延时距离平均减小0.55 m。田间施肥性能试验结果表明,双测速模式加速阶段速度切换造成的排肥转速差均值为1.5 r/min,减速阶段排肥转速差在8.0 km/h速度条件下最大,均值为7.1 r/min。减速阶段控制结果表明,系统平均响应时间为1.3 s,平均稳态误差均值为0.8 r/min,系统平均超调量为8.7%。双测速模式切换准确率为100%,满足精准施肥的需要。

关键词:玉米追肥机;双测速模式;北斗测速;排肥控制;光谱信息

中图分类号: S126; S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0145-09

Design and Experiment of Double Speed Measurement Mode of Corn Topdressing Control System Based on Spectral Information

ZHAO Xueguan^{1,2} JIN Xin³ ZOU Wei^{1,2} ZHAI Changyuan^{1,2} ZHANG Chunfeng^{1,2} WANG Xiu^{1,2}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

3. School of Mechanical and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to solve the problem of low accuracy caused by the delay of Beidou single point speed measurement of corn topdressing machine, a double speed measurement mode combining Beidou single point speed measurement with ground wheel speed measurement was proposed. The control system of corn topdressing machine was set up and the corresponding control interface was developed. The double speed measurement mode rule was established and the controller program was designed. The speed range of acceleration and deceleration process judgment and stable speed measurement of ground wheel were studied. The switching conditions of dual speed measurement mode were determined by experiment, and the feasibility of dual speed measurement mode was verified. The test results showed that the maximum speed of the ground wheel was 6.0 km/h, the optimal value of the ground wheel speed measurement queue N was 5, and the critical value of mode switching speed variation coefficient was 4.2%. The speed measurement performance comparison test results of four different target speeds of 3.5 km/h, 5.5 km/h, 6.0 km/h and 8.0 km/h showed that the average response time of double speed measurement mode was 1.6 s earlier than that of Beidou single point speed measurement, and the deceleration phase was 1.8 s earlier. The actual fertilization distance was reduced by 0.55 m. The results of field fertilization performance test showed that the average speed difference of fertilizer application was 1.5 r/min in the acceleration stage of double speed measurement mode, and the maximum speed difference was 7.1 r/min at the speed of 8.0 km/h in deceleration stage. The results showed that the average response time of the

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200608)

作者简介: 赵学观(1988—),男,助理研究员,主要从事智能化农业装备技术研究,E-mail: zhaoxg@nrcita.org.cn

通信作者: 王秀(1965—),男,研究员,主要从事农业机械化和农业工程技术研究,E-mail: wangx@nrcita.org.cn

system was 1.3 s, the average steady-state error was 0.8 r/min and the average overshoot was 8.7%. The accuracy of double speed mode switching was 100%, which met the needs of precision fertilization.

Key words: corn topdressing; double speed measurement mode; Beidou speed measurement; fertilizer control; spectral information

0 引言

精准变量施肥技术的关键是肥量的精准控制。国内外研究人员在排肥控制方面做了大量的研究,主要集中在排肥轮的改进^[1-2]、比例-积分-微分(Proportion-integration-differentiation, PID)控制技术^[3-4]、现场监测技术^[5-7]、双变量排肥控制技术^[8-9]、电力驱动技术^[10-11]、气力式输送技术^[12-13]和穴施施肥技术等^[14-15]。目前以上施肥控制系统的共性是依据采集到的施肥机作业速度信号,控制相应驱动系统(液压马达、电机等),实现施肥量依据作业速度的变量精确控制。可见,机具作业速度作为排肥转速控制的关键变量,其准确获取是精准排肥的关键因素。

目前施肥机常用的测速方法有传感器测速法和北斗单点测速法。传感器测速法是通过霍尔传感器或编码器测量单位时间内地轮转动角度,然后将获取的脉冲信号换算为施肥机的前进速度,但编码器测速容易受到地轮打滑的影响,使得测速准确性下降^[16]。北斗测速法按照接收的信号分为差分信号和单点信号^[17]。差分信号测速需要依赖北斗基站,目前国内农场及农户基站建设不完善,其工作范围受限;单点信号北斗接收模块价格便宜,便于大面积推广应用,但其在低速时测速不稳定,在加减速时易产生丢速或者延时^[18],该缺点在施肥的加速过程容易造成肥料无法及时施入,减速过程肥料堆积的现象。针对以上问题,文献[19]应用雷达测速仪检测播种机作业速度,提高排种精度,但雷达价格昂贵,应用同样受到限制。文献[17]针对地轮测速的方式在土质松软条件下易产生轮胎滑移的现象,设计并实现了基于脉冲式多普勒雷达的智能测速系统,为系统建立了多分辨率自适应机制,但试验仅在1 km/h以下的低速进行。文献[20]提出了加入滑移率参数进行编码器测速速度修正的方案,但仍然不能保证修正参数的普适性,无法从根本上解决地轮打滑造成丢速的问题。

针对以上问题,本文结合地轮测速与北斗单点测速各自测速特性,提出对加减速过程测速模式优化方法,以提高控制的准确性和稳定性。

1 系统总体设计与工作原理

玉米变量追肥机基于玉米近地光谱信息进行变

量追肥,采用风送式输肥设计,配有一个肥料箱,肥料箱下设有中央集排式排肥轮^[21],可以同时支持6路施肥单体工作。玉米变量追肥机控制系统主要由车载计算机、光谱传感器、中继器、控制器、测速编码器、排肥电机、吹肥风机及其固定装置等部件组成,中继器内置北斗单点测速模块,控制系统总体设计如图1所示。

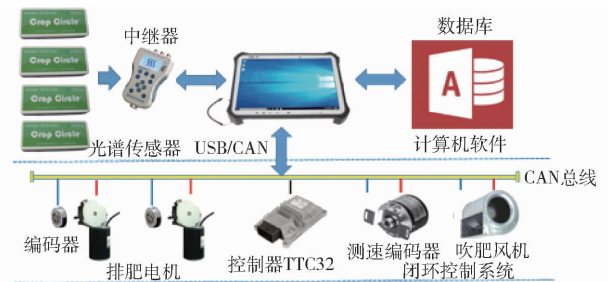


图1 玉米变量追肥机控制系统组成

Fig. 1 Composition of corn variable topdressing control system based on spectral information

系统工作时光谱传感器 Crop circle (ACS-430型)通过3个光学测量通道(670、730、780 nm)采集玉米冠层的光谱信息,中继器(GeoSCOUT X Data Logger型)将采集的光谱信息转换为归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI),通过串行接口将数据传输给车载计算机。车载计算机(德航PPC-GS0792T型)上运行玉米变量追肥控制系统,实现变量追肥作业信息的采集、显示、控制,通过控制器局域网(Controller area network, CAN)总线与下位机控制器(贺德克TTC32型)进行通信。北斗单点测速模块,获取位置信息及速度信息,测速编码器获取地轮速度信息。系统随北斗单点测速与地轮测速实时动态信息判别采取的测速方式,并将北斗位置信息、速度信息、排肥转速信息保存到数据库,便于数据分析和处理。排肥电机转速通过编码器实时获取,并将信息反馈给控制器,形成闭环反馈控制,系统工作原理如图2所示。

2 系统软硬件设计

2.1 系统硬件设计

2.1.1 北斗单点测速信号采集

中继器内置北斗单点测速模块,该北斗接收模块支持直流12 V供电,测速精度为0.1 m/s,最大信号更新频率5 Hz,以上关键参数均可满足系统需要。

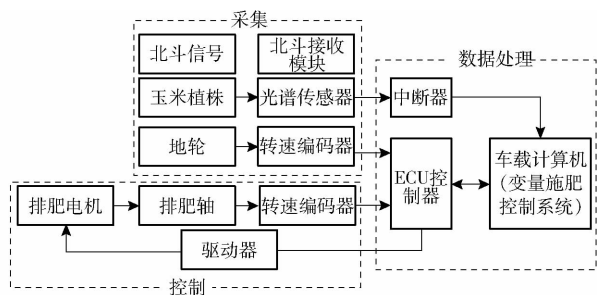


图 2 玉米追肥机控制系统原理图

Fig. 2 Schematic of corn topdressing machine control system

系统通过 RS232 串口接收北斗的 NMEA0183 格式导航电文,解析 GPRMC 帧中数据可得到当前拖拉机的前进速度,该速度记为 V_B 。

2.1.2 地轮测速信号采集

编码器采用 ROTARY ENCODER (E38S6G5 - 100B - G5N 型)光电式增量旋转编码器,分辨率为 1 周 500 个脉冲,通过 TTC32 控制器的频率计数 I/O 口接收编码器的 A 相脉冲。该型编码器集电极开路输出 (NPN 型),需在电源和集电极之间接一个上拉电阻,使得集电极和电源之间能有一个稳定的电压状态。地轮测速 V_{Gr} 计算式为

$$V_{Gr} = \frac{2\pi fr \times 3.6}{K} \quad (1)$$

式中 K ——限深轮每转脉冲数

r ——限深轮半径, m

f ——脉冲频率, Hz

2.2 软件设计

2.2.1 双测速模式设计

施肥作业过程是由地头静止状态加速,经过加速到达匀速,再经历减速至停止状态,并不断重复的过程。即施肥作业包括加速过程、匀速过程、减速过程。由于北斗响应时间与其更新频率、解析时间有关,存在测速滞后的现象,加减速过程车速急剧增大或减小,北斗单点测速存在延迟^[22],因此需准确地判别加减速过程。为判定加减速过程,在控制系统定义一个队列 $G()$, 队列元素记为 $G[i]$, 保存地轮测速值, 队列长度为 N , 队列如图 3 所示。

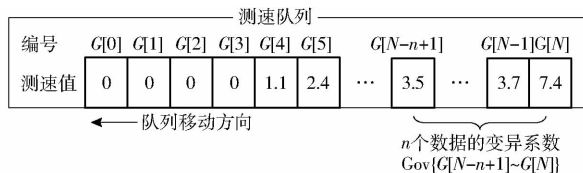


图 3 地轮测速队列变异系数计算

Fig. 3 Calculation of variation coefficient of ground wheel speed measurement queue

通过对 $G()$ 队尾的 n 个数值求取变异系数 C_c 作为速度波动的判定条件, C_c 计算式为

$$C_c = \frac{SD\{G(n)\}}{Mean\{G(n)\}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 $SD\{G(n)\}$ ——方差函数

$Mean\{G(n)\}$ ——均值函数

当速度变异系数小于设定阈值 $C_{threshold}$, 则认为匀速过程, 否则认为是加减速过程。

地轮测速在速度较高时存在滑移, 进而引起丢速的现象。因此需对适合地轮测速的低速过程进行界定, 即确定匀速作业地轮可以稳定测速的最大值 V_{Grmax} , 该最大值应满足地轮具有较小的滑移率, 满足施肥的实际需要。地轮测速滑移率 δ 通过行驶理论距离相对实际距离 L_{Real} 的误差表示

$$\delta = \frac{|2\pi rn - L_{Real}|}{L_{Real}} \times 100\% \quad (3)$$

当滑移率大于设定阈值 $\delta_{threshold}$, 则认为高速, 不适宜地轮测速。

在确定地轮无滑移率的速度最大值 V_{Grmax} 及加减速过程后, 考虑到匀速过程的速度会超出 V_{Grmax} , 因此制定了双测速模式规则, 即当满足条件 $C_c < C_{threshold}$ 且 $v > V_{Grmax}$, 测速值取北斗测速值 V_{GPS} , 当满足条件 $C_c > C_{threshold}$ 或者条件 $C_c < C_{threshold}$ 与 $v < V_{Grmax}$ 时, 测速值取地轮测速值 V_{Gr} 。

为确定地轮测速与北斗单点测速的采样频率, 通过 GetTickCount() 函数对运行程序起止时间监测可知, 系统运行时间为 323 ms, 通过 Settimer() 函数设定控制系统下发 0ASC6465 报文的间隔为 500 ms, 即采用北斗单点测速的速度更新时间为 500 ms。地轮测速易受扰动信号影响, 取 4 次采样频率的平均值为最终反馈值。由于下位机需要实时接收上位机的目标肥量信息, 下位机地轮测速更新频率采用 500 ms。

2.2.2 通信协议设计

系统环境提供了 MSComm 的通信控件, 可以通过串行接口发送和接收数据, ECU 控制器 (Electronic control unit, ECU) 与控制界面之间通过 USB 转 CAN 模块通信, ECU 通过 CAN 总线实时接收控制系统下发的转速指令, 并通过 PID 控制方法控制排肥电机转速, 实现变量施肥作业控制功能。CAN 总线协议参照 ISO11783 标准, 本文主要对 ISO11783 协议仲裁场和数据场进行了设计。ECU 对现场的施肥控制、上下层风机状态等实时数据进行接收和处理。CAN 报文包括帧信息 (1 个字节)、帧 ID (4 个字节)、帧数据 (8 个字节), 数据在传输过程中加入帧的起始符 SC/SM 和帧尾的 CRC 校验, 数据场协议如表 1 所示。

表 1 中设定值每公顷施肥量数据长度为 2 B, 分

表1 排肥总线系统数据场协议

Tab.1 Data field protocol of fertilizer discharge bus system

| 节点 | PDU 标识 | 有效数据长度/B | 帧数据含义 |
|-------|----------|----------|---|
| TTC32 | 18SC6465 | 8 | Data0: 启停状态 0x0A/0x00; Data1 ~ Data2: 上层排肥电机转速; Data3 ~ Data4: 下层排肥电机转速; Data5、Data6: 上下层风机转速; Data7: 地轮车速 |
| 车载计算机 | 0ASC6465 | 8 | Data0: 启动 0x0A, 停止 0x00; Data1 ~ Data2: 风机转速; Data3 ~ Data4: 上层每公顷施肥量; Data5 ~ Data6: 下层每公顷施肥量; Data7: 北斗车速 |

辨率为 0.01 kg/hm², 反馈转速、设定转速数据长度 2 B, 分辨率为 0.01 r/min; 车速数据长度 1 B, 分辨率为 0.1 km/h。ECU 程序启动后, 首先完成端口初始化设置, 等待 CAN 总线报文, 对报文 PDU 标识进行判别, PDU 标识一致后, 读取数据, 利用上述通信协议对数据进行解析, 获取上位机排肥驱动电动机的转速, 程序根据实时数据进行 PID 闭环调控。

2.2.3 上位机软件设计

变量施肥机控制系统软件基于 Visual Studio 2012 软件微软基础类库 (Microsoft Foundation Classes, MFC) 框架开发, 该上位机控制界面主要实现玉米的生长状况 (NDVI 值来表征) 实时测定, 并根据生长状况进行肥料的变量实施控制。主要包括变量施肥控制主界面、通信参数设置界面、控制参数设置界面。其中施肥控制主界面主要用于光谱传感器、北斗单点测速、地轮测速、排肥转速等信息显示及控制, 通信参数控制界面用于施肥控制系统与控制 ECU 及北斗模块之间的通信参数设置。控制参数界面主要用于施肥模型参数、PID 控制参数的设置, 系统界面如图 4 所示。系统工作时, 首先根据当前新建地块在控制参数界面进行施肥模型参数的设置, 以明确 NDVI 均值与施肥量之间的关系, 再通过通信设置界面进行通信参数设置, 打开串口后系统主界面可显示监测数值并开始工作。

机具作业时, 4 个光谱传感器获取的玉米植株的 NDVI 均值作为理论 NDVI 值, 系统根据作物冠层实时 NDVI 指数以及速度信息, 实时计算当前排肥理论转速实现精准施肥, 排肥电动机输出转速为

$$R_{ev} = \frac{wqv}{600p} \quad (4)$$

式中 R_{ev} ——排肥电动机输出转速, r/min

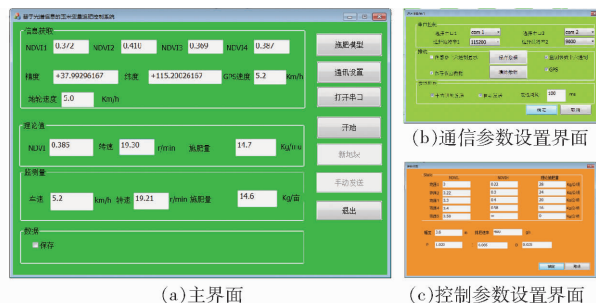


图 4 基于光谱信息的夏玉米变量追肥控制系统界面
Fig.4 Interface of summer maize variable topdressing control system based on spectral information

- w ——机具作业幅宽, m
- q ——施肥量设定值 (由 NDVI 值根据施肥模型决定), kg/hm²
- p ——排肥器每转排肥量, kg/r
- v ——作业速度, km/h

2.2.4 下位机程序设计

利用 CodesysV2.3 软件, 使用 ST 语言对 ECU 控制器进行编程, 程序流程如图 5 所示。控制器程序启动后, 首先完成初始化配置, 等待上位机软件通过 CAN 总线传送报文, 对报文 PDU 标识进行判别并读取数据, 利用 2.2.2 节中规定的通信协议对数据进行解析, 获得排肥量、北斗单点测速值等信息, 同时将地轮测速值保存到数组循环队列, 通过对队列数据计算判断是否进行测速模式切换。确定测速模式后, 根据排肥量、速度计算排肥转速为目标转速, 获得的编码器频率转换为转速, 作为反馈转速, 并进行 PID 转速调节。TTC32 间隔 100 ms 发送 0ASC6465 报文到车载计算机。

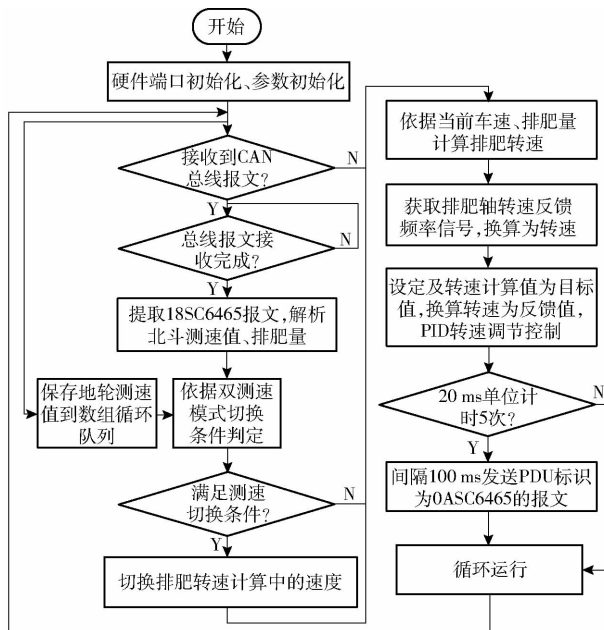


图 5 控制器 ECU 程序流程图

Fig.5 Program flow chart of controller ECU

3 试验与结果分析

3.1 速度切换条件试验

3.1.1 加减速过程判定

依据 2.2.1 节对加减速过程的判别可知,地轮测速队列长度 N 影响判别准确性与稳定性。为保证匀速阶段与加减速阶段的正确区分,确定最佳的 N 值,

进行了不同速度条件下的加减速过程,试验同样在麦茬覆盖地进行,拖拉机挂接施肥机由静止开始加速。增速目标为 3.5、5.0、6.5、8.0 km/h 4 种速度,达到目标速度后减速停止,每个目标速度重复 5 次,系统记录当前测速速度、时间等信息。地轮测速值通过 CAN 分析仪进行保存。通过对加减速过程记录的速度计算变异系数,统计结果如图 6、7 所示。

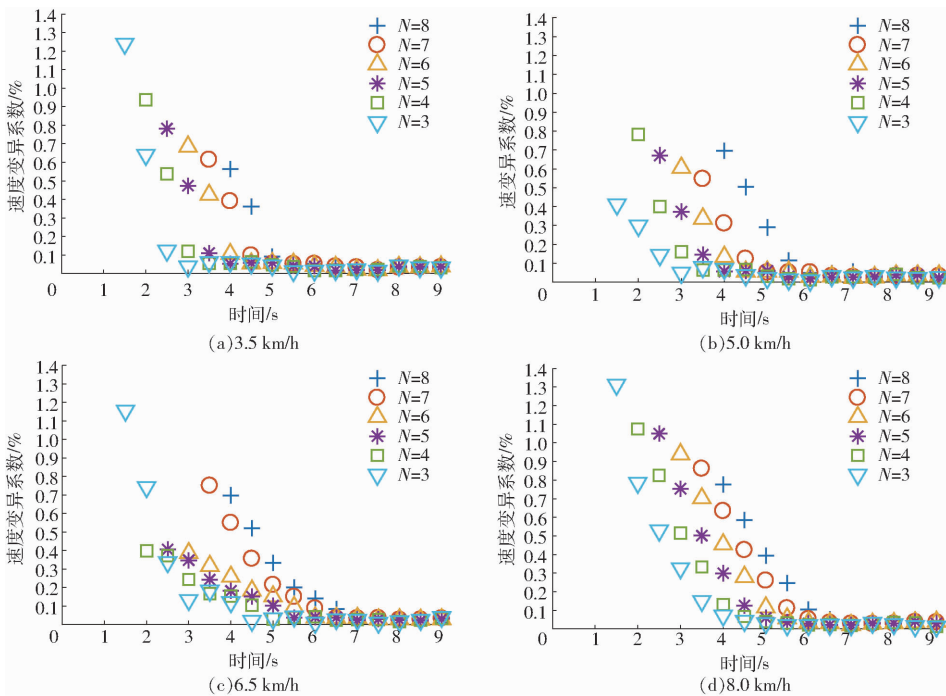


图 6 不同目标速度的加速过程变异系数

Fig. 6 Variation coefficients of acceleration process for different target velocities

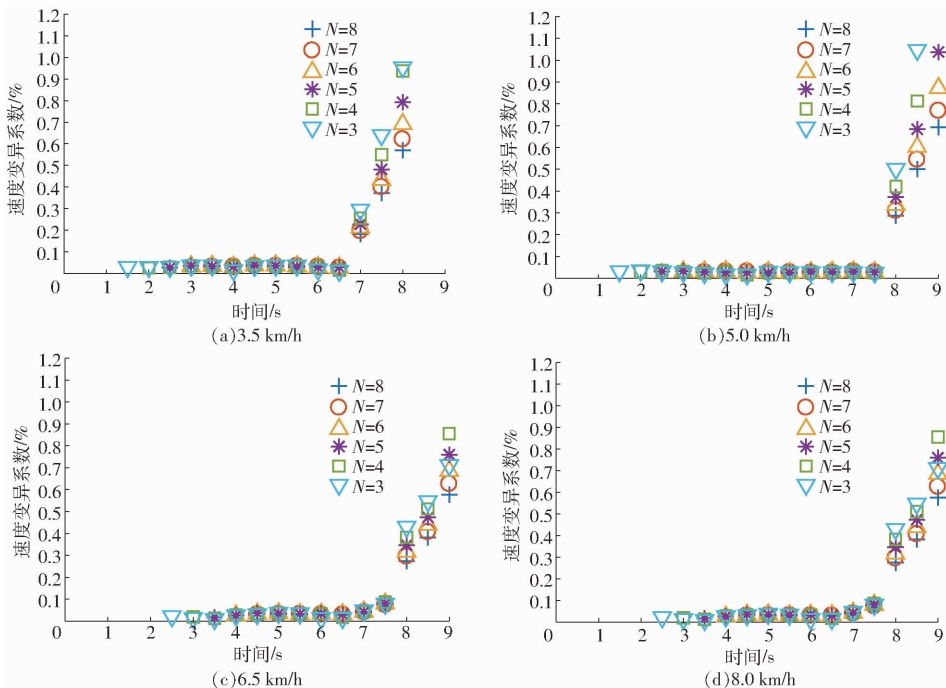


图 7 不同目标速度的减速过程变异系数

Fig. 7 Variation coefficients of deceleration process for different target speeds

由不同目标速度的加减速过程可知,地轮测速加速过程速度的变异系数逐渐减小,减速过程的变

异系数逐渐增大,队列长度 N 对匀速速度的变异系数影响较小,通过对各目标速度的匀速过程变异系

数统计可知,匀速过程变异系数最大值为4.2%,因此将该值作为匀速与加减速的临界值。加速过程所需时间随着目标车速的增大不断增大,减速过程所需时间与目标车速无明显关系,主要由于减速过程所需时间比较短,在挂载施肥机的情况下,负载对制动距离影响明显,目标车速对制动距离的影响较小,车速降速快,所需时间短。由不同目标速度的加速过程可知,地轮测速响应时间与目标车速无关,与队列长度 N 有关, N 越小对加速过程的响应越快,即队列长度 N 越小越能更快地对速度变化情况作出响应,因此 N 的选取尽量小。但在目标速度6.5 km/h的加速过程可知, N 为3时变异系数存在一定的波动,根据某一点的变异系数不能准确判断加减速过程,综合以上分析确定 N 为5。

3.1.2 地轮测速条件

不同车速下地轮的滑移率是不同的,为了确定滑移率与车速的关系,以进一步明确 $\delta_{\text{threshold}}$,确定地轮稳定测速的范围,在玉米中耕追肥最常见的麦茬覆盖地进行不同车速条件下滑移率试验。麦茬地秸秆覆盖量152~201 g/m²,土壤含水率32.3%,0~15 cm深度土壤硬度423 kPa,地轮直径12.3 cm,宽度12.5 cm。根据黄淮海地区追肥机械常用速度范围,选取7个目标速度进行试验,试验时记录拖拉机匀速行驶通过测量40 m区间的时间,通过CAN分析仪记录行驶过程中总的脉冲数,转换为地轮转速,根据公式计算滑移率。滑移率与速度的关系如图8所示,对测点数据进行拟合得到关系模型

$$y = 0.167x^2 - 0.296x + 0.773 \quad (5)$$

模型决定系数 $R^2 = 0.9826$ 。

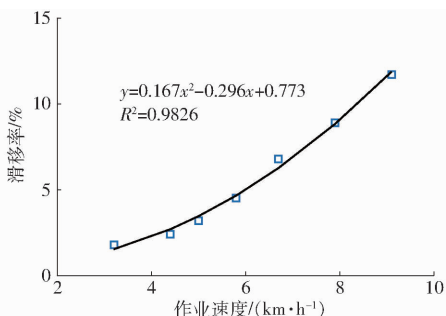


图8 滑移率与作业速度的关系

Fig. 8 Relationship between slip rate and speed

参考玉米机械化深松施肥播种作业技术规范(NY/T 2851—2015)中施肥量的测算公式,在滑移率大于5%时需要考虑滑移率对施肥量的影响,因此本文选取地轮滑移率阈值 $\delta_{\text{threshold}} = 5\%$ 时的速度作为地轮测速的临界值,根据关系模型得到该速度为6.0 km/h。

3.1.3 速度切换条件

根据以上对加减速过程的判定及地轮测速条件的确定,速度切换条件如下:当满足条件 C_c 大于4.2%或者满足条件 C_c 小于4.2%且 v 小于6.0 km/h时,速度取 V_c ,当满足条件 C_c 小于4.2%且 v 大于6.0 km/h时,速度取 V_{GPS} 。

3.2 田间施肥试验

为考察系统控制性能,于2020年7月12—14日在项目示范地区—河北辛集马兰农场进行田间试验,采用文献[20]中玉米追肥模型。于2020年6月14日采用北斗导航播种,株距24 cm,行距60 cm,种植玉米品种为大地916,地表有麦茬覆盖。试验分为测速性能对比试验及田间施肥性能试验。测速性能对比试验中,主要对比双测速模式测速及北斗单点测速性能,试验时,拖拉机挂载施肥机由静止开始加速到匀速,匀速行驶40 m后减速停止,系统自动记录每次测速方法测速加速、减速过程的响应时间(采样值由零速转变为非零速或者非零速变为零速的时间;相对响应时间为双测速模式响应时间与北斗单点测速响应时间差)。同时通过扒土手工测量实际施肥滞后的距离作为延时距离。田间施肥性能试验为整机性能试验,考察双测速模式的速度切换对排肥转速的影响。试验过程中利用CAN分析仪记录系统的速度、时间及排肥转速数据,采样时间间隔100 ms。两种试验目标车速均设置4个目标速度(3.5、5、6.5、8.0 km/h),每个目标速度进行5次试验,试验现场如图9所示。

3.2.1 双测速模式响应性能分析

表2为双测速模式下系统测速值及北斗单点测

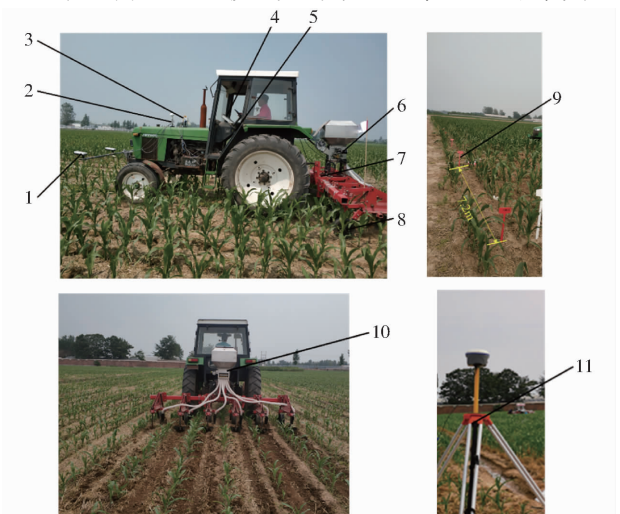


图9 变量追肥试验现场图

Fig. 9 Variable topdressing test

1. 光谱传感器 2. 北斗接收器 3. 中继器 4. 车载计算机 5. 驱动器 6. 排肥电机 7. ECU 8. 限深轮 9. 分区标志 10. 排肥器 11. 北斗基站

速统计,由统计结果可知,双测速模式与北斗单点测速在加速阶段相对响应时间均值为 1.6 s,减速阶段相对响应时间均值为 1.8 s。在加、减速过程双测速模式与北斗单点测速的相对响应时间均在低速 3.5 km/h 时最大,说明北斗单点测速在静止时漂移比较大,低速响应时间较长。北斗单点测速延时距离均值为 0.86 m,双测速模式延时距离均值为 0.31 m。双测速模式相对北斗单点测速的实际施肥延时距离平均减小 0.55 m,达到了降低延时的效果。

表 2 双测速模式与北斗单点测速性能对比

Tab. 2 Comparison of speed measurement performance between dual speed measurement mode and Beidou

| 目标速度/ (km·h ⁻¹) | 相对响应时间/s | | 双测速 延时 距离/m | 北斗单点 测速延时 距离/m | 绝对误 差/m |
|--------------------------------|----------|-----|-------------------|----------------------|------------|
| | 加速 | 减速 | | | |
| 3.5 | 1.9 | 2.2 | 0.24 | 0.56 | 0.32 |
| 5.0 | 1.6 | 1.9 | 0.32 | 0.62 | 0.30 |
| 6.5 | 1.4 | 1.5 | 0.34 | 0.96 | 0.62 |
| 8.0 | 1.5 | 1.6 | 0.35 | 1.28 | 0.93 |
| 均值 | 1.6 | 1.8 | 0.31 | 0.86 | 0.55 |

3.2.2 双测速模式对施肥的影响

为明确在加减速过程中测速模式切换对施肥性能的影响,通过转速记录数据,绘制排肥转速在不同目标车速加减速时曲线,4 种目标转速对应的实测转速均值分别为 3.7、5.4、6.3、8.1 km/h,监测转速曲线如图 10 所示。

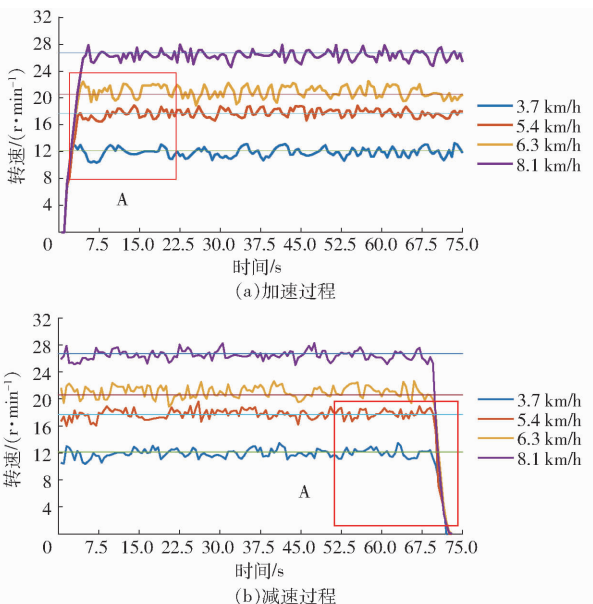


图 10 加减速过程排肥电机转速响应曲线

Fig. 10 Speed response curves of fertilizer discharge motor during acceleration and deceleration

由图 10a 可知,加速过程排肥转速随车速的增

大呈线性增大的趋势,达到目标转速后,排肥转速呈现上下波动,即排肥转速以一定的稳态误差趋于稳定值。由图 10b 可知,排肥轴转速没有出现转速较大的波动,说明测速模式切换实现了速度平顺的过渡。

为进一步明确加减速模式切换过程对排肥转速的影响,根据试验保存数据及速度切换条件,计算速度切换时 2 种测速速度,将切换速度差绝对值记为 Δv ,当前点 NDVI 值对应理论排肥转速差,其绝对值记为 ΔR_{ad} ,加、减速阶段 2 种测速方式的统计结果如表 3、4 所示。

表 3 加速阶段统计结果

Tab. 3 Acceleration statistics

| 目标速度/ (km·h ⁻¹) | 加速阶段速度平均 切换值/(km·h ⁻¹) | | Δv / (km·h ⁻¹) | ΔR_{ad} / (r·min ⁻¹) | 排肥转速 差实测值/ (r·min ⁻¹) |
|--------------------------------|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|---|---|
| | 地轮 | 北斗 | | | |
| | 3.5 | 3.5 | | | |
| 5.0 | 5.1 | 5.4 | 0.3 | 1.1 | 1.0 |
| 6.5 | 6.3 | 6.9 | 0.6 | 1.6 | 1.8 |
| 8.0 | 7.3 | 7.9 | 0.6 | 1.8 | 1.9 |

表 4 减速阶段统计结果

Tab. 4 Deceleration statistics

| 目标速度/ (km·h ⁻¹) | 减速阶段速度平均 切换值/(km·h ⁻¹) | | Δv / (km·h ⁻¹) | ΔR_{ad} / (r·min ⁻¹) | 排肥转速 差实测值/ (r·min ⁻¹) |
|--------------------------------|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|---|---|
| | 地轮 | 北斗 | | | |
| | 3.5 | 3.2 | | | |
| 5.0 | 2.1 | 3.0 | 0.9 | 3.1 | 3.0 |
| 6.5 | 0.2 | 2.4 | 2.0 | 5.3 | 4.8 |
| 8.0 | 0.0 | 3.2 | 3.2 | 9.4 | 7.1 |

由表 3 可知,加速阶段速度切换差值最大为 0.6 km/h,对应理论排肥转速差绝对值最大为 1.8 r/min,实测排肥转速差为 1.9 r/min,即加速过程排肥转速波动量较小,对排肥控制无影响。由表 4 可知,减速阶段两种测速方式在速度切换时切换差值随着车速的增大而增大,车速为 8.0 km/h 达到最大,最大速度切换差值为 3.2 km/h,排肥转速差绝对值最大为 9.4 r/min,而 5 次实测排肥转速差均值为 7.1 r/min,低于理论值,主要由于按照测速切换条件计算,当测速模式切换时,电机与排肥轮具有惯性作用。

通过车速模拟值及 NDVI 的模拟值进行排肥转速差降速模拟,统计响应特性如表 5 所示。响应时间为系统从开始调节至达到零速 5% 精度范围内的时间,系统平均超调量为 8.7%,平均响应时间约为 1.3 s,平均稳态误差均值为 0.8 r/min,系统在减速过程较大排肥转速差的条件下满足控制精度要求。

表5 减速过程排肥转速跳变响应结果

Tab.5 Response results of fertilizer discharge speed jump in deceleration process

| 排肥转速差/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 超调量/ % | 稳态误差绝对值/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 响应时间/ s |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------------------|------------|
| 6.6 | 7.3 | 0.6 | 1.2 |
| 7.0 | 8.6 | 0.7 | 1.4 |
| 7.4 | 9.5 | 0.8 | 1.4 |
| 7.6 | 10.4 | 1.1 | 1.6 |
| 6.8 | 7.5 | 0.7 | 1.0 |

对试验过程中自动保存的排肥转速数据进行绘图,采用 ArcMap 软件绘制转速分布图,绘图过程中为更易区分地头排肥转速,在符号系统采用手动转速分类。并考虑可视性,对采样点的密集度进行降采样,绘制转速分布如图 11 所示,目前施肥机未有悬挂离地后停止作业功能,由图可知,在双测速模式区,地头呈现较多零速,说明双测速模式区在地头实现了测速模式切换。到而在北斗单点测速区只有在北部地头有零速点,是拖拉机在水泥路上转弯,此时 NDVI 为 0。而在南部地头出现极少零点,转速多在 0 ~ 12.5 r/min 之间。根据双测速模式区加减速过程速度判别地头位置,以地头排肥零转速次数与进出地头次数比值,作为双测速模式下地头排肥零转速准确率,准确率为 100%。

4 结论

(1) 搭建了基于光谱信息的玉米追肥控制系统,开发了基于光谱信息的玉米追肥控制系统界面,提出北斗单点测速与地轮测速相结合的双测速模式,完成了控制器双测速模式程序设计。

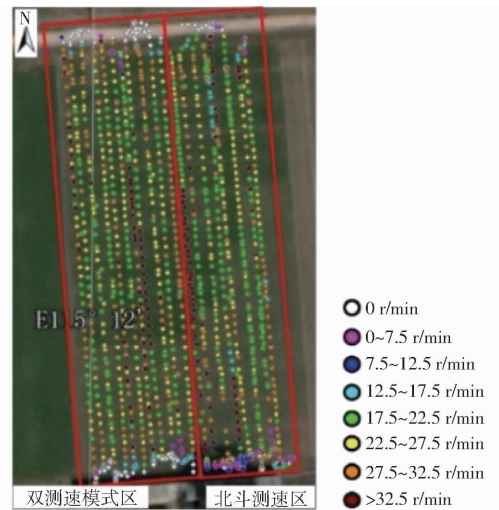


图 11 排肥转速分布图

Fig.11 Speed distribution of fertilizer discharge

(2) 试验确定了双模式测速的切换条件: $C_G < 4.2\%$ 且 $v > 6.0$ km/h 时采用北斗测速,否则采用地轮测速。

(3) 3.5、5.5、6.0、8.0 km/h 4 种不同目标速度测速性能对比试验结果表明,双测速模式与北斗单点测速在加速阶段相对响应时间均值为 1.6 s,减速阶段相对响应时间均值为 1.8 s,实际施肥延时距离减小均值为 0.55 m。

(4) 田间施肥性能试验结果表明,双测速模式加速阶段速度切换造成的排肥转速差均值为 1.5 r/min,减速阶段转速差在 8.0 km/h 速度条件下最大,均值为 7.1 r/min。8.0 km/h 速度条件下减速过程排肥转速控制结果表明,系统平均响应时间为 1.3 s,平均稳态误差均值为 0.8 r/min,系统平均超调量为 8.7%。双测速模式切换准确率为 100%,满足精准施肥的需要。

参 考 文 献

- [1] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等. 双齿轮式排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(3):87-96.
DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double gear type fertilizer apparatus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):87-96. (in Chinese)
- [2] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18):12-20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):12-20. (in Chinese)
- [3] 安晓飞,付卫强,王培,等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 96-101.
AN Xiaofei, FU Wei, WANG Pei, et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Suppl.): 96-101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s016&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.016. (in Chinese)
- [4] 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.
CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 71-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.010. (in Chinese)
- [5] JAFAR, HERMMAT A, SADEGHI M. Development and performance assessment of a DC electric variable-rate controller for use on grain drills[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 73(1):56-65.

- [6] 苑严伟, 张小超, 吴才聪, 等. 玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 222 - 226.
YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, WU Caicong, et al. Precision control system of no-till corn planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 222 - 226. (in Chinese)
- [7] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 50 - 58.
SUN Yongjia, SHEN Jingxin, DOU Qingqing, et al. Design and test of monitoring system of no-tillage planter based on Cortex - M3 processor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 50 - 58. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180806&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 08. 006. (in Chinese)
- [8] 赵学观, 何亚凯, 王松林, 等. 双变量排肥系统充肥性能分析与试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 104 - 110.
ZHAO Xueguan, HE Yakai, WANG Songlin, et al. Fertilizer filling performance analysis and experimental study of bivariate fertilizer drainage system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 104 - 110. (in Chinese)
- [9] 古玉雪, 苑进, 刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 134 - 139.
GU Yuxue, YUAN Jin, LIU Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 134 - 139. (in Chinese)
- [10] 王金武, 李树伟, 张墨, 等. 水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 43 - 54.
WANG Jinwu, LI Shuwei, ZHANG Zhao, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 43 - 54. (in Chinese)
- [11] 赵硕, 宗泽, 刘刚. 基于电机驱动的定位施肥控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 91 - 95.
ZHAO Shuo, ZONG Ze, LIU Gang. Design and test on position fertilization control system based on motor drive [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 91 - 95. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s015&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. S0. 015. (in Chinese)
- [12] 杨庆璐, 王庆杰, 李洪文, 等. 气力集排式变量排肥系统分层施肥量调节装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 1 - 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Development of layered fertilizer amount adjustment device of pneumatic centralized variable fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 1 - 10. (in Chinese)
- [13] 齐兴源, 周志艳, 杨程, 等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 20 - 26.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 20 - 26. (in Chinese)
- [14] 周文琪, 肖红, 刘子铭, 等. SYJ - 3 型深施型斜置式液肥穴施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 78 - 86.
ZHOU Wenqi, XIAO Hong, LIU Ziming, et al. Design and test of SYJ - 3 deep application-type inclined liquid fertilizer hole applicator [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 78 - 86. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200409&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. 04. 009. (in Chinese)
- [15] 胡红, 李洪文, 王庆杰, 等. 玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 26 - 35.
HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26 - 35. (in Chinese)
- [16] KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-tillage sowing of maize and soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104: 121 - 125.
- [17] 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 低速智能农业车辆多分辨率自适应测速系统设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 159 - 164.
TIAN Guangzhao, AN Qiu, JI Changying, et al. Design of multiresolution adaptive speed measurement system for low-speed intelligent agricultural vehicle [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 159 - 164. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130230&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 02. 030. (in Chinese)
- [18] 何海波, 杨元喜, 孙中苗. 几种北斗测速方法的比较分析[J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 217 - 221.
HE Haibo, YANG Yuanxi, SUN Zhongmiao. A comparison of several approaches for velocity determination with Beidou [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(3): 217 - 221. (in Chinese)
- [19] 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.jcsam.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)
- [20] HE X, CUI T, ZHANG D, et al. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 184 - 192.
- [21] 何亚凯, 杨学军, 翟长远, 等. 集排风送式玉米分层追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 54 - 63.
HE Yakai, YANG Xuejun, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of air-assisted layered fertilization machine of centralized distributing for corn [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 54 - 63. (in Chinese)
- [22] 孙伟, 段顺利, 丁伟, 等. 北斗单点测速方法的比较分析[J]. 导航定位学报, 2017, 5(1): 81 - 85, 99.
SUN Wei, DUAN Shunli, DING Wei, et al. Comparative analysis on velocity determination by Beidou single point [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2017, 5(1): 81 - 85, 99. (in Chinese)