

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.006

集排风送式玉米分层追肥机设计与试验

何亚凯^{1,2} 杨学军³ 翟长远^{1,2} 赵学观^{1,2} 窦汉杰^{1,4} 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. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 4. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 针对玉米追肥机械化程度低、追肥作业效率和肥料利用率不高等问题, 根据玉米分层施肥农艺要求, 设计了一种多行集中排肥、气流输肥以及分层深施肥方式的玉米追肥机。对追肥机关键部件进行了理论分析与参数确定, 并对各行之间排肥量一致性、施肥精度以及施肥深度进行了试验研究。试验结果表明: 排肥转速对各行之间排肥量一致性影响较小, 在相同转速下, 深、浅层之间排肥量一致性差异较小, 排肥量比较均匀; 随着转速的增加, 各行之间排肥量变异系数有所减小, 最大变异系数为 2.64%。在试验速度范围内, 随着工作速度的增加, 追肥机械施肥精度呈减小趋势, 施肥精度最小值为 95.42%; 深层施肥深度变化量不大, 施肥深度均值最小为 11.04 cm, 变异系数不超过 5.35%; 浅层施肥深度稳定性有所降低, 施肥深度均值最小为 6.9 cm, 变异系数不超过 9.36%; 追肥机性能达到设计目标, 能够较好地满足玉米追肥机械作业标准要求。

关键词: 玉米; 追肥机械; 集中排肥; 风送输肥; 分层施肥

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)11-0054-10

OSID:



Design and Experiment of Air-assisted Layered Fertilization Machine of Centralized Distributing for Corn

HE Yakai^{1,2} YANG Xuejun³ ZHAI Changyuan^{1,2} ZHAO Xueguan^{1,2} DOU Hanjie^{1,4} 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. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Corn is the most important food in China, which has the vital significance in ensuring food security and economic development. The work of topdressing is the important part in the process of corn production. The fertilizer management can effectively improve crop yield at the middle and later stage of maize growth, which can also increase the comprehensive benefit of corn production. However, the current topdressing work of corn is most performed by artificial fertilization. The uniformity of artificial fertilization is worse and the topdressing efficiency is lower, which can be improved by the mechanized fertilizer. So, the mechanized fertilizer would be in urgent need of development. According to the agronomic characteristics of corn layered fertilization, the centralized and pneumatic conveying fertilizer applicator was designed. The fertilizer machine was mainly composed of multi-line concentration distributing device, pneumatic conveying device, control system of fertilization and layered fertilizing device, which can realize long-range and wide-range rapid fertilization. Theoretical analysis and structural parameters of the key components were conducted. The software of control system and the interface of human-machine interaction were developed. The whole fertilizer applicator was assembled completely at last. In order to check the working performance of topdressing machinery, experimental tests concerning the consistency of fertilizer discharge, fertilization accuracy, and depth of fertilization between rows were conducted. Based on the prototype of fertilizer applicator, the tests were carried out according to relevant standards at Malan Farm in Shijiazhuang City of China in July 2019. During the

收稿日期: 2020-01-17 修回日期: 2020-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200604)

作者简介: 何亚凯(1989—),男,助理研究员,主要从事智能化农业装备技术研究,E-mail: hlyakai@163.com

通信作者: 王秀(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事智能农机装备及关键技术研究,E-mail: wangx@nrcita.org.cn

experiment, a 51.5 kW tractor was selected as the only power. Granular urea was used as test fertilizer. The experimental results showed that the rotating speed of fertilization wheel had less influence on the consistency of fertilizer quantity among each row. The difference of fertilizer quantity consistency between the deep and shallow fertilization was small at the same speed of fertilization wheel. And the fertilizer quantity was stable and uniform. The variation coefficient of fertilizer quantity consistency was reduced with the increase of rotational speed. And the maximum variation coefficient was 2.64%. With the increase of forward speed, the precision of fertilizer quantity was reduced to 95.42%. And the minimum average depth of deep fertilization of 11.04 cm remained stable with the variation coefficient being less than 5.35%, while the stability of depth for shallow fertilization was reduced with the minimum of 6.9 cm and the coefficient of variation reached 9.36%. The results indicated that the fertilizer applicator designed can meet the standard requirement of maize topdressing machinery better.

Key words: corn; fertilizer applicator; centralized fertilization; pneumatic conveying fertilizer; layered fertilization

0 引言

追肥作业是玉米生产中的重要环节,有效地追肥管理能够提高作物产量。目前,国内玉米生产过程中追肥环节仍以人工或简易机具作业为主,其劳动强度大、作业效率低,不利于大面积作业,且施肥不均匀,影响后期植株生长及作物产量^[1-5]。

机械化追肥能够有效降低玉米追肥作业劳动强度,提高施肥效率,提升综合经济效益^[6-7]。目前,国内玉米追肥机械研究还处于起步阶段,研制的追肥机械以重力直排技术施肥为主,成熟产品较少。国内一些学者已对排肥、输送和施肥技术进行了相关研究。胡红^[3]设计了一种玉米定点扎穴追肥机,该机主要由玉米植株探测装置、外槽轮间隔排肥和滑轨连杆扎穴施肥装置组成,能够根据玉米植株位置实现定点扎穴施肥,提高了肥料的利用率,但追肥效率较低;郑媛媛^[8]设计了一款电动玉米中耕追肥机,采用常用的外槽轮式排肥器进行排肥,利用单条开沟器进行开沟施肥作业,能够实现玉米行间机械化追肥作业,但追肥效率有待提高;气力辅助施肥能够有效增加机具作业幅宽,提高追肥效率,齐兴源等^[9]设计了一种稻田气力式变量施肥机,并进行相关试验,可实现稻田侧深施肥量在 40~200 kg/hm² 范围内的调节;赵金辉等^[10]通过对气流输送系统进行分析研究,设计了一种气流输送式苜蓿排种装置,排种性能指标满足标准要求;左兴健等^[11]利用数学建模分析和试验研究对关键施肥部件进行优化,设计开发了一种风送式水稻侧深精准施肥样机;雷小龙等^[12]基于颗粒化肥的机械物理特性和施肥量要求,设计了一种颗粒化肥螺旋组合式集中供肥装置;文献[13-14]利用高压气流输送原理,设计了气流输送式小麦免耕播种机,提高了小麦播种的效率和均匀性;文献[15-17]研究了玉米种植的不同施肥方式,分层施肥能够满足不同生育期的养分需求、提

高肥料利用效率、增加作物产量,对集排和风送式玉米追肥机械的研究相对较少,追肥机械作业效率不高。

为了改善我国玉米追肥机械现状,提高我国玉米机械化追肥作业效率,本文针对黄淮海平原地区,采用集中排肥和气流输肥的方式,以最高作业速度 7.2 km/h 为目标,设计一种集排风送式玉米分层追肥机,以期实现多行宽幅分层快速施肥作业。

1 结构与工作原理

1.1 结构及技术参数

集排风送式玉米分层追肥机结构示意图如图 1 所示,主要由排肥箱 a 和 b、排肥风机 a 和 b、施肥控制系统、分流器 a 和 b、排肥装置 a 和 b、供料器、施肥固定架、机架、深层施肥铲、浅层施肥铲、仿形机构、行走轮、浅层输肥管和深层输肥管等部件组成,其中深浅层施肥分别由施肥原理相同的排肥装置 a

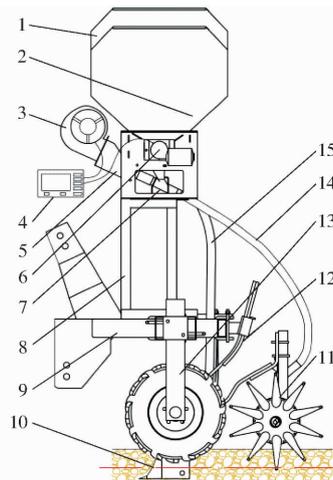


图 1 追肥机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of fertilization prototype

1. 排肥箱 a
2. 排肥箱 b
3. 排肥风机 b
4. 控制系统
5. 分流器
6. 排肥装置 b
7. 供料器
8. 施肥固定架
9. 机架
10. 深层施肥铲
11. 浅层施肥铲
12. 仿形机构
13. 行走轮
14. 浅层输肥管
15. 深层输肥管

和 b 来单独控制。

追肥机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 追肥机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of fertilizer applicator

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 155 × 3 740 × 1 970
配套动力/kW	≥43.8
工作效率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	≤2.59
肥箱容积/L	520 × 2
最大工作幅宽/m	3.6
施肥行数	6
深层施肥深度/cm	10 ~ 12
浅层施肥深度/cm	6 ~ 8

1.2 工作原理

该追肥机械采用 43.8 kW 以上拖拉机作为工作动力,运用电动多行集排、气流输送方式进行施肥作业。施肥工作开始前,开启施肥控制系统,根据作业要求设定作业幅宽、目标追肥量、深浅层肥量等相关参数,打开风机使输肥系统产生稳定的气流,保证落入文丘里管内的肥料能够被顺畅输送至施肥机构;施肥工作开始时,排肥电机驱动排肥轮进行排肥,排肥电机转速可自适应机械工作速度变化,实时进行排肥量的调节,排出的肥料落入文丘里供料器落肥口处,文丘里供料器进料口在气流作用下产生稳定的负压,能够使肥料顺利吸入输肥管道内,肥料在输肥管道压差作用下随气流运动输送至施肥机构处,落入施肥沟槽内,完成追肥作业。追肥机械深浅层施肥是通过两套施肥装置完成,深层追肥作业为开沟条施,在玉米植株侧边 p_1 (10 ~ 15 cm) 处划出一条深度 h_1 (10 ~ 12 cm) 的沟槽进行深施肥,为了减少追肥机械施肥时土壤对施肥铲产生的阻力,降低拖拉机动力消耗,浅层追肥作业为扎土穴施,与深施肥同侧,在与玉米植株距离 p_2 为 15 ~ 18 cm、扎穴深度 h_2 为 6 ~ 8 cm 处进行浅施肥,其施肥深浅层作业原理示意图如图 2 所示,其中 D 为玉米播种行间距。

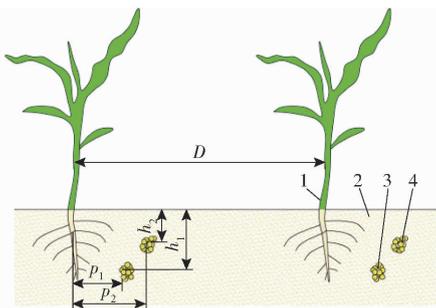


图 2 玉米分层施肥作业原理图

Fig. 2 Schematic of layered fertilization for corn

1. 玉米植株 2. 土壤 3. 深层肥料 4. 浅层肥料

2 关键部件设计

2.1 多行集中排肥装置设计

排肥装置是施肥机关键部件之一,排肥性能决定了追肥机的施肥质量和实用性。本文所设计的排肥装置采用 6 行排肥轮集中排肥的结构形式,结构集成度较高,利用一个排肥电机进行多行排肥量的控制,且每个施肥铲的施肥量分别来自对应排肥轮所排出肥量,排肥一致性较好;排肥装置结构如图 3 所示,主要包括排肥壳体、肥料隔板、排肥槽(由排肥上弧板和下弧板构成)、排肥轮、排肥轴、张紧机构、排肥间隔套和排肥电机等,肥料隔板安装在肥箱和排肥轴之间,能够有效减少肥料对排肥轴的下压力,降低排肥电机的功耗,排肥下弧板为铰接机构(铰接点 O),能够有效降低排肥过程中排肥轮与排肥槽的卡肥现象,提高排肥稳定性能。

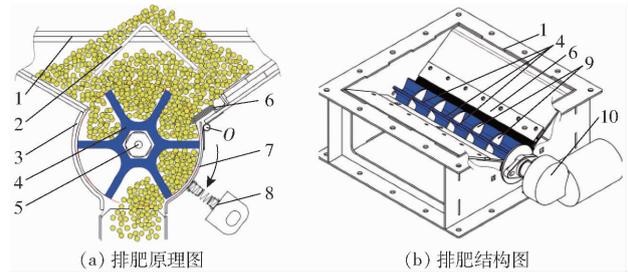


图 3 排肥装置工作原理与结构图

Fig. 3 Schematic and structure of fertilizer discharge device

1. 排肥壳体 2. 肥料隔板 3. 排肥上弧板 4. 排肥轮 5. 排肥轴 6. 毛刷 7. 排肥下弧板 8. 张紧机构 9. 排肥间隔套 10. 排肥电机

排肥轮是排肥机构中主要工作部件,目前常用的排肥轮结构形式较多,由于直齿外槽式排肥轮结构简单,排肥量可调控度高,工作性能稳定,本排肥机构采用直齿外槽式排肥轮,其排肥过程示意图如图 3a 所示,根据外槽轮排种原理^[18]可知,该外槽轮排肥器单个排肥轮每转排肥量计算式为

$$\begin{cases} q_0 = \pi d L \gamma \left(\frac{\varphi_0 f_s}{\omega} + \lambda \right) \\ \omega = \frac{\pi d}{z} \end{cases} \quad (1)$$

式中 q_0 ——单个槽轮每转排肥量, g/r

d ——外槽轮外径, mm

L ——单个槽轮工作长度, mm

γ ——肥料容重, g/mm^3

φ_0 ——凹槽内肥料填充系数

f_s ——单个槽轮凹槽截面积, mm^2

ω ——凹槽节距, mm

z ——槽轮槽数

λ ——带动层特性系数, mm

由式(1)可知,影响排肥量的主要参数有凹槽截面积、槽轮工作长度和填充系数,其中填充系数与转速负相关^[19]。当排肥量一定时,排肥轮凹槽截面积较大,则排肥轮工作长度和转速要求变小,排肥量均匀性相对较差;排肥轮凹槽截面积较小,则排肥轮转速和工作长度要求变大,肥料填充系数下降,排肥准确性相对降低。根据尿素颗粒尺寸以及追肥量等农艺要求,结合排肥装置结构设计,确定排肥轮结构参数为排肥轮外径 68 mm,一周凹槽数 6 个,槽轮有效排肥长度 14 mm,槽深 21.5 mm,外槽沿槽厚 4 mm,凹槽半径 8.5 mm。

2.2 风送输肥装置设计

2.2.1 风送输肥原理

风力输送是利用一定速度和压力的气流进行物料远距离输送,其动力来源为具有一定能量的气流,可以实现柔性结构布局,简化施肥机械复杂的结构布置,气流风送输肥工作原理如图 4 所示。风机运转后能够产生稳定的高压气流,气流的运动在文丘里供料器进料口处产生负压,以促进肥料顺利进入输肥管道,气流在管道内作为肥料的载体,快速输送肥料至施肥位置处。

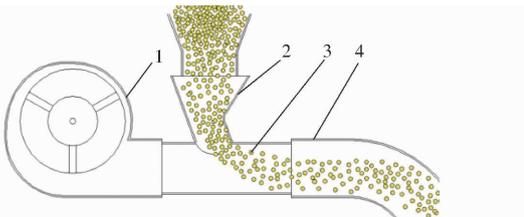


图 4 气流输肥技术工作原理图

Fig. 4 Schematic of pneumatic conveying fertilizer technology

1. 输肥风机 2. 文丘里供料器 3. 颗粒肥料 4. 输肥软管

2.2.2 风送输肥系统参数确定

气流速度是风送输肥系统的关键参数,直接影响肥料颗粒在管道中的运动状态。气流速度较小时,肥料颗粒则渐渐停滞在水平输肥管的管底,导致输肥管道堵塞;气流速度较大时,肥料能够在管道内均匀散开、顺利输送,若速度过高会浪费能量,还会造成施肥口处肥料颗粒速度过大,影响肥料在田间施肥过程中的分布效果。气流输送速度可根据气力输送理论公式进行计算

$$v_s = k_p \sqrt{\frac{\rho_p}{1000}} + k_s l \quad (2)$$

式中 v_s ——输肥管入口输送风速, m/s

k_p ——肥料颗粒度系数(一般为 16~20,颗粒直径较小时取小值)

ρ_p ——肥料颗粒密度, kg/m³

k_s ——肥料颗粒特性系数,一般为 $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$

l ——输送肥料管道长度, m

由于玉米追肥多数为尿素化肥,肥料颗粒直径一般不超过 4 mm,则选取颗粒度系数为 16,肥料颗粒密度为 1 335 kg/m³,肥料输送管道长度最大为 2 m,管道长度对风速影响可忽略^[11,20-21],则由式(2)可知输肥风速 v_s 为 18.48 m/s,考虑实际施肥作业环境的复杂性以及管道接口处的密封性等因素影响,为确保能够顺利输送肥料,实际风速取为 $1.1 \times 18.48 \text{ m/s} = 20.33 \text{ m/s}$ 。

气流输送浓度(也称料气比)^[21]为单位时间内输送肥料的质量与通过管道气流质量的比值,输送浓度越大,所需空气质量将会减少,输送所需功率也会降低,但易造成肥料输送堵塞,输送浓度过低时,输肥效率将会大大降低,影响施肥工作效率。通过查阅相关资料^[22],可知常用物料输送浓度的经验值,为提高肥料输送过程的通畅性,结合经验值,选定气流输送浓度 μ 为 1.2。气流输送浓度表达式为

$$\mu = \frac{G_p}{G_s} \quad (3)$$

其中

$$G_s = \frac{j\pi\rho_s v_s d_0^2}{4} \quad (4)$$

式中 G_p ——输送管道内肥料质量流量, kg/s

G_s ——输送管道内空气质量流量, kg/s

j ——输肥管个数,取 6

ρ_s ——空气密度, kg/m³

d_0 ——每一分行输肥管道直径, m

根据式(1)~(4)可知,输肥管道直径为

$$d_0 = \sqrt{\frac{2G_p}{3\mu\pi\rho_s v_s}} \quad (5)$$

输送流量为

$$Q_s = \frac{G_p}{\mu\rho_s} \quad (6)$$

根据玉米追肥农艺要求,玉米追肥最大量一般为 360 kg/hm²,为增大风送系统适应范围,机械前进速度设定为 9 km/h,施肥口共 12 个(深浅层各 6 个),则可知追肥作业中单位时间内总排肥量不超过 0.32 kg/s,单层排肥总量 G_p 不超过 0.16 kg/s,由式(5)可知输肥管直径为 32.8 mm;输送流量要求为 371 m³/h,则根据流量和风速要求,本文选取风机型号为 ZFL133/190BN-S1150,工作电压为 24 V,额定功率为 160 W 调速风机,额定转速为 1 600 r/min。

2.2.3 供料器

供料器是风送输肥系统中关键部件之一,它的作用是把肥料喂入输肥管道,并且能够确保肥料在

管道内顺利输送^[21-24]。本文采用文丘里原理进行供料器的结构设计,文丘里供料器结构如图5所示。

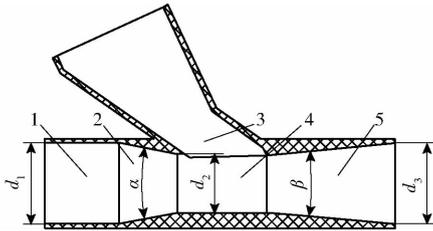


图5 文丘里供料器结构示意图

Fig. 5 Structure of Venturi feeding fertilizer

1. 入口区 2. 收缩区 3. 入料区 4. 喉管区 5. 气流出口区

气流由文丘里管进口流入,经过收缩区进行加速,流至喉管区时速度达到最大,此时入料口处于负压状态,使肥料顺利落入输肥管道并快速输送至扩散区,避免了肥料的拥堵。其中,气流入口直径 d_1 和出口直径 d_3 与输肥管道直径 d_0 相等(即 $d_1 = d_3 = d_0 = 32.8 \text{ mm}$),收缩角 α 为 22° ,扩散角 β 为 9° ,喉部直径过小则要求气流入口压力大,气流输送阻力增加,喉部直径太大,喉部气流增速和入料口负压效果不显著,不利于输肥,为保证肥料在管喉部有足够空间,取喉部直径 d_2 为 23 mm 。

结合供料器设计参数进行参数化建模,并利用Fluent软件进行流体仿真分析,其仿真结果如图6所示。从仿真图中可以看出,该供料器内部管道无湍流现象,气流平稳,当入口风速为 20 m/s 时,出口风速平均值为 21.74 m/s ;物料入口处风速平均值为 1.14 m/s ,气料混合口风速平均值为 8.24 m/s ,方向流向管道内,由物料入口处至气料混合口处负压越来越大,有利于肥料输送,验证了文丘里供料器结构设计的合理性。

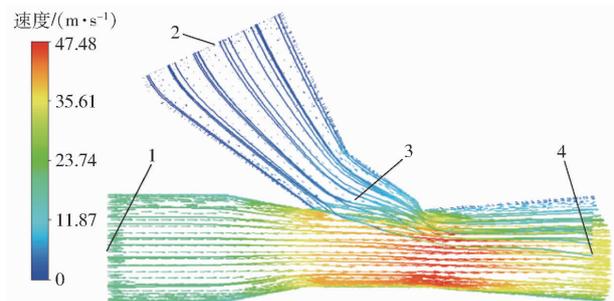


图6 供料器管道截面速度分布图

Fig. 6 Velocity distribution diagram of feeding fertilizer cross section

1. 气流入口 2. 物料入口 3. 气料混合口 4. 气流出口

2.2.4 分流器和风送输肥装置

分流器在风送输肥系统中具有重要作用,该机构能够有效把风机出风口气流转化为6行输肥气流,其结构简图如图7a所示。为确保各行输肥气流的一致性,针对分流器结构进行优化设计并利用

CFD(Computational fluid dynamics)进行气流运动仿真分析,当入口压强为 360 Pa 时,其仿真结果如图7b所示,从仿真图中分析可知,该分流器内部气流较为平稳、无涡流现象,6行出风口速度均值为 20.03 m/s ,变异系数为 0.32% ,分流一致性较好,验证了分流器结构设计的合理性。

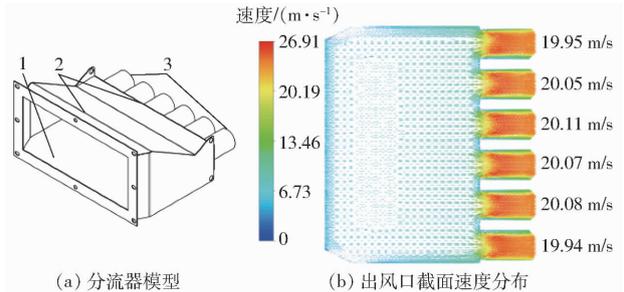


图7 分流器结构和风速仿真图

Fig. 7 Structure and airflow simulation of airflow allotter

1. 进风口 2. 分流器壳体 3. 出风口

本文利用气流正压输送技术设计了两套6行风送输肥装置(如图8所示),分别用于深浅层施肥。该风送输肥装置主要由输肥风机、分流器、过渡连接管、文丘里供料器、输肥软管和施肥固定架组成,输肥风机安装在输肥系统气流的起始端,风机产生的气体经过分流器后均匀分成6路气流,每路气流分别对应一条输肥管道,实现各路输肥和施肥互不干扰,确保输肥的一致性和稳定性。

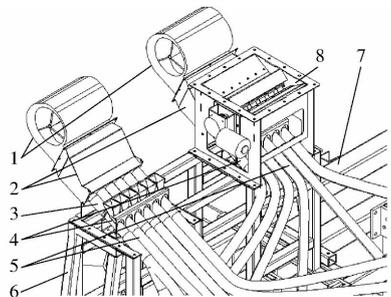


图8 输肥装置结构简图

Fig. 8 Structure of pneumatic conveying fertilizer device

1. 输肥风机 2. 分流器 3. 过渡连接管 4. 文丘里供料器 5. 输肥软管 6. 施肥固定架 7. 施肥装置机架 8. 排肥机构

2.3 深、浅层施肥铲

深层施肥铲选用河北省农哈哈公司生产的开沟施肥铲,其结构简图如图9所示,主要包括主梁、圆柱滚轮、施肥管、开沟刀头和开沟铲翼,能够较好地完成深层开沟施肥作业。浅层施肥铲选用河北省临西县众一精密铸造厂生产的扎穴施肥器^[25],其结构示意图如图10所示,主要由主梁、施肥管、星形齿盘a、星形齿盘b和齿盘转轴等组成,能够实现A点处扎穴齿闭合接肥,B点处扎穴齿张开施肥过程;主梁上方为排气口,用于排出过量气流,减小出肥口肥料

速度,降低肥料与扎穴齿间的冲击碰撞,避免出现弹跳溢出现象。

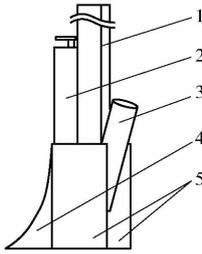


图 9 深层施肥铲结构示意图

Fig. 9 Structure of deep fertilization colter

1. 主梁 2. 圆柱滚轮 3. 施肥管 4. 开沟刀头 5. 开沟铲翼

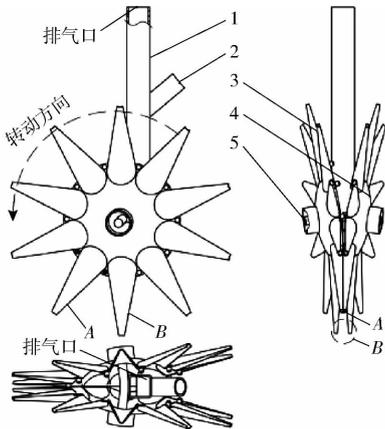


图 10 浅层施肥耙结构示意图

Fig. 10 Structure of shallow fertilization rabbler

1. 主梁 2. 施肥管 3. 星形齿盘 a 4. 星形齿盘 b 5. 齿盘转轴

2.4 施肥控制系统设计

2.4.1 总体设计

控制系统主要用于施肥作业状态的控制以及施肥作业肥量变化的自动调节。控制系统主要包括 GPS 车速模块、风机、深浅层排肥电机、电机驱动器、编码器、排肥控制单元 (ECU) 和人机交互单元。控制系统根据作业信息的传输与处理等划分为信息输入 (包括风机转速、排肥电机转速和机具行走速度)、信息处理 (包括控制单元和人机交互单元) 和信息输出 (包括风机转速和排肥电机转速), 系统框图如图 11 所示。该控制系统采用 TTC32 作为控制核心, 利用 CODESYS 进行程序开发, 通过 CAN 总线进行信息传输, 实现硬件之间的运行与融合。

施肥作业时, GPS 车速模块能够实时获取当前车速, TTC 控制器根据协议读取当前车速和排肥电机实际转速, 基于控制器内部设定程序计算出排肥电机目标转速, 进行排肥电机实际转速与目标转速差值比较与处理, 利用 PID 方法对电机实际转速进行调控, 确保排肥电机转速调节的快速稳定, 实现排肥电机转速的实时控制, 完成施肥量随前进速度变

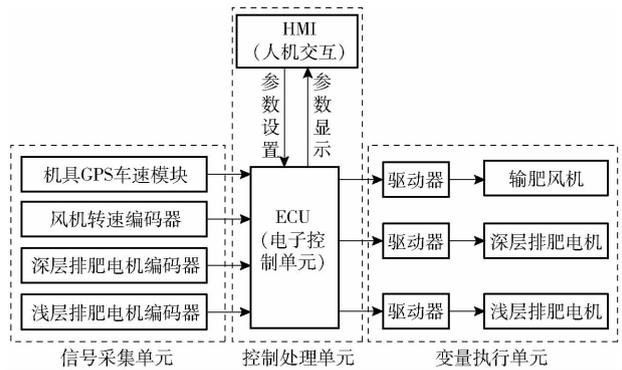


图 11 追肥机控制系统总体结构框图

Fig. 11 Block diagram of control system for fertilizer applicator

化的自适应调节。

2.4.2 车载控制端软件设计

基于 VS2012 软件开发平台, 采用 Visual C++ 语言设计了车载计算机人机交互界面 (如图 12 所示), 包括串口通讯参数设置、施肥参数设置和作业状态信息监测, 车载计算机经过串口 USB/CAN 转换器连接至 CAN 网络, 与控制单元 (TTC32) 进行施肥现场作业数据信息交换。该界面能够根据不同施肥作业要求对施肥作业参数进行更改, 参数更改简便, 并能够实时有效地读取机具当前作业状态信息 (深浅层施肥量、当前车速、地块位置等), 增加了施肥机具作业的灵活性和适应性。



图 12 车载端人机交互软件界面

Fig. 12 Interface of human-machine interaction

为了获取深浅层排肥电机目标转速, 在软件界面 (图 12) 输入相对应参数值, 排肥控制单元读取输入相应数值信息后进行计算可得深浅层排肥电机目标转速为

$$\begin{cases} n_{p1} = \frac{1\,000 \times 60 Q_{p1} vB}{15 \times 667mq} \\ n_{p2} = \frac{1\,000 \times 60 Q_{p2} vB}{15 \times 667mq} \end{cases} \quad (7)$$

式中 m ——施肥行数, 取 6

q ——单个排肥轮每转排肥实测量, 取 28 g/r

n_{p1} ——深层排肥装置排肥电机转速, r/min

n_{p2} ——浅层排肥装置排肥电机转速, r/min

Q_{p1} ——深层目标施肥量, kg/hm²

Q_{p2} ——浅层目标施肥量, kg/hm²

v ——机具前进工作速度, m/s

B ——机具工作幅宽, 取 3.6 m

3 性能试验

3.1 试验方法

为了检验追肥样机施肥性能, 参照 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》、JB/T 7864—2013《中耕追肥机》和 GB/T 20346.2—2006《施肥机械 试验方法 第2部分: 行间施肥机》等相关试验方法, 采用尿素颗粒化肥, 颗粒直径为 1.0 ~ 3.5 mm, 对风送追肥机进行室内和田间试验。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 排肥量一致性试验

本文设计的风送追肥机可同时进行多行施肥,

各行之间排肥一致性的测量能够反映各行之间排肥量的差异性, 间接反映出田间施肥的均匀性, 为减少各施肥口排肥量的差异引起施肥不均的问题, 进行排肥机构排肥一致性试验。排肥一致性试验为室内试验, 设计作业速度条件下, 排肥电机转速一般不超过 38 r/min, 采用施肥系统软件进行车速设置, 实现排肥速度为低、中、高 3 个等级状态, 每个速度下进行 3 次重复试验, 试验时间为 1 min, 试验中把 6 个施肥口从左到右分别进行编号并进行肥量称量统计, 试验数据统计如表 2 所示。

由表 2 可知, 相同转速下, 深、浅层之间排肥量差异较小, 各行之间施肥口排肥量一致性较好, 排肥量比较均匀; 试验速度范围内, 随着排肥转速的增加, 各行之间排肥量变异系数有所降低, 最大变异系

表 2 各行施肥管口排肥量一致性试验结果

Tab. 2 Results of fertilizer quantity consistency among each row

排肥转速/ (r·min ⁻¹)	排肥装置	各施肥管口平均排肥量/g						6 个施肥管排 肥量平均值/g	标准差/ g	变异系数/ %
		1	2	3	4	5	6			
15.1	深层	434.67	430.12	411.05	415.33	432.83	414.33	423.06	9.66	2.28
	浅层	443.33	448.17	420.83	418.51	429.83	422.67	430.56	11.37	2.64
24.8	深层	703.67	711.33	672.83	690.52	714.85	704.83	699.67	14.22	2.03
	浅层	715.05	720.51	702.83	691.83	707.33	696.33	705.65	9.98	1.41
34.3	深层	932.25	950.32	913.83	925.33	954.23	924.83	933.47	14.39	1.54
	浅层	943.51	953.55	926.83	924.17	937.56	948.72	935.72	10.78	1.15

数为 2.64%, 排肥量比较稳定。

3.2.2 施肥量准确率试验

施肥量准确率能够反映追肥机械田间追肥作业的稳定性, 是田间追肥作业各区域追肥一致性的保证。为检验追肥样机施肥均匀性能, 2019 年 7 月中旬于河北省辛集市马兰农场进行田间试验, 试验田块总面积为 6 000 m², 前期已采用导航拖拉机进行玉米播种, 播种行距为 60 cm, 追肥样机为北京农业智能装备技术研究中心研制的 2FQS-6 型玉米分层追肥机, 田间作业试验如图 13 所示。



图 13 施肥准确率试验现场

Fig. 13 Experimental scene of fertilization quantity accuracy

试验过程中追肥样机在施肥口进行套袋测肥, 追肥作业在低、中、高 3 种速度下进行, 每种速度下

试验前进 100 m 测量一组数据, 并进行 3 次重复试验, 施肥量准确率为

$$W_a = \left(1 - \frac{|q_{r1} - q_{r2}|}{q_{r1}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

其中

$$q_{r1} = \frac{1\,000 Q_r B S_l}{15 \times 667} \quad (9)$$

式中

W_a ——施肥量准确率, %

Q_r ——设定施肥量, kg/hm²

q_{r1} ——试验距离理论施肥量, g

q_{r2} ——试验距离实际施肥量, g

S_l ——施肥准确率试验距离, 取 100 m

试验数据统计结果如表 3 所示。可以看出, 在工作速度不超过 7.2 km/h 时, 追肥机械施肥精度随着前进速度增加而减小, 施肥精度最小为 95.42%, 追肥机械施肥精度满足标准要求; 在同样工作速度下, 深、浅层排肥装置施肥精度差别很小, 排肥装置分层施肥性能比较稳定。

3.2.3 施肥深度准确性试验

施肥深度能够较好地反映追肥状态以及肥力效果, 按照施肥均匀性试验的田间试验安排, 在低、中和高 3 种前进工作速度下, 进行田间追肥施肥深度检测试验, 任意选取一个施肥行, 沿施肥方向每间隔

表 3 施肥量准确率试验结果

Tab. 3 Statistical results of fertilization quantity accuracy

前进速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	排肥 装置	设定施肥量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	各施肥管口平均排肥量/g						总施 肥量/g	理论 施肥量/g	施肥 误差/g	准确率/ %
			1	2	3	4	5	6				
3.4	深层	150	879.17	900.12	871.67	862.53	909.15	896.67	5 319.31	5 397.30	77.99	98.56
	浅层	150	875.83	903.32	882.51	902.55	923.04	905.16	5 392.41	5 397.30	4.89	99.91
5.5	深层	150	862.15	879.17	857.51	853.83	885.84	853.55	5 192.05	5 397.30	205.25	96.20
	浅层	150	867.85	886.83	854.52	865.83	897.50	864.51	5 237.04	5 397.30	160.26	97.03
7.2	深层	150	833.55	879.17	852.67	829.83	886.64	868.35	5 150.21	5 397.30	247.09	95.42
	浅层	150	841.16	864.32	860.83	848.12	885.17	873.33	5 172.93	5 397.30	224.37	95.84

1 m 进行一次深度测量,共进行 20 次测量,施肥深度田间试验如图 14 所示,试验数据与处理结果如表 4 所示。

由表 4 可知,在追肥作业速度不超过 7.2 km/h 时,深、浅层施肥深度均满足施肥设定要求,深层开沟施肥深度受速度影响较小,深度平均值最小为 11.04 cm,深度变异系数不超过 5.35%;浅层扎穴施肥深度平均值随着作业速度的增加而减小,施肥深度平均值最小为 6.9 cm,变异系数最大为 9.36%。



图 14 田间追肥试验现场

Fig. 14 Field test of fertilizer applicator

表 4 施肥深度准确性试验结果

Tab. 4 Experimental results of fertilizing depth accuracy

前进速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	施肥 位置	测量点处肥料深度/cm																		均值/ cm	标准 差/cm	变异 系数/%		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				19	20
3.6	深层	12.0	12.0	11.5	11.2	10.5	10.0	10.8	11.3	11.5	10.2	11.1	10.9	11.5	10.5	11.8	11.5	12.0	11.7	10.9	10.5	11.17	0.60	5.35
	浅层	6.5	6.5	7.0	6.1	7.2	8.0	7.9	7.2	6.9	7.5	6.9	7.6	7.1	6.8	7.5	7.2	7.9	7.5	8.0	7.7	7.25	0.52	7.21
5.4	深层	11.2	11.4	11.5	11.8	11.0	10.6	10.8	11.0	10.5	10.0	10.3	11.5	10.4	10.8	10.5	11.0	11.6	11.2	11.7	12.0	11.04	0.54	4.87
	浅层	6.8	7.3	7.1	6.5	6.9	7.5	7.8	7.5	8.0	8.0	7.9	6.8	7.0	7.3	6.5	6.0	6.8	5.6	7.2	6.5	7.05	0.63	8.95
7.2	深层	11.0	11.2	12.0	11.6	10.8	11.5	10.6	12.0	11.4	10.5	10.8	11.3	11.7	11.9	10.9	11.3	10.2	10.8	11.9	10.4	11.15	0.52	4.86
	浅层	6.0	6.2	6.6	7.3	6.5	6.3	6.1	7.6	6.3	6.5	7.2	7.8	7.6	6.5	7.3	7.9	6.2	7.3	6.7	8.0	6.90	0.65	9.36

4 结论

(1) 针对玉米中期追肥生产需要,设计了一种集排风送式玉米分层追肥机。在玉米生长中期进行追肥作业时,该机能够实现多行快速深浅分层施肥作业;基于 TTC32 开发了一套具有人机交互功能的追肥控制系统,简化了作业系统的变量设置,实现了系统追肥作业的连续性,使施肥量能够随工作速度自适应变化,提高了追肥作业效率和肥料利用率。

(2) 进行了多行集中排肥装置排肥量一致性室内试验,结果表明:在电机相同转速下,深、浅层排肥装置排肥量差异性较小,各行之间施肥口排肥量一

致性较好;随着转速增加,各行之间排肥量变异系数有所减小,最大变异系数为 2.64%,转速对排肥量一致性的影响不明显,各行之间排肥量比较均匀、稳定。

(3) 为了验证该追肥样机的作业性能,进行了样机田间追肥试验,结果表明,在试验速度范围内,随着工作速度的增加,追肥机械施肥精度呈逐渐减小趋势,施肥精度最小值为 95.42%;深层施肥深度变化量不大,施肥深度均值最小为 11.04 cm,变异系数不超过 5.35%;浅层施肥深度有所降低,施肥深度均值最小为 6.9 cm,变异系数不超过 9.36%;追肥机性能达到设计目标,能够满足玉米追肥机械作业标准要求。

参 考 文 献

- [1] 唐汉,王金武,徐常塑,等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):1-19.
TANG Han,WANG Jinwu,XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):1-19. http://www.j-

- csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190401&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.001. (in Chinese)
- [2] 刘正道,何进,王庆杰,等.我国玉米穴施肥装置研究现状及展望[J].江苏农业科学,2019,47(20):5-8.
LIU Zhengdao, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Research status and perspective of corn hole-pricking fertilization device in China [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(20): 5-8. (in Chinese)
- [3] 胡红.玉米行间定点扎穴深施追肥机设计与研究[D].北京:中国农业大学,2017.
HU Hong. Design and research of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between maize rows [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [4] 李振.中耕追肥机施肥铲的设计与试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
LI Zhen. Design and experimental study on fertilizer shovel of fertilizer cultivator [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 施印炎,陈满,汪小岳,等.稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(7):97-103.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170712&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012. (in Chinese)
- [7] 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(增刊2):88-92.
WANG Xiaochan, CHEN Man, SUN Guoxiang, et al. Design and test of control system on variable fertilizer applicator for winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2): 88-92. (in Chinese)
- [8] 郑媛媛.电动玉米中期追肥机的设计与试验研究[D].合肥:安徽农业大学,2013.
ZHENG Yuanyuan. Design and experiment of the electric fertilizer applicator [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [9] 齐兴源,周志艳,林蜀云,等.稻田气力式变量施肥机肥料喷撒器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):164-170,180.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, LIN Shuyun, et al. Design of fertilizer spraying device of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 164-170, 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s022&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.022. (in Chinese)
- [10] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等.苔麸播种机气流输送式排种系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):101-107.
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of pneumatic seeding system of teff seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):101-107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s014&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.014. (in Chinese)
- [11] 左兴健,武广伟,付卫强,等.风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(3):14-21.
ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 14-21. (in Chinese)
- [12] 雷小龙,李蒙良,张黎骅,等.颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调定量供肥装置设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(19):9-18.
LEI Xiaolong, LI Mengliang, ZHANG Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 9-18. (in Chinese)
- [13] 刘立晶,刘忠军,杨学军,等.气流输送式小麦免耕播种机设计和试验[J].农业机械学报,2011,42(2):54-57.
LIU Lijing, LIU Zhongjun, YANG Xuejun, et al. Design and test on pneumatic no-till wheat planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 54-57. (in Chinese)
- [14] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等.气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):141-148.
YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 141-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s019&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)
- [15] 王云霞,梁志杰,崔涛,等.玉米分层施肥器结构设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):163-169.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn [J/OL].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (Supp.): 163 - 169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)
- [16] 邹忠君,孙艳华.玉米一次性分层缓释施肥技术试验研究[J].农学学报,2011,1(4):6-9.
ZOU Zhongjun, SUN Yanhua. A test on slow-release fertilizer one-time stratification application technique in maize [J]. Journal of Agriculture, 2011, 1(4): 6-9. (in Chinese)
- [17] 王春虎,杨文平.不同施肥方式对夏玉米植株及产量性状的影响[J].中国农学通报,2011,27(9):305-308.
WANG Chunhu, YANG Wenping. Character studying in maize plants and yield impact about different fertilization methods [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9): 305-308. (in Chinese)
- [18] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [19] 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)
- [20] 常金丽,张晓辉.2BQ-10型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(1):136-141.
CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)
- [21] 吴建章,李东森.通风除尘与气力输送[M].北京:中国轻工业出版社,2018.
- [22] 胡克吉.气力输送系统文丘里供料器的研究[D].青岛:青岛科技大学,2013.
HU Keji. The research on Venturi feeder in pneumatic conveying system [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [23] 佟飞虎.文丘里管、文丘里喷嘴流量计的参数化设计[D].沈阳:东北大学,2007.
TONG Feihu. The parametric design of Venturi tube and Venturi nozzle flowmeter [D]. Shenyang: Northeastern University, 2007. (in Chinese)
- [24] KUMAR P, SAN S M. CFD study of the effect of Venturi convergent and divergent angles on low pressure wet gas metering [J]. Journal of Applied Sciences, 2014, 14(22):3036-3045.
- [25] 孟凡华.施肥穴植器:201620981376.X[P].2017-02-22.

~~~~~

(上接第 53 页)

- [21] 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?file\\_no=20190207&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190207&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.007. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 段力学.PID参数整定方法分类与概述[J].现代计算机(专业版),2012(7):23-26.  
DUAN Lixue. Category and summarization of PID parameters tuning methods[J]. Modern Computer, 2012(7):23-26. (in Chinese)
- [24] 叶政.PID控制器参数整定方法研究及其应用[D].北京:北京邮电大学,2016.  
YE Zheng. PID controller parameter tuning method and application [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2016. (in Chinese)
- [25] 刘霞,冯元,王亚云.基于衰减曲线法整定PID调节器参数仿真技术研究[J].国外电子测量技术,2019,38(8):101-104.  
LIU Xia, FENG Yuan, WANG Yayun. Research on simulation technology of PID regulator parameters tuning based on attenuation curve method[J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2019,38(8):101-104. (in Chinese)
- [26] 孙跃光,林怀蔚,周华茂,等.基于临界比例度法整定PID控制器参数的仿真研究[J].现代电子技术,2012,35(8):192-194.  
SUN Yueguang, LIN Huaiwei, ZHOU Huamao, et al. Simulation study on setting of PID controller parameters according to critical proportioning methods[J]. Modern Electronics Technique,2012,35(8):192-194. (in Chinese)