doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.007

温室大棚电驱气力式胡萝卜播种机设计与试验

王方艳　杨　亮　王红提
(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 目前能适应设施大棚种植条件的小型播种机多采用窝眼轮式排种器,播种精度低,播种质量无法实时监测。小型气力式播种机需要配置气力式排种器和风机,存在动力系统设计困难、排种稳定性差、整机结构复杂、笨重等设计难题。本文基于设计的气吸式排种器,设计了叉形分种器,实现窄行距精密播种作业;确定油电混合动力系统,排种器和风机采用电驱方式,排种稳定性得到了提高。设计了基于旋转编码器测速的电驱式胡萝卜播种机控制系统,该系统以 PLC 为主控制器,根据旋转编码器采集的前进速度信息实时调节排种器转速,实现排种转速与播种机前进速度实时匹配。基于对射式矩阵光纤传感器,开发了播种质量监测系统,解决了小粒径种子的监测问题。通过试验表明,续航时间为 10 h,计数相对误差小于等于 4.6%,型孔堵塞时能发出警报提醒;播种株距合格率大于 93.7%、漏播率小于等于 3.9%、重播率小于 2.4%,漏播率检测误差小于 8.4%,试验结果符合国家相关标准要求及胡萝卜种植农艺要求。

关键词: 设施农业; 胡萝卜; 电驱式; 气吸式; 精密播种机; 实时监测系统
中图分类号: S223.2+6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0064-10　　**OSID**:

Design and Test of Electric Driving Pneumatic Carrot Planter in Greenhouse

WANG Fangyan　YANG Liang　WANG Hongti
(*School of Electrical and Mechanical Engineering*, *Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: At present, the small planters that can adapt to the planting conditions of the facility greenhouses mostly use the cell wheel seed-metering device, so the seeding accuracy is low, and the seeding quality cannot be immediately known. Small pneumatic planters need to be equipped with pneumatic seed-metering device and fan, while there are design problems such as power system design, poor seed metering stability, complex structure and bulkiness of the whole machine. On the basis of the air suction seed-metering device designed previously, a fork-shaped seed divider was developed to realize narrow row spacing. The seeder would not stray meanwhile working on the ridge was designed. Due to the oil-electric hybrid power system, the machine had independent power system, that meant the gas online engine provided seeder driving force as well as the electric offered the seed-metering device and draught fan power. In this way, seeding performance was improved. In terms of automation, the carrot precision seeder system of electric driving was designed based on the speed measurement method of rotary encoder. PLC was the main controller of this system. According to the advance speed message collected by rotary encoder, the speed of seeding was adjusted in real time, as well as realized the real-time matching between the speed of seeding and the advance speed of the seeder. In order to solve the monitoring problem of small grain size seeds, a monitoring system for seeding quality was developed, which can display leaky seeding number and sowing area in real time during operation. Through adopting bijective matrix fiber optic sensor monitoring the flow of seed, counting test proved the counting relative error was not more than 4.6%. On the other hand through the leaky alarm system, it was tested by plugging seed cells artificially. The test results showed that the system can effectively monitor the leakage and meet the requirements of production and use. The rotary encoder was used to measure the speed of the seeder, and the servo motor drived the seeder. The seeding control

收稿日期: 2021-08-23　修回日期: 2021-12-20
基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019GNC106056)和国家自然科学基金项目(51775290)
作者简介: 王方艳(1979—),女,副教授,博士,主要从事农业装备技术研究,E-mail: wfy_66@163.com
通信作者: 王红提(1983—),女,讲师,博士,主要从事农业机械与农产品加工装备研究,E-mail: lntizi59@163.com

system adjusted the speed of the seeder, so that the speed of the seeder matched the advance speed of the seeder in real time, so as to realize the uniform sowing distance of the whole plot. The field experiment showed that the endurance of the battery reached 10 hours, the qualified rate of the plant spacing was more than 93.7%, the reseeding rate was less than 2.4%, and the leaky seeding rate was not more than 3.9%. The experimental result met the national relevant criterion whose sowing depth was uniform and averagely 17 mm. Compared with several cognate type of carrot seeders, the reseeding rate and the leaky seeding rate were reduced, the sowing quality could be monitored in real time, the monitoring error was less than 8.4%, and the working efficiency and sowing quality were improved.

Key words: facility agriculture; carrot; electric driving; air-suction; precision planter; real-time monitoring system

0　引言

胡萝卜是中国重要的经济作物之一，种植面积约 4.0×10^5 hm^2，占世界种植面积的 42%[1]。为了错开上市时间和反季节种植，获得更多收益，设施大棚种植胡萝卜被广泛推广，但受设施大棚有限空间的影响，国外引进的大型播种机无法使用。国内小型气力式播种机极少，现有的小型播种机具主要有人力手推式、电动手推式和油动手推式，均为窝眼轮式排种器[2-4]，存在种子易破损、型孔易堵塞、播种精度难保障等问题[5-6]。气力式排种器能克服上述窝眼轮式排种器的缺点，因此，研发一种小型气力式精密播种机，并对播种质量进行自动监测，对设施大棚蔬菜机械化播种具有重要意义。

目前，小型播种机多由地轮驱动，存在地轮滑移产生漏播的问题[7]，一般采用电机驱动排种器来解决。采用编码器、霍尔传感器、雷达和 GPS 等采集播种机或拖拉机前进速度，借助控制器实时调整电机转速，实现排种器转速与播种机前进速度实时匹配[8-17]。

此外，随着市场对播种质量和智能化程度要求的不断提高，对光电式、压电式和图像式排种性能监测系统的研究不断增多。如文献[18-20]利用光电传感器进行漏播检测；文献[21-22]利用光纤传感器进行了漏播检测，为降低生产成本，后又设计了一种压电式漏播检测装置；黄东岩等[23]利用压电传感器进行漏播检测，并采用 GPS 采集漏播位置。邱兆美等[24]利用光电传感器和 CMOS 图像传感器对播种数量、漏播数量和落种过程进行监测；谯睿等[25]利用激光传感器进行漏播重播检测；董宝军[26]设计了具有漏播补偿功能的监测系统，利用光电传感器进行漏播检测，还加设了补种排种器进行补种。以上几种检测方法中，光电和压电检测法结构简单，成本低，应用较广，主要用来检测玉米、大豆等大粒种子，对直径小于 4 mm 的小粒种子检测困难；图像检测系统能够直观地看到播种质量和过程，但是结构复杂，成本较高，对小粒种子的漏播检测适合采用光纤传感器，灵敏度高、抗干扰性强。

本研究以山东、河南等地温室大棚 1 垄 2 行胡萝卜种植模式为研究对象，设计一种小型胡萝卜精密播种机。要求能 1 次播种 2 行；整机结构紧凑、质量轻，能在大棚等狭窄空间调头；可实时反映播种质量。为满足以上要求，在笔者研制的双行气吸式排种器的基础上[27]，配套设计双行分种器以及驱动轮等部件，重点进行动力系统和监测系统设计，提升用户体验。为保证播种机续航能力及风机风压稳定，采用汽油机为播种机的行走提供动力，锂电池为电机及风机提供动力；采用电机驱动排种器获得适宜的转速；采用光纤传感器检测胡萝卜种子，通过作业质量监测系统提高播种效果及智能化水平。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

山东、河南等地胡萝卜种植多采用 1 垄 2 行的种植方式，行距 110～120 mm，株距 60～100 mm，播深 10～20 mm。为满足质量轻的要求，动力系统中各部件均以体积小、质量轻为原则进行设计，紧凑布置。对于播种粒距均匀性问题，通过 PLC 控制使排种速度与前进速度相匹配。漏播检测采用对射式光纤传感器，安装在排种器投种口。该机主要由汽油机、行走轮、机架、风机、电机、开沟器、排种器、锂电池、电控箱、触摸屏 PLC 一体机等组成，可一次性完成开沟、播种、镇压和漏播监测等工序。播种机结构如图 1 所示。

1.2　工作原理及主要技术参数

作业时，根据胡萝卜品种及生产要求输入合适的株距，启动汽油机及风机，调节到合适的播种风压及汽油机油门，使排种器吸种稳定、播种机匀速前进。通过编码器获取播种机前进速度，经 PLC 的控制实时调整伺服电机的转速，保障播种粒距稳定。排种器排出的双行种子流经叉形分种管导入到种沟中完成播种。在此过程中，漏播监测系统获得播种

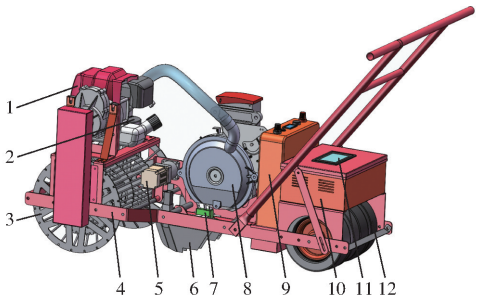


图 1 播种机结构图

Fig. 1 Structural diagram of seeder

1. 汽油机 2. 风机 3. 驱动轮 4. 机架 5. 电机 6. 开沟器 7. 光纤传感器 8. 排种器 9. 锂电池 10. 电控箱 11. 触摸屏 PLC 一体机 12. 镇压轮

效果,触摸屏上实时显示前进速度、播种总数、漏播数等信息。播种机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 播种机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of seeder

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 085×450×850
配套动力/kW	1.4
整机质量/kg	53
播种行数/行	2
行距/mm	120
株距/mm	50~100
播种深度/mm	0~50

2 关键部件设计与参数确定

2.1 动力系统设计

2.1.1 汽油机

汽油机选择之前,需计算播种机所需驱动功率。播种机田间作业时的工作阻力主要包括前后轮滚动阻力、开沟器开沟阻力和覆土器覆土阻力,消耗的总功率主要由播种机行走消耗的动力及开沟、覆土器消耗的动力组成。整机滚动摩擦力为

$$F_1 = mgf_1 \tag{1}$$

式中 m——整机质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

f_1——滚动摩擦因数

播种机整机质量按最大取值计算 $m=60$ kg,土壤对钢的摩擦因数 $f_1=0.5$(按黏结沙壤土),代入计算得到摩擦力 $F_1=294$ N;播种机总阻力 F 为整机滚动摩擦力 F_1、开沟器阻力 F_2 和覆土器阻力 F_3 之和,本研究采用 2 个开沟器和 2 个覆土器,即

$$F = F_1 + 2F_2 + 2F_3 \tag{2}$$

查阅文献[28]得到滑刀式开沟器开沟阻力为 200~400 N,开沟阻力与开沟器的类型、尺寸参数、开沟深度以及播种机作业速度等因素有关,本研究中胡萝卜播种时开沟深度约 2 cm,取开沟器阻力 $F_2=200$ N,刮板式覆土器阻力 $F_3=45$ N,代入计算得到总阻力 $F=784$ N。整机所需驱动功率

$$P = Fv_1 \tag{3}$$

式中 v_1——播种机作业速度,m/s

播种机前进速度 v_1 按人步行速度 1.39 m/s(5 km/h)计算,得到驱动功率 $P=1\,089.76$ W。综合考虑功率储备等因素,选择三菱 TB50PFD 型二冲程汽油机,额定功率 1.5 kW,净质量 4.5 kg,额定转速7 200 r/min,外形尺寸(长×宽×高)为 283 mm×178 mm×254 mm。搭配 30 速比减速器,与油门配合能满足播种机 3~5 km/h 的作业速度要求。

2.1.2 电机

本研究排种器采用直流伺服电机驱动,由锂电池供电。作业时,直流电机驱动扭矩计算式为[16]

$$T_1 = K_1 \frac{T_2}{\mu_1 \mu_2} \tag{4}$$

式中 T_1——电机驱动扭矩,N·m

T_2——作业时排种器最大负荷,N·m

K_1——安全系数

μ_1——周向传动比

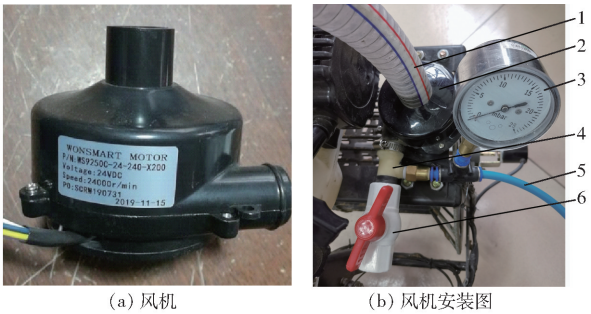
μ_2——减速器传动比

经扭矩传感器测量,本研究设计的排种器作业时最大负荷 $T_2=3.5$ N·m,考虑自重和摩擦力,安全系数取 $K_1=2$,周向传动比 $\mu_1=1$,减速器传动比 $\mu_2=36$,代入计算得到电机驱动扭矩 $T_1=0.19$ N·m。选用杭州翼志科技有限公司 57AIM15 型直流伺服电机,其额定转矩为 0.48 N·m,工作电压 DC 24 V,额定电流 2.2 A,分辨率 32 768 P/r(每转输出脉冲数 32 768 个),可满足作业要求。该直流伺服电机内部集成 15 位绝对值编码器和驱动器,只需供电和脉冲信号即可完成控制,简化了接线操作。直流伺服电机启动转矩大,调速范围宽,控制方式灵活,通过 PLC 控制器控制伺服电机驱动器,结合采集到的播种机后轮转速进行动态调整,可实现电机转速的闭环控制。直流伺服电机具有较好的抗速度过载和转矩过载的能力,在智能化精密播种作业中是一种较佳的动力配套选型方案。

2.1.3 风机

目前应用于气吸式播种机的风机布置主要有两种:一个风机为多个排种器提供工作负压,这种风机一般用于大型气吸式播种机,其动力由拖拉机后输出轴提供;一个风机为一个排种器提供工作负压,这种一般用于小型气力式播种机,其动力由汽油机提供。由于风机动力由汽油机提供,怠速或减速时动力波动会影响风机风压,进而影响排种器排种性

能[29]，且考虑到要减轻整机质量及提高结构紧凑性，故本研究在第 2 种布置方式的基础上改选用电驱式风机，由锂电池供电。前期研究成果表明，胡萝卜播种机最佳工作负压为 4.4 kPa，小粒种子播种所需负压一般不高于 6 kPa[27]。因此，选用宁波东莱机电有限公司的 WS9250C 型直流无刷离心式风机，配套风机驱动器，可进行 PWM 调速。该风机最大风压 7 kPa，最大风量 43 m^3/h，额定电压 DC 24 V，额定电流 5 A，风机圆柱形，直径 92 mm，高度 50 mm，体积小，出风量大，满足排种器工作要求。在风机出风口加装三通管和球阀可以为排种器提供吹杂正压，如图 2 所示。



(a) 风机　　(b) 风机安装图

图 2　WS9250C 型风机

Fig. 2　WS9250C fan

1. 负压导气管　2. 风机　3. 正压压力表　4. 三通管　5. 正压导气管　6. 球阀

2.1.4　蓄电池

常用的动力蓄电池主要有铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、磷酸铁锂电池和三元锂电池。传统农业机械设备直流动力电池一般采用铅酸电池，铅酸电池价格低廉、安全可靠、工艺较成熟，但铅酸电池能量密度低，体积、质量相对较大，不适合轻便型设备使用。锂电池能量密度较高、小巧轻便、充放电循环寿命长，相对于铅酸电池更高效、安全、环保。三元锂电池能量密度可达 304 W·h/kg，相当于磷酸铁锂电池 140 W·h/kg 的 2.17 倍，铅酸电池 40 W·h/kg 的 7.6 倍，其抗低温性也比磷酸铁锂电池强[30]。考虑到续航时间和整机质量，本研究选择深圳市德力普科技有限公司额定电压为 25.9 V、容量为 51 A·h 三元锂电池，质量约 7 kg，同时为排种器电机和风机提供动力，续航时间为

$$t = \frac{UQ}{P_1 + P_2} \tag{5}$$

式中　t——电池续航时间，h

U——电池额定电压，V

Q——电池容量，A·h

P_1——电机额定功率，W

P_2——风机额定功率，W

电机额定功率为 50 W，风机额定功率为 120 W，代入式(5)计算得到续航时间 t = 7.77 h。播种机作业过程中电机和风机实际功率小于额定功率，故续航时间大于 7.77 h，经田间播种试验测算，续航时间约 10 h，满足 1 天的作业时间要求。

2.2　排种器设计

气吸式胡萝卜排种器主要由左右壳体、气吸垫、排种盘、种箱、导种器、上刮种器、下刮种器等部件组成，负压气室在左壳体上，种箱和右壳体为一体结构。排种器结构示意图如图 3 所示。排种器通过软管与风机进风口连接，工作时，排种器左壳体形成负压状态，种子被吸附在排种盘型孔上，随排种盘转动，型孔上吸附的多余种子被刮种器清除掉，1 个型孔只保留 1 粒种子，到达下面投种口时，负压室被隔断，种子脱离排种盘经过导种管落入种沟完成排种。

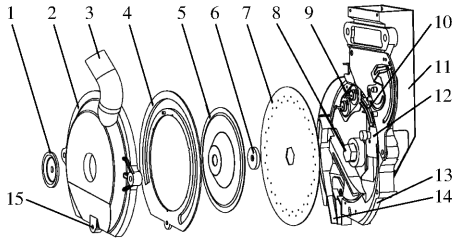


图 3　排种器结构示意图

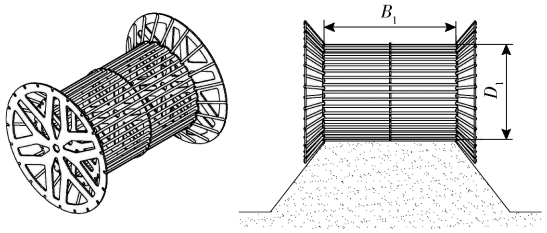
Fig. 3　Schematic of seed-metering device

1. 壳体盖　2. 左壳体　3. 负压接口　4. 气吸垫　5. 气吸垫压盘　6. 压盘套　7. 排种盘　8. 传动轴　9. 上刮种器　10. 下刮种器　11. 种箱　12. 挡种板　13. 右壳体　14. 导种器　15. 正压接口

前期通过对排种过程进行理论分析，设计了双圈型孔排种盘，可实现 1 个排种器播种 2 行。排种盘直径为 220 mm，内、外圈型孔所在圆周直径分别为 175、190 mm，每圈 30 个型孔。更换不同型孔数量和型孔直径的排种盘可以播种不同品种的小粒径种子。设计的双侧刮种器从型孔上、下两个方向把吸附的多余种子清除，上刮种器为锯齿式，下刮种器为偏心杆式。通过单因素试验得到对排种性能影响较大的因素为排种盘型孔直径、排种盘转速和气室负压，并通过三因素五水平二次回归正交旋转组合试验，获得排种器最佳参数组合为型孔直径 1.6 mm，排种盘转速 18 r/min，气室负压 4.4 kPa[27]。

2.3　驱动轮设计

手推式胡萝卜播种机在垄上行走时方向不易把控，易发生掉垄现象，针对此情况，在驱动轮两端分别设有喇叭形导向轮，不仅增加了驱动轮与地面的摩擦力，而且在垄上作业时具有导向作用，防止驱动轮跑偏，如图 4 所示。考虑到山东地区胡萝卜种植多为壤土，整地后垄面仍有土块且粘性较大，影响开沟播种质量。驱动轮设计为鼠笼式，轮辋为格栅状，



(a) 轴测图 (b) 主视图

图 4 驱动轮结构图

Fig. 4 Structural diagrams of driving wheel

缝隙 10 mm,行走时不仅能把较大土块压碎,而且粘在轮辋上的土壤在滚动时会自然脱落,鼠笼式的结构也减轻了自身质量。驱动轮滚动摩擦力除受土壤特性影响外,还与驱动轮宽度和直径有关,其关系为[31]

$$R_x = \frac{G^2}{K_2 B_1 D_1} \tag{6}$$

式中 R_x——驱动轮滚动摩擦力,N

G——驱动轮受到的垂直载荷,N

K_2——土壤特性系数

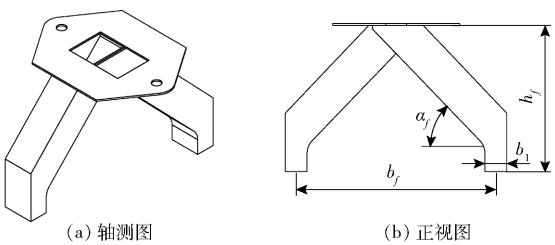
B_1——驱动轮宽度,m

D_1——驱动轮直径,m

由式(6)可以看出,在其他参数不变的情况下,增大驱动轮直径可以减小滚动摩擦力。综合动力、自重、造型等因素考虑,结合胡萝卜的种植模式,确定驱动轮宽度 B_1 为 280 mm,直径 D_1 为 200 mm。

2.4 分种器设计

针对农艺要求,分种器由 2 个分种管组成,左右对称,前后错位布置,中心距 b_f = 120 mm,安装在排种器支架下面。排种盘上外、内圈型孔上的种子从连接板中间方孔分别落入左、右分种管,分种管将改变种子运动方向,使其由前后向左右运动,实现窄距双行播种。由试验测得包衣胡萝卜种子的休止角为 22.6°,故分种装置倾斜角 α_f 应大于 22.6°,在此设计 α_f 为 43°。种子与分种管碰撞后运动轨迹随机,将影响粒距均匀性,因此,设计的分种器高度 h_f 为 80 mm,降低种子触地速度。为保证行距准确性,分种器出种口宽度 b_1 为 10 mm。分种器结构如图 5 所示。



(a) 轴测图 (b) 正视图

图 5 分种器结构图

Fig. 5 Structural diagrams of seed-guiding device

3 播种控制与监测系统

为了实现播种粒距的精确控制及播种状态的实时监测,设计了胡萝卜精密播种控制与监测系统。播种前,根据胡萝卜品种及生产要求输入合适的株距;播种时,触摸屏上实时显示前进速度、播种总数及漏播率等信息,当漏播出现异常时(连续漏播 7 个或规律性漏播)屏幕报警信号灯亮起,播种人员可根据实际情况及时停机排除故障。播种控制与监测系统由排种控制系统和漏播监测系统两部分组成,系统工作流程如图 6 所示。

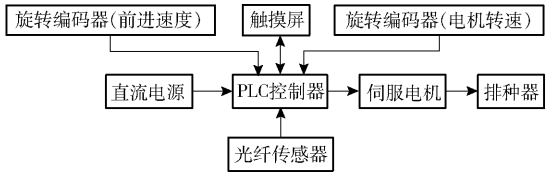


图 6 播种控制与监测系统原理框图

Fig. 6 Principle diagram of seeding control and missing detection system

3.1 排种控制系统

3.1.1 排种控制系统工作原理

排种控制系统由硬件及软件构成,硬件主要由旋转编码器、PLC 控制器、触摸屏等组成。其工作原理是 PLC 根据人机交互界面设定的播种株距等参数值,先计算出单位时间内的排种量及排种器转速的理论值;然后,PLC 将旋转编码器测得的行进速度和排种器转速进行比较,实现排种器转速的实时调整,并实时显示作业速度、排种器实际转速以及播种数量等。播种控制系统通过调整排种器的转速,使排种器转速与播种机前进速度实时匹配,实现整个地块播种粒距均匀。

3.1.2 硬件选型

PLC 为主控制单元,负责与触摸屏通信并根据旋转编码器实时测得的相关速度对伺服电机实时控制。PLC 具体型号根据系统架构、经济性、I/O 点数、参考精度等进行选择。根据装置结构共有 4 个输入、1 个伺服电机控制输出、1 个触摸屏通讯接口,因此,选用深圳中达优控公司的 MC-20MR-6MT_430A_FX_F 型触摸屏 PLC 一体机,触摸屏和 PLC 集成一体,内部集成了 CPU 模块、I/O 模块和电源模块,具有结构紧凑、操作简单、安装方便以及成本低等特点。

该一体机 CPU 模块为 Mitsubishi FX 系列,其响应速度较快,基本指令执行速度时间为 0.08 μs,内置的用户存储器为 8 000 步。触摸屏为 4.3 英寸高亮度液晶显示屏(480 像素 × 272 像素),通讯端口

RS 485，4 线精密电阻网络(4H)，预装 YKHMI V3.3 组态软件，具备图像显示和数据处理功能。

目前农业机械前进速度测量方法主要有标杆测速法、轮速传感器测速法、多普勒雷达测速法、GPS 测速法等。目前采用较多的是轮速传感器测速法和 GPS 测速法，在拖拉机加、减速过程中，单点定位 GPS 速度误差和延时较大。有研究表明，在作业速度为 4 km/h 时，GPS 测速方式平均粒距合格指数小于编码器测速方式，在作业速度为 6 ~ 12 km/h 时，GPS 测速方式平均粒距合格指数大于编码器测速方式[16]。本研究播种机为轻简型手推式播种机，作业速度为 3 ~ 5 km/h，因此，选用台州霍尔电气有限公司生产的 E6B2 - CWZ6C 型旋转编码器，工作电压 DC 5 ~ 24 V，控制电流小于 80 mA，最高响应频率为 150 kHz，分辨率 1 024 P/r(每转输出脉冲 1 024 个)，输出方式为 NPN 常开。

3.1.3　PLC 控制程序设计

PLC 程序在 GX Works2 上编程，主要功能采用梯形图进行开发，包括参数设定、启停、状态检测以及比例值调整等。

(1)排种器转速

为了确保播种株距稳定，提高播种质量，排种器的转速必须和播种机作业速度相匹配，即 PLC 控制器需根据播种机作业速度实时调整排种器转速。其中播种机的作业速度由旋转编码器 A 测定，排种器的转速由伺服电机调整。

播种机作业时，PLC 控制器通过高速计数器(频率模式)实时采集旋转编码器 A 的转动频率，播种机的作业速度 v_1 为

$$v_1 = \frac{\pi D_2 f_2}{R_1} \tag{7}$$

式中　f_2——编码器 A 的转动频率，P/s

R_1——编码器 A 的分辨率，P/r

D_2——地轮直径，m

排种器在时间 t_1 内转动圈数

$$N_1 = \frac{v_1 t_1}{SZ} \tag{8}$$

式中　t_1——时间，s

S——播种株距，m

Z——排种盘单圈型孔数量

则排种器的转速为

$$n_1 = \frac{N_1}{t_1} = \frac{60 v_1}{SZ} \tag{9}$$

通过 PLC 控制器将排种器的转速 n_1 转换为脉冲量输出，程序通过读取后镇压轮速度检测编码器 B 的数值，根据比例关系调整脉冲量的输出，进而实现排种器转速的实时调整。

(2)理论播种粒数和播种面积计算

为了了解播种机作业量，需要对播种粒数和播种面积进行计算。作业过程中，通过高速计数器(计数模式)实时读取旋转编码器 B 的计数值(脉冲数)，根据编码器的分辨率，可得到单行播种粒数

$$Q_1 = \frac{MZ}{R_2} \tag{10}$$

式中　Q_1——排种器理论播种粒数

M——编码器 B 的计数值

R_2——编码器 B 的分辨率，P/r

根据播种粒数、设定的播种株距和工作幅宽，计算播种面积

$$A = Q_1 SW \tag{11}$$

式中　W——播种机工作幅宽，m

3.2　漏播监测系统

3.2.1　硬件选型

目前漏播监测方法主要有光电监测法、压电监测法、电容监测法、高速摄影监测法和机器视觉监测法。光电监测法、压电监测法和电容监测法结构简单、成本低，但存在监测盲区、易受灰尘和杂质影响；高速摄影监测法和机器视觉监测法对事件还原度高、过程可视性好，但价格高，对作业环境要求高，不适合田间作业使用。

根据“红喜三红七寸”和“孟德尔二号”2 个品种的包衣胡萝卜种子的测量数据，种子尺寸范围在 2.17 ~ 4.62 mm 之间，粒径较小，对光电传感器监测精度要求较高。本研究选用东莞南之巅电子有限公司生产的 TR20MLD 型矩阵对射式光纤传感器，工作电压 DC 12 ~ 24 V，消耗电流小于 3 mA，响应时间小于 200 μs。该传感器采用红外发光二极管作为发光元件，红外光敏二极管作为受光元件，具有反应快、功耗小、价格低的优点；11 mm 宽度布置 16 芯光纤，相对于常规光电式传感器红外光更密集，最小监测直径为 0.5 mm，可最大程度地消除感应盲区，提高漏播监测精度。此光纤传感器需配合放大器使用，放大器的作用是对光信号进行放大，选用同一公司生产的 FL - 31N 型光纤放大器，通过设置感应延时来调节感应灵敏度，可设延时范围为 0 ~ 9 999 ms。

本研究为一器双行气吸式排种器，需采用 2 套光纤传感器，传感器安装在排种器的分种器下方，左右对射布置，3D 打印 1 个支架进行固定，如图 7a 所示。

3.2.2　监测程序

排种器下落的种子通过传感器检测区域时，由于种子对光线的遮挡产生遮光量，传感器把检测到



(a) 3D模型 (b) 播种计数试验

图 7 光纤传感器

Fig. 7 Fiber optic sensor

的信息传输到 PLC 控制器进行相关处理,PLC 判断是否出现漏播现象,再由报警单元实现相应的报警。本研究设计的播种机最大前进速度为 1.39 m/s (5 km/h),单粒精播株距为 0.07 m, 相邻 2 粒种子的最小落种时间间隔为

$$T_{\min} = \frac{S}{v_1} \tag{12}$$

式中 $T_{\min}$——最小落种时间间隔,s

计算得到最小落种时间间隔 $T_{\min} = 0.05$ s = 50 ms,远大于 PLC 程序运行一个周期的时间(1 ~ 1.5 ms),故程序满足单粒落种时间间隔要求。

种子穿过监测区域完全遮断光线的时间与种子下落的高度有关,本研究种子从离开排种盘开始下落到达监测区域的高度为 $h = 0.055$ m,种子到达监测区域时的速度计算式为

$$\begin{cases} v_2 = gt_2 \\ h = \dfrac{1}{2}gt_2^2 \end{cases} \tag{13}$$

式中 v_2——种子到达监测区域时的速度,m/s

t_2——种子到达监测区域时所用的时间,s

由式(13)可以得到种子到达监测区域时的速度为 $v_2 = 1.038$ m/s,种子穿过监测区域所用的时间

$$t_3 = \frac{b_{\min}}{v_2} \tag{14}$$

式中 $b_{\min}$——种子最小尺寸,m

包衣胡萝卜种子的最小尺寸 $b_{\min} = 2.17$ mm,将其代入式(14)得到 $t_3 = 0.002\,091$ s = 2 091 μs, 即最小尺寸的种子完全阻断光束的时间为 2 091 μs,而选用的光纤传感器响应时间小于 200 μs,故选用的光纤传感器满足包衣胡萝卜种子漏播监测要求。

播种机前进速度 v_1 由测速传感器获得,本研究使用旋转编码器测速。依据光纤传感器实时检测信息计算相邻 2 粒种子的实际落种时间间隔 ΔT,获得实时播种株距

$$S_d = v_1 \Delta T \tag{15}$$

式中 S_d——实时播种株距,m

结合理论株距判断是否发生漏播现象,根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,具体判断依据为:$0.5S < S_d \leqslant 1.5S$ 为正常;$S_d > 1.5S$ 为漏播;$S_d > 7S$ 为断条。

实际应用中,取时间间隔 ΔT 的 1.5 倍作为漏播定时器的设定值,正常播种时,每粒种子落下使定时器复位;出现漏播时,设定的时间内没有种子落下,定时器就会置位。定时器每置位 1 次,计数器就会记录 1 次漏播,并在触摸屏上实时显示。在监测状态下,如果排种盘型孔发生堵塞,就会产生漏播,但本研究采用排种器有正压吹杂功能,堵塞在型孔中的杂质或破碎的种子一般能被正压气流吹掉。为了不影响作业效率,仅以下情况需报警提醒处理:当型孔被堵塞,排种器连续转 7 周,堵塞物仍没有被清除,发生规律性漏播时;当种箱中缺种或风压不足等导致连续 7 个以上型孔未吸上种子时。

4 试验

4.1 计数校准

为获取实际的落种数量,将光纤传感器安装在排种器出种口处,并在分种管下方安装接种袋,如图 7b 所示。试验在室内进行,调整风机负压到 4.5 kPa,正压 1.0 kPa,启动电机测试程序驱动排种器,排种器转速为 18 r/min,播种机原地不动。为方便查看系统显示的播种数量,播种系统每次启动前,先手动清零播种数据。

试验选用山东地区广泛种植的“孟德尔二号”和“三喜三红七寸”胡萝卜品种,两个品种均为包衣种子,颜色均为乳白色。前者三轴尺寸 4.13 mm × 3.25 mm × 3.05 mm,含水率 3.82%,千粒质量 21.17 g;后者三轴尺寸 3.91 mm × 2.77 mm × 2.60 mm,含水率 3.81%,千粒质量 11.34 g。预试验时发现三轴尺寸小的计数准确率略低,接下来的计数试验选用三轴尺寸小的品种进行。

由于左右两行的光纤传感器并排安装会相互干扰,试验时将左行的放大器抗干扰等级设置为 F2,右行的设置为 F1,其发射频率不同就不会相互干扰。通过设置放大器的遮光量阈值和感应延时来调节感应灵敏度,本研究选用的放大器可设延时范围为 0 ~ 99 990 μs(精度 10 μs)。根据放大器使用说明书进行设置试验,确定遮光量阈值左行为 7 995,右行为 8 003;延时左行和右行均为 200 μs,此时相对误差最小可达到 0。为进一步验证设置参数的准确性及系统稳定性,在计划排种粒数分别为 50、100、200、300 时进行 4 组试验。当触摸屏显示数量到达计划值时,手动停止电机测试程序,人工统计接

种袋中的种子实际数量，并记录触摸屏显示的监测数量，每组试验重复 5 次，试验数据如表 2 所示。

表 2　播种计数试验结果

Tab. 2　Test results of seeding counting

计划数量/粒	编号	左行			右行		
		实际数量/粒	监测数量/粒	相对误差/%	实际数量/粒	监测数量/粒	相对误差/%
50	1	56	55	1.8	55	53	3.6
	2	51	51	0	51	49	3.9
	3	54	52	3.7	54	53	1.9
	4	48	48	0	48	46	4.2
	5	53	53	0	53	52	1.9
100	1	110	109	0.9	113	110	2.7
	2	108	105	2.8	108	107	0.9
	3	111	106	4.5	108	108	0
	4	102	101	1.0	104	101	2.9
	5	107	105	1.9	108	103	4.6
200	1	210	203	3.3	218	210	3.7
	2	207	202	2.4	212	205	3.3
	3	203	197	3.0	207	201	2.9
	4	203	200	1.5	204	202	1.0
	5	197	195	1.0	202	196	3.0
300	1	309	303	1.9	316	308	2.5
	2	310	304	1.9	311	307	1.3
	3	308	299	2.9	303	301	0.7
	4	314	306	2.5	314	306	2.5
	5	306	297	2.9	308	302	1.9

从表 2 可以看出，计数相对误差小于等于 4.6%，说明放大器遮光量和延时参数设置合理，后续播种试验可以使用此参数。造成相对误差偏大的原因是受环境干扰，以及由重播造成。2 个种子经过光束时重叠或时间间隔太短，系统误判为 1 个，但重播率在 3% 以内，且监测的主要目的为避免产生连续漏播（断条），故此监测系统可以为后续生产使用。

4.2　漏播监测试验

根据以往试验观察到，造成气吸式排种器漏播的主要原因是型孔堵塞。漏播监测试验采用人为堵塞型孔的方式进行，双圈型孔排种盘，每圈 30 个型孔。型孔堵塞且正压气流不能清除掉堵塞物，将产生较为严重的漏播问题，需报警提醒。试验时，用热熔胶每圈堵塞 1 个型孔，使用与计数试验相同的种子，如图 8 所示。为了减少外在因素的影响，试验在室内进行，播种机原地不动，通过程序控制排种器转速。分别设置 3 种不同的排种速度，通过排种器上面的观察窗口统计排种盘漏播数量（自然漏播的不统计在内），与系统显示的漏播数量进行比较，程序设计为一定时间内累计漏播 7 次启动报警。为了便于统计，每次试验排种器转动 20 周，试验重复 5 次，取平均值，试验结果如表 3 所示。



图 8　漏播监测试验

Fig. 8　Test of missing state

1. 排种器　2. 堵塞的型孔　3. 种子　4. 观察窗口

表 3　漏播监测试验结果

Tab. 3　Test results of missing state

排种盘转速/($r \cdot min^{-1}$)	实际漏播数/粒	监测漏播数/粒	相对误差/%
18	20	20.4	2.0
24	20	21.2	6.0
30	20	21.8	9.0

从表 3 可以看出，随着转速加快，漏播监测误差开始加大，但相对误差不大于 9.0%，说明漏播监测程序可靠，可进行后续田间播种试验。通过对投种口进行观察，发现造成相对误差偏大的原因是排种盘转速加快，种子下落路径不稳定，经过监测光线前撞击到了光纤传感器支架内壁，改变了相邻两粒种子的间隔时间。

4.3　田间试验

上述漏播监测试验是在设定转速下进行的，田间作业时排种盘转速是随着播种机前进速度实时变化的，程序需要实时更新相邻两粒种子的间隔时间以适应变速作业。

田间试验的目的是验证闭环控制系统和漏播监测系统的可靠性和准确性，2020 年 12 月，在山东省青岛市平度市仁兆镇进行样机播种适应性和性能试验，试验地块长 100 m，宽 20 m，旋耕起垄，垄面宽约 280 mm，土质为壤土，土壤含水率为 19.5%，土壤坚实度为 938 kPa，播种机的前进速度约 3 km/h，分别设置播种机的理论株距为 50、70、90 mm，各播种 10 垄。试验现场如图 9 所示。

根据室内试验得到的最佳播种参数，选择型孔直径为 1.6 mm 的排种盘，启动风机和控制系统，把气室负压调节到 4.4 kPa，吹杂正压调节到 1 kPa。由于排种器由伺服电机驱动，PLC 自动控制，汽油机带动播种机前进时，排种器将自动运行。播种后，按照 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》的要求进行试验和结果评价。选择 3 种胡萝卜种植株距进行试验，每种株距选取 1 垄进行测量，选



图 9 田间试验

Fig. 9 Field experiments

取中间段测量数据,每垄测量 3 组数据,每组测量 100 个种子间距,总共得到 9 组数据,根据试验数据计算出粒距合格率、重播率和漏播率,如表 4 所示。

表 4 田间试验结果

Tab. 4 Results of field experiments %

株距/mm	株距合格率	重播率	漏播率	株距变异系数
50	94.24	1.97	3.79	3.82
	94.12	2.02	3.86	3.15
	93.74	2.36	3.90	2.98
70	95.35	1.93	2.72	3.02
	94.89	2.07	3.04	2.54
	95.37	2.24	2.39	3.17
90	95.76	2.23	2.01	3.64
	96.21	2.13	1.66	2.79
	94.67	2.39	2.94	2.85

由表 4 可以看出,株距增大,株距合格率上升,重播率增大,漏播率减小,但总体变化范围不大;样机播种性能良好,漏播率小于等于 3.90%,重播率小于 2.4%,播种株距合格率大于 93.7%,各项指标均符合 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》的要求,平均播深 17 mm,满足胡萝卜播种要求。

为了验证漏播监测系统测量的漏播率的准确性,取同一株距的 3 组漏播率平均值进行比较,如表 5 所示。由表 5 可以看出,播种机按设计的株距作业,漏播监测系统测量的漏播率误差小于 8.4%,系统监测性能可靠,可用于实际生产。

表 5 漏播率监测结果

Tab. 5 Test results of missing rate %

株距/mm	实际漏播率	监测漏播率	相对误差
50	3.85	4.17	8.31
70	2.68	2.85	6.34
90	2.20	2.33	5.91

5 结论

(1)研制的电驱气吸式胡萝卜播种机,可以一次完成开沟、精量播种、覆土、镇压等作业工序。采用混合动力系统方案,风机和排种器的驱动力不受播种机前进速度影响,从而能保持稳定工作,同时续航时间也得到了保障,播种机可连续工作 10 h,满足作业需求,而其他仅靠蓄电池提供动力的小型播种机续航时间约 6 h[2]。排种器采用内外两圈型孔排种盘,一器双行排种方式既减少了动力消耗,又使得整机结构更为紧凑,整机质量为 53 kg,搬运方便,适合小地块和设施大棚内作业。

(2)采用对射式矩阵光纤传感器对种子流进行监测,通过计数试验,计数相对误差小于等于 4.6%,并通过人为堵塞型孔的方式,对漏播报警系统进行测试,测试结果表明该系统能有效监测漏播情况,满足生产使用要求。

(3)采用旋转编码器对播种机测速,伺服电机驱动排种器,播种控制系统通过调整排种器的转速,使排种器转速与播种机前进速度实时匹配,实现整个地块播种株距均匀。田间试验表明,播种机按所设计的株距作业后,株距合格率大于 93.7%,重播率小于 2.4%,漏播率小于等于 3.9%,播深均匀,平均播深 17 mm,试验结果符合国家相关标准要求。与传统使用窝眼轮式排种器的小型蔬菜播种机相比(其株距合格率大于 86%)[4],株距合格率提高约 7.7 个百分点,播种质量可实时监测,监测误差小于 8.4%。

参 考 文 献

[1] 牟晓卉. 适于烟威地区种植出口胡萝卜品种筛选及生产关键技术研究[D]. 烟台:烟台大学,2018.
MOU Xiaohui. Study on key technology of variety screening and production for carrot suitable for the export and cultivation in Yan-Wei Region[D]. Yantai: Yantai University, 2018. (in Chinese)

[2] 王海,赵武云,戴飞. 电动双行胡萝卜播种机的研制与试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(6):4-9.
WANG Hai, ZHAO Wuyun, DAI Fei. Design and test of the motor-driven double row carrot seeder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016,37(6):4-9. (in Chinese)

[3] 王晋,蒋恩臣,杨华,等. 手推式蔬菜种子播种机的设计[J]. 农机化研究,2012,34(8):61-64.
WANG Jin,JIANG Enchen,YANG Hua, et al. Design of the hand-propelled vegetable seeds seed-sowing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(8):61-64. (in Chinese)

[4] 杜铮,舒虹杰,卢泽民,等. 小粒径蔬菜电动播种机的研制[J]. 中国农机化学报,2017,38(7):5-10.

DU Zheng, SHU Hongjie, LU Zemin, et al. Design and manufacture of seed planter for small grain vegetable[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 38(7):5 - 10. (in Chinese)
[5] 管春松,崔志超,高庆生,等. 蔬菜精量直播技术及装备的研究现状[J]. 中国蔬菜,2018(12):9 - 15.
[6] 杨亮,王方艳,王红提. 胡萝卜播种技术及装备探析[J]. 农机化研究,2021,43(12):1 - 8,16.
YANG Liang, WANG Fangyan, WANG Hongti. Analysis of carrot seeding technology and equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12):1 - 8,16. (in Chinese)
[7] 赵艳忠,张晨光,王运兴,等. 免耕播种机地轮摩擦力与滑移率试验研究[J]. 东北农业大学学报,2016,47(10): 58 - 66.
ZHAO Yanzhong, ZHANG Chenguang, WANG Yunxing, et al. Study on friction and slip rate of no-tillage seeder ground wheels [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(10): 58 - 66. (in Chinese)
[8] 杨硕,王秀,高原源,等. 支持转速现场标定的玉米精密排种器电驱控制系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(1): 47 - 55.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Investigation on motor-driving maize precision seed meter system supporting on-site calibration of rotate speed of seed plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (1): 47 - 55. (in Chinese)
[9] KAMGAR S, ESLAMI M J, MAHARLOUIE M M. Design development and evaluation of a mechatronic transmission system to improve the performance of a conventional row crop planter[J]. International Journal of Agronomy and Plant Production, 2013, 4(3):480 - 487.
[10] 彭丽芳,彭建华,孟鹏祥. 基于 PLC 的步进电机驱动排种器控制系统设计[J]. 农机化研究,2020,42(2):183 - 188.
PENG Lifang, PENG Jianhua, MENG Pengxiang. Design of control system with stepper motor driving seed-metering device based on PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2):183 - 188. (in Chinese)
[11] 陈蒋. 电驱动小麦播种机的设计与试验[D]. 郑州:河南农业大学,2018.
CHEN Jiang. Design and test of electric drive wheat drill[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[12] 刘婉茹,陈蒋,何豪,等. 小麦播种机电控系统的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(1):46 - 51.
LIU Wanru, CHEN Jiang, HE Hao, et al. The design and test of electric control system of wheat seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1):46 - 51. (in Chinese)
[13] 郭颖,刘沛. 一种 PLC 联合控制小型播种机设计与应用研究[J]. 农机化研究,2021,43(2):107 - 109,138.
GUO Ying, LIU Pei. Design and application of a small planter controlled by PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(2):107 - 109,138. (in Chinese)
[14] 唐尧华. 基于拖拉机前轮转速的排种驱动系统的研究[D]. 保定:河北农业大学,2009.
TANG Yaohua. Research on the planting drive system based on a tractor front-wheel speed[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2009. (in Chinese)
[15] 张春岭,吴荣,陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):51 - 59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):51 - 59. (in Chinese)
[16] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):42 - 49. (in Chinese)
[17] 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)
[18] LAN Y, KOCHER M F, SMITH A. Opto-electronic sensor system for laboratory measurement of planter seed spacing with small seeds[J]. Journal of Agricultural Engineer Research, 1999, 72(2):119 - 127.
[19] 吴南,林静,李宝筏,等. 免耕播种机排种器性能监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):65 - 75.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test on performance monitoring system of no-tillage planter seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 65 - 75. (in Chinese)
[20] 赵艳华,龚丽农,尚书旗,等. 基于 CPLD 的漏播检测装置的设计与测试[J]. 农机化研究,2015,37(9):126 - 130.
ZHAO Yanhua, GONG Linong, SHANG Shuqi, et al. Design and test of a seeding absence monitor based on CPLD[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9):126 - 130. (in Chinese)
[21] 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)
[22] 丁幼春,杨军强,朱凯,等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2017, 33(9):29 - 36.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29 - 36. (in Chinese)
[23] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于 GPS 和 GPRS 的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报,2016,32(6):162 - 168.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Remote monitoring system for corn seeding quality based on GPS and GPRS[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 162 - 168. (in Chinese)

(下转第 131 页)

and drought region[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12): 25 - 29. (in Chinese)
[16] 陈中玉, 高连兴, CHEN Charles, 等. 中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 1 - 21.
CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, CHEN Charles, et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1 - 21. (in Chinese)
[17] CORNELIU P. Research regarding the performances obtained by the 560 and the 750 CLAAS lexion combines in sunflower harvesting[J]. Scientific Papers, 2012(5): 331 - 333.
[18] 韩长杰, 王超超, 朱兴亮, 等. 食用向日葵仿人工取盘采收台的设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 14 - 22.
HAN Changjie, WANG Chaochao, ZHU Xingliang, et al. Design of imitating manual harvesting device for edible sunflower [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 14 - 22. (in Chinese)
[19] 马新云, 王道屏, 许芳. 食葵收获机: CN204191175U[P]. 2015 - 03 - 11.
[20] 菅志亮, 张勇, 李素萍, 等. 4ZXRKS - 4 型收获机的食用向日葵机械化收获技术[J]. 农业工程技术, 2018,38(29): 48.
[21] 周建成, 贾文斌, 冯春明, 等. 一种插盘式葵花收获割台: CN112042388A[P]. 2020 - 12 - 08.
[22] 韩长杰, 康秀生, 郭辉, 等. 食葵收获割台: CN205105675U[P]. 2016 - 03 - 30.
[23] 刘宇. 食葵收获机总体设计及捡拾装置的试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
LIU Yu. Design and experimental research of picking up device of edible sunflower harvester[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[24] 韩长杰, 刁宏伟, 张静, 等. 食葵取盘脱粒一体机: CN112970418B[P]. 2021 - 09 - 21.
[25] 孔凌嘉, 王文中, 荣辉. 机械基础设计实践[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 146 - 147.
[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 8097—2008 收获机械 联合收割机 试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
[27] 韩长杰. 农机试验设计[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018: 15 - 20,135.
[28] 傅珏生, 张健, 王振羽, 等. 实验设计与分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 48 - 60.
[29] 刘羊, 黄小毛, 马丽娜, 等. 拨禾链式油葵割台静态滑切角恒定切割器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(1): 99 - 108.
LIU Yang, HUANG Xiaomao, MA Li'na, et al. Design and test of static sliding cut angle constant cutting machine for chain oil sunflower harvester header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 99 - 108. (in Chinese)
[30] 张学军, 马少腾, 朱兴亮, 等. 正多杆变隙式油葵脱粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 26 - 33.
ZHANG Xuejun, MA Shaoteng, ZHU Xingliang, et al. Design and test of oil-sunflower threshing device with variable clearance[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 26 - 33. (in Chineset)
[31] 新疆维吾尔自治区农牧业机械管理局. DB65/T 3541—2013 葵花生产机械化操作技术规程[S]. 2013.

(上接第 73 页)

[24] 邱兆美,张巍朋,赵博,等. 小粒种子电动播种机作业质量监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4): 77 - 83.
QIU Zhaomei, ZHANG Weipeng, ZHAO Bo, et al. Design and test of operation quality monitoring system for small grain electric seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4): 77 - 83. (in Chinese)
[25] 谯睿,杨文彩,韩文霆,等. 三七精密播种机漏播重播检测系统设计与试验[J]. 传感技术学报,2019,32(7): 1115 - 1122.
QIAO Rui,YANG Wencai,HAN Wenting,et al. Design and test of missed broadcast and over sowing system for panax precision seeder[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(7): 1115 - 1122. (in Chinese)
[26] 董宝军. 精密播种机监测系统的设计及研究[D]. 济南: 山东大学,2011.
DONG Baojun. Design and research of precision seeder monitoring system[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
[27] 王方艳,杨亮,鲍余峰,等. 气吸式胡萝卜起垄播种一体机研制[J]. 农业工程学报,2020,36(17):35 - 45.
WANG Fangyan, YANG Liang, BAO Yufeng, et al. Development of air-suction ridging and seeding machine for carrot[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17):35 - 45. (in Chinese)
[28] 李宝筏. 农业机械学(第 2 版)[M]. 北京:中国农业出版社,2018: 91.
[29] 彭博. 气吸式播种机气力系统稳定性的研究[D]. 保定:河北农业大学,2019.
PENG Bo. Study on the stability of pneumatic system of pneumatic seeder[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[30] 胡敏,王恒,陈琪. 电动汽车锂离子动力电池发展现状及趋势[J]. 汽车实用技术,2020(9):8 - 10.
HU Min, WANG Heng, CHEN Qi. Development status and trend of lithium-ion power batteries for electric vehicles[J]. Automobile Applied Technology, 2020(9):8 - 10. (in Chinese)
[31] 刘林. 免耕播种机地轮设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2015.
LIU Lin. Design and experiment of no-tillage seeder wheel[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)