

电液混合调控式大蒜播种机设计与试验

张春岭^{1,2} 吴晓庆^{1,2} 谢东波^{1,2} 王晴晴^{1,2} 张杰^{1,2} 陈黎卿^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036)

摘要: 针对传统大蒜播种装备自动化程度低而导致的播种合格率和作业效率低等问题,设计了一种电液混合调控式大蒜播种机。该机主要由电控播种装置、播深调节装置、参数检测装置和人机交互界面等组成。以单片机为核心控制器,利用速度传感器和旋转编码器,实现了株距与作业速度的匹配;分析开沟入土阻力与入土深度关系,确定了播深调节液压装置关键部件;结合光电传感器和显示屏,完成了作业参数实时显示与播种异常报警功能。以杂交蒜为试验对象,分别进行了播深一致性试验、播量检测试验和播种质量试验,结果显示,播深调节平均误差为4.7%,播深变异系数平均值为5.3%;播量检测平均误差为4.0%;播种合格率为83.7%,漏播率为6.2%,满足大蒜播种农艺要求,且较同种条件下以汽油机为动力源的大蒜播种机漏播率降低3.1个百分点。

关键词: 大蒜; 播种; 电液混合调控; 播深一致性; 播种质量

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)10-0166-09 OSID: 

Design and Experiment of Electro-hydraulic Mixed Garlic Planter

ZHANG Chunling^{1,2} WU Xiaoping^{1,2} XIE Dongbo^{1,2} WANG Qingqing^{1,2} ZHANG Jie^{1,2} CHEN Liqing^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Hefei 230036, China)

Abstract: Aiming at the problems of low utilization rate of garlic sowing mechanization and inconvenient adjustment of sowing depth, an electro-hydraulic mixed garlic planter was designed. The system was mainly composed of electronically controlled seeding device, sowing depth adjustment device, parameter detection device and human-computer interaction interface. The single chip microcomputer was used as the core controller, and the speed sensor and rotary encoder were used to realize the match of plant distance and operating speed. The relationship of trench resistance and depth was analyzed to determine the key components of the hydraulic device for depth adjustment. Combined with the use of photoelectric sensors and display screen, the real-time display of operating parameters and alarm function for abnormal seeding were completed. Taking the hybrid garlic as the experiment object, the sowing depth consistency experiment, sowing quantity detection experiment and sowing quality experiment were conducted respectively. The results showed that the average error of sowing depth adjustment was 4.7%, and the coefficient of variation of sowing depth was 5.3%. The qualified rate of sowing was 83.7%, and the missed sowing rate was 6.2%, which met the agronomic requirements of garlic sowing. The average error of sowing rate detection was 4.0%, and compared with the same kind of conditions, the missed sowing rate of garlic planter with gasoline engine as the power source was reduced by 3.1 percentage points. The research results can provide a certain reference for the mechanization and automation of garlic sowing.

Key words: garlic; sowing; electro-hydraulic hybrid control; sowing depth consistency; sowing quality

0 引言

目前,国内大蒜种植方式主要为人工插播,其劳

动强度大,作业效率低,人均单日播种量为0.013~0.017 hm²^[1]。因此,大蒜机械化种植成为提升大蒜生产效率的关键性因素。

收稿日期: 2020-11-14 修回日期: 2021-01-07
基金项目: 安徽高校协同创新项目(GXXT-2019-036)
作者简介: 张春岭(1989—),男,讲师,博士,主要从事播种装备设计与测控研究,E-mail: zhangcl@ahau.edu.cn
通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

由于欧美国家多采用宽行距随机播种,对农艺要求相对较简单^[2],所以对大蒜种植机械的研究主要集中于取种和整机结构方面。如 JIRAPORN 等^[3]、MANJUNATHA 等^[4]、DEVESH 等^[5]、BAKHTIARI 等^[6]、TARUN 等^[7]和 GARG 等^[8]对不同大蒜播种机结构及其作业性能进行了设计与分析,MOHAMMAD 等^[9]测量了大蒜物料特性并研发了相应的气力取种装置。国内大蒜播种对农艺要求较高,目前主要采用小行距高密度直立播种方式。为了提高大蒜播种直立度,国内相关学者对大蒜调头机理进行了解析,并研制了对应的调头装置^[10-12]。也有专家学者对大蒜播种机的取种装置和大蒜播种农艺进行了研究^[13-14],但主要集中于机械结构的设计。综上分析可见,当前国内外对大蒜播种机具的研究集中于关键部件结构设计等方面,即取种和鳞芽定向播种,而对整机作业参数的智能化监测与自动调节控制研究较少;此外,传统大蒜播种机多采用汽油机作为动力源,机具振动大,取种勺内种子易脱落,从而影响播种合格率,且依靠驾驶员手动按压或提升操作来调节播深,控制难度大、精度低,作业效率不高。

针对上述问题,本文以某勺链式播种机为原型,设计一种电液混合调控式大蒜播种机。该机采用直流电机作为播种动力源,单片机为核心控制器,通过电液混合调控方式调节播深,实现作业速度和播量等参数的实时检测与调节功能,为大蒜播种智能化作业系统设计提供参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

电液混合调控式大蒜播种机包括电控排种装置、播深调节装置、参数检测装置和人机交互界面等,如图 1 所示。

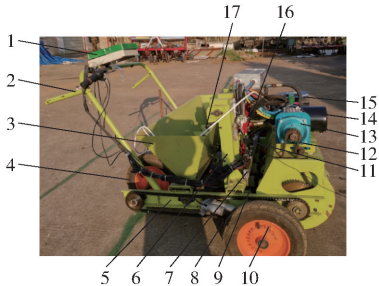


图 1 电液混合调控式大蒜播种机结构图

Fig. 1 Structure and composition of electro-hydraulic hybrid garlic planter

1. 人机交互界面 2. 扶手 3. 种箱 4. 镇压轮 5. 机架 6. 导种管 7. 连接支架 8. 光电传感器 9. 开沟器 10. 驱动轮 11. 位移传感器 12. 链条 13. 行走驱动电机 14. 液压油罐 15. 电源 16. 液压缸 17. 取种勺

电控排种装置由行走驱动电机、排种器驱动电机、电机驱动器、排种执行装置、旋转编码器和电源等组成,用于实现和行驶速度匹配的排种作业;播深调节装置由液压升降机构、液压泵和开沟器等组成,可根据播种农艺要求调节播种深度;参数检测装置由光电传感器、单片机和 LED 灯组成,可对播量与作业速度进行实时监测,并发出连续漏播报警信号;人机交互界面由 LCD 屏和控制面板等组成,用于播种参数的设定和作业数据的显示。整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 整机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of whole machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 400×1 100×1 100
整机质量/kg	155
配套动力/kW	1.5
作业速度/(m·s ⁻¹)	0~3.6
行数/行	5
行距/mm	120~200(可调)
株距/mm	80~100(可调)
播种深度/mm	30~50(可调)

1.2 工作原理

播种作业前,根据大蒜种植农艺要求,通过人机交互界面设置播深和株距控制系数。作业时,驾驶员依据自身舒适感控制油门把手;速度编码器实时检测行驶速度,并将检测信号传送给控制器;经过判断、计算后,将指令下达至排种器转动电机,进而开始排种作业;转速传感器将排种器实时转速反馈至控制器,从而形成闭环控制。参数检测系统对播量进行实时监测,其中,光电传感器检测到种子信号后传送至控制器,控制器通过程序算法计算播量并对堵种现象进行报警;人机交互界面可实时显示播量、作业速度、排种器转速和播深。系统工作原理框图如图 2 所示。

2 关键部件设计

2.1 电控排种装置设计

电控排种装置主要由控制器、速度传感器、行走驱动电机、旋转编码器、排种驱动电机和 USTARTHMI 四线制触控串口屏等组成,用于实现行驶速度与播种株距相匹配的排种作业。其排种控制流程如图 3 所示^[15]。

由于大蒜和玉米都是单粒精量播种^[16-17],且两者排种器旋转驱动方式相同,均为直流电机直接驱动,因此,选用与课题组前期设计的玉米电控排种系统相同的闭环控制策略^[18]。排种系统控制框图如

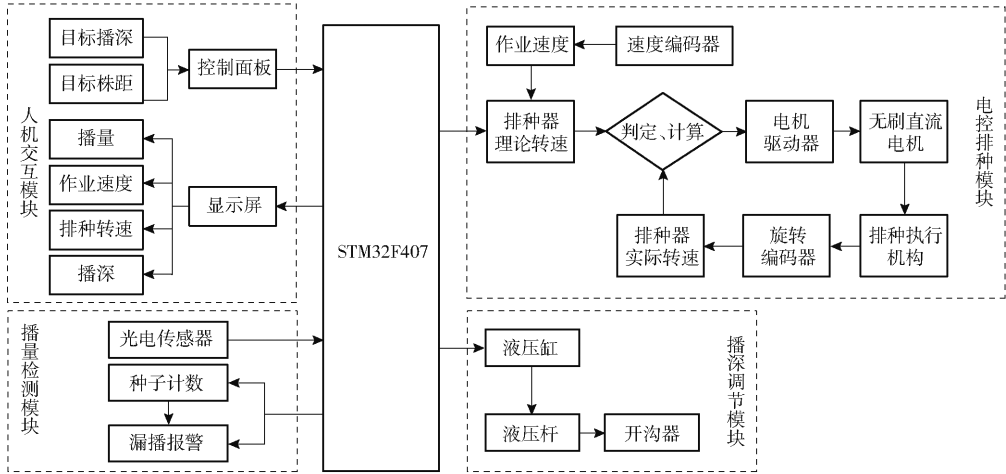


图2 系统工作原理框图
Fig.2 Overall principal block diagram

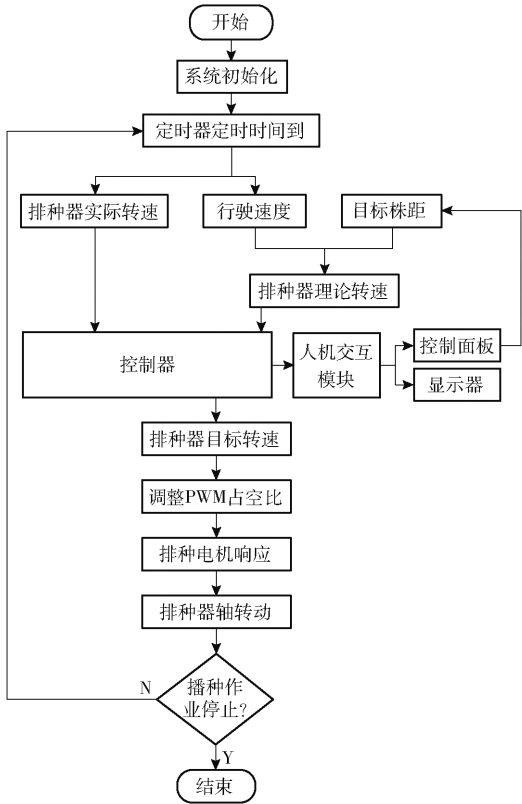


图3 电控排种控制流程图
Fig.3 Flow chart of electronic metering control system

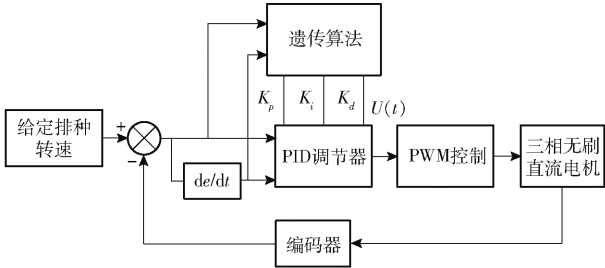


图4 排种系统控制框图
Fig.4 Control structure diagram of seed metering device

建立控制系统的 Simulink 模型,如图 5 所示。经迭代优化后得各参数: $K_p=0.0019$ 、 $K_i=1.3682$ 和 $K_d=0.9143$ 。将优化后各参数输入 Simulink 模型中进行仿真,得排种器输出转速仿真曲线如图 6 所示。

2.2 播深调节装置设计

2.2.1 结构组成与工作原理

播种深度直接影响种子出苗率、后期长势和产量,是播种作业质量的重要考核指标之一^[19-20]。参考 GB/Z 26578—2011《大蒜生产技术规范》可知,穴播大蒜播深为 30~40 mm,播深较小,手动调整难度大。为此,本文设计了一种电液混合控制方式的播深调节装置。其基于开沟器入土阻力与入土深度相关关系,通过实时检测开沟器入土深度并与液压执行机构相结合,使播深维持在所需范围内。该装置结构示意图如图 7 所示,主要由控制器、液压元件和开沟器等组成。

作业前,通过控制面板设定播深,按下开关键,开沟器开始下降并深入土壤。压力传感器和位移传感器实时检测开沟器入土阻力与下降高度,并将测得数值转化成对应信号传送给控制器。随着入土深度的增加,开沟器入土阻力也随之升高,当阻力达到设定播深对应的入土阻力时(具体对应关系见 2.2.2 节),控制器下达指令停止液压泵作业。与此

图 4 所示,被控对象由电机驱动器、直流无刷电机和排种器组成。由速度编码器测得作业速度,与输入目标株距计算得到排种器理论转速,以此作为 PID 调节器输入信号, $U(t)$ 为经 PID 调节器输出的转速控制量。在控制器执行过程中,通过速度编码器实时监测排种器驱动电机转速,并将其输入到控制系统中,与控制系统计算得到的理论排种转速形成偏差 e 和偏差变化率 Δe ,经遗传算法整定得到合适的 PID 控制参数。输出适当控制量来调节排种转速,可以有效抑制排种转速不均匀问题,提高大蒜播种机抗干扰能力。

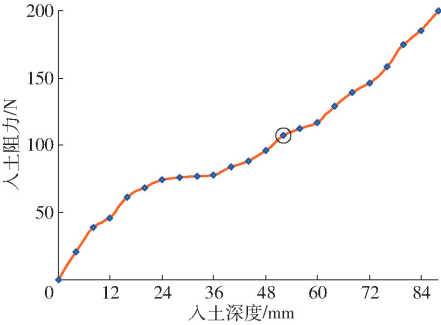


图8 开沟器入土阻力试验曲线

Fig. 8 Experimental results of soil resistance of furrow opener

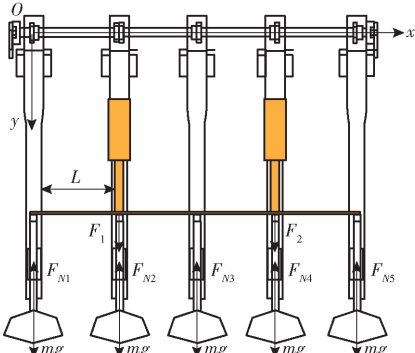


图9 液压缸及开沟器受力分析

Fig. 9 Stress analysis of hydraulic cylinder and furrow opener

由受力平衡和力矩平衡关系可得

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_1 + F_2 + 5mg - \sum_{i=1}^5 F_{Ni} = 0 \tag{1}$$

$$\sum M_o(F) = 0 \Rightarrow LF_1 + 3LF_2 + Lmg + 2Lmg + 3Lmg + 4Lmg - LF_{N2} - 2LF_{N3} - 3LF_{N4} - 4LF_{N5} = 0 \tag{2}$$

式中 F_1 、 F_2 ——液压缸对开沟器装置作用力,N
 m ——开沟器质量,kg
 g ——重力加速度,m/s²
 L ——播种行距,m
 F_{Ni} ——各开沟器入土阻力,N

本系统中,为了简化设计,将5个可调节深度开沟器固定于同一角铁,并在角铁对称中心线两端安装液压缸(图9)。因此,在理想状态下,各开沟器作业时入土阻力相等。本文设计播种机的开沟器质量为2.5 kg,平均行距为160 mm。将各数值代入式(1)、(2)解得 $F_1 = F_2 = 362.5$ N。

由液压缸受力平衡可得^[21]

$$p_0 \frac{\pi}{4} d_0^2 = F_x + \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_1^2) p_1 \tag{3}$$

式中 p_0 ——三位四通电磁换向阀出口压力,MPa
 d_0 ——活塞直径,为40 mm
 F_x ——开沟器装置对液压缸作用力,N

d_1 ——活塞杆直径,为25 mm
 p_1 ——液压缸出油口背压,为0.4 MPa

代入各数值可得 $p_0 = 0.53$ MPa,因此,选取型号为HSG-40×25×100的液压缸,其最大压力可达20 MPa,最大行程为100 mm,满足设计要求。

2.2.3 控制模块设计

液压调节播深控制模块主要由控制器、DAC转换器、检测元件和人机交互模块等组成,其作业原理框图如图10所示。作业时,通过控制面板设定播深,控制器计算相应的入土阻力,并将该入土阻力对应的电压传输给电磁比例减压阀。当开沟器下降至设定深度时,液压杆停止运动,蓄能器保压回路开始工作,开沟深度保持稳定;当受到外部干扰导致开沟深度发生变化时,对比检测元件输出电压与DAC转换模块输出电压,从而调节电磁比例减压阀,使入土阻力保持稳定,进而维持开沟深度。

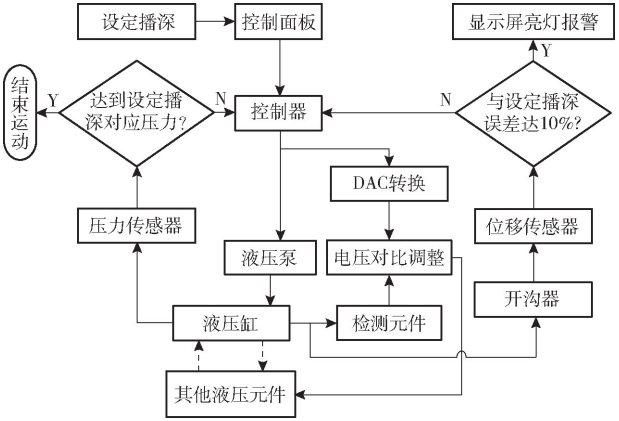


图10 液压调节播深控制原理框图

Fig. 10 Flow chart of principle of depth control by hydraulic adjustment

2.2.4 作业参数显示系统设计

作业参数显示系统主要由信号采集模块、控制器、显示屏和报警模块等组成,可实现播量实时检测、显示与连续漏播报警功能,如图11所示。由于大蒜为大粒径单粒播种,因此,选用光电传感器作为检测元件,其价格低廉,使用方便,具体安装方式如图12a所示。作业时,常态输出电平为高电平,当发出的红外光束被大蒜种子遮挡并返回被接收时,输出低电平。

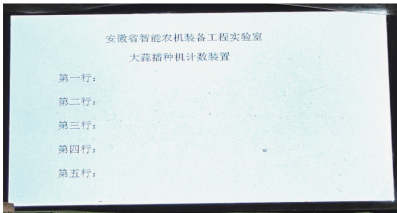


图11 播量显示模块

Fig. 11 Display module of seeding amount

报警显示功能由 5 个 LED 灯组成, 分别对应 5 个播种行。当在定时时间内连续监测到高电平, 则对应播种行的 LED 灯闪烁报警, 如图 12b 所示, 驾驶员停机排除故障。作业速度检测由旋转编码器实现, 控制器核心元件为 STM32F407 单片机。

通过上述对各模块的设计和关键元件的选型, 设计电液混合控制系统总电路如图 13 所示。

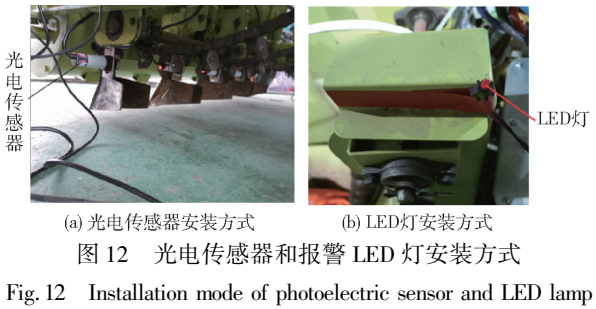


Fig. 12 Installation mode of photoelectric sensor and LED lamp

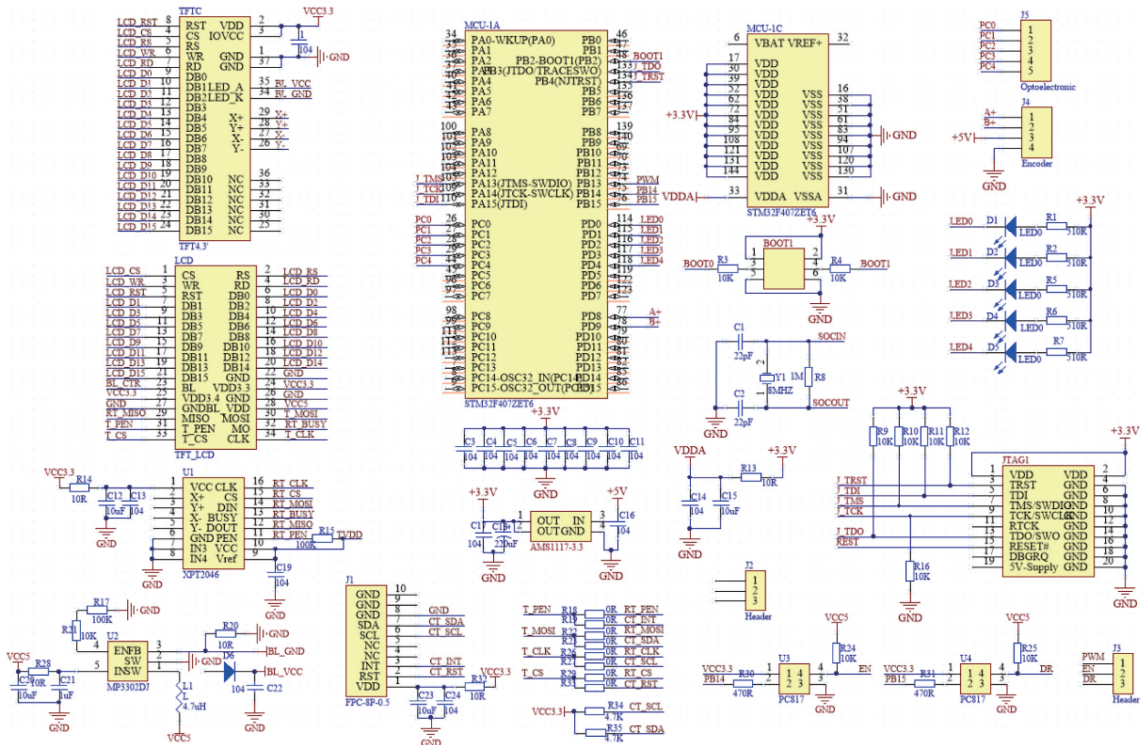


图 13 控制系统总电路图

Fig. 13 General circuit diagram of control system

3 试验

田间试验在安徽农业大学农萃园进行, 如图 14 所示。试验前, 利用课题组前期研制的秸秆耕整机^[22]旋耕土壤, 以达到一定平整度, 方便后续试验的进行并提高试验准确度。试验品种为来安大蒜, 试验因素与水平如表 2 所示, 每组试验重复 3 次, 取平均值为试验结果。



图 14 田间试验

Fig. 14 Field test

表 2 试验因素水平

Tab. 2 Test factors and levels

水平	因素	
	作业速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	播深/mm
1	0.15	30
2	0.25	40
3	0.35	50

3.1 播深一致性试验

对上述试验因素进行全因素试验, 每次试验结束后, 以中间行和两侧行为测量行, 每行选取 20 个取样点, 分别测量其播深。每种工况重复 3 次, 取平均值为测量播深, 结果如图 15 所示。由图可见, 不同工况下, 实际播深均在设定播深值较小范围内波动。由图 15 可得出, 当设定播深分别为 30、40、50 mm 时, 电液混合控制系统调节播深平均误差分别为 4.7%、4.8% 和 4.5%, 满足设计要求^[23]。

参考农业行业标准 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》, 计算不同作业速度下的播深合格率、标准差和变异系数, 可得 0.15、0.25、

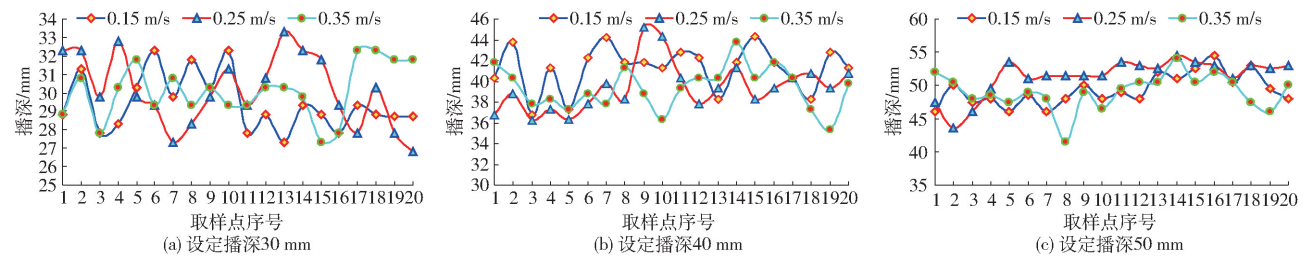


图 15 播深试验结果

Fig. 15 Test results of sowing depth

0.35 m/s 下的播深合格率分别为 85.4%、83.4%、82.2%，各标准差分别为 2.0、2.3、2.0 mm，播深变异系数分别为 4.9%、5.8%、5.1%。因此，采用电液混合控制系统调节大蒜播种机播种深度，在 0.15 ~ 0.35 m/s 范围内无较大偏差。

3.2 播量检测试验

播深一致性试验时，在测量播深前，先将播入土壤内的大蒜种子取出、收集，然后测量播深。每组试验结束后，统计测量行内大蒜种子数量，并与人机交互系统中显示屏上显示的播量进行对比，结果如表 3 所示。

表 3 播量检测试验结果			
Tab.3 Results of sowing rate test			
作业速度/(m·s ⁻¹)	检测播量/粒	实际播量/粒	误差/%
0.15	205	213	3.76
0.25	218	228	4.39
0.35	198	206	3.88

由表 3 可得出，本文设计的播量检测系统对大蒜播种播量检测平均误差为 4.0%，满足设计要求^[24]。分析原因主要为，大蒜播种为单粒精量播种，采用光电传感器对大蒜种子进行检测结构简单，干扰小，故误差较小，并且设计成本也较低。此外，由表 3 可知，当作业速度为 0.15 ~ 0.35 m/s 时，检测误差相差很小，最大误差与最小误差的差值小于 1 个百分点；且当作业速度为 0.25 m/s 时，检测误差最大，分析其原因为与重播率相关。由表 4 计算可知，当作业速度为 0.25 m/s 时，平均重播率最高，即检测时间段内通过种子数量多于单粒的次数最多，而光电传感器仅检测出其中一粒，从而导致检测误差增大。

3.3 播种质量试验

由于目前我国尚没有关于大蒜播种设备技术检测的国家标准，故本文参考 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》对大蒜播种机播种质量进行试验。以表 2 所列试验因素及水平进行全因素试验，每种工况结束后，随机选取 3 行，分别测量其播种合格率和漏播率，每种工况重复 3 次，结果取平均

值，如表 4 所示。

表 4 播种质量试验结果					
Tab.4 Results of sowing quality test					
播深/mm	作业速度/ (m·s ⁻¹)	合格率/%		漏播率/%	
		电动机	汽油机	电动机	汽油机
30	0.15	79.8	77.9	7.9	11.1
	0.25	83.3	79.3	5.3	9.2
	0.35	80.7	78.4	6.1	8.6
40	0.15	84.6	81.5	4.9	7.8
	0.25	81.8	78.3	5.7	8.5
	0.35	85.6	83.5	6.8	10.3
50	0.15	91.7	85.2	5.9	9.3
	0.25	85.2	84.7	3.8	7.4
	0.35	80.4	76.5	9.1	11.5
平均值		83.7	80.6	6.2	9.3

由表 4 可得，本文设计的电液混合控制大蒜播种机播种合格率平均值为 83.7%，漏播率为 6.2%，满足设计要求。由于本文设计系统应用对象为勾链式取种器，对大蒜种子品种与尺寸要求较高，从而导致重播率较高。与改进前由汽油机作为动力源的大蒜播种机作业质量相比，漏播率降低了 3.1 个百分点。分析其原因，可能为采用电机作为动力源较汽油机减小了整机振动，提高了填充率，进而降低了漏播率。

此外，由表 4 可得，0.15、0.25、0.35 m/s 下的播深合格率分别为 85.4%、83.4%、82.2%，即随着作业速度的增加，平均播种合格率呈下降趋势，但平均漏播率呈先降低再增加的变化规律。虽然作业速度为 0.15 m/s 时的重播率较作业速度为 0.25 m/s 时低，但漏播率较高，结合播种农艺要求^[25]，选取 0.25 m/s 为试验范围内较优作业速度。

4 结论

(1) 采用电机作为动力源，以单片机为控制核心，旋转编码器为转速传感器，光电传感器为种子检测元件，结合液压调节播深系统，设计了一种电液混合调控式大蒜播种机，可实现电控排种、液压调节播种深度、播量检测和连续漏播报警功能。

(2) 液压播深调节系统采用电子元件和液压元

件相结合方式,实现播深的实时调节,其播深一致性试验结果显示,该系统调节播深误差平均值为 4.7%,且不同播深下,播深变异系数平均值为 5.3%,调节精度较高,满足播种农艺要求。

(3)样机田间试验结果表明,应用该机进行杂

交蒜播种作业时,播量检测平均误差为 4.0%,播种合格率为 83.7%,漏播率为 6.2%,较同种条件下以汽油机为动力源的大蒜播种机漏播率降低 3.1 个百分点,且在 0.15~0.35 m/s 范围内选取 0.25 m/s 左右为较优作业速度,满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 白玉成,刘赞东,狄明利. 大蒜栽植机械的现状与发展趋势探讨[J]. 农机化研究,2007,29(11):247-248.
BAI Yucheng, LIU Yundong, DI Mingli. Discussing on the present situation and development trends of garlic transplanting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(11): 247-248. (in Chinese)
- [2] 崔荣江,黄嘉宝,张振河,等. 大蒜机械化播种技术研究现状[J]. 农业装备与车辆工程,2018,56(6):54-56.
CUI Rongjiang, HUANG Jiabao, ZHANG Zhenhe, et al. Research status of garlic mechanized sowing technology[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(6): 54-56. (in Chinese)
- [3] JIRAPORN B, HAI S, NOBUTAKA I. Study of the mechanics of a 5hp power tiller attached to a 10-row garlic planter[J]. Agricultural Mechanization in Asia, 2010, 41(1): 40-44.
- [4] MANJUNATHA M, SAMUEL D V K, RAHUL K, et al. Development and performance evaluation of a garlic peller[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3083-3093.
- [5] DEVESH K, JITENDRA K, KAMAL K. Studies and performance of a garlic planter in Uttar Pradesh[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2017, 10(1): 228-233.
- [6] BAKHTIARI M R, LOTHAVI M. Development and evaluation of an innovative garlic clove precision planter[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2009, 11(2): 125-136.
- [7] TARUN K M, VARMA M R. Modification and performance evaluation of garlic planter[J]. Agricultural Engineering Today, 2007, 31(2): 11-14.
- [8] GARG I K, ANOOP D. Development and evaluation of manually operated garlic planter[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2003, 34(2): 19-22.
- [9] MOHAMMAD R B, DESA A. Determining physical and aerodynamic properties of garlic to design and develop of a pneumatic garlic clove metering system[J]. CIGR Journal, 2015, 17(1): 59-67.
- [10] 侯加林,黄圣海,牛子儒,等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):87-96.
HOU Jialin, HUANG Shenghai, NIU Zirui, et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlics upwards using two duckbill devices[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181110&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.11.010. (in Chinese)
- [11] 何岳平,陈青春,何瑞银,等. 大蒜栽植机栽植系统优化设计与运动分析[J]. 农业机械学报,2011,42(2):88-93,119.
HE Yueping, CHEN Qingchun, HE Ruiyin, et al. Optimal design and kinematic analysis for planting system of garlic planting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 88-93, 119. (in Chinese)
- [12] 谢学虎,张永,刘召,等. 大蒜播种机种植机构的设计[J]. 农业工程学报,2015,31(1):34-39.
XIE Xuehu, ZHANG Yong, LIU Zhao, et al. Design of planting mechanism for garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 34-39. (in Chinese)
- [13] 李玉华,张智龙,李天华,等. 轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):61-68.
LI Yuhua, ZHANG Zhilong, LI Tianhua, et al. Design and experiment of wheel-spoon type garlic precision seed-picking device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 61-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200307&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.007. (in Chinese)
- [14] 崔荣江,荐世春,杨继鲁,等. 勺链式大蒜取种器的优化设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(2):99-102.
CUI Rongjiang, JIAN Shichun, YANG Jilu, et al. Optimization design and test of take garlic spoon[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 99-102. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 王金武,唐汉,关睿,等. 动定指勾夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):48-57.
WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 48-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171206&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.006. (in Chinese)
- [17] 文恩杨,吴彦强,李天华,等. 牵引式大蒜播种机的设计[J]. 农机化研究,2020,42(1):96-100.
WEN Enyang, WU Yanqiang, LI Tianhua, et al. Design of traction garlic sowing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(1): 96-100. (in Chinese)
- [18] 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?file_no=20170207&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007. (in Chinese)
- [19] 付卫强, 董建军, 丛岳, 等. 基于玉米播深控制的农田地形模拟系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 58 – 65.
- FU Weiqiang, DONG Jianjun, CONG Yue, et al. Design and test of farmland-terrain simulation system for corn sowing depth control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 58 – 65. (in Chinese)
- [20] MOLATUDI R L, MARIGA I K. The effect of maize seed size and depth of planting on seedling emergence and seedling vigour [J]. Journal of Applied Sciences Research, 2009, 5(12): 2234 – 2237.
- [21] 付卫强, 董建军, 梅鹤波, 等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 68 – 77.
- FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68 – 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180608&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.008. (in Chinese)
- [22] 张春岭, 夏俊芳, 张居敏, 等. 六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 25 – 34.
- ZHANG Chunling, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of knife roller for six-head spiral straw returning cultivator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 25 – 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190303&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.003. (in Chinese)
- [23] 高原源, 王秀, 杨硕, 等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 23 – 32.
- GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 23 – 32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191203&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.003. (in Chinese)
- [24] 王安, 丁晓迪, 马旭, 等. 基于改进形状的钵体秧盘播种质量检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 29 – 35, 8.
- WANG An, DING Xiaodi, MA Xu, et al. Research on the method of seeding quantity detection in potted seedling tray of supper rice based on improved shape factor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 29 – 35, 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151105&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.005. (in Chinese)
- [25] 吕金庆, 王鹏榕, 杨晓涵, 等. 舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 51 – 60.
- LÜ Jinqing, WANG Pengrong, YANG Xiaohan, et al. Design and experiment of seed-clearing device for cup-belt type potato seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 51 – 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190705&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.005. (in Chinese)

(上接第 145 页)

- [20] 刘柯楠, 吴普特, 朱德兰, 等. 太阳能渠道式喷灌机自主导航研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 141 – 146.
- LIU Ke'nan, WU Pute, ZHU Delan, et al. Autonomous navigation of solar energy canal feed sprinkler irrigation machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 141 – 146. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160921&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.021. (in Chinese)
- [21] 刘柯楠, 吴普特, 朱德兰, 等. 基于 GPS 的太阳能平移式喷灌机自主导航系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 89 – 94.
- LIU Kenan, WU Pute, ZHU Delan, et al. Design and experiment of autonomous navigation system for solar powered linear move sprinkler machine based on GPS[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 89 – 94. (in Chinese)
- [22] YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, ZHAO Huaping. Study on linear move irrigation synchronization control system in virtual scene[C]//2009 Second International Conference on Information and Computing Science. IEEE, 2009, 3: 165 – 168.
- [23] 李丹, 朱德兰, 刘柯楠, 等. 平移式喷灌机行走阻力的确定及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 19 – 27.
- LI Dan, ZHU Delan, LIU Kenan, et al. Determination and application verification for driving resistance of lateral move sprinkling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 19 – 27. (in Chinese)
- [24] JIANG Z P, NIJMEIJER H. Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping[J]. Automatica, 1997, 33(7): 1393 – 1399.
- [25] 安秋, 姬长英, 周俊, 等. 基于 CAN 总线的农业移动机器人分布式控制网络[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 123 – 126.
- AN Qiu, JI Changying, ZHOU Jun, et al. Distributed control network for CAN-based autonomous agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 123 – 126. (in Chinese)