doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.008

# 油菜旋耕移栽联合作业机穴距电液比例控制系统研究

汤　庆[1]　吴崇友[1]　吴　俊[1]　秦　超[2]　蒋　兰[1]　王　刚[1]
(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.南京大学工程管理学院,南京 210008)

**摘要**:油菜旋耕移栽联合作业机以拖拉机为动力,由于拖拉机动力输出为定值,故栽植速度不能随拖拉机前进速度而变化,导致栽植穴距不稳定。针对上述问题设计了穴距控制系统,以 STM32 为主控制器,通过地轮测速编码器检测前进速度,通过电液比例液压系统实时调节驱动栽植系统的液压马达转速,从而实现栽植速度与前进速度的实时匹配。穴距控制系统台架试验表明:液压马达转速与地轮转速变化趋势一致,滞后时间在 600 ms 内,左右两个移栽单元的液压马达同步性好,转速平均误差为 0.7%。将穴距电液控制系统安装于油菜旋耕移栽联合作业机上,并进行了整机田间试验,4 种理论穴距(150、160、170、180 mm)、4 种作业速度(2、3、4、5 km/h)的对比试验表明:穴距稳定性好,理论穴距、作业速度均对穴距一致性变异系数影响显著,其中理论穴距影响最显著,在穴距 160 mm 和 4 种作业速度下,穴距一致性变异系数均能保持较小值,说明 160 mm 为最佳穴距。

**关键词**:油菜旋耕移栽联合作业机;穴距;电液比例控制系统
**中图分类号**:S223.9;S222.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)10-0061-08　　**OSID**:

# Electro-hydraulic Proportional Control System of Hole Distance for Rape Seedling Rotary Tillage Combined Transplanter

TANG Qing[1]　WU Chongyou[1]　WU Jun[1]　QIN Chao[2]　JIANG Lan[1]　WANG Gang[1]
(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *School of Management and Engineering*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210008, *China*)

**Abstract**: The rape rotary tillage combined transplanter takes the tractor as power. As the PTO of tractor is fixed value, the planting speed of rape combined transplanter cannot change with the forward speed of tractor, which leads to the instability of the planting hole distance. A hole distance control system was designed, which was based on STM32 controller. The forward speed of tractor was detected by a ground wheel speed encoder. The speed of the hydraulic drive motor was adjusted by the electric proportional hydraulic system in real time. Generally, the real time matching of planting speed and forward speed was realized. The bench test of hole distance control system was developed. The test result showed that the hydraulic motor speed was consistent with the change trend of ground wheel speed, and the delay time was within 600 ms. Moreover, the hydraulic drive motor of the left and right two transplanting units had excellent synchronization, and the average speed error was 0.7%. The electro-hydraulic control system of hole distance was installed on the rape combined transplanter. Comparative field tests were conducted for four theoretical hole distances (150 mm, 160 mm, 170 mm, 180 mm) and four operating speeds (2 km/h, 3 km/h, 4 km/h and 5 km/h). The test result indicated that the transplanter had terrific hole distance stability. The primary and secondary factors affecting the consistency coefficient of variation were theoretical hole distance and forward speed. Theoretical hole distance had the most significant effect on the consistency of hole distance. When the hole distance was 160 mm, the consistency coefficient of variation of hole distance at different forward speed can keep a small value, which indicated that the hole distance of 160 mm was the most ideal hole distance.

**Key words**: rape seedling rotary tillage combined transplanter; hole distance; electro-hydraulic proportional control system

收稿日期:2020-06-29　修回日期:2020-07-25
**基金项目**:国家自然科学基金项目(51575284)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700804)、江苏省重点研发计划项目(SBE2018310260)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-13)
**作者简介**:汤庆(1985—),男,助理研究员,博士生,主要从事旱地移栽技术与装备研究,E-mail:285881240@qq.com
**通信作者**:吴崇友(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事旱地移栽技术与装备研究,E-mail:542681935@qq.com

## 0 引言

油菜是我国重要的油料作物,85% 集中在长江流域冬油菜产区,其中 30% ~40% 因轮作茬口或气候条件等原因,不具备直接播种的条件,必须采用育苗移栽方式种植。现有的油菜移栽机作业效率低,无法适应水稻茬黏重的土壤条件[1]。吴崇友团队[2]提出了"毯状苗切块切缝插栽"的高效移栽方式,开发了基于插秧机底盘的油菜毯状苗移栽机。为进一步提高移栽机对土壤的适应性、简化作业环节、提高功效,研究以拖拉机为动力、将耕整地与移栽功能集为一体的油菜旋耕移栽联合作业机非常必要。拖拉机 PTO 设计为定值,栽植速度不能随前进速度而变化,导致栽植穴距不稳定,因此亟需研发穴距控制系统。

靳晓波[3]设计了一种基于单片机控制、步进电机驱动的谷子精量播种控制系统,该系统采用旋转编码器检测播种机的工作速度,通过单片机控制步进电机的转速,使排种器的转速与播种器工作速度一致。丁友强等[4]设计了基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统,该系统以 STM32 为主控制器,采用 Android 手机终端设置播种株距、排种盘型孔数等作业参数,采用 GPS 接收器采集拖拉机的前进速度,根据速度信息实时调节排种器转速,从而实现排种器转速与拖拉机前进速度的实时匹配。印祥等[5]设计了一种基于光电编码器测速的玉米精量播种机智能控制系统,实现了播种粒距和播种机作业速度的动态匹配。张春岭等[6]采用雷达测速仪检测播种机实时速度,并通过编码器采集排种器实时转速进行反馈控制,提高了排种精度。HE 等[7]提出以电机驱动排种器、采用编码器测速并加入滑移率参数进行速度修正的驱动方案,提高了播种质量。赵金辉等[8]设计了一种基于 PLC 的苔麸施肥播种机,通过转速传感器测量播种速度,建立播种速度和伺服电动机转速之间的对应关系,通过控制伺服电动机转速实现不同播种速度下单位面积播种量的一致。

液压技术具有大功率、易控制等优点,通过液压比例阀容易控制液压流量,从而控制执行元件。近年来 Yanmar、Kubota 和 Claas 等公司在农业机械上也应用了液压比例阀,从而提升了产品性能[9]。将电控技术与液压比例阀结合形成电液比例控制技术应用于多种机具上[10-13]。作为基于模型的控制算法,PID 控制算法设计相对容易[14],故广泛应用于液压控制系统[15-19],在拖拉机、插秧机等农业机械上得到了广泛应用[20-23]。

播种机排种轴动力消耗小,可由小功率电机驱动,电机转速控制较易实现。本文油菜旋耕移栽联合作业机栽植机构动力消耗大,且结构紧凑,不适宜大功率电机的安装。借鉴电液比例控制技术在其他机具上的应用方案,针对油菜旋耕移栽联合作业机栽植速度无法与作业速度匹配而造成穴距不稳定的问题,设计油菜旋耕移栽联合作业机穴距电液比例控制系统,以期达到栽植穴距稳定、提高栽植精度的目的。

## 1 控制系统设计

### 1.1 整机结构与工作原理

试验用油菜旋耕移栽联合作业机结构如图 1 所示,主要由旋耕整地单元、栽植单元和覆土镇压单元组成,在旋耕整地单元一侧设计有地轮测速系统。该机配套 73.5 kW 拖拉机,动力输出轴转速为 540 r/min。旋耕单元为正转旋耕刀带中间开厢沟结构,栽植株距 120 ~200 mm,由穴距电液比例控制系统控制和调整。

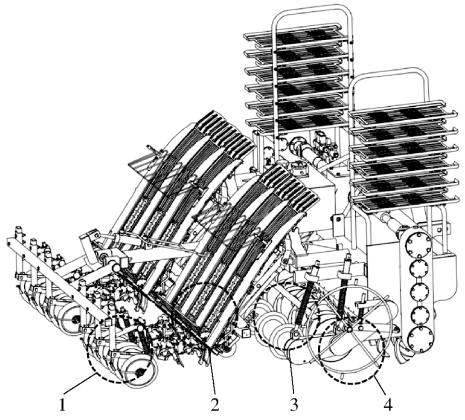


图 1 油菜旋耕移栽联合作业机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of rape seedling rotary tillage combine transplanter

1. 覆土镇压单元 2. 栽植单元 3. 旋耕整地单元 4. 地轮测速系统

机具作业时,由拖拉机动力输出轴提供动力,经中间齿轮箱减速后,一端输出轴驱动旋耕刀辊转动,另一端输出轴驱动边齿轮箱,边齿轮箱通过链传动带动旋耕整地单元工作,同时边齿轮箱为液压泵提供动力,液压泵经液压回路支撑栽植单元和覆土镇压单元升降工作。栽植单元由穴距电液比例控制系统控制栽植臂取苗移栽,将油菜苗块栽插入精整地装置形成的苗沟内,依靠毯状苗基质块和苗沟壁使秧苗保持直立,通过向内侧倾斜的 V 形覆土镇压单元将苗沟两边的土壤挤向秧苗周围,再压实固苗。

### 1.2　穴距电液比例控制系统组成与控制原理

油菜旋耕移栽联合作业机穴距电液比例控制系统由地轮测速系统、电液比例控制系统和马达驱动栽植系统等组成(图 2)。其工作流程如下:在油菜旋耕移栽联合作业机开始作业时,地轮跟随转动,通过地轮测速编码器检测地轮转速并换算为作业速度,通过电控系统控制比例流量阀调整液压系统流量,驱动液压马达转动从而驱动栽植系统工作。在作业过程中,地轮测速系统实时检测前进速度,当前进速度增加,通过电控系统控制比例流量阀增加流经液压马达的流量,提升液压马达转速,加快栽植频率,保证栽植穴距的稳定性。

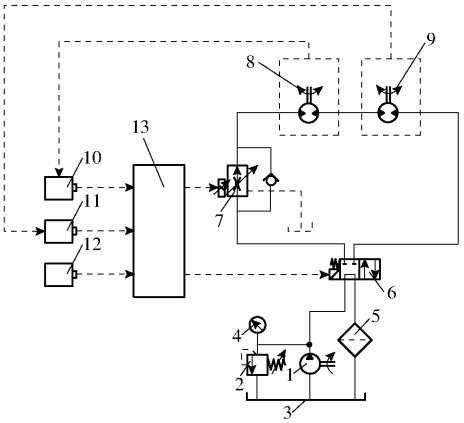


图 2　穴距电液比例控制系统原理图

Fig. 2　System principle diagram of electro-hydraulic proportional control system for hole distance

1. 液压泵　2. 溢流阀　3. 液压油箱　4. 压力表　5. 过滤器　6. 二位四通电磁换向阀　7. 比例流量阀　8. 液压马达Ⅰ　9. 液压马达Ⅱ　10. 测速编码器Ⅰ　11. 测速编码器Ⅱ　12. 地轮测速编码器　13. 控制板

### 1.3　地轮测速系统设计

如图 3,地轮是跟随联合作业机前进实现被动转动,通过安装在地轮转轴上的测速编码器测量理论转速从而得出前进速度。测速编码器(欧姆龙 E6B2 - CWZ6C 500P/R)1 转 500 个脉冲。地轮圆周上均布钉齿,基本不会产生滑移。所以不考虑滑移情况下,前进速度与地轮转速的关系式为

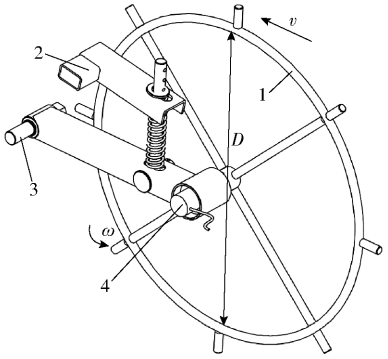


图 3　地轮测速原理图

Fig. 3　Schematic of ground wheel speed measurement

1. 地轮　2. 机架固定点　3. 旋转铰接点　4. 地轮测速编码器

$$\pi D = v\frac{1}{n_d} \tag{1}$$

其中

$$n_d = \frac{X}{500} \tag{2}$$

式中　$v$——前进速度,m/s　　$D$——地轮直径,mm

$n_d$——地轮转速,r/min

$X$——电控系统 1 min 内接收脉冲数,个/min

### 1.4　电液比例控制系统设计

电液比例控制用输入的电信号调制液压参数,使之成比例的连续变化,具有控制原理简单、控制精度高的优势,广泛应用于农业机械领域。

#### 1.4.1　液压系统设计

液压系统主要由液压泵、液压马达、油箱、比例流量阀、换向阀等组成。液压系统主要依据栽植单元的马达驱动轴的工作转速为 200 r/min 和扭矩为 40 N·m 来选取元件型号。液压泵(CBTL - F412 - A - PL 型定量齿轮泵)安装在旋耕单元上方变速箱的端部与变速箱直连,变速箱输出转速 2 000 r/min。油菜旋耕移栽联合作业机包含两个栽植单元,每个单元采用一个液压马达驱动,在栽植过程中要保证 2 个栽植单元的栽植速度同步,液压系统采用 2 个液压马达串联方式使速度同步。液压马达(BMM - 50 - FAE 型定量摆线液压马达)安装于每个栽植单元的驱动轴端部,由联轴器连接。比例流量阀(QVHZO - AES - 06/18/U0 型)与换向阀、溢流阀等阀组安装于油箱旁。

经过实验室测试得到比例流量阀不同输入电流信号与流量对应关系,通过二项式拟合得到理论流量调节曲线函数为:$y = 0.055x^2 - 0.170\,2x - 1.539\,5$,$R^2 = 0.999\,8$,其中 4 mA≤$x$≤20 mA(图 4)。由流量调节曲线可知,比例流量阀的理论开启电流为 7.2 mA。由于液压系统在实际作业过程中流量受到负载、油温、泄漏以及液压系统结构等影响,实际作业中往往理论开启电流不能驱动液压马达。由得到的理论开启电流进行台架测试,得到不同负载情况下的输出电流信号与流量的函数关系。

通过台架试验不同负载(5、10、15、20 N·m)情况下比例流量阀的实际流量调节曲线(图 5)可知:液压马达在不同负载情况下,比例流量阀的启动电流不同,负载越大比例流量阀初始开启电流增加,而当电磁阀输入电流信号到达最大值(20 mA)时,负载越大流量越小,但差异较小。

控制程序设定地轮转速数据采集时间间隔为 0.2 s,由于液压系统的滞后性以及液压马达有扭矩负载,通过比例流量阀的实际流量调节曲线可知,开

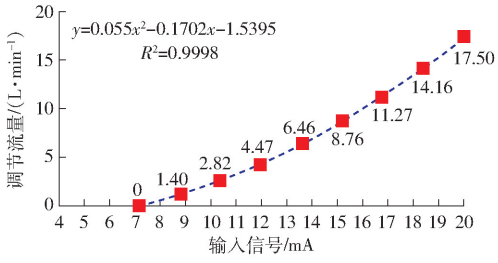


图 4 比例流量阀理论流量调节曲线

Fig. 4 Theoretical flow regulation curve of proportional flow valve

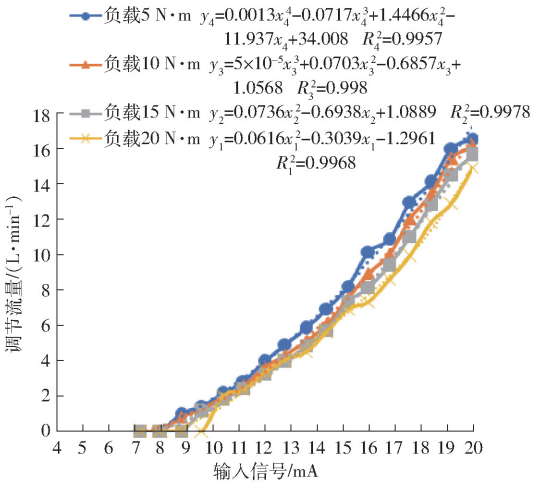


图 5 比例流量阀实际流量调节曲线

Fig. 5 Actual flow regulation curves of proportional flow valve

始转动需要一定的初始流量,所以在机具开始作业短时间内液压系统还不能驱动液压马达转动,造成开始作业时出现漏栽现象,因此需要设置比例流量阀控制信号的初始值。

### 1.4.2 电控系统设计

电控系统包括系统硬件和系统软件两部分。如图 6 所示,系统硬件主要由地轮测速编码器、马达测速编码器、基于 STM32 单片机的控制系统等组成,通过 SWD 接口、串行接口进行电控系统程序调试,通过 I/O 口接收液压马达与地轮测速编码器的矩形波信号,经过 STM32 单片机进行信号处理,由 I/O 端口输出的电平信号控制方向阀的通断,同时由外围电路将 I/O 端口输出的 PWM 信号转换成电流信号,进而控制比例流量阀实现液压系统流量调节。另外报警信号由另外一个 I/O 端口输出,可在地轮反转等不正常作业情况下进行报警。

### 1.4.3 控制系统工作过程

移栽作业时,通过按键调整 PID 控制参数来控制穴距,比例流量阀初始值通过试验测定后在程序中初始化。地轮测速编码器检测地轮转速,通过电控系统处理检测信号,经过程序计算液压马达转速所需的液压流量,输出信号至比例流量阀来调整系

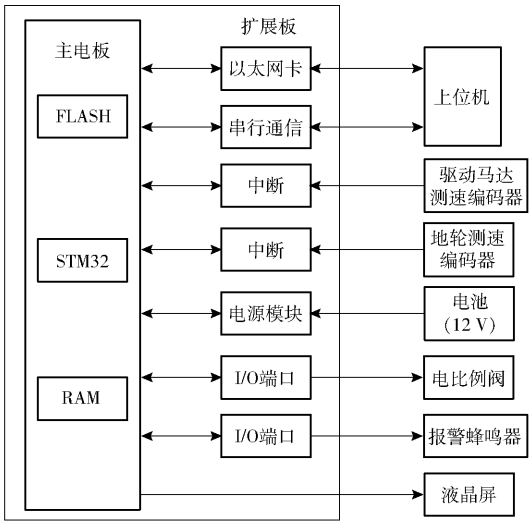


图 6 电控系统组成图

Fig. 6 Composition diagram of electronic control system

统液压流量,驱动液压马达以期望的速度转动,带动栽植臂旋转栽植秧苗;同时液压马达驱动轴端的马达测速编码器测得液压马达转速作为反馈值,以实现系统的闭环控制,即通过将设定值与反馈信号的偏差信号 $e(t)$ 作为 PID 控制器的输入,调整比例流量阀的控制信号,实时调整液压马达转速,保证拖拉机行驶速度变化时移栽穴距稳定。

如图 7 所示,地轮测速后,经过惯性滤波及基于加速度预测若干秒后的车速,作为控制器的输入值。将输入值乘以设定的比例系数 $K_c$(根据移栽机的参数与需要的穴距来确定)后,确定液压马达的设定转速。在不出现设备故障的前提下,反馈值即为左右液压马达编码器测得的实际平均值。

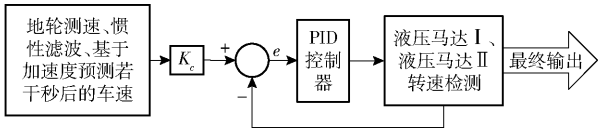


图 7 控制逻辑图

Fig. 7 Control logic diagram

本控制系统设计的关键是 PID 控制器的设计及其参数的整定。由于本系统的控制对象是液压比例阀的开度,当控制板的输出电流为 $I$ 时,比例阀的开度为 $K_aI$($K_a$ 为电磁阀开度与电流之间的关系系数),液压流量即为 $K_aK_bI$($K_b$ 为流量与开度之间的关系系数),即当输出电流为 0 时,液压马达停止转动,所以控制对象的执行机构不含积分部件,故本系统中的 PID 控制器采用的是位置式 PID,即

$$u(k)=K_pe(k)+K_i\sum e(i)+K_d(e(k)-e(k-1)) \tag{3}$$

式中 $K_p$——PID 整定的比例系数

$K_i$——PID 整定的积分系数

$K_d$——PID 整定的微分系数

通过专家的经验及现场的调试，得出参数：$K_c=15$，$K_p=0.5$，$K_i=0.15$，$K_d=0$。

为了避免出现控制输出振荡以及作业过程中转速的误测量，对 PID 控制器各个环节采取了必要的限幅处理，最终将电流输出设定在 11.9 ~ 19.8 mA，电流上限值由比例阀的最大开度决定，电流下限值由液压马达需要的最小液压确定。

### 1.5　栽植系统设计

油菜旋耕移栽联合作业机栽植单元由一个液压马达驱动。液压马达安装在驱动横向移箱的往复丝杠一端，通过链轮和齿轮的传动最终驱动 3 个栽植臂转动完成取苗移栽，同时实现减速，如图 8 所示。

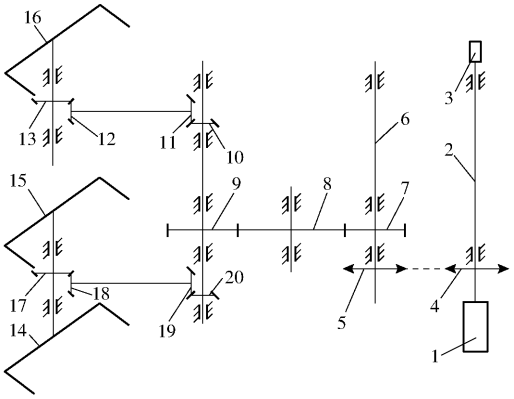


图 8　栽植系统传动图

Fig. 8　Transmission diagram of motor-driven planting system

1. 液压马达　2. 往复丝杠　3. 转速传感器　4. 主动链轮　5. 从动链轮　6. 纵向送秧轴　7. 传动齿轮　8. 中间齿轮　9. 从动齿轮　10、20. 锥齿轮Ⅰ　11、19. 锥齿轮Ⅱ　12、18. 锥齿轮Ⅲ　13、17. 锥齿轮Ⅳ　14. 栽植臂 1　15. 栽植臂 2　16. 栽植臂 3

栽植臂旋转一周栽植穴距为 2 个穴距距离，因此穴距、前进速度和栽植臂转速之间的关系为

$$\frac{60}{2n_{13}}=\frac{0.001s}{v} \tag{4}$$

即

$$s=\frac{30\,000v}{n_{13}} \tag{5}$$

式中　$n_{13}$——栽植臂转速，r/min

$s$——穴距，mm

## 2　电液比例控制系统台架试验

将设计的穴距电液比例控制系统在台架上进行响应测试，试验台架（图 9）模拟栽植电液比例控制系统，液压泵由动力电机提供动力，2 个驱动栽植臂的液压马达串联，由加载碟刹模拟栽植单元的负载，由变频电机驱动地轮测速编码器来模拟不同的地轮速度。由 2 个马达测速编码器检测液压马达的转速反馈信号。

调节变频电机转速由地轮测速编码器检测速度，测试两个液压马达的转速响应，从图 10 液压马达的转速变化曲线可知，2 个液压马达转速响应灵敏，转速大小变化基本一致，数据分析可知 2 个液压马达转速的平均误差为 0.7%，说明液压马达串联同步方法使油菜旋耕移栽联合作业机效果很好，能够满足正常移栽需要。

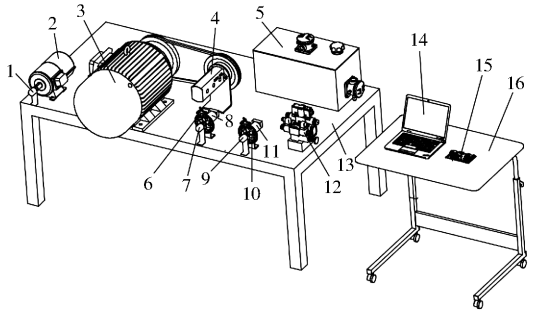


图 9　电液比例控制系统台架结构原理图

Fig. 9　Diagram of test-bed of electro-hydraulic proportional control system

1. 地轮测速编码器　2. 变频电机　3. 动力电机　4. 液压泵　5. 液压油箱　6. 加载碟刹Ⅰ　7. 马达测速编码器Ⅰ　8. 液压马达Ⅰ　9. 加载碟刹Ⅱ　10. 马达测速编码器Ⅱ　11. 液压马达Ⅱ　12. 比例流量阀组　13. 试验台机架　14. 调试计算机　15. 控制电路板　16. 移动调试平台

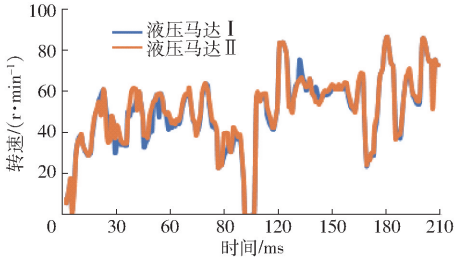


图 10　液压马达转速响应曲线

Fig. 10　Response curves of hydraulic motor speed

由于 2 个液压马达转速基本一致，选取液压马达Ⅰ测试不同负载（5、10、15、20 N·m）情况下与地轮转速之间的响应关系，从图 11 响应关系可以看出在不同的负载情况下，液压马达的转速变化小，说明负载对液压系统的影响相对较小。同时发现马达转速与地轮转速趋势一致，而马达转速相对于地轮转速有一定的滞后性，滞后时间在 600 ms 内，液压系统稳定。

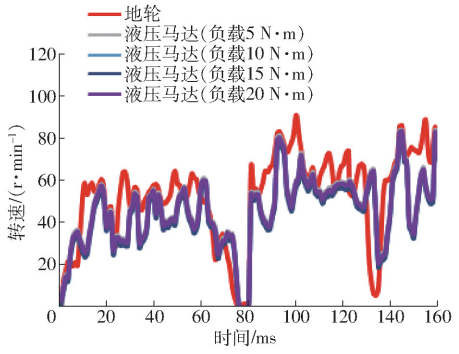


图 11　液压马达Ⅰ转速响应曲线

Fig. 11　Response curves of hydraulic motor Ⅰ

## 3 田间试验

### 3.1 试验条件与方法

试验于 2018 年 11 月在江苏省大丰市裕华镇进行。试验地土壤为黄壤土。试验前,0 ~ 10 cm 处土壤容积密度为 1.26 g/cm$^3$,10 ~ 20 cm 处土壤容积密度为 1.51 g/cm$^3$,0 ~ 5 cm 处土壤含水率为 21.3%,5 ~ 10 cm 处土壤含水率为 26.7%,10 ~ 15 cm 处土壤含水率为 27.2%,15 ~ 20 cm 处土壤含水率为 29.8%,试验现场如图 12 所示。检测设备包括游标卡尺、秒表、钢尺及卷尺等。



图 12 试验机具和现场

Fig. 12 Experimental equipment and site

本试验进行了移栽穴距一致性测定。

穴距一致性:选定一个栽植单元 3 行进行测定,作业长度 10 m,计算穴距一致性变异系数。

进行穴距一致性试验时,选定理论穴距 $X$ 和作业速度 $v$ 为试验因素,由于油菜旋耕移栽联合作业机包含旋耕整地,动力消耗大并受拖拉机性能限制,作业速度较低,选定理论穴距分别为 150、160、170、180 mm,作业速度分别为 2、3、4、5 km/h,理论穴距通过穴距电液比例控制系统程序设定调整,作业速度通过拖拉机油门来控制,试验采用全面试验法,选用二因素四水平全面试验设计,因素水平如表 1 所示。

**表 1 试验因素水平**

**Tab. 1 Orthogonal factors and levels**

| 水平 | 因素 | |
|---|---|---|
| | 理论穴距/mm | 作业速度/(km·h$^{-1}$) |
| 1 | 150 | 2 |
| 2 | 160 | 3 |
| 3 | 170 | 4 |
| 4 | 180 | 5 |

### 3.2 试验结果与分析

在不同因素和水平条件下进行全面试验,试验设计 16 组,试验结果如表 2 所示。分别测定一个栽植单元的每一行穴距,计算每行的穴距一致性变异

**表 2 试验结果及分析**

**Tab. 2 Analysis of test results**

| 试验编号 | 理论穴距 | 作业速度 | 穴距一致性变异系数/% | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 每行 | 平均 |
| 1 | 1 | 1 | 3.13<br>3.31<br>3.31 | 3.25 |
| 2 | 1 | 2 | 2.91<br>2.98<br>3.02 | 2.97 |
| 3 | 1 | 3 | 4.60<br>4.51<br>4.51 | 4.54 |
| 4 | 1 | 4 | 5.52<br>5.58<br>5.49 | 5.53 |
| 5 | 2 | 1 | 2.01<br>1.98<br>2.13 | 2.04 |
| 6 | 2 | 2 | 1.79<br>1.83<br>1.78 | 1.80 |
| 7 | 2 | 3 | 2.38<br>2.43<br>2.39 | 2.40 |
| 8 | 2 | 4 | 2.91<br>2.88<br>2.91 | 2.90 |
| 9 | 3 | 1 | 2.77<br>2.71<br>2.77 | 2.75 |
| 10 | 3 | 2 | 3.28<br>3.29<br>3.48 | 3.35 |
| 11 | 3 | 3 | 4.22<br>4.26<br>4.27 | 4.25 |
| 12 | 3 | 4 | 4.58<br>4.55<br>4.67 | 4.60 |
| 13 | 4 | 1 | 3.20<br>3.42<br>3.58 | 3.40 |
| 14 | 4 | 2 | 4.87<br>4.94<br>4.89 | 4.90 |
| 15 | 4 | 3 | 3.69<br>3.82<br>3.74 | 3.75 |
| 16 | 4 | 4 | 4.60<br>4.33<br>4.12 | 4.35 |
| $k_1$ | 4.07 | 2.86 | | |
| $k_2$ | 2.29 | 3.26 | | |
| $k_3$ | 3.74 | 3.74 | | |
| $k_4$ | 4.10 | 4.35 | | |
| $F$ | 7.69 | 4.27 | | |
| $P$ | 0.01 | 0.04 | | |
| $R$ | 7.15 | 3.50 | | |

系数，得到一个栽植单元的穴距一致性变异系数平均值。

由 $F$ 值和 $P$ 值可以得到理论穴距 $X$ 和作业速度 $v$ 都对穴距一致性系数影响显著，其中理论穴距最为显著。由极差 $R$ 可以判断理论穴距影响最大，由 $k$ 值可知最佳的理论穴距为 160 mm，最佳的作业速度为 2 km/h。

穴距一致性变异系数随理论穴距和作业速度变化的趋势如图 13 所示，可以看出：在理论穴距 160 mm 的情况下，不同的作业速度下变异系数都很小，最小变异系数时的作业速度为 3 km/h；在相同的理论穴距下，随着作业速度的提高，变异系数总体呈上升趋势；在相同的作业速度下，理论穴距过大（180 mm）或者过小（150 mm）都会使变异系数偏高，穴距稳定性差。所以最佳理论穴距为 160 mm，最佳作业速度为 3 km/h。

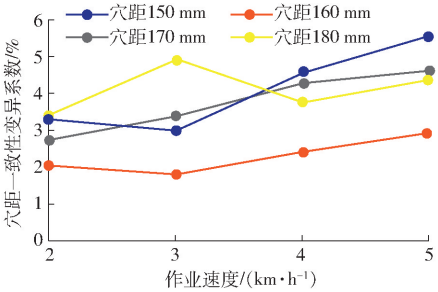


图 13　不同理论穴距和作业速度下的变异系数曲线

Fig. 13　Curves of variation coefficient at different theoretical distances and operating speeds

## 4　结论

（1）油菜旋耕移栽联合作业机穴距电液控制系统台架试验表明，2 个液压马达转速基本一致，平均误差为 0.7%。选取液压马达Ⅰ测试不同负载（5、10、15、20 N·m）下与地轮转速之间的关系，结果显示，负载对液压系统的影响相对较小。同时发现，马达转速与地轮转速变化趋势一致，而马达转速相对于地轮转速有一定的滞后性，滞后时间在 600 ms 内，液压系统稳定。

（2）选定理论穴距分别为 150、160、170、180 mm，作业速度分别为 2、3、4、5 km/h，进行田间试验，结果表明，理论穴距、作业速度均对穴距一致性变异系数影响显著，其中理论穴距对穴距一致性影响最显著，在穴距 160 mm 和 4 种作业速度下，穴距一致性变异系数均能保持较小值，说明 160 mm 为最佳穴距，在此穴距下前进速度 3 km/h 为最佳前进速度。

## 参　考　文　献

[1] 殷艳，廖星，余波，等. 我国油菜生产区域布局演变和成因分析[J]. 中国油料作物学报，2010，32(1)：147－151.
YIN Yan，LIAO Xing，YU Bo，et al. Regional distribution evolvement and development tendency of Chinese rapeseed production [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science，2010，32(1)：147－151. (in Chinese)

[2] JIANG L，WU C Y，TANG Q，et al. Critical equation of seedling block falling off in transplanting process and the optimization experiment of rape blanket seedling transplanter[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng.，2019，12(5)：87－96.

[3] 靳晓波. 基于单片机控制的谷子精量播种控制系统设计[J]. 机械工程与自动化，2019(4)：197－198，201.
JIN Xiaobo. Design of millet precision seeding control system based on single chip microcomputer control[J]. Mechanical Engineering & Automation，2019(4)：197－198，201. (in Chinese)

[4] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(8)：42－49. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180805&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.005. (in Chinese)

[5] 印祥，杨腾祥，金诚谦，等. 玉米精量播种智能控制系统研制[J]. 农机化研究，2018，40(9)：125－128.
YIN Xiang，YANG Tengxiang，JIN Chengqian，et al. Development of an intelligent control system for precision corn seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2018，40(9)：125－128. (in Chinese)

[6] 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. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007. (in Chinese)

[7] 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.

[8] 赵金辉，刘立晶，杨学军，等. 基于 PLC 的苔麸播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：84－89.
ZHAO Jinhui，LIU Lijing，YANG Xuejun，et al. Design and experiment of tef seeder based on PLC[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(Supp.)：84－89. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016s013&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.013. (in Chinese)

[9] WEI L, ZHANG X, JIA Q, et al. Automatic navigation system research for PZ60 rice planter[C]// International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture, Springer International Publishing, 2016.

[10] SIDDIQUE M, KIM W, CHUNG S, et al. PID control algorithm based on hydraulic oil viscosity for the proportional valve of the planting depth control system[J]. Agriculture, 2020, 10(3): 73.

[11] RAIKWAR S, TEWARI V K, MUKHOPADHYAY S, et al. Simulation of components of a power shuttle transmission system for an agricultural tractor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 114: 114 – 124.

[12] SAEYS W, ENGELEN K, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow manure injection, part 1: modelling of the depth control system[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(2): 146 – 154.

[13] SAEYS W, DEBLANDER J, RAMON H, et al. High-performance flow control for site-specific application of liquid manure[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 22 – 34.

[14] BRAVO W A, CANUTO E, AGOSTANI M, et al. Proportional electrohydraulic valves: an embedded model control solution [J]. Control Engineering Practice, 2017, 62: 22 – 35.

[15] HUANG H, ZHANG S, YANG Z, et al. Modified smith fuzzy PID temperature control in oil-replenishing device for deep-sea hydraulic system[J]. Ocean Engineering, 2018, 149: 14 – 22.

[16] MAHMOOD Q A, NAWAF A T, ESMAEL M N, et al. PID temperature control of demineralized water tank [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 454: 1 – 10.

[17] HAN C, HWANG Y H, CHOI S B. Tracking control of a spool displacement in a direct piezoactuator driven servo valve system [J]. Frontiers in Materials, 2017, 4: 1 – 9.

[18] ABDELAZIZ H O, AHMED M M, MAHMOUD D. Effect of viscous friction coefficients variation on robot's joint PID control [J]. International Journal of Engineering, Management, Humanities and Social Sciences Paradigms (IJEMHS), 2016, 21: 11 – 14.

[19] HEO Y J, KANG J, KIM M J, et al. Tuning free controller to accurately regulate flow rates in a microfluidic network[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23273.

[20] 齐文超,李彦明,张锦辉,等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10): 17 – 23,34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17 – 23, 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20191002&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.002. (in Chinese)

[21] 郭娜,胡静涛. 插秧机行驶速度变论域自适应模糊 PID 控制[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12): 245 – 251.
GUO Na, HU Jingtao. Variable universe adaptive fuzzy-PID control of traveling speed for rice transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 245 – 251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131241&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.041. (in Chinese)

[22] 梁春英,衣淑娟,王熙,等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. 农业机械学报,2010,41(7): 157 – 162.
LIANG Chunying, YI Shujuan, WANG Xi, et al. Strategy of the variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 157 – 162. (in Chinese)

[23] 杜巧连,熊熙程,魏建华. 拖拉机液压悬挂耕深电液控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8): 62 – 65.
DU Qiaolian, XIONG Xicheng, WEI Jianhua. Design and experiment on the control system of electro-hydraulic plow depth of tractor hydraulic hitch mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 62 – 65. (in Chinese)