doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.022

果园有机肥深施机分层变量排肥控制系统设计与试验

袁全春　徐丽明　牛　丛　马　帅　闫成功　赵诗建
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：果园不同深度的土壤养分不同，果树根系分层吸肥能力不同，有机肥分层变量深施可以解决传统施肥存在的养分分布不均和肥料利用率低等问题。针对有机肥分层变量深施的排肥控制问题，本文设计了排肥控制系统，可以根据用户设置的各层理论排肥量和作业速度，实时计算液压马达的理论转速，并采用 PID 算法控制比例流量阀开度，调节马达转速驱动螺旋输送器排肥，实现分层变量排肥。将 AMESim 中建立的液压系统模型与在 Matlab/Simulink 中建立的控制模型进行联合仿真，整定 PID 参数。液压马达转速调节性能试验中最大超调量为 14 r/min，达到稳定转速的时间最大为 6 s，控制性能较好，表明通过 AMESim－Matlab/Simulink 联合仿真，能够快速便捷地整定 PID 参数，结果准确可靠。排肥控制性能试验中排肥量相对误差最大 6.20%，变异系数最大 8.69%，排肥量准确性和均匀性均达到要求。设计的控制系统具有较好的性能，能为果园有机肥分层变量深施提供技术支撑。

关键词：深施机；PID 控制；有机肥；分层变量施肥
中图分类号：S224.22；TP273⁺.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)S1-0195-08

Design and Test of Layered Variable Rate Fertilizer Discharge Control System for Organic Fertilizer Deep Applicator

YUAN Quanchun　XU Liming　NIU Cong　MA Shuai　YAN Chenggong　ZHAO Shijian
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Due to the different soil nutrients in different depths of orchard, and the ability of fruit tree roots to absorb fertilizer is different, the layered variable deep application of organic fertilizer can solve the problems of uneven distribution of nutrients and low utilization rate of fertilizer in traditional fertilization. In view of the electro-hydraulic control of layered variable rate fertilizer discharge, a fertilizer discharge control system was designed, which can calculate the theoretical speed of hydraulic motor in real time according to the theoretical fertilizer amount of each layer set by the user and the forward speed of the unit. PID algorithm was used to control the opening of the proportional flow valve, and the motor speed was adjusted to drive the screw conveyor to discharge fertilizer, so as to realize the layered variable rate fertilizer discharge. PID algorithm usually needed to adjust the parameters such as proportion, integral, differential coefficient and sampling time to obtain better control performance. Matlab/Simulink is a powerful simulation software, which can establish the control system model and carry out simulation. It can quickly and conveniently adjust PID parameters. But it is necessary to establish the mathematical model of the controlled object. It is difficult to establish an accurate mathematical model for the valve controlled motor speed control system because of its nonlinearity, time-varying and hysteresis. AMESim is a multi-disciplinary complex system modeling and simulation platform, especially suitable for hydraulic system simulation and analysis. The hydraulic system model was built in AMESim, the control model was built in Matlab/Simulink, and the joint simulation results were more accurate and reliable. The hydraulic system mainly included gear pump, relief valve, differential pressure reducing valve, proportional throttle valve and hydraulic motor. According to the sample of hydraulic components, the hydraulic system model was completed in AMESim, the parameters of each component was set, the rotating load was set according to the actual working environment, the

收稿日期：2020－08－20　修回日期：2020－09－20
基金项目：现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS－29)
作者简介：袁全春(1993—)，男，博士生，主要从事生物生产自动化研究，E-mail：yqcmail@qq.com
通信作者：徐丽明(1969—)，女，教授，博士生导师，主要从事生物生产自动化研究，E-mail：xlmoffice@126.com

speed sensor and coupling interface was added. The PID control simulation model was established in Matlab/Simulink, and the parameters were adjusted through joint simulation. When the values of proportional, integral and differential coefficients were 0.005, 0.05 and 0, respectively, and the sampling time was 0.5 s, the control performance was the best. The adjusted algorithm was used in the bench test of speed regulation performance and fertilizer discharge performance. The regulation performance test results showed that the speed regulation performance was good, the maximum overshoot was 14 r/min and the maximum time to reach the stable speed was 6 s. The simulation results were accurate and reliable, AMESim - Matlab/Simulink joint simulation can quickly and conveniently research the layered variable rate fertilizer control algorithm, and adjust algorithm parameters. The fertilizer discharge performance test results showed that the accuracy and uniformity of fertilizer discharge can meet the requirements, the maximum relative error of fertilizer discharge was 6.20%, the maximum coefficient of variation was 8.69%. The control system had better control performance, and it can provide technical support for layered variable rate deep application of organic fertilizer in orchard.

Key words: deep applicator; PID control; organic fertilizer; layered variable rate fertilization

0 引言

目前,果园有机肥深施作业基本可以实现机械化,但作业方式较为粗放[1]。由于果园不同深度的土壤养分不同,果树根系分层吸肥能力不同,传统的单层施肥方式存在养分分布不均、肥料利用率低和土壤污染严重等问题,研究分层变量深施技术十分必要,其中排肥量的变量控制是关键。

变量控制技术在农业领域得到了广泛应用,国内外学者在播种、施肥、喷药等方面均进行了变量控制的研究[2-19]。HE 等[2]采用 PID 算法对精量播种机进行变量控制,提高了播种质量;袁玲合等[4]对玉米施肥量的精确控制进行了研究,实现了玉米机械化精准追肥;安晓飞等[5]研究了小麦变量施肥控制系统,实现了分层变量施肥;王相友等[20]针对喷药机设计了变量控制系统,实现了变量喷药。变量控制技术较为成熟,但在有机肥分层变量施肥方面的研究较少。

本文拟针对果园有机肥分层变量深施的排肥控制问题,设计排肥控制系统。该系统可以根据用户设置的各层理论排肥量和作业速度,实时计算各液压马达的理论转速,并采用 PID 算法控制比例流量阀开度,调节马达转速驱动螺旋输送器排肥,实现分层变量排肥。在 AMESim 软件中建立液压系统模型,在 Matlab/Simulink 软件中建立控制模型,通过联合仿真整定 PID 参数,并通过台架试验测试控制系统对马达转速的调节性能和对排肥量的控制性能。以期设计出控制性能较好的分层变量排肥控制系统,为果园有机肥分层变量深施提供技术支撑。

1 分层变量排肥控制系统设计

1.1 分层变量排肥装置结构

分层变量排肥由分层变量排肥装置实现,该装置主要由机架、肥箱、排肥螺旋输送器、液压系统和控制系统等组成,如图 1 所示。该装置与拖拉机通过三点悬挂连接,液压驱动排肥;由 3 个液压马达分别驱动螺旋输送器从肥箱不同位置排肥,配合回填装置可 3 层施肥;通过比例流量阀控制马达转速进而调节排肥量,可实现变量排肥,满足不同深度施肥量不同的要求。

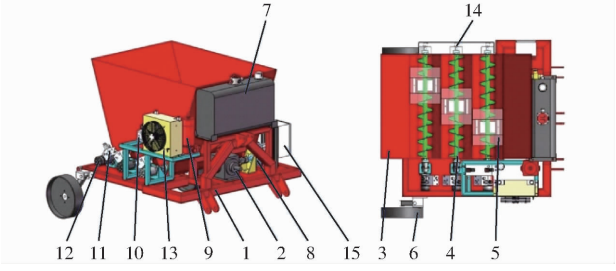

图 1 分层变量排肥装置结构图

Fig. 1 Structure of layered variable rate fertilizer distributor

1. 机架 2. 传动齿轮箱 3. 肥箱 4. 排肥螺旋输送器 5. 排肥口罩壳 6. 地轮 7. 液压油箱 8. 齿轮泵 9. 压力管路过滤器 10. 主阀块 11. 比例阀块 12. 液压马达 13. 风冷却器 14. 光电编码器 15. 控制柜

排肥机构如图 2 所示,主要由液压马达、比例阀块、排肥螺旋输送器和光电编码器等组成。作业时液压马达驱动排肥口两侧旋向相反的螺旋输送器旋转进行排肥;比例阀块用于控制液压马达流量,调节排肥螺旋输送器转速,控制排肥量,通过阀块将比例阀直接与液压马达连接,可以提高控制系统响应速度;光电编码器用于测定排肥螺旋输送器转速,反馈

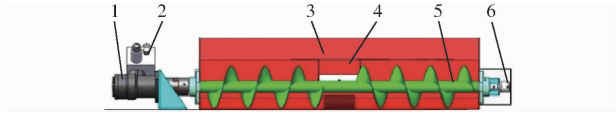

图 2 排肥机构示意图

Fig. 2 Schematic of fertilizer discharging mechanism

1. 液压马达 2. 比例阀块 3. 肥箱 4. 排肥口罩壳 5. 排肥螺旋输送器 6. 光电编码器

实际排肥量。

1.2　控制系统硬件设计

分层变量排肥控制系统主要由触摸屏、地轮光电编码器、控制板、卸荷阀继电器、PWM 转 0 ~ 5 V 电压输出模块、比例阀放大器、比例阀马达总成和排肥螺旋输送器光电编码器等组成，如图 3 所示。该系统可以根据用户设置的各层理论排肥量和作业速度，实时计算各液压马达的理论转速，并采用 PID 算法控制比例流量阀开度，调节马达转速驱动螺旋输送器排肥，实现分层变量施肥。

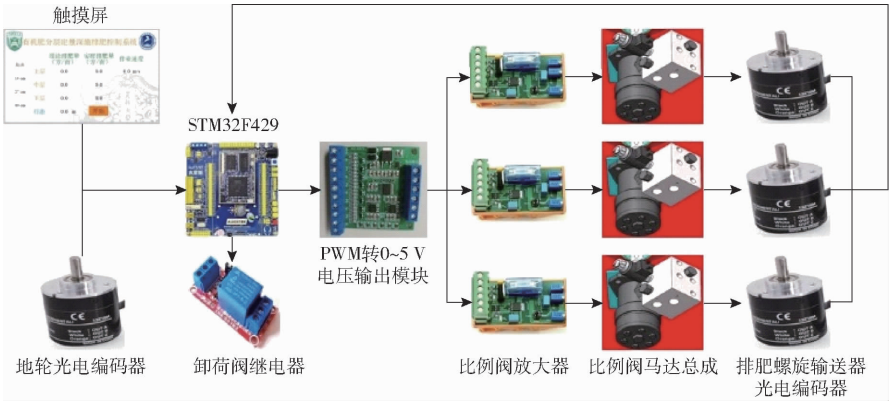

图 3　控制系统组成

Fig. 3　Control system composition

本文使用触摸屏（陶晶智能串口屏 X3TJC8048 ×370_011R）实现人机交互，设置各层理论排肥量和行距等参数，并实时显示各层实际排肥量和机组前进速度；使用光电编码器（OMRON E6B2 - CWZ3E 型，5 ~ 12 V DC，1000 P/r）测定地轮转速，计算出机组前进速度；采用 STM32F429（原子 F4 水星版）作为控制器；使用比例阀放大器（7CM011/PCB - 2600 型，控制信号：0 ~ 5 V）和 PFC - 13A - 2D - 0140 - N 型比例流量阀调节液压马达转速，控制排肥量；由于 STM32 输出电压为 0 ~ 3.3 V，比例阀放大器控制信号为 0 ~ 5 V，所以使用 PWM 转 0 ~ 5 V 电压输出模块进行电压转换；采用光电编码器（OMRON E6B2 - CWZ3E 型，5 ~ 12 V DC，1000 P/r）测定排肥螺旋输送器实际转速，反馈给控制器，进行闭环控制；使用卸荷阀继电器（5 V）控制卸荷阀通断，在不作业时对液压系统进行卸荷。

1.3　控制系统软件设计

为了方便数据交互，应用串口屏界面开发环境，设计了人机交互软件，操作界面如图 4 所示。通过交互界面可以设置上、中、下各层排肥量以及行距等作业参数，并可以实时显示上、中、下各层实际排肥量及作业速度。将各作业参数设置完善后，点击开始按钮，软件便将作业参数发送到控制器，并实时接收显示控制器发送的数据。

控制程序流程如图 5 所示。程序开始运行，进入定时中断。获取作业参数及作业速度，判断作业参数是否设置完成、机组是否开始作业。若没有则不进行排肥作业，打开卸荷阀为液压系统卸荷，若是则关闭卸荷阀，开始排肥作业。测定作业速度和液压马达实际转速，根据设置的各层理论排肥量、行距和作业速度计算出液压马达理论转速，根据马达实

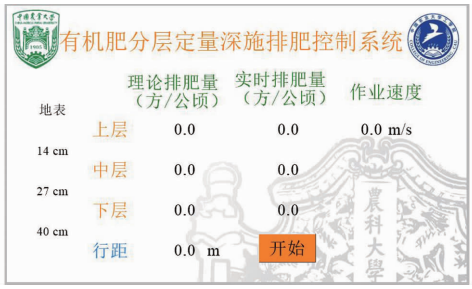

图 4　控制系统交互界面

Fig. 4　Control system interface

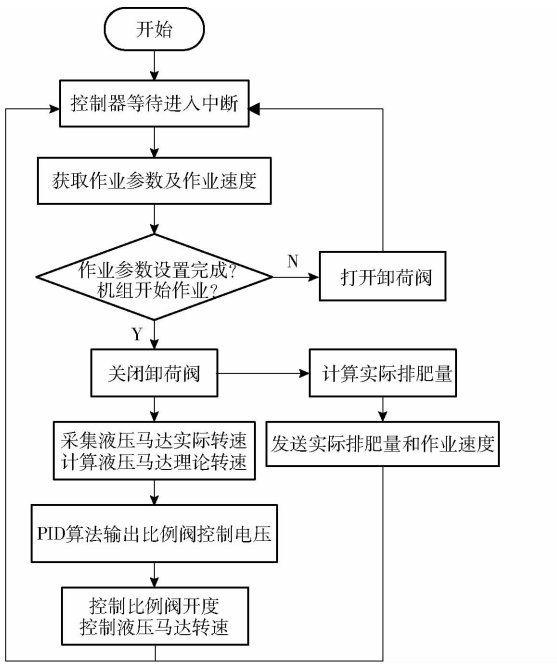

图 5　控制程序流程图

Fig. 5　Flow chart of control procedure

际转速、作业速度和行距计算出各层实际排肥量。将各层实际排肥量和作业速度发送到触摸屏实时显示,并根据液压马达理论转速与实际转速的偏差,采用 PID 算法输出比例流量阀控制电压,调节马达转速,控制排肥量。进入下次中断,直至作业结束。

排肥机构采用螺旋输送器排肥,排肥量由液压马达转速决定,已知理论排肥量、行距、作业速度等,液压马达理论转速计算公式为

$$n = \frac{4Qsv}{667k} \tag{1}$$

式中 n——液压马达理论转速,r/min

Q——理论排肥量,m^3/hm^2

s——行距,m

v——作业速度,m/s

k——螺旋输送器每转排肥量,m^3/r

为保证排肥量准确与稳定,在控制器中采用位置式 PID 控制算法,对液压马达转速进行调节[21]。控制器的输入量是液压马达实际转速与理论转速的偏差信号,输出量是控制比例节流阀开度的电压信号。在实际应用过程中,必须将控制原理离散化,其程序语言实现公式为

$$u_k = Pe_k + IT_s \sum_{j=0}^{k} e_j + D\frac{1}{T_s}(e_k - e_{k-1}) \tag{2}$$

式中 u_k——第 k 次运算时的输出值

e_k——第 k 次运算时输入的偏差值

e_{k-1}——第 $k-1$ 次运算时输入的偏差值

P——比例系数 I——积分系数

D——微分系数 T_s——采样时间,s

e_j——第 j 次运算时输入的偏差值

1.4 PID 参数整定

PID 算法通常需要整定比例、积分、微分系数及采样时间等参数,才能获得较好的控制性能。Matlab/Simulink 是一款功能强大的仿真软件,可以建立控制系统模型,并进行仿真,可以快速方便地整定 PID 参数。但需要建立被控对象的数学模型,阀控马达调速系统是一个复杂的非线性时变系统,难以建立精确的数学模型。AMESim 为多学科领域复杂系统建模仿真平台,适合进行液压系统仿真与分析。而且 AMESim 拥有丰富的接口,可以与多种软件耦合,进行联合仿真。将 AMESim 与 Matlab/Simulink 相结合,在 AMESim 中建立液压系统模型,在 Simulink 中建立控制系统模型,进行联合仿真,优势互补,仿真结果更加准确可靠[7,22-27]。

1.4.1 液压系统 AMESim 模型建立

根据液压系统原理图和实际需要,在 AMESim 中建立简化的仿真模型[28-29],并添加耦合接口(SimulinkCosim),如图 6 所示。仿真模型主要包括油箱、电动机、齿轮泵、单向阀、溢流阀、定差减压阀、节流阀、液压马达、转速传感器和扭矩加载器等元件。对于仿真模型,设置正确的参数是关键,直接影响仿真的准确性,根据液压元件样本资料、液压设计手册和系统作业环境设置仿真模型各元件参数,主要参数如表 1 所示。

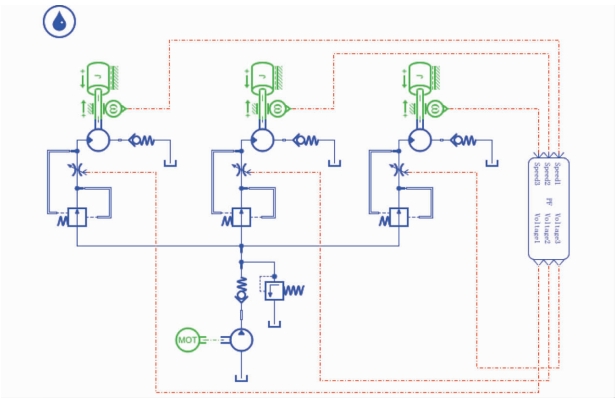

图 6 分层变量排肥液压系统 AMESim 模型

Fig. 6 AMESim model of layered variable rate fertilizer hydraulic system

表 1 AMESim 模型元件主要参数

Tab. 1 AMESim model element main parameter

名称	物理元件型号	参数	数值
电动机		转速/(r·min^{-1})	1 700
齿轮泵	CBTs-320F1Z1L	排量/(mL·r^{-1})	20
单向阀	CV-162A-20-03-N	开启压力/MPa	0.03
溢流阀	RD-162A-25-A-L	开启压力/MPa	7.5
定差减压阀	LP-11A-30-100-N	控制压力/MPa	1.0
变量节流阀	PFC-13A-2D-0140-N	最大流量/(L·min^{-1})	14
		压降/MPa	1.4
		控制信号范围/V	0~5
液压马达	BMR160	排量/(mL·r^{-1})	160
旋转载荷		扭矩/(N·m)	150

1.4.2 PID 控制模型建立

在 Matlab/Simulink 中建立 PID 控制模型,如图 7 所示,包括输入、模糊调节器、PID 控制器、显示器和 AMESim 耦合接口等元件[30-32]。模型输入为液压马达理论转速与实际转速的偏差,输出为比例节流阀控制电压 0~5 V。实际应用中,使用微处理器进行 PID 运算控制输出,其只能根据采样时刻的偏差计算控制量,必须对算法公式进行离散化,用累加代替积分,用差分代替微分,选择离散 PID 控制器。PID 控制器传递函数为

$$G_c(z) = P + IT_s\frac{1}{z-1} + D\frac{1}{T_s}\frac{z-1}{z} \tag{3}$$

1.4.3 联合仿真整定 PID 参数

将液压系统的 AMESim 模型与 PID 控制模型进行联合仿真,整定 PID 参数,提高控制性能。PID 算

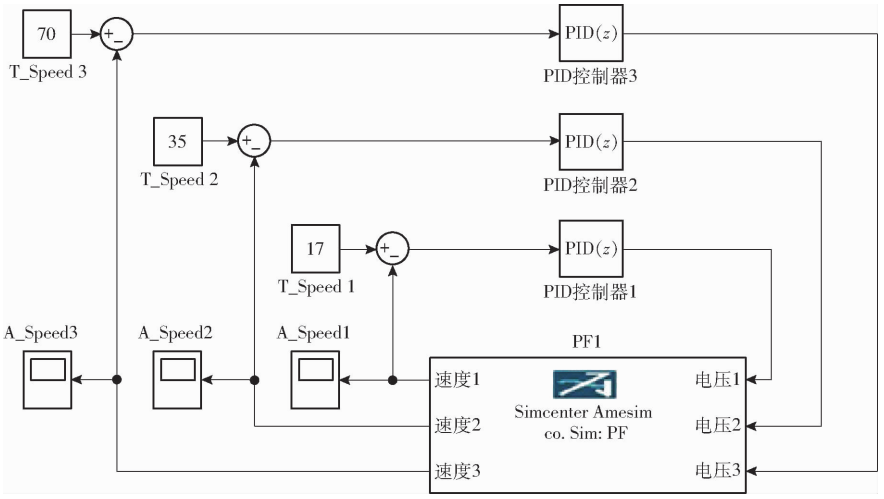

图 7　PID 控制模型

Fig. 7　Control model of PID

法的参数主要有比例系数、积分系数、微分系数和采样时间等。根据前期试验，若理论转速较低时，控制性能表现较好，则控制系统在其他理论转速下也具有较好的控制性能。所以仿真整定参数时，将一个液压马达理论转速设置为较低的转速 17 r/min，其余两个设置为 0。改变参数进行仿真，分析液压马达转速响应曲线，从超调量、响应时间和稳定性等方面评价控制性能。遵循“先比例后积分再微分”的顺序整定 PID 参数。如图 8 所示，只有比例系数 P 时，液压马达难以达到目标转速，且随着 P 的增大，转速波动加剧；当加入积分系数 I 时，液压马达可以达到目标转速，I 较小时转速波动较小，但达到目标转速的时间增加，I 较大时转速波动加剧；微分系数 D 对系统控制性能影响较小，故未加入微分系数；采样时间亦会影响系统控制性能，过短过长均会加剧转速波动。仿真试验表明，当比例、积分、微分系数分别为 0.005、0.05 和 0，采样时间为 0.5 s 时，PID 算法具有较好控制性能。

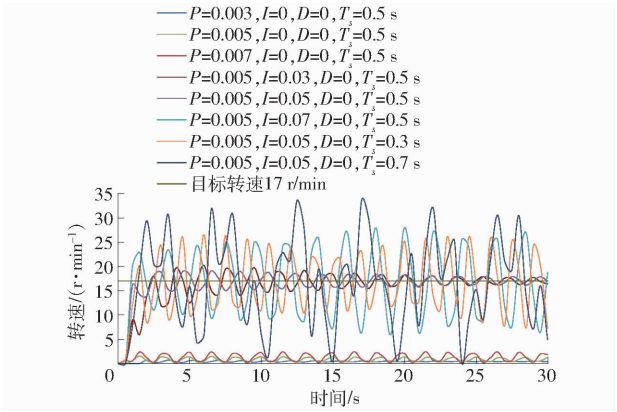

图 8　PID 参数整定液压马达转速响应曲线

Fig. 8　Hydraulic motor rotational speed response curves of PID parameters setting

为了测试整定参数后的算法在其他理论转速下的控制性能，分别设 3 个理论转速为 17、35、70 r/min 进行仿真。图 9 为液压马达转速响应曲线，由图可知，在 3 种理论转速下，算法均具有较好的控制性能。理论转速为 17 r/min 时，达到稳定转速的时间为9 s，超调量为 1 r/min；理论转速为 35 r/min 时，达到稳定转速的时间为 3.5 s，超调量为 1 r/min；理论转速为 70 r/min 时，达到稳定转速的时间为 4 s，超调量为 3 r/min。

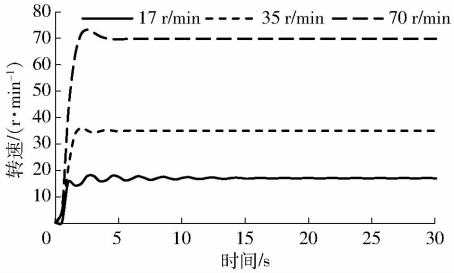

图 9　PID 算法仿真液压马达转速响应曲线

Fig. 9　Hydraulic motor rotational speed response curves of PID algorithmin simulation

2　台架试验

2.1　液压马达转速调节性能试验

为了测试仿真结果的准确性，在空载条件下进行液压马达转速调节性能试验。使用雷沃 950 型拖拉机提供动力，动力输出轴转速设置为 450 r/min，液压系统压力设置为 7.5 MPa，前、中和后液压马达的理论转速组合及算法参数与仿真试验相同。使用便携式计算机通过串口与控制器进行通信，控制系统启停，并采集液压马达实际转速的实时数据，得到转速响应曲线。

图 10 为液压马达转速响应曲线，由图可知，理论转速为 17 r/min 时，达到稳定转速的时间为 3 s，超调量为 0；理论转速为 35 r/min 时，达到稳定转速

的时间约为 3.5 s,超调量为 5 r/min;理论转速为 70 r/min 时,达到稳定转速的时间约为 6 s,超调量为 14 r/min。控制系统具有较好的控制性能,仿真结果具有较高的准确性。

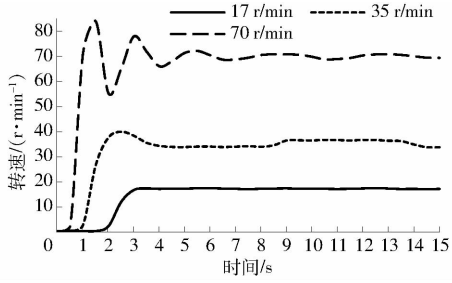

图 10 液压马达转速响应曲线

Fig. 10 Hydraulic rotational speed response curves

2.2 排肥控制性能试验

2.2.1 试验设计

为了测试分层变量排肥控制系统排肥控制性能,参考国家标准[35]进行了排肥性能试验(图 11),采用羊粪有机肥作为试验材料,为了测试不同理论排肥量的排肥控制性能,通过触摸屏分别设置上、中、下层排肥量为 7.50、15.00、30.00 m^3/hm^2,并设置行距为 3 m。使用雷沃 950 型拖拉机为分层变量排肥装置提供动力,以 0.5 m/s 左右的速度作业 15 m,在中间 10 m,每隔 2 m 取500 mm 长度范围内有机肥,每次试验取样 5 次,使用电子天平分别称量质量,并记录数据,共进行 3 次试验。

2.2.2 评价指标

排肥控制性能试验是为了测试排肥控制系统对排肥量控制的准确性和均匀性。排肥量准确性可以用相对误差来描述,相对误差越小,表明排肥量准确性越高,反之越低。排肥量均匀性可以用排肥量变异系数进行描述,对不同位置样本的实际排肥量进行比较得出变异系数,变异系数越小,表明排肥量均匀性越高,反之越低。



(a)分层变量排肥装置样机 (b)排肥取样

图 11 排肥性能试验

Fig. 11 Test of fertilizer discharge performance

2.2.3 试验数据处理与结果分析

对试验数据进行处理,通过样本质量计算出各层排肥量变异系数,并取 3 次试验平均值;根据有机肥样本质量平均值和堆积密度计算体积排肥量,并计算出相对误差,取 3 次试验平均值,结果如表 2 所示。上层排肥量相对误差为 4.56%,中层排肥量相对误差为 6.20%,下层排肥量相对误差为 4.37%,均在误差允许范围内,表明排肥量准确性能够达到要求;上层排肥量变异系数为 8.69%,中层排肥量变异系数为 6.46%,下层排肥量变异系数为 6.67%,表明排肥量均匀性较好,能够达到变量排肥要求。

表 2 排肥性能试验结果

Tab. 2 Test results of fertilizer discharge performance

排肥层	试验序号	样本质量/g		实际排肥量/($m^3\cdot hm^{-2}$)	理论排肥量/($m^3\cdot hm^{-2}$)	相对误差/%	变异系数/%
		标准差	平均值				
上层	1	12.58	303.58	6.90	7.50	7.99	4.14
	2	42.46	332.08	7.55	7.50	0.65	12.78
	3	28.61	313.35	7.12	7.50	5.03	9.13
	平均值					4.56	8.69
中层	1	10.99	618.30	14.05	15.00	6.31	1.78
	2	51.59	626.49	14.24	15.00	5.06	8.24
	3	57.30	612.15	13.91	15.00	7.24	9.36
	平均值					6.20	6.46
下层	1	126.32	1270.61	28.88	30.00	3.73	9.94
	2	66.39	1252.98	28.48	30.00	5.06	5.30
	3	60.36	1263.00	28.71	30.00	4.30	4.78
	平均值					4.37	6.67

3 结论

(1)设计的分层变量排肥控制系统可以根据用户输入的理论排肥量和机组前进速度,实时计算液压马达理论转速,并采用 PID 算法调节马达转速达到理论转速,实现了有机肥分层变量排肥。

(2)将 AMESim 中建立液压系统模型与 Matlab/Simulink 中建立控制模型进行联合仿真,整定了 PID

参数，液压马达转速调节性能试验中最大超调量为 14 r/min，达到稳定转速的时间最大为 6 s，控制性能较好。试验结果表明，通过 AMESim - Matlab/Simulink 联合仿真，能够快速便捷地整定 PID 参数，结果准确可靠。

（3）排肥控制性能台架试验结果表明，各层排肥量相对误差最大 6.20%，排肥量变异系数最大 8.69%，在不同的理论排肥量下，排肥量准确性和均匀性均达到要求。表明设计的控制系统具有较好的控制性能，能为果园有机肥分层变量深施提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 袁全春，徐丽明，邢洁洁，等. 果园肥料深施机研究现状与发展趋势[J]. 农机化研究，2019，41(6)：258 - 264.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Research status and trend of fertilizer deep machine in orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 258 - 264. (in Chinese)

[2] HE X T, CUI T, ZHANG D X, 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.

[3] 安晓飞，王晓鸥，付卫强，等. 四要素变量施肥机肥箱施肥量控制算法设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：149 - 154.
AN Xiaofei, WANG Xiaoou, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of fertilizer amount control algorithm in four factors variable rate fertilization system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 149 - 154. (in Chinese)

[4] 袁玲合，古冬冬，王万章，等. 三轮高架作业车玉米变量施肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：170 - 175.
YUAN Linghe, GU Dongdong, WANG Wanzhang, et al. Design and experiment of variable rate fertilization system of tri-wheel high frame operation vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 170 - 175. (in Chinese)

[5] 安晓飞，付卫强，王培，等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报，2019，50(增刊)：96 - 101.
AN Xiaofei, FU Weiqiang, WANG Pei, et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 96 - 101. (in Chinese)

[6] HU J, HE J C, WANG Y, et al. Design and study on lightweight organic fertilizer distributor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 1 - 11.

[7] 崔东云. 基于 PWM 电液比例控制的气吸式小麦精播装置设计与研究[D]. 泰安：山东农业大学，2019.

[8] 丁旭. 有机肥精准深施装备的设计与研发[D]. 合肥：中国科学技术大学，2018.

[9] 丁友强，杨丽，张东兴，等. 玉米变量播种机单体驱动器的设计[J]. 农业工程学报，2019，35(11)：1 - 9.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design of row-unit driver for maize variable rate planter[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 1 - 9. (in Chinese)

[10] 肖琪，赵军，衣淑娟，等. 变量施肥液压驱动系统设计及试验研究[J]. 农机化研究，2019，41(3)：87 - 92.
XIAO Qi, ZHAO Jun, YI Shujuan, et al. Design and experimental research of variable rate fertilizer hydraulic drive system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 87 - 92. (in Chinese)

[11] 祝清震，武广伟，罗长海，等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：155 - 163.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, LUO Zhanghai, et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 155 - 163. (in Chinese)

[12] 陈满，鲁伟，汪小昂，等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(2)：71 - 76.
CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 71 - 76. (in Chinese)

[13] 李翠锦，周树林，宋乐鹏. 基于模糊 PID 的变量液体施肥控制系统[J]. 农机化研究，2019，41(3)：244 - 249.
LI Cuijin, ZHOU Shulin, SONG Lepeng. Particle swarm optimization of adaptive fuzzy PID control for valve cylinder position [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 244 - 249. (in Chinese)

[14] 汪小昂，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)

[15] 王由之，张宏文，王磊，等. 基于模糊 PID 控制的棉花采摘性能试验台测控系统研制[J]. 农业工程学报，2018，34(23)：23 - 32.
WANG Youzhi, ZHANG Hongwen, WANG Lei, et al. Development of control system for cotton picking test bench based on

fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(23):23 - 32. (in Chinese)
[16] 丁幼春,夏中州,彭靖叶, 等. 联合收获机单神经元 PID 导航控制器设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(7):34 - 42.
DING Youchun, XIA Zhongzhou, PENG Jingye, et al. Design and experiment of the single-neuron PID navigation controller for a combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(7):34 - 42. (in Chinese)
[17] WRAT G, BHOLA M, RANJAN P, et al. Energy saving and Fuzzy-PID position control of electro-hydraulic system by leakage compensation through proportional flow control valve[J]. ISA Transactions,2020, 101: 269 - 280.
[18] 牛丛,徐丽明,马帅, 等. 变量喷药技术的应用现状与发展[J]. 农业装备与车辆工程,2018,56(12):1 - 4.
NIU Cong, XU Liming, MA Shuai, et al. Application and development of variable spray technology[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018,56(12):1 - 4. (in Chinese)
[19] 赵学观,徐丽明,何绍林, 等. 玉米定向种子带恒张力卷绕系统自适应模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报,2015,46(3):90 - 96.
ZHAO Xueguan, XU Liming, HE Shaolin, et al. Constant tension winding system of corn directional belt making machine based on self-adaptive fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(3):90 - 96. (in Chinese)
[20] 王相友,胡周勋,李学强, 等. 多回流式变量喷药控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):123 - 131.
WANG Xiangyou, HU Zhouxun, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of multi-reflux variable spraying control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(2):123 - 131. (in Chinese)
[21] 张洋,刘军,严汉宇, 等. 原子教你玩 STM32[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.
[22] 付甜甜,朱玉川,顾亚军. 基于 MATLAB - AMESim 的电液伺服系统模糊 PID 控制[J]. 机床与液压,2016,44(20):144 - 146.
FU Tiantian, ZHU Yuchuan, GU Yajun. Research on fuzzy PID control of electro-hydraulic servo system based on MATLAB - AMESim joint simulation[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016,44(20):144 - 146. (in Chinese)
[23] 葛蕾,郭津津,胡建飞. 基于 AMEsim/Simulink 的工业蝶阀电液伺服控制系统的仿真分析[J]. 天津理工大学学报,2019,35(2):9 - 13.
GE Lei, GUO Jinjin, HU Jianfei. Simulation analysis of electro-hydraulic servo control system of industrial butterfly valve based on AMEsim/Simulink[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2019,35(2):9 - 13. (in Chinese)
[24] 雷晓顺,侯帅,秦璇, 等. 电液比例阀控液压马达系统的模糊 PID 恒速控制[J]. 流体传动与控制,2016(1):42 - 46.
LEI Xiaoshun, HOU Shuai, QIN Xuan, et al. Electro-hydraulic proportional valve-controlled hydraulic motor system of fuzzy PID constant speed control[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2016(1):42 - 46. (in Chinese)
[25] 孟凡虎,赵素素,于子彭, 等. 基于 AMESim 和 Simulink 联合仿真的阀控马达神经元 PID 调速系统控制[J]. 液压与气动,2016(7):83 - 88.
MENG Fanhu, ZHAO Susu, YU Zipeng, et al. Single neural element PID control based on AMESim and Simulink co-simulation for speed governing system of valve-controlled motor[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2016(7):83 - 88. (in Chinese)
[26] 汪亮培. 采煤机电液比例调高控制仿真研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2019.
[27] 王波,熊瑞平,赵亚文, 等. 基于 AMESim - MATLAB 联合仿真的双泵直驱电液伺服系统压力控制[J]. 液压与气动,2020(1):171 - 176.
WANG Bo, XIONG Ruiping, ZHAO Yawen, et al. Research on pressure control of dual-pump direct-drive electro-hydraulic servo system based on AMESim - MATLAB joint simulation[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(1):171 - 176. (in Chinese)
[28] 付永领,祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真参考手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
[29] 梁全,谢基晨,聂利卫. 液压系统 Amesim 计算机仿真进阶教程[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
[30] 宋志安,曹连民,黄靖, 等. MATLAB/Simulink 与液压控制系统仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
[31] 王正林,王胜开,陈国顺, 等. MATLAB/Simulink 与控制系统仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
[32] 高振铭,徐丽明,李超, 等. 植物工厂中移动平台导引系统的路径校正控制方法研究[J]. 农机化研究,2017,39(12):7 - 14.
GAO Zhenming, XU Liming, LI Chao, et al. Path correction control method for mobile platform guidance system in plant factory[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(12):7 - 14. (in Chinese)
[33] GB/T 20346.2—2006 施肥机械 试验方法 第 2 部分 行间施肥机[S].