

变量施肥控制系统 PID 控制策略*

梁春英¹ 衣淑娟¹ 王 熙² 怀宝付¹

(1. 黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

【摘要】 根据机械动力学原理和电学原理建立了变量施肥控制系统的数学模型,为控制系统的设计、PID 参数选择以及控制性能改进提供了理论依据。利用 Matlab/Simulink 动态仿真工具构建了直流伺服电动机驱动无级变速传动机构的仿真模型,采用临界比例度法对系统的 PID 参数进行整定,获得了反映系统性能的仿真曲线,仿真和试验验证结果表明,PID 控制策略提高了控制系统的跟踪性能和抗干扰性能。

关键词: 变量施肥 控制系统 数学模型 PID 参数整定

中图分类号: S224.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0157-06

PID Control Strategy of the Variable Rate Fertilization Control System

Liang Chunying¹ Yi Shujuan¹ Wang Xi² Huai Baofu¹

(1. College of Information and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract

The mathematical model of the variable rate fertilization control system according to the principles of mechanical and electrical dynamics was set up and the theoretical basis for the system design, parameter selection and performance improvement was provided. The simulation model with direct current servo motor driving variable transmission mechanism was constructed by using Matlab/Simulink dynamic simulation tools. PID parameter tuning of control system was carried out by the critical proportioning method, the simulation curves of system performance was obtained. The simulation results showed that PID control strategy could improve the control system tracking performance and anti-jamming performance, and the test was carried out to verify the system performance.

Key words Variable rate fertilization, Control system, Mathematical model, PID parameter tuning

引言

变量施肥技术是精准农业的重要组成部分,它依据小尺度田块之间的地力和作物长势差异,施以不同数量和配比的肥料^[1-4],使肥料投入合理,在基本稳定产量的前提下,提高品质、降低过量施肥对农业生态环境的危害。处方信息控制施肥技术是目前我国应用最多的变量施肥技术^[5-6],它是基于 GIS

获取处方信息和 GPS 获取田间位置信息,由变量控制系统进行变量作业的施肥技术。多年来,国内外学者对变量施肥控制系统进行了广泛的研究^[7-14],研究内容主要集中在系统的设计和试验方面,对系统模型和控制策略的研究报道还不多见。本文针对黑龙江八一农垦大学研制的 2BJ-6W 型播种机变量施肥控制系统的控制策略进行研究,拟从电学和动力学的角度,利用机理建模的方法,建立变量施肥

收稿日期: 2009-11-09 修回日期: 2010-02-09

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A310)

作者简介: 梁春英,副教授,主要从事农业电气化研究, E-mail: ndliangchunying@163.com

通讯作者: 衣淑娟,教授,博士生导师,主要从事农业机械化研究, E-mail: yishujuan_2005@126.com

控制系统的数学模型。通过计算机动态仿真,探讨变量施肥控制系统的运动规律,对系统控制策略特性进行分析,并通过试验验证系统性能。

1 控制系统组成

变量施肥控制系统由 GPS 接收机、机载计算机、变量施肥控制器、无级变速器、执行电动机组成,如图 1 所示。变量施肥控制器根据相应田间位置的施肥偏差,采用 PID 控制策略调节占空比,从而改变无级变速器的传动比和排肥轮的转速,实现施肥播种机的变量施肥。

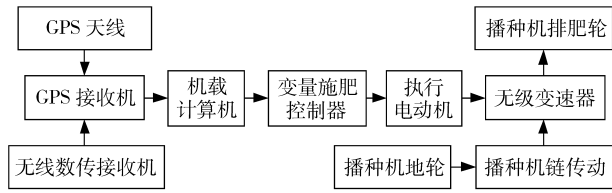


图 1 变量施肥控制系统的结构框图

Fig. 1 Structural diagram of the variable rate fertilization control system

2 控制系统的建模

2.1 直流伺服电动机模型

伺服电动机选用 ZD1330 型永磁直流刮水电动机,经链传动减速后驱动无级变速机构。伺服电动机参数 $U_N = 12 \text{ V}$, $P_N = 30 \text{ W}$, $I_N = 2 \text{ A}$, $n = 60 \sim 80 \text{ r/min}$ 。

伺服电动机处于动态过程时,电源电压 $u_a(t)$ 与电枢电流 $i_a(t)$ 的关系为

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1)$$

式中 R_a ——伺服电动机电枢线圈的电阻

L_a ——伺服电动机电枢线圈的电感

$e_a(t)$ ——额定励磁下电动机的反电势

从机械动力学的角度,伺服电动机输出转矩 $T(t)$ 与负载转矩 $T_L(t)$ 的关系为

$$T(t) = T_L(t) + (J_a + J_L) \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2)$$

式中 J_a ——伺服电动机电枢的转动惯量

J_L ——负载的转动惯性

$\omega(t)$ ——伺服电动机的转动角速度

伺服电动机的反电势 $e_a(t)$ 与角速度 $\omega(t)$ 关系为

$$e_a(t) = K_a \omega(t) \quad (3)$$

式中 K_a ——额定励磁下的电势转速比

伺服电动机输出转矩 $T(t)$ 与电枢电流 $i_a(t)$ 关系为

$$T(t) = K_T i_a(t) \quad (4)$$

式中 K_T ——额定励磁下的转矩电流比

式(1)~(4)进行拉氏变换,伺服直流电动机的动态模型如图 2 所示。

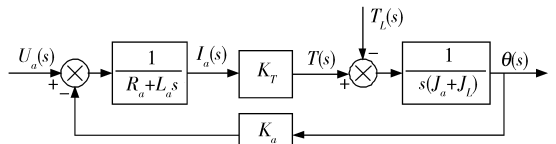


图 2 伺服电动机动态结构图

Fig. 2 Dynamic structural diagram of direct current servo motor

2.2 脉宽调制环节模型

脉宽控制其实质是功率放大,脉宽控制器按照 PID 算法输出的控制信号,产生相应频率的脉宽波形,改变伺服电动机的端电压,达到调节直流伺服电机转速的目的。根据 PWM 变换器的工作原理,当控制电压改变时,PWM 变换器的输出电压要到下一个周期方能改变。因此,PWM 变换器可以看成是一个滞后环节,它的延时最大不超过一个开关周期 T_{PWM} 。当系统开环频率特性截止频率满足 $\omega_c \leq \frac{1}{3T_{PWM}}$ 时,可将滞后环节近似看成一阶惯性环节,脉宽调制电路的传递函数可以近似表示为 $G_{PWM}(s) = \frac{K_{PWM}}{T_{PWM}s + 1}$ 。这里 $K_{PWM} = U_s/U_{0max}$ 为 PWM 功率放大器的放大系数, U_s 为 PWM 功率转换电路的电源电压; U_{0max} 为脉宽调制器控制电压的最大值,系统脉宽

变换电路的传递函数为 $G_{PWM}(s) = \frac{2.52}{0.002s + 1}$ 。

2.3 无级变速机构模型

控制系统执行机构采用 U34-1.5 型机械无级变速器,这种变速器是三相并列曲柄摇块型(GUSA 型)脉动无级变速器,伺服电动机驱动丝杠改变滑块的位置,通过曲柄摇杆机构使输出轴的转速连续变化,即实现无级调速。

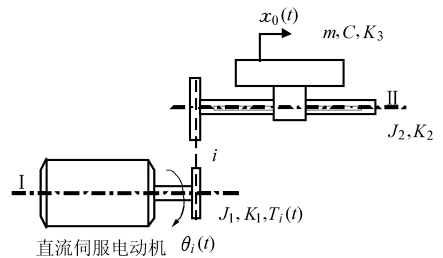


图 3 无级变速器机械传动机构

Fig. 3 Mechanical driving mechanism of CVT

伺服传动系统示意图如图 3 所示,伺服电动机通过一级减速链传动及丝杠驱动滑块作直线运动,随着滑块调速位置的连续变化,输出角速度也随着连续变化。设 J_1 为轴 I 部件和电动机转子构成的转动惯量; J_2 为轴 II 部件构成的转动惯量; K_1 、 K_2 分

别为轴 I、II 的扭转刚度系数; K_3 为丝杠及滑块部分的轴向刚度系数; m 为滑块质量; C 为滑块粘性阻尼系数。传动系统动态方程为

$$K \left(\theta_i(t) - i \frac{2\pi}{l_0} x_0(t) \right) = T_i(t) \quad (5)$$

$$T_i(t) = J_1 \frac{d^2 \left(2\pi i x_0(t) / l_0 \right)}{dt^2} + \frac{T_2(t)}{i} \quad (6)$$

$$T_2(t) = \left[J_2 + m \left(\frac{l_0}{2\pi} \right)^2 \right] \frac{d^2 \left(\frac{2\pi}{l_0} x_0(t) \right)}{dt^2} + C \left(\frac{l_0}{2\pi} \right)^2 \frac{d \left(\frac{2\pi}{l_0} x_0(t) \right)}{dt} \quad (7)$$

式中 $\theta_i(t)$ ——伺服电动机输出转角
 $T_i(t)$ ——伺服电动机输出转矩
 $T_2(t)$ ——轴 II 的输入转矩
 $x_0(t)$ ——滑块输出位移
 l_0 ——丝杠的基本导程
 K ——等效扭转刚度系数

式(5)~(7)描述了无级变速器滑块的动态特性,对以上公式进行拉氏变换,经整理得到传动系统频域关系式为

$$K \left(\theta_i(s) - i \frac{2\pi}{l_0} X_0(s) \right) = T_i(s) \quad (8)$$

$$T_i(s) = J_1 \left(\frac{2\pi i}{l_0} \right) s^2 X_0(s) + \frac{T_2(s)}{i} \quad (9)$$

$$T_2(s) = \left[J_2 + m \left(\frac{l_0}{2\pi} \right)^2 \right] \frac{2\pi}{l_0} s^2 X_0(s) + C \left(\frac{l_0}{2\pi} \right)^2 \frac{2\pi}{l_0} s X_0(s) \quad (10)$$

按照各式输入输出关系,以滑块位移为输出量 $X_0(s)$,直流伺服电动机转角为输入量 $\theta_i(s)$ 的传动系统结构如图 4 所示。

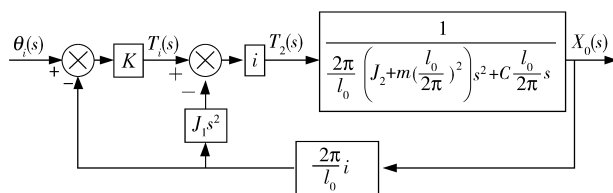


图 4 无级变速器传动机构动态结构图

Fig. 4 Dynamic structural diagram of CVT mechanical driving mechanism

3 PID 控制策略

采用 Matlab/Simulink 进行控制策略的时域仿真,进入 Simulink 操作环境提取仿真模块,根据系统伺服电动机、脉宽调制环节、无级变速机构的模型,绘制仿真系统结构如图 5 所示。

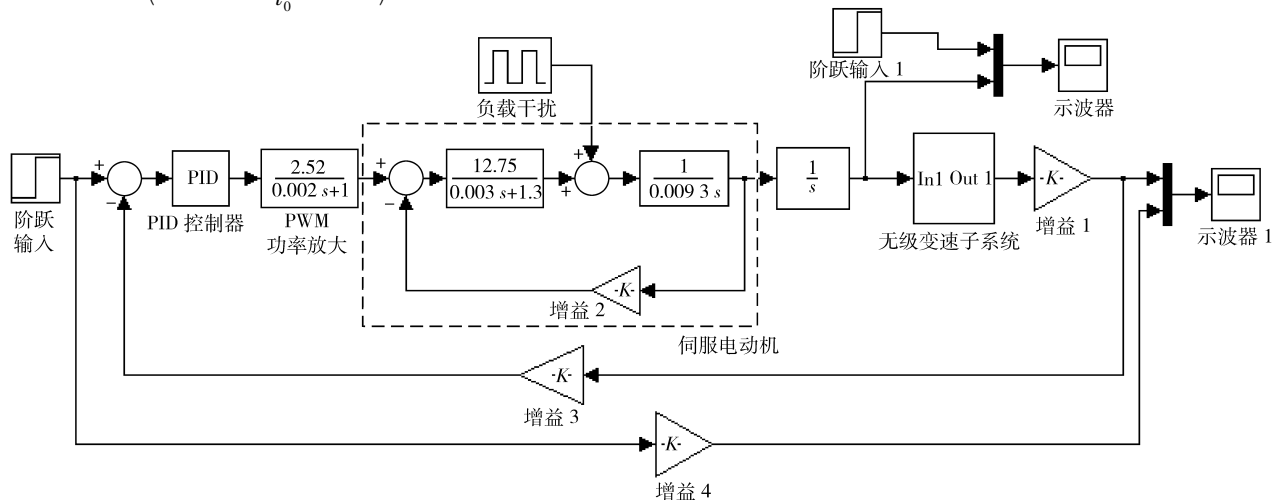


图 5 控制系统 Simulink 仿真结构图

Fig. 5 Simulation block diagram of the control system

其中,PID 控制模块的 Simulink 封装内部结构如图 6 所示。

3.1 PID 参数的整定

控制参数整定是在采用 PID 控制结构的条件下,调整其参数 K_p 、 K_i 、 K_d 使闭环系统的控制品质满足所需要的性能,从而使系统达到最优^[15]。

PID 的控制规律为

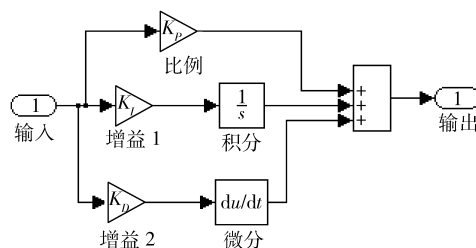


图 6 PID 控制器内部结构

Fig. 6 Internal structure of PID controller

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (11)$$

式中 $e(t)$ ——控制偏差,作为 PID 控制器的输入

$u(t)$ ——PID 控制器的输出

K_p ——比例系数 T_I ——积分时间常数

T_D ——微分时间常数

相应的传递函数为

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad (12)$$

按照临界比例度法对 PID 控制的参数进行整定,根据对象在临界振荡时响应曲线的参数确定比例度 $\delta_k = 9.26\%$,振荡周期 $T_k = 1.5$ s,由表 1 得到控制策略的整定参数 $K_p = 6.32$ 、 $K_D = 7.2$ 、 $K_I = 4.05$ 。

表 1 临界比例度整定控制器参数

Tab.1 Parameters of critical proportioning method tuning controller

控制器类型	比例度 δ	积分时间 T_i	微分时间 T_d
P	$2\delta_k$	∞	0
PI	$2.2\delta_k$	$0.833T_k$	0
PID	$1.7\delta_k$	$0.50T_k$	$0.125T_k$

3.2 PID 控制策略性能分析

3.2.1 跟踪性能分析

采用阶跃信号模拟输入传动比和负载转矩,分别进行系统空载(负载转矩 $T_L = 0$)和带载(负载转矩 $T_L = 1$ N·m)动态仿真,传动比为 $i = 0.2$ 时,空载跟随仿真结果如图 7a 所示,由仿真曲线可知,PID 控制策略系统的性能指标超调量为 15%,调整时间为 3.5 s,稳态误差为 0;无 PID 控制系统的性能指标超调量为 72.5%,调整时间为 5 s,稳态误差为 3.8%,对比性能指标可以看出 PID 控制策略系统超调明显减小、振荡消失、过渡过程时间缩短、跟随精度提高。带载跟随仿真结果如图 7b 所示,PID 控制策略系统的性能指标超调量为 17%,调整时间为 3.5 s,稳态误差为 0;无 PID 控制系统的动态指标超调量 82.2%,调整时间为 6 s,稳态误差为 3.8%,可以看出 PID 控制策略系统带负载运行时,系统的性能指标超调量变化幅度很小,调整时间和稳态误差保持不变,说明 PID 控制策略系统具有更强的带负载能力。

3.2.2 抗干扰性能分析

干扰脉冲仿真主要检测系统抗阻力干扰的能力,即在仿真 5 s 时,突加持续时间为 0.5 s,转矩为 2 N·m 的脉冲信号模拟负载扰动,仿真曲线如图 8

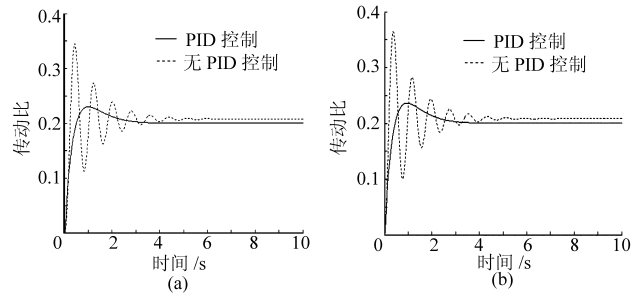


图 7 跟踪阶跃输入响应曲线

Fig.7 Response curves of tracking step input

(a) 系统空载 (b) 系统带载

所示。仿真结果表明,无 PID 控制系统传动比变化为 57.5%,振荡频繁,说明系统抗干扰能力较差,恢复时间长,超调量大。PID 控制策略的系统传动比变化为 8%,振荡较小,说明 PID 控制策略的系统抗阻力干扰能力增强,恢复时间短,超调量小。对比可以看出,PID 控制策略使系统抗干扰能力明显提高。

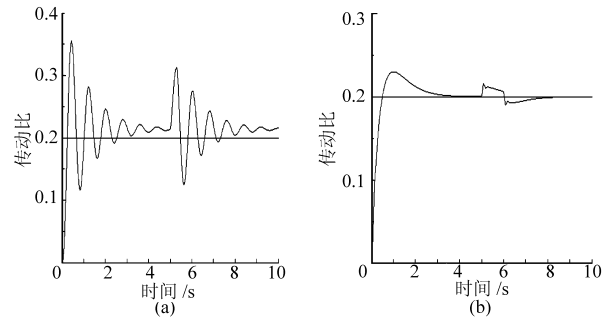


图 8 负载扰动下的响应曲线

Fig.8 Response curves under load disturbance

(a) 无 PID 控制 (b) PID 控制策略

3.2.3 伺服电动机性能分析

伺服电动机是控制系统的驱动装置,是将电信号转变成机械运动的关键元件,系统有偏差时,伺服电动机调整传动比,系统稳态运行时伺服电动机转速为零。对比执行电机在两种控制方式情况下的跟踪性能和抗干扰性能仿真曲线如图 9 所示,可以看出采用 PID 控制策略的系统伺服电动机调整时间缩短了,系统调整能力更强,振荡减小,抑制干扰能力提高。

3.3 施肥试验

将 PID 控制策略变量施肥控制系统安装在变量施肥播种机上,进行施肥试验。试验地点:黑龙江省宝清县八五二农场,播种机类型:2BJ-6W 型变量施肥播种机,试验用肥料:磷酸二铵,配套动力:东方红-802。施肥变量范围:110~290 kg/hm²。

(1) 常量施肥结果分析

设定施肥量为 110、200、290 kg/hm²,分别对两种控制方式的变量施肥播种机进行常量试验,得到实际施肥量如表 2 所示。

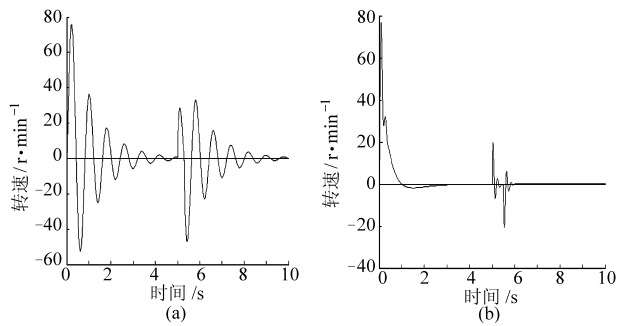


图 9 伺服电动机的调整曲线

Fig. 9 Adjustment curves of direct current servo motor

(a) 无 PID 控制 (b) PID 控制策略

表 2 常量施肥试验结果

Tab. 2 Results of fixed-rate fertilization experiment

设定量 /kg·hm ⁻²	无 PID		PID	
	实际量/ kg·hm ⁻²	误差 /%	实际量/ kg·hm ⁻²	误差 /%
110	122.8	11.64	113.2	2.90
200	221.1	10.55	194.1	2.95
290	317.4	9.45	294.8	1.66

由表 2 可以看出 PID 控制策略系统的施肥误差远小于无 PID 控制系统的施肥误差,说明采用 PID 控制策略的系统,稳态性能得到显著提高。

(2) 变量施肥结果分析

设定施肥量从 110 kg/hm² 跃变到 200 kg/hm², 分别记录两种系统动态调整过程中的施肥量,得到实际施肥曲线如图 10 所示。由图可见,无 PID 控制

系统的过渡过程振荡严重、调整时间长,而 PID 控制策略系统的过渡过程迅速而平稳,这表明采用 PID 控制策略的变量施肥系统,动态性能得到明显改善。

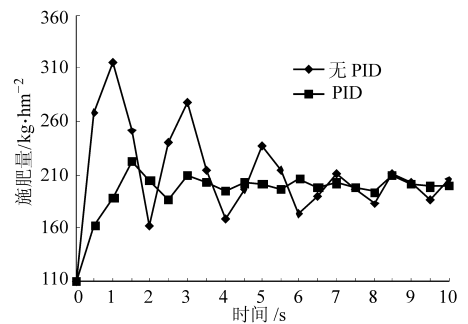


图 10 变量施肥曲线

Fig. 10 Curves of variable rate fertilization

4 结论

(1) 建立了变量施肥控制系统的数学模型、利用 Matlab/Simulink 仿真工具,采用临界比例度法对 PID 控制策略的参数进行整定,实现变量施肥系统控制参数的优化。

(2) 采用 PID 策略的控制系统,稳态精度高,提高了变量施肥的准确性;动态响应快、超调小,改善了变量施肥的快速性;抗负载干扰能力强,能够更好地适应田间作业环境。

(3) PID 控制策略变量播种机的施肥性能得到明显提高,试验验证了 PID 控制策略的优越性,为进一步探讨变量施肥播种机的国产化打下了基础。

参 考 文 献

- 于英杰,张书慧,齐江涛,等. 基于传感器的变量施肥机定位方法[J]. 农业机械学报,2009,40(10):165~168.
Yu Yingjie,Zhang Shuhui,Qi Jiangtao, et al. Positioning method of variable rate fertilizer applicator based on sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):165~168. (in Chinese)
- Gowda P H, Mulla D J, Larson W E. Environmental benefits of precision farming-a modeling case study [C]//2005 ASABE Annual International Meeting, Paper Number 051042.
- 孙立民,王福林. 变量播种施肥技术研究[J]. 东北农业大学学报,2009,40(3):115~120.
Sun Limin, Wang Fulin. Research on variable rate seeding and fertilization technology [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009, 40(3):115~120. (in Chinese)
- 牛晓颖,钱东平,王秀,等. 基于归一化植被指数的变量施肥控制系统研究[J]. 河北农业大学学报,2005,28(2):94~98.
Niu Xiaoying, Qian Dongping, Wang Xiu, et al. Research on control system of variable rate fertilizer applicator in precision agriculture based on NDVI [J]. Journal of Agricultural University of Hebei,2005,28(2):94~98. (in Chinese)
- 林昌华,唐群峰,唐树梅. 自动变量施肥技术的研究与应用现状[J]. 华南热带农业大学学报,2006,12(2):76~79.
Lin Changhua, Tang Qunfeng, Tang Shumei. The research and application prospect of precise fertilization techniques [J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture,2006,12(2):76~79. (in Chinese)
- 房世波,杨武年,潘剑君,等. GIS、RS 和 GPS 支持下的精确施肥理论技术及展望[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2003,30(6):603~607.
Fang Shibo, Yang Wunian, Pan Jianjun, et al. Technology and theories of site-specific fertilization and its prospect supported by GIS, RS and GPS [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition,2003,30(6):603~607. (in Chinese)
- 耿向宇,李彦明,苗玉彬,等. 基于 GPRS 的变量施肥机系统研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):164~167.

- Geng Xiangyu, Li Yanming, Miao Yubin, et al. Development of variable rate fertilizer applicator based on GPRS [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11):164~167. (in Chinese)
- 8 陈立平, 黄文倩, 孟志军, 等. 基于 CAN 总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8):101~105.
Chen Liping, Huang Wenqian, Meng Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8):101~105. (in Chinese)
- 9 孟志军, 赵春江, 刘卉. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2009, 30(4):338~342.
Meng Zhijun, Zhao Chunjiang, Liu Hui. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(4):338~342. (in Chinese)
- 10 邵利敏, 王秀, 牛晓颖, 等. 基于 PLC 的变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11):84~87.
Shao Limin, Wang Xiu, Niu Xiaoying, et al. Design and experiment on PLC control system of variable rate fertilize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11):84~87. (in Chinese)
- 11 张书慧, 马成林, 杜巧玲, 等. 精确农业自动变量施肥机控制系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1):113~116.
Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Du Qiaoling, et al. Design of control system of variable rate fertilizer applicator in precision agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1):113~116. (in Chinese)
- 12 王新忠, 王熙, 汪春, 等. 黑龙江垦区大豆变量施肥播种应用试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):143~146.
Wang Xinzhong, Wang Xi, Wang Chun, et al. Application test of soybean sowing by variable fertilization seeder in Heilongjiang reclamation areas [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5):143~146. (in Chinese)
- 13 Camp C R, Sadler E J, Evans D E, et al. Variable-rate, digitally controlled metering device [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(1):39~44.
- 14 Thomson S J, Smith L A, Hanks J E. Evaluation of application accuracy and performance of a hydraulically operated variable-rate aerial application system [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(3):715~722.
- 15 何衍庆. 控制系统分析、设计和应用——MATLAB 语言的应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
- 16 李恩光. 机电伺服控制技术 [M]. 上海:东华大学出版社, 2003.
- 17 苑士华, 魏超, 胡纪滨. 排量伺服系统对液压机械无级变速器动态特性的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7):27~31.
Yuan Shihua, Wei Chao, Hu Jibin. Influence of displacement servo system on dynamic behavior of hydro-mechanical transmission [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):27~31. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 135 页)

- 2 储伟. 催化工程 [M]. 成都:四川大学出版社, 2006:55~60.
- 3 王家铭. 市场信息 [J]. 中国食品用化学品, 1997(4):28~40.
- 4 宋兰, 张敏, 李良. 大豆卵磷脂氢化催化剂的筛选 [J]. 食品科学, 2008, 29(12):350~352.  
Song Lan, Zhang Min, Li Liang. Screening of catalyst for hydrogenation soy lecithin [J]. Food Science, 2008, 29(12):350~352. (in Chinese)
- 5 卢行芳, 卢荣. 天然磷脂产品的加工及应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004:168~174.
- 6 Boehm H P. Chemical identification of surface groups [J]. Advances in Catalysis, 1996, 16:179~274.
- 7 Noh J, Schwarz J A. Hydrogen storage on speractivated carbon at refrigeration temperatures [J]. Carbon, 1990, 28(5):675~676.
- 8 丁春黎, 朱永娟, 顾薇. 对浸渍法制备 Pd/C 催化剂表面积影响因素的讨论 [J]. 吉林工学院学报, 2001, 22(1):4~6.  
Ding Chunli, Zhu Yongjuan, Gu Wei. A discussion on the influence of surface area of the Pd/C catalyst prepared by soaking method [J]. Journal of Jilin Institute of Technology, 2001, 22(1):4~6. (in Chinese)
- 9 许越. 催化剂设计与制备工艺 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003:248~249.