

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.009

深施型液态肥变量施肥控制系统*

郎春玲^{1,2} 王金武¹ 王金峰¹ 何剑南¹ 郝晓焕³

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江科技学院计算机与信息工程学院, 哈尔滨 150027;

3. 山推工程机械股份有限公司, 济宁 272073)

摘要: 以深施型液态施肥机为依托, 采用单片机作为核心处理器, 以电磁比例调节阀为执行部件, 设计了深施型液态变量施肥控制系统。设计与硬件配套的上位机软件, 用于采集数据与发送命令。喷肥针施肥量控制误差台架试验结果表明, 该系统可实现深施型液态变量施肥, 施肥误差不超过 0.5 mL/次, 满足液态变量施肥作业要求。

关键词: 液态肥施肥机 变量施肥 控制系统 单片机

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0043-05

Variable Fertilizer Control System for Deep-fertilization Liquid Fertilizer Applicator

Lang Chunling^{1,2} Wang Jinwu¹ Wang Jinfeng¹ He Jiannan¹ Xi Xiaohuan³

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Computer and Information Technology, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China

3. Hill Pushed Engineering Machinery Co., Ltd., Jining 272073, China)

Abstract: A control system for variable rate fertilization, which depends on deep-fertilization liquid fertilizer applicator, was introduced. The single chip microcomputer was used as core processor and electromagnetic proportion regulator valve was used as execution unit. Software was designed for selecting data and sending commands. The test results in the test-bed showed that the system can complete the control of variable rate fertilization and the error of the variable fertilizing was less than 0.5 mL in each time, which meets the liquid fertilizer variables requirement.

Key words: Liquid fertilizer applicator Variable rate fertilizing Control system Single chip microcomputer

引言

液态肥是含一种或一种以上农作物生长所需要的营养元素的液体产品^[1], 因其生产费用低、肥效高、易吸收、节支增产效果显著、施肥方式方便迅速以及施用过程中可以根据测土施肥方案加入土壤所缺少的微量元素等优点得到了广泛应用。变量施肥技术是精准农业的重要组成部分, 可根据不同地区、不同土壤类型以及土壤中各种养分的盈亏情况、作

物类型和产量水平, 将 N、P、K 等多种可促进作物生长的微量元素与有机肥加以科学配方, 实现按需施肥^[2-4]。现阶段对变量施肥技术的控制系统研究, 主要针对固态肥的按需施用, 而液态肥控制系统局限于对农作物的叶面喷洒方式。本文以东北农业大学研究的深施型液态施肥机为依托, 设计低成本的适合机具使用的液态肥变量施肥控制系统。控制系统以单片机为控制单元以电磁比例调节阀为执行部件, 并通过试验验证其可行性。

收稿日期: 2012-02-27 修回日期: 2012-04-02

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2010232511002、20112325110006)

作者简介: 郎春玲, 博士生, 黑龙江科技学院讲师, 主要从事精准农业与农业机械智能控制研究, E-mail: langchun_@163.com

通讯作者: 王金武, 教授, 博士生导师, 主要从事田间机械与机器可靠性研究, E-mail: jinwu@163.com

1 液态变量施肥实施过程

变量施肥整体布局如图1所示。上位机接收GPS定位数据,通过上位机的变量施肥控制专用软件对位置数据进行处理,并对当前位置进行网格识别,结合地理信息系统读取数据库中的施肥量数据,经施肥公式计算出电磁比例调节阀所需电压(变量施肥数据),通过USB口将其发送给单片机系统。单片机系统执行命令,对电磁比例调节阀进行电压控制。电压不同,电磁比例调节阀的开度不同,进而改变施肥管路的流量,以达到变量施肥的目的。

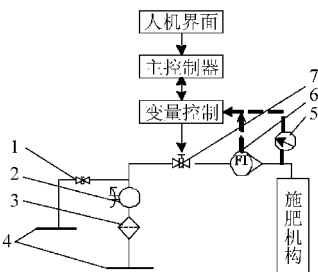


图1 变量施肥整体布局

Fig. 1 Variable fertilization overall layout diagram

1. 安全阀 2. 柱塞泵 3. 过滤器 4. 液肥箱 5. 压力表 6. 流量计 7. 电磁比例调节阀

为了实现变量施肥,将电磁比例调节阀置于施肥机械的主管路中。电磁比例调节阀实时接收单片机

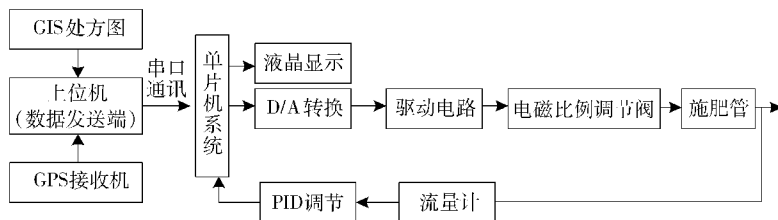


图2 液态变量施肥控制系统结构框图

Fig. 2 System structure of liquid fertilizer control system

执行部分为电磁比例调节阀,其接收经单片机D/A转换后的电压信号。电磁比例调节阀接收0~10V直流电压。

系统在工作过程中,使用流量计检测此时施肥管路中的流量是否达到上位机给定的预设值,如果没有达到预设值,通过流量计反馈到单片机系统中,运用增量式PID调节算法继续调节,以达到精确控制施肥量的目的。

2.2 系统方案

根据系统要求,采用闭环控制法对电磁比例调节阀进行控制。由自动控制系统构成可得偏差方程为

$$e(t) = u_0(t) - u(t) \quad (1)$$

式中 $e(t)$ ——偏差值

$u_0(t)$ ——设定值,即此位置理想的施肥值

机信号,响应速度快,能够满足喷肥针扎入土穴喷肥时间0.354s的要求。定性分析控制系统可知,其响应时间为0.2s,稳定性时间为0.6s。因此,选用德国Burkert公司生产的8603型控制器与2835型比例调节阀,其响应时间为0.1s,接收范围为0~10V直流电压。当电压不超过1V时,阀为闭合状态;当电压为10V时,阀为全开状态;当电压在1~10V之间时,阀的开度随着电压的增大而增大。

2 液态变量施肥控制系统

2.1 系统构成

液态变量施肥控制系统如图2所示,分为控制部分与执行部分,由GPS接收机、上位机、变量施肥控制器和电磁比例调节阀等构成。

控制部分的核心处理器选用单片机STC89C52RC。单片机带有8kB闪烁可编程可擦除只读存储器的CMOS8位微处理器。该单片机与工业标准的MCS-51指令集和输出管脚相兼容。由于将多功能8位CPU和闪烁存储器组合在单个芯片中,是一种高效微控制器,其为很多嵌入式控制系统提供了一种灵活性高且价廉的方案。控制部分主要完成电磁比例调节阀的驱动、LCD(Liquid crystal display)的显示和控制算法的实施。

$u(t)$ ——采样值,即当前位置的施肥值

系统由PID调节控制器与电磁比例调节阀组成,将 $e(t)$ 按比例、积分、微分通过线性组合构成控制量 $e_a(t)$,对电磁比例调节阀进行控制。控制器的输入、输出关系可描述为

$$e_a(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

式中 $e_a(t)$ ——校正后的偏差值,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

本系统采用了增量型PID算法,利用 $\Delta u(n)$ 来调节控制电磁比例调节阀。设 T 为采样周期, k 为采样序号, $k=0,1,2,\dots,n$,得到差分方程为

$$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = K_p(1 + K_i + K_d)e(n) - K_p(1 + 2K_d)e(n-1) + K_pK_d e(n-2) \quad (3)$$

其中

$$K_i = \frac{T}{T_i} \quad K_d = \frac{T_d}{T}$$

式中 $\Delta u(n)$ ——PID 调节增量

K_i ——积分系数 K_d ——微分系数

$e(n)$ ——前 1 次误差

$e(n-1)$ ——前 2 次误差

$e(n-2)$ ——前 3 次误差

控制系统如图 3 所示。

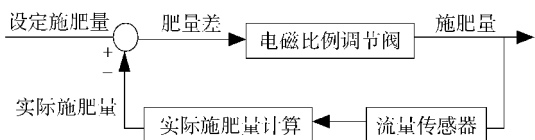


图 3 变量施肥控制原理

Fig. 3 Control principle of variable rate fertilization

根据设计的控制系统,由 Ziegler - Nichols 算法得到 PID 控制参数。系统采用继电器反馈方法测取闭环阶跃响应特性,如图 4 所示。

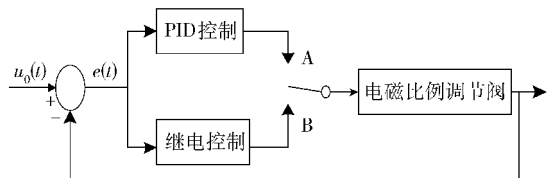


图 4 继电器反馈自动整定结构图

Fig. 4 Automatic setting structure of relay feedback

系统设置 2 种模态,即测试模态和调节模态。首先将开关拨向 B 位置,系统处于测试模态,测试特征参数:临界振荡角频率 ω_c (或临界振荡周期 $T_c = 2\pi/\omega_c$) 和临界振荡增益 K_c 。然后将开关拨向 A 位置,系统进入调节模态,由特征参数 ω_c 和 K_c 计算出 PID 参数,并进入控制过程。若系统的测试发生变化,则需重新进入测试模态进行测试,测试完成后,再回到调节模态进行控制,系统响应曲线如图 5 所示。由系统阶跃响应特性得 K_c 为 2.5, T_c 为 0.2 s, 由表 1 确定控制策略的整定参数 K_p 为 1.5, K_i 为 0.1, K_d 为 0.024。

2.3 系统硬件模块

系统硬件电路图如图 6 所示。硬件模块以单片机模块为控制核心,控制通信模块、电源稳压模块、

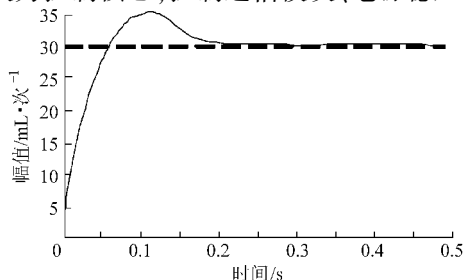


图 5 系统阶跃响应曲线

Fig. 5 System step response curve

表 1 Ziegler - Nichols 整定控制器参数

Tab. 1 Parameters of Ziegler - Nichols turning controller

控制器类型	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_c$	∞	0
PI	$0.4K_c$	$0.8K_c$	0
PID	$0.6K_c$	$0.5T_c$	$0.12T_c$

TLC5620 数模转换模块、电磁比例调节阀驱动模块、LCD 显示模块和流量采集模块协调工作,以达到高精度控制变量施肥的目的。

(1) 通信模块

电路采用 PL2303 芯片,实现上位机与单片机之间的通信。PL2303 采用 28 脚贴片 SOIC 封装,工作频率为 12 MHz,符合 USB 1.1 通信协议,可以直接将 USB 信号转换成串口信号,波特率为 75 ~ 1 228 800 b/s,有 22 种波特率可以选择,并支持 5、6、7、8、16 共 5 种数据比特位,符合本系统串口信息的要求。

(2) 单片机模块

单片机模块为 STC89C52RC 芯片,其工作晶振为 11.059 MHz,内部有 5 个中断源、2 个 16 位定时器/计数器,外部设有 32 路可编程 I/O 线,保证了外围复杂电路的正常工作。单片机模块主要对上位机发送数据和流量计的反馈数据进行 PID 调节,通过实时监控输出变量与输入变量数据,对数据进行实时分析,保证施肥的精确性与准确性。另外,单片机模块负责将电磁比例调节阀的工作状态实时输出,方便操作者进行控制。

(3) D/A 转换与驱动模块

系统采用 D/A 转换方式来控制输出电压,D/A 转换模块芯片采用 4 通道 8 位数模转换器 TLC5620,单片机模块与其他模块通信时可对 TLC5620 进行锁定,保证了输出的精度。与传统的 PWM 电压调节方式和数字电位器调节方式相比具有输出准确、响应迅速和系统可靠性高等优点。输出电压为

$$V_0 = V_1 \frac{c_1}{256} (1 + r_1) \quad (4)$$

式中 V_0 ——输出电压, V

V_1 ——参考标准电压, V

c_1 ——数字控制量

r_1 ——放大校正增量

计算得出系统输出电压精度可达到 0.03 V。

后级驱动电路选用低噪声,非斩波稳零的双极性运算放大器 OP07。电磁比例调节阀工作电流为 60 ~ 100 mA,因此驱动芯片的驱动电流至关重要。OP07 具有输入偏置电流低 (± 2 nA)、开环增益高

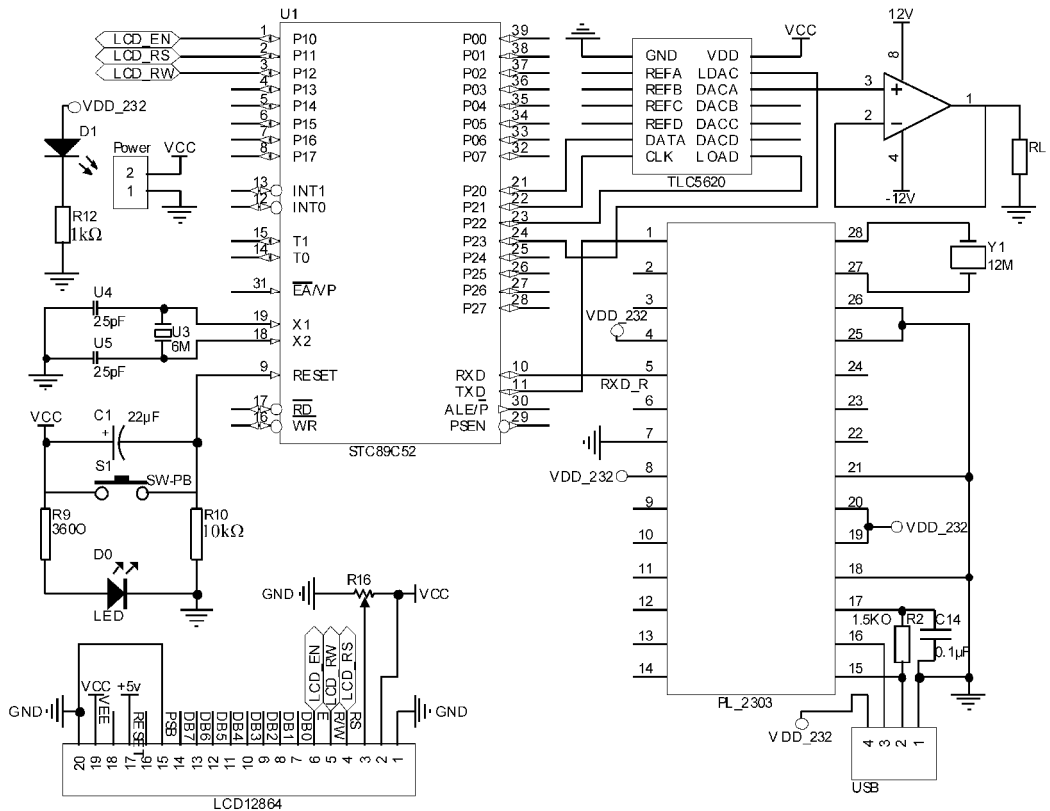


图6 控制系统电路模块图

Fig. 6 Control system circuit module chart

(300 V/mV)和驱动电流大等特点。电磁比例调节阀的开度由控制信号电压(直流1~10 V)控制。系统设计时将1~10 V电压分成255个等级,计算出响应的数字控制量,发送给TLC5620的DATA端,经过OPO7电流放大后,驱动电磁比例调节阀。

(4) LCD显示模块

系统显示的字符有汉字、数字和单位,其中汉字是16×16点阵,数字为8×16点阵。为了显示整齐,单位采用16×16点阵字。LCD显示屏用来实时显示单位面积的施肥量和实际瞬时施肥量。

(5) 流量采集模块

喷肥针施肥量采用MKULC2100型电磁流量计测量(大连迈克流体公司),其主要性能参数:工作电压24 V,输出幅值为5 V的方波脉冲信号,公称口径15 mm,流量检测范围为0.3~6.0 m³/h,检测精度为0.5%。流量计检测信号送STC89C52RC的P2.7口,由51单片机读取。

2.4 系统软件

系统软件包括上位机控制软件和单片机执行软件。上位机控制软件系统选用VB 6.0编写,完成的主要功能是根据输入机具当前点的施肥量数据,标定试验得出的施肥量与电磁比例调节阀电压之间的关系式为

$$V_c = 1.10201 - 0.050761q + 0.012329q^2 \quad (5)$$

式中 q ——喷肥针施肥量, mL/次

V_c ——电动调节阀控制电压, V

通过计算得出电磁比例调节阀的控制电压,将其发送给单片机。单片机接收控制电压,同时检测流量计的反馈信号,通过增量式PID控制算法,执行对施肥机构的闭环控制。单片机软件子程序包括LCD液晶显示子程序、串行通信子程序、流量采集反馈子程序、D/A转换子程序和PID参数整定子程序。由于子程序模块较多,所以将流量采集反馈模块的程序优先级设置最高,以保证系统的正常运行与施肥量的精确控制。闭环程序流程图如图7所示。

流量采集模块程序设计为:定义单精度型变量 q 为采集流量计脉冲信号,采样时间间隔为0.1 s。定义void init-llj(void)函数初始化定时器0,设置外部中断1上升沿触发。启动定时器0和外部中断源1记录脉冲数,0.1 s后关闭定时器0和外部中断源1,单片机读取中断1的计数值换算处理后赋值于 q 。

3 试验结果及分析

(1) 试验条件

为了验证系统设计的可行性,根据设计的电路原理,搭建了实际的电路,并在实验室现有的试验台上进行了试验。试验台使用变频器控制电动机,实

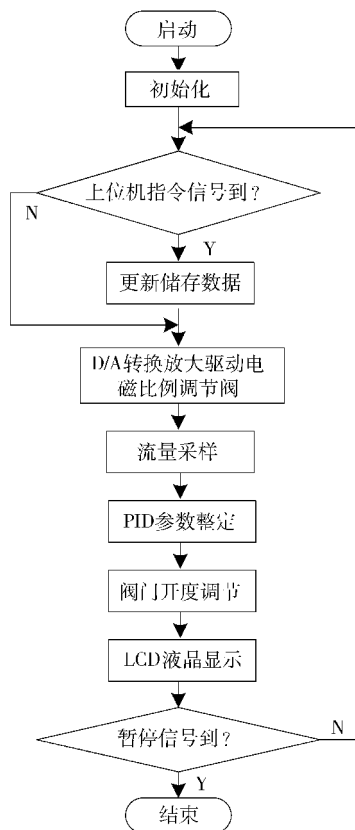


图7 闭环程序流程

Fig.7 Flow chart of closed-loop program

现施肥机的行走和分配器的分配,电动机调速方式均为变频调速。使用柱塞泵为整个施肥管路供压,当系统主管路压力达到0.4 MPa时,系统工作正常。

(2) 试验方法

在上位机软件子系统中预设施肥量后,启动变频器、控制器和电磁比例调节阀。变频器的频率设为1.78 Hz,试验台车速度固定为0.55 m/s,试验测区区长6.5 m,设置每间隔0.315 m为一个施肥点,每一施肥预设值重复施肥10次,测量预设施肥量与实际施肥量的误差。试验中用流量传感器测量累计施肥量,取平均值得到每次的施肥量。

(3) 试验结果及分析

试验数据如表2所示。从表2可以看出,施肥精度最低可达95.00%,设定的施肥量与测得的施肥量误差最小为0.2 mL/次,最大为0.5 mL/次,表明系统软硬件设计合理。产生误差的主要原因是电磁比例调节阀的动作滞后。由于电磁比例调节阀动作滞后属机械制造中不可避免的固有特性,因此为提高系统对施肥机具施肥量控制的准确率,可选择更高性能的电磁比例调节阀,缩短电磁比例调节阀对控制指令的响应时间;其次是通过大量的试验,运用软件的手段对其进行修正。

表2 控制系统试验数据及分析

Tab.2 Test data and results of control system

设定施肥量 /mL·次 ⁻¹	实测施肥量 /mL·次 ⁻¹	误差 /mL·次 ⁻¹	精度 /%
26.0	25.8	0.2	99.23
26.4	26.0	0.4	98.48
26.7	26.3	0.4	98.50
25.9	25.4	0.5	98.06
24.3	23.9	0.4	98.35
20.7	20.2	0.5	97.58
17.0	16.5	0.5	97.06
13.5	13.0	0.5	96.29
10.0	9.5	0.5	95.00

4 结论

(1) 以STC89C52RC单片机为核心,以电磁比例调节阀为执行部件设计了深施型液态变量施肥控制系统,在标定试验中,得到施肥量与电磁比例调节阀控制电压之间的关系,实现了深施型液态施肥机作业过程中根据设定的施肥量进行自动变量施肥,达到了液态变量施肥的目的。

(2) 试验结果表明,该系统设计合理、使用方便,变量调节的误差不超过0.5 mL/次,施肥精度最低可达95.00%,满足液态变量施肥作业精度要求。

参 考 文 献

- 王金武, 纪文义, 冯金龙, 等. 液态施肥机的设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 158 ~ 159.
Wang Jinwu, Ji Wenyi, Feng Jinlong, et al. Design and experimental investigation of the liquid fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 158 ~ 159. (in Chinese)
- 王金峰, 王金武. 液态变量施肥机两种不同变量机构的研究[J]. 农机化研究, 2007(1): 123 ~ 124.
Wang Jinfeng, Wang Jinwu. Research on two different kinds of variable mechanism of liquid variable fertilizer applicator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(1): 123 ~ 124. (in Chinese)
- 刘阳春, 张小超, 伟利国, 等. 一种变量施肥技术的实现及其台架试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 160 ~ 162.
Liu Yangchun, Zhang Xiaochao, Wei Liguoguo, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 160 ~ 162. (in Chinese)
- 王金峰. 深施型液态施肥关键部件的工作机理与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- 张书慧, 马成林, 吴才聪, 等. 一种精确农业自动变量施肥技术及其实施[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 129 ~ 131.
Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Development and application of a variable rate fertilizer applicator for precision agriculture [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 129 ~ 131. (in Chinese)

- 2012,43(10):41~46,71. (in Chinese)
- 9 叶秉良,俞高红,陈志威,等. 偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构的运动学建模与参数优化[J]. 农业工程学报,2011,27(12):7~12.
Ye Bingliang, Yu Gaohong, Chen Zhiwei, et al. Kinematics modeling and parameters optimization of seedling pick-up mechanism of planetary gear train and non-circular gear[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):7~12. (in Chinese)
- 10 滕弘飞,王奕首,史彦军. 人机结合的关键支持技术[J]. 机械工程学报,2006,42(11):1~9.
Teng Hongfei, Wang Yishou, Shi Yanjun. Key supporting techniques of human-computer cooperation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(11):1~9. (in Chinese)
- 11 路甬祥,陈鹰. 人机一体化系统科学体系和关键技术[J]. 机械工程学报,1995,31(1):1~7.
Lu Yongxiang, Chen Ying. Academic architecture and key techniques of the humachine system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1995,31(1):1~7. (in Chinese)
- 12 俞高红,刘炳华,赵匀,等. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构运动机理分析[J]. 农业机械学报,2011,42(4):53~57.
Yu Gaohong, Liu Binghua, Zhao Yun, et al. Kinematic principle analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears in automatic vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):53~57. (in Chinese)
- 13 俞高红,谢仁华,赵匀,等. 椭圆齿轮传动后插旋转式分插机构运动分析与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(5):45~48,29.
Yu Gaohong, Xie Renhua, Zhao Yun, et al. Kinematic analysis and experiment of backward rotary transplanting mechanism with elliptical gears transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5):45~48,29. (in Chinese)
- 14 俞高红,马成稳,孙良,等. 插秧机后插旋转式宽窄行分插机构设计与优化[J]. 农业机械学报,2012,43(8):50~55,65.
Yu Gaohong, Ma Chengwen, Sun Liang, et al. Design and optimization of backward rotary transplanting mechanism in wide-narrow row planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):50~55,65. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 47 页)

- 6 翟长远,朱瑞祥,随顺涛,等. 车载式变量施药机控制系统设计与试验 [J]. 农业工程学报,2009,25(8):123~124.  
Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, Sui Shuntao, et al. Design and experiment of control system of variable pesticide application machine hauled by tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8):123~124. (in Chinese)
- 7 张迎新,雷道振,陈胜,等. 单片微型计算机原理、应用及接口技术[M]. 北京:国防工业出版社,2004:96~98.
- 8 洪志全,洪学梅. 现代计算机接口技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008:82~84.
- 9 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):158~160.  
Liang Chunying, Yi Shujuan, Wang Xi, et al. PID control strategy of the variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):158~160. (in Chinese)
- 10 于永,戴佳,常江. 51 单片机 C 语言常用模块与综合系统设计实例精讲[M]. 北京:电子工业出版社,2007:74~131.
- 11 王利霞,张书慧,马成林,等. 基于 ARM 的变量喷药控制系统设计 [J]. 农业工程学报,2010,26(4):115~116.  
Wang Lixia, Zhang Shuhui, Ma Chenglin, et al. Design of variable spraying system based on ARM [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(4):115~116. (in Chinese)
- 12 张书慧,齐江涛,廖宗建,等. 基于 CPLD 的变量施肥控制系统开发与应用[J]. 农业工程学报,2010,26(8):200~201.  
Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, Liao Zongjian, et al. Research and application of control system for variable rate fertilizer applicator based on CPLD [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(8):200~201. (in Chinese)
- 13 Sawyer J E. Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer application[J]. Production of Agriculture, 1994, 22(7):195~206.
- 14 王金武,刘亚华,王金峰,等. 全椭圆齿轮行星系液态肥深施机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):60~65,59.  
Wang Jinwu, Liu Yahua, Wang Jinfeng, et al. Optimization design and experiment of liquid-fertilizer applying deep-fertilization mechanism for planetary elliptic gears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):60~65,59. (in Chinese)
- 15 严海军,初晓一. 喉管直径对文丘里施肥器性能影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):359~363.  
Yan Haijun, Chu Xiaoyi. Numerical simulation for influence of throat diameter on Venturi injector performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(4):359~363. (in Chinese)