

PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器设计与测试^{*}

魏新华¹ 蒋 杉² 孙宏伟¹ 徐来齐³

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 合肥师范学院电子信息工程学院, 合肥 230061;
3. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 为实现基于脉宽调制(PWM)间歇喷雾的流量调节式变量喷施控制,以 DSP56F805 数字信号控制器为核心,设计了一种 PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器。控制器有单机和联机两种工作模式,可输出 12 路独立调节的 PWM 信号,实时检测喷雾机组前进速度、隔膜泵输入轴转速、喷杆压力和喷施流量,并采用预测比例控制方法,通过比例溢流阀在线调节喷杆压力。将控制器安装到一台经过改装的商购喷杆式喷雾机上,构建了一套 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统,并进行了系统测试。测试结果表明:PWM 信号有效频率小于等于 5 Hz、流量调节范围大于 10,喷雾机组前进速度检测误差在 ± 0.1 km/h 范围内、隔膜泵输入轴转速检测误差在 ± 1.5 r/min 范围内、喷杆压力检测误差在 ± 0.01 MPa 范围内、喷施流量检测误差在 ± 0.05 L/min 范围内,经 2 s 调节后喷杆压力调节误差在 ± 0.01 MPa 范围内。

关键词: 变量喷施 脉宽调制 控制器 流量调节 喷杆压力

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0087-07

Design and Test of Variable Rate Application Controller of Intermittent Spray Based on PWM

Wei Xinhua¹ Jiang Shan² Sun Hongwei¹ Xu Laiqi³

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230061, China

3. School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In order to implement variable rate application control of intermittent spray based on pulse width modulation (PWM) technology, a blended pulse variable rate application controller was designed with its core part DSP56F805. The controller has two working modes. Operational parameters were set artificially in single mode, and received from upper computer through CAN bus in online mode. The controller can output 12 channels of PWM signal which can be adjusted individually. It also can monitor traveling speed of sprayer, rotational speed of diaphragm pump's input shaft, spray pressure and application flow rates of each boom partition. In addition, the spray pressure can be regulated on-line by predictive control algorithm with proportional relief valve. A variable rate application system was constructed by integration of a modified commercial boom sprayer and the controller, and its performance tests were carried out. Test results showed that the maximal effective frequency of the PWM signal was within 5 Hz, the ratio of flow regulation was more than 10, measuring error was within ± 0.1 km/h for the traveling speed, within ± 1.5 r/min for the rotational speed, within ± 0.01 MPa for the spray pressure and within ± 0.05 L/min

收稿日期: 2012-02-24 修回日期: 2012-06-22

^{*} 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009200)、镇江市农业科技支撑计划资助项目(NY201025)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8号)和江苏省农业装备智能化高技术重点实验室资助项目(BM2009703)

作者简介: 魏新华,副教授,博士,主要从事智能化农业装备和农药变量喷施技术研究,E-mail: wei_xh@126.com

for the flow rate, and regulating error of the spray pressure was within ± 0.01 MPa in a 2 s regulating period.

Key words Variable rate application, Pulse width modulation, Controller, Flow regulating, Spray pressure

引言

常规机动农药喷施作业只能对大块农田进行全面等量喷施,无法做到因地制宜、按需施药,不仅造成大量农药浪费,增加农产品中的农药残留,且对土壤和生态环境造成严重污染。变量喷施技术可根据区域内病虫害害的具体情况按需施药,是施药技术的重要发展方向^[1~2]。目前,变量喷施控制主要有压力调节式、浓度调节式和 PWM 间歇喷雾流量调节式 3 种^[3]。其中,压力调节式的流量调节范围较小,喷雾特性易发生畸变^[4];浓度调节式的系统响应时间较长,尚无法满足实时变量的需要^[5~6];PWM 间歇喷雾流量调节式的系统响应速度快、流量调节范围大,且使用常规喷头即可获得良好的喷雾特性,但其对控制系统要求较高^[7~9]。在 PWM 间歇喷雾式变量喷施技术的研究及应用领域,国外研究较为深入,并已有成熟产品供应市场;而国内研究仍主要集中于概念样机的实验室性能测试上,有关专用控制器及实际样机的研究开发工作才刚刚起步^[10~13]。

本文针对 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统的控制需要,开发专用的 PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器,构建相应的变量喷施系统,并对控制器及变量喷施系统的性能进行测试。

1 PWM 变量喷施系统

1.1 系统工作原理

PWM 变量喷施系统的结构如图 1 所示。事先配制好的一定浓度的农药药液储存在药液箱中。在拖拉机动力输出轴的驱动下,隔膜泵经过滤器吸入药液并将其泵入喷施管路中。溢流阀用于限制系统的喷杆压力。各高速开关电磁阀由 PWM 变量喷施控制器输出的多路独立可调的 PWM 信号分别控制。当电磁阀开启时,药液经电磁阀由喷头喷出;当电磁阀关闭时,喷头停止喷雾。调节电磁阀的启、闭时间之比(即相应 PWM 控制信号的占空比),即可调节对应喷头的实际喷施流量。

为获得稳定的农药施用量,设置喷雾机组前进速度传感器。各喷头在其当前喷施区域内的目标喷施流量为

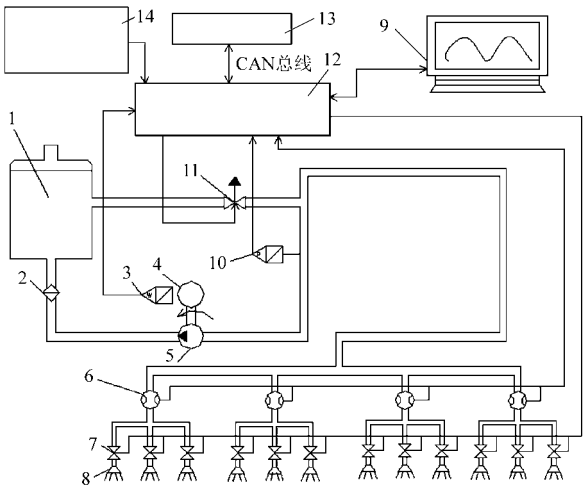


图 1 PWM 变量喷施系统的结构示意图

Fig. 1 Structure of variable rate application system

1. 药液箱 2. 过滤器 3. 隔膜泵输入轴转速传感器 4. 拖拉机动力输出轴 5. 隔膜泵 6. 喷施流量传感器 7. 高速开关电磁阀 8. 喷头 9. 人机对话接口 10. 喷杆压力传感器 11. 比例溢流阀 12. PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器 13. 车载计算机 14. 机组前进速度霍尔传感器

$$q_i = \frac{4Q_{si}Wv}{667cN}$$

(1)

- 式中 q_i ——喷头的目标喷施流量, L/min
 Q_{si} ——当前喷头喷施区域的农药原液设定施用量, mL/hm²
 c ——药液的体积比, mL/L
 W ——喷雾机组的喷幅宽度, m
 N ——喷头个数
 v ——喷雾机组的前进速度, m/s

同时设置喷施流量传感器,以实现各喷杆分区内实际喷施流量的实时监测。

为在不同作业工况下以及总喷施流量发生改变时保持喷杆压力的稳定,溢流阀采用比例溢流阀,并设置喷杆压力传感器和隔膜泵输入轴转速传感器,以实现喷杆压力在线调节。

PWM 变量喷施控制器负责各传感器信号的采集、信息处理以及各个电磁阀和比例溢流阀的控制,并可通过 CAN 总线与喷雾机组的车载计算机通讯,获得 c 和各喷头在其当前喷施区域内的 Q_{si} 等工作参数,以实现基于处方图或基于实时传感器的精确变量施药。

1.2 系统构建

PWM 变量喷施系统在 3WX-200 型悬挂式喷杆喷雾机(北京现代农装科技股份有限公司)的基础上改造而成,喷幅 6 m、喷头 12 个、额定喷雾压力 0.3~0.5 MPa。采用隔膜泵供液,排量 40 L/min、自带手动溢流阀、工作压力可达 1.5 MPa。喷头选用 TR80-05 型圆锥雾喷头(德国,Lechler 公司),最高耐压 2.0 MPa 和 0.5 MPa 下的喷雾流量为 2.5 L/min。

1.2.1 电磁阀

电磁阀选用 6013 型直动式电磁阀(德国, Burkert 公司),常闭、操作电压直流 24 V、工作压力 0~0.8 MPa、孔径 3 mm、对水的流通能力 k_v 为 0.23 m³/h、开启时间 20 ms、关闭时间 30 ms,具有较好的耐高温和耐腐蚀性能。系统上电前,所有电磁阀全部关闭,不会有药液喷出。

1.2.2 比例溢流阀

比例溢流阀选用 DBEE6-1X/50 型先导式比例溢流阀(德国,博世力士乐股份公司),最大流量为 30 L/min、通径 6 mm、最大工作压力 5 MPa、操作电压为直流 24 V、内部自带控制用集成电子元件、控制信号为 0~10 V 电压信号、10% 至 90% 阶跃响应时间约 80 ms、90% 至 10% 阶跃响应时间约 50 ms。系统上电前,比例溢流阀处于最低设置压力状态,以防系统过压或过载。

1.2.3 传感器

为安装方便,在拖拉机驱动轮轮毂上圆周均布 6 个磁钢,并采用 JK8002C 型霍尔式接近开关(南京茶花电子有限公司)检测拖拉机驱动轮转速,以间接实现喷雾机组前进速度的测量。霍尔开关的工作电压为直流 5~24 V、响应频率 100 kHz。隔膜泵输入轴转速的检测也采用 JK8002C 型霍尔式接近开关,并在隔膜泵输入轴上对应安装 1 个磁钢。

喷杆压力检测采用 CYT-101 型压力变送器(北京天宇恒创有限公司),工作电压直流 24 V、量程 0~3 MPa、检测精度 $\pm 0.2\%$ F.S.、4~20 mA 电流输出、响应时间小于等于 1 ms。

喷施流量检测采用 LWGY-6 型液体涡轮流量传感器(北京天宇恒创有限公司),量程 0.1~0.6 m³/h、检测精度 $\pm 0.2\%$ F.S.、4~20 mA 电流输出、工作电压为直流 24 V、耐压 6.3 MPa。

2 PWM 变量喷施控制器硬件

PWM 变量喷施控制器作为整个 PWM 变量喷施系统的测控中心,必须具备以下功能:①具有 12 路独立可调的 PWM 信号输出通道,以分别控制 12 个电磁阀。②具有 1 路 D/A 输出通道,以控制比

例溢流阀。③具有 2 路脉冲信号输入通道,以检测喷雾机组前进速度和隔膜泵输入轴转速。④具有 5 路 A/D 输入通道,以检测喷杆压力和 4 个喷杆分区的实际喷施流量。⑤具有较高的运算速度和较强的计算能力,以进行各传感器检测值、各喷头目标喷施流量、各电磁阀控制信号和比例溢流阀控制信号的快速计算。⑥具有 CAN 总线接口,以实现与车载计算机的数据通讯。⑦具有单机和联机两种工作模式,以适应不同的应用需求。⑧具有人机对话接口,以在单机模式下输入系统工作参数并显示系统的实时工作状态。

为此,PWM 变量喷施控制器的主控芯片选用 DSP56F805 型数字信号控制器(美国,飞思卡尔半导体公司),它具有单周期的 16 位 $\times$ 16 位乘法器,且内部集成有 2 个 4 通道的 12 位 A/D 转换器、2 个 6 路可独立编程的 PWM 组件、4 个通用四元定时器组件、1 个 CAN 2.0B 组件、1 个 SPI 接口、14 路通用 I/O 接口、2 路外部中断输入、31.5 KB(16 位)的程序 FLASH、4 KB 的数据 FLASH 和 2 KB 的引导 FLASH,并具有 16 位的外部扩展总线,从而将数字信号处理器(DSP)强大的数据运算处理能力与微控制器(MCU)丰富的外围测控接口集于一身,只需扩展 D/A 转换等少量外围接口即可满足 PWM 变量喷施控制器的系统需求。

PWM 变量喷施控制器的结构原理如图 2 所示。由于 DSP56F805 为 3.3 V 系统,所以系统中多处设置了电平转换器,以实现 5 V 信号与 3.3 V 信号之间的相互转换。I/V 变换电路中,采用 165 Ω 的精密电阻将 4~20 mA 的电流信号转换为 0.66~3.3 V 的电压信号。D/A 转换器选用 TLC5615(美国,德州仪器),10 位分辨率、SPI 接口串行操作、电压输出。LCD 显示屏选用 TX-G12864K 型液晶模块(天兴光电显示科技有限公司),并行接口、自带中文字库。键盘采用 16 键矩阵式键盘,占用 8 路通用 I/O 口线,4 条列回复线都配置为外部中断输入,键盘可工作于中断和查询 2 种操作方式,16 个按键分别为 10 个数字键、“.”、“确认”、“取消”、“作业”、“停止”和“设置”键。多位开关用于设置单/联机工作模式。固态继电器单独设置在固态继电器板上。

3 PWM 变量喷施控制器软件

PWM 变量喷施控制器软件在 Codewarrior 集成开发环境(美国,飞思卡尔半导体公司)下,使用其 PE(processor expert)软件开发包及 C 语言开发而成。

3.1 系统总工作流程

PWM 变量喷施控制器的主程序流程如图 3 所

3.3 喷杆压力及喷施流量的检测

DSP56F805 可在其 8 个模拟量输入通道中任选几个进行规定次数的顺序循检,循检完成后产生结束中断,各通道的转换结果为其各次循检结果的平均值。在 8 MHz 的晶振频率下,设定 A/D 转换时间为 8.5 μs,循检次数 32 次,则对喷杆压力和 4 个喷施流量信号的最高循检采样频率为 735 Hz。由于 DSP56F805 输出的 A/D 转换值为左移 3 位后的转换结果,所以其满量程输出为 32 768。此外,还可通过设置偏移量来对转换结果进行内部修正,将偏移量设置为 6 552,则可消除 0.66 V 的零点偏移。

CYT-101 型压力变送器为线性输出,经试验标定,其标定公式为

$$p = 3X/26\,216 \tag{2}$$

式中 p ——喷杆压力,MPa

X ——喷杆压力信号的 A/D 转换结果

LWGY-6 型液体涡轮流量传感器也为线性输出,经试验标定,其标定公式为

$$q_{aj} = \frac{25}{78\,648}y_j + \frac{5}{3} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \tag{3}$$

式中 q_{aj} ——第 j 喷杆分区实际喷施流量,L/min

y_j ——第 j 喷杆分区喷施流量信号的 A/D 转换结果

在每个测控循环内,对喷杆压力和 4 个喷杆分区的喷施流量各检测 200 次,并以其各自的平均值作为最终检测值。

3.4 喷雾机组前进速度检测

喷雾机组前进速度检测用霍尔传感器的输出信号接至四元定时器组件 C 的通道 0。喷雾机组的作业速度为 6 ~ 10 km/h、驱动轮直径为 1.3 m,所以驱动轮转速约为 24 ~ 42 r/min,不考虑滑转率,霍尔传感器的输出信号频率约为 2.4 ~ 5.0 Hz。喷雾机组前进速度每两个测控周期检测 1 次。采用四元定时器 C 的 Timer 0 预计数 1 个信号脉冲,并在其计数中断后立即启动四元定时器 C 的 Timer 1 开始计时,接着启动 Timer 0 重新正式计数 1 个脉冲,然后在 Timer 0 正式计数中断后立即停止 Timer 1 计时。Timer 1 的计时值即为霍尔传感器的输出信号周期。喷雾机组的前进速度计算式为

$$v = \frac{1.3\pi}{6T_c}(1 - \delta) \tag{4}$$

式中 T_c ——C 组件 Timer 1 的计时值,s

δ ——驱动轮滑转率

3.5 隔膜泵输入轴转速的检测

隔膜泵输入轴转速检测用霍尔传感器的输出信号接至四元定时器组件 D 的通道 0。拖拉机动力输

出轴转速约为 300 ~ 600 r/min,所以霍尔传感器的输出信号频率约为 5 ~ 10 Hz 左右。隔膜泵输入轴转速信号的周期检测方法与喷雾机组前进速度信号的周期检测方法相同,但使用的是四元定时器 D 的 Timer 0 和 Timer 1。隔膜泵输入转速计算式为

$$n = 60/T_d \tag{5}$$

式中 n ——隔膜泵输入轴转速,r/min

T_d ——D 组件 Timer 1 的计时值,s

3.6 比例溢流阀的控制

DBEE6-1X/50 型先导式比例溢流阀的设定压力与控制信号基本呈线性关系,当所需设定压力为 p_s 时,TLC5615 的对应控制量为

$$d_0 = 1\,024p_s/5 \tag{6}$$

式中 d_0 ——TLC5615 的控制量值,取整

p_s ——比例溢流阀的设定压力,MPa

对喷杆压力采用预测比例控制方法,通过比例溢流阀进行调节。首先根据当前的隔膜泵输入轴转速和各喷头的总目标喷施流量计算比例溢流阀的目标溢流量,然后根据其溢流-压差特性对设定压力进行预调节,最后再根据实测喷杆压力与初始设定压力的差值对喷杆压力进行比例调节。调节规律如下

$$d = d_0 - k_1 \left(\frac{n}{15} - \sum_{i=1}^{12} q_i - 10 \right) - k_2 e \tag{7}$$

式中 d ——TLC5615 的新控制量值,取整

k_1, k_2 ——比例系数

e ——实测喷杆压力与初始设定压力之差,MPa

经试验整定,初始设定压力为 0.5 MPa 时,取 $k_1 = 2.62, k_2 = 135$ 。

4 试验测试

将 PWM 变量喷施系统挂接在上海-50 型拖拉机上,构成变量喷施机组,如图 4 所示。拖拉机驱动轮配套 11-28 橡胶高花纹轮胎。

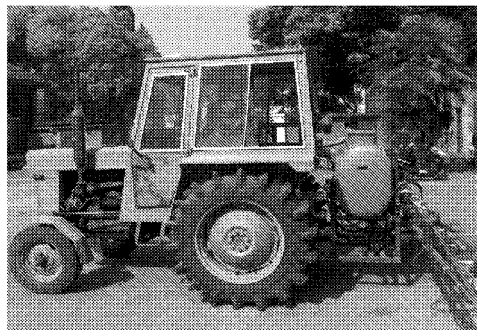


图 4 变量喷施机组

Fig.4 Modified commercial sprayer

4.1 喷雾机组前进速度

试验分别在平坦的水泥路面和旱田中进行。首

先以 6 km/h 左右的速度匀速行驶,测量驱动轮转动 10 圈所驶过的距离,计算得滑转率,并输入 PWM 变量喷施控制器;然后以不同速度匀速行驶 50 m,测量所用时间,计算得实测平均速度,并在行驶过程中每间隔 10 m 记录一次 PWM 变量喷施控制器显示的机组前进速度。测得水泥路面上的滑转率为 4.1%,旱田中滑转率为 12.6%。速度测试结果如表 1 所示。由表 1 可知,在滑转率相对稳定的情况下,喷雾机组前进速度的检测误差在 ± 0.1 km/h 范围内。

表 1 喷雾机组前进速度检测结果

km/h							
水泥路面				旱田			
实测平 均速度	最大显 示速度	最小显 示速度	平均显 示速度	实测平 均速度	最大显 示速度	最小显 示速度	平均显 示速度
4.92	4.93	4.86	4.89	5.17	5.27	5.09	5.12
7.19	7.25	7.17	7.21	6.83	6.89	6.76	6.86
9.23	9.29	9.23	9.26	8.89	8.97	8.80	8.95

4.2 隔膜泵输入轴转速

试验采用 DM6236P 型转速表(深圳市胜利高电子科技有限公司),测量精度 $\pm 0.05\%$ 。在拖拉机动力输出轴上贴一片反射胶带,用转速表测量动力输出轴转速,并同时记录 PWM 变量喷施控制器显示的隔膜泵输入轴转速值,改变拖拉机油门进行多组测量。结果如表 2 所示。由表 2 可知,在 300 ~ 600 r/min 范围内,隔膜泵输入轴转速的检测误差在 ± 1.5 r/min 范围内。

表 2 隔膜泵输入轴转速检测结果

r/min		
序号	转速表显示值	控制器显示值
1	298.36	298.34
2	452.65	452.62
3	598.51	598.49

4.3 喷杆压力

在喷施管路中安装手动打压泵和 CYT-111 小型数显压力变送器(北京天宇恒创有限公司),量程 0 ~ 3 MPa,精度 $\pm 0.2\%$ F. S.。将比例溢流阀的设定压力设为 1 MPa,所有电磁阀全部关闭。利用手动打压泵逐步打压,并同时记录 CYT-111 的显示值和 PWM 变量喷施控制器显示的喷杆压力值,结果如表 3 所示。由表 3 可知喷杆压力的检测误差在 ± 0.01 MPa 范围内。

4.4 喷施流量

拖拉机油门固定,比例溢流阀设定压力为

表 3 喷杆压力检测结果

MPa		
序号	CYT-111 显示压力	控制器显示压力
1	0.219	0.221
2	0.429	0.428
3	0.607	0.605

0.5 MPa,PWM 变量喷施控制器控制所有喷头以 100% 的占空比连续喷雾 30 s,记录控制器显示的喷杆 1 分区的喷施流量,并用 2 000 mL 的量筒分别接 1 ~ 3 号喷头喷出的药液,累加并计算 1 ~ 3 号喷头的总流量;然后关闭 3 号喷头,重复上述过程,累加并计算 1 号和 2 号喷头的总流量;然后再关闭 2 号喷头,重复上述过程,计算 1 号喷头的流量。结果如表 4 所示。量筒最小刻度为 20 mL。由表 4 可知,喷施流量的检测误差在 ± 0.05 L/min 范围内。

表 4 喷施流量检测结果

L/min		
序号	计算流量	显示流量
1	7.484	7.481
2	5.036	5.038
3	2.532	2.540

4.5 喷杆压力稳定试验

喷雾机组停稳不动,拖拉机怠速运行,隔膜泵输入转速 300 r/min 左右,12 个喷头全部以 100% 的占空比连续喷雾。比例溢流阀设定压力先后设定为 0.3、0.4 和 0.5 MPa。在每一个设定压力下,先改变油门大小使隔膜泵输入转速增至 540 r/min 左右,记录此后 4 个测控周期内喷杆压力显示值;然后关闭 9 个喷头,使总喷施流量减少为原来的 1/4,记录此后 4 个测控周期内的喷杆压力显示值。结果如表 5 所示。由表 5 可知,经过 2 s 调节后,喷杆压力调节误差在 ± 0.01 MPa 范围内。

表 5 喷杆压力稳定试验结果

MPa					
设定压力	工况	显示值 1	显示值 2	显示值 3	显示值 4
0.3	油门位置	0.392	0.286	0.322	0.307
0.3	喷量变化	0.395	0.285	0.324	0.305
0.4	油门位置	0.435	0.392	0.413	0.405
0.4	喷量变化	0.439	0.390	0.416	0.404
0.5	油门位置	0.516	0.495	0.512	0.503
0.5	喷量变化	0.518	0.491	0.517	0.498

4.6 变量喷施试验

将比例溢流阀设定压力设定为 0.5 MPa,2 ~ 12 号喷头以 100% 的占空比持续喷雾,改变 1 号喷头 PWM 控制信号的频率和占空比,每种频率-占空比组合下持续喷雾 30 s,用桶收集 1 号喷头喷出的药液,并用精度为 0.1 g 的电子秤进行称量,然后换算为流量。结果如表 6 所示。

表 6 0.5 MPa 下 TR80-05 型喷头流量调节试验结果
Tab.6 Results of flow regulating test of TR80-05 type nozzle under spray pressure of 0.5 MPa L/min

占空比/%	PWM 信号频率/Hz			
	2	3	4	5
10	203.7	203.1		
20	429.3	441.0		
30	665.7	669.6		
40	946.8	952.2	914.1	
50	1 164.3	1 169.1	1 122.3	
60	1 407.0	1 386.3	1 376.4	
70	1 608.6	1 617.9	1 602.6	
80	1 819.8	1 809.3	1 839.0	
90	2 047.8	2 055.0	2 089.5	2 070.6
100	2 477.8	2 477.8	2 477.8	2 477.8

由表 6 可知,当 PWM 信号频率大于 3 Hz 而占

空比低于下限占空比时,电磁阀来不及动作而无法启动。且随着 PWM 信号频率的增大,占空比下限逐渐提高。频率在 5 Hz 时有效占空比调节范围过小,已无法满足变量喷施的需要。将流量调节比定义为最大流量与最小流量之比,则采用 6013 型直动式电磁阀时,PWM 信号有效频率小于等于 5 Hz,流量调节比大于 10。

5 结论

(1)基于 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统的需要,以 DSP56F805 芯片为核心,研制了 PWM 变量喷施控制器,构建了 PWM 变量喷施系统,实现了 PWM 变量喷施过程的自动控制。

(2)所研制的 PWM 变量喷施系统采用比例溢流阀调压装置,PWM 变量喷施控制器通过预测比例控制方法对比例溢流阀进行在线调节,实现了喷杆压力的快速稳定。

(3)所研制的 PWM 变量喷施系统的 PWM 信号有效频率小于等于 5 Hz、流量调节范围大于 10、喷雾机组前进速度检测误差在 ±0.1 km/h 范围内、隔膜泵输入轴转速检测误差在 ±1.5 r/min 范围内、喷杆压力检测误差在 ±0.01 MPa 范围内、喷施流量检测误差在 ±0.05 L/min 范围内、经 2 s 调节后喷杆压力调节误差在 ±0.01 MPa 范围内。

参 考 文 献

1 何雄奎.改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J].农业工程学报,2004,20(1):13~15.
He Xiongkui. Improving severe draggling actuality of plant protection machinery and its application techniques [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 13~15. (in Chinese)

2 傅泽田,祁力钧,王俊红.精准施药技术研究进展与对策[J].农业机械学报,2007,38(1):189~192.
Fu Zetian, Qi Lijun, Wang Junhong. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 189~192. (in Chinese)

3 邱白晶,李佐鹏,吴昊,等.变量喷雾响应性性能的试验研究[J].农业工程学报,2007,23(11):148~152.
Qiu Baijing, Li Zuopeng, Wu Hao, et al. Experimental study on variable-rate spraying equipment response capability[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 148~152. (in Chinese)

4 史岩,祁力钧,傅泽田,等.压力式变量喷雾系统建模与仿真[J].农业工程学报,2004,20(5):118~121.
Shi Yan, Qi Lijun, Fu Zetian, et al. Model development and simulation of variable rate of pressure spray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(5): 118~121. (in Chinese)

5 刘志壮,徐汉虹,洪添胜,等.在线混药式变量喷雾系统设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(12):93~96.
Liu Zhizhuang, Xu Hanhong, Hong Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 93~96. (in Chinese)

6 Anglund E A , Ayers P D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(3):273~282.

7 Giles D K, Comino J A. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 47(4):249~267.

8 邓巍,丁为民.基于 PWM 技术的连续式变量喷雾装置设计与特性分析[J].农业机械学报,2008,39(6):77~80.
Deng Wei, Ding Weimin. Variable-rate continuous spray equipment based on PWM technology and it's spray characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 77~80. (in Chinese)

- Pu Qiu, Wu Jianjun. Three dimensional GIS-based preliminary study on urban disaster emergency system; taking Beijing Normal University area at Beitaipingzhuang as an example[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 17(1): 33 ~ 38. (in Chinese)
- 8 杨信廷, 钱建平, 范蓓蕾, 等. 农产品物流过程追溯中的智能配送系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 125 ~ 130.
Yang Xinting, Qian Jianping, Fan Beilei, et al. Establishment of intelligent distribution system applying in logistics process traceability for agricultural product[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 125 ~ 130. (in Chinese)
- 9 祁明亮, 池宏, 赵红, 等. 突发公共事件应急管理研究现状与展望[J]. 管理评论, 2006, 18(4): 35 ~ 45.
Qi Mingliang, Chi Hong, Zhao Hong, et al. The current researches and expectations of public emergency management[J]. Management Review, 2006, 18(4): 35 ~ 45. (in Chinese)
- 10 孟海波, 赵立欣, 徐义田, 等. 用粗糙集理论评价生物质固体成型燃料技术的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 198 ~ 202.
Meng Haibo, Zhao Lixin, Xu Yitian, et al. Assessment of biomass pellets and briquettes technologies by rough sets theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 198 ~ 202. (in Chinese)
- 11 张建军, 张利, 穆海芳, 等. 基于改进粒子群优化 BP 网络的发动机故障诊断方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 198 ~ 203.
Zhang Jianjun, Zhang Li, Mu Haifang, et al. Improved BP-neural network of the particle swam optimization in the research on engine fault diagnosis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 198 ~ 203. (in Chinese)
- 12 王国胤, 姚一豫, 于洪. 粗糙集理论与应用研究综述[J]. 计算机学报, 2009, 32(7): 1 229 ~ 1 246.
Wang Guoyin, Yao Yiyu, Yu Hong. A survey on rough set theory and applications[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(7): 1 229 ~ 1 246. (in Chinese)
- 13 朱明, 李永, 李嘉. 中小型原水河渠污染事故危害度应急评价模型[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 405 ~ 412.
Zhu Ming, Li Yong, Li Jia. Emergency assessment model for the hazard extent of water pollution accidents in small and medium sized rivers[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 405 ~ 412. (in Chinese)
- 14 谭旭, 唐云岚, 陈英武. 基于粗糙集的烤烟烟叶智能分级方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 169 ~ 174.
Tan Xu, Tang Yunlan, Chen Yingwu. Intelligent grading of flue-cured tobacco leaves based on rough set theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 169 ~ 174. (in Chinese)
- 15 李佳, 张元标. 基于粗糙集理论的广东省农业循环经济综合评价[J]. 广东农业科学, 2009(9): 275 ~ 278.
Li Jia, Zhang Yuanbiao. Synthetical evaluation of agricultural circular economy in Guangdong Province based on rough set theory[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(9): 275 ~ 278. (in Chinese)
- 16 ESRI 中国(北京)培训中心. ArcGIS Server 轻松入门[M]. 北京: ESRI 中国(北京)培训中心, 2008.
- 17 刘光, 唐大仕. Web GIS 开发——ArcGIS Server 与 .NET[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

(上接第 93 页)

- 9 王丽霞, 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): 113 ~ 117.
Wang Lixia, Zhang Shuhui, Ma Chenglin, et al. Design of variable spraying system based on ARM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 113 ~ 117. (in Chinese)
- 10 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 74 ~ 78.
Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 74 ~ 78. (in Chinese)
- 11 吴春笃, 杜彦生, 张伟, 等. 脉宽调制型变量喷雾系统雾量沉积分布[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 70 ~ 73.
Wu Chundu, Du Yansheng, Zhang Wei, et al. Study on the deposit distribution of the modulated variable rate spray system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 70 ~ 73. (in Chinese)
- 12 Giles D K, Downey D. Quality control verification and mapping for chemical application[J]. Precision Agriculture, 2003, 4(1): 103 ~ 124.
- 13 Bennur P J, Taylor R K. Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(6): 1 069 ~ 1 075.