

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.017

脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制*

魏新华¹ 蒋杉² 张进敏¹ 李青林¹

(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)

摘要: 采用 6013 型直动式高速电磁阀、TR80-05 型圆锥雾喷头、DBEE6-1X/50 型先导式比例溢流阀和自制的 PWM 变量喷施控制器, 设计了一套 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统。就隔膜泵输入轴转速、喷头位置、喷雾压力、PWM 控制信号频率和占空比等因素对喷头喷雾流量的影响进行了试验测试, 采用单因素线性拟合法建立了 0.2、0.3 和 0.4 MPa 喷雾压力下 TR80-05 型圆锥雾喷头的喷雾流量计算模型, 得出了相应的施药量控制模型, 并对整个 PWM 变量喷施系统的施药量控制性能进行了试验测试。测试结果表明: 喷雾流量受喷头位置和 PWM 控制信号频率的影响很小, 而受喷雾压力和 PWM 控制信号占空比的影响很大; 在启用喷雾压力稳定控制功能的情况下, 隔膜泵输入轴转速对喷雾流量的影响很小; 在该电磁阀与喷头组合下, 系统流量调节范围约为 10:1; 当目标喷雾流量大于等于 0.3 L/min 时, 喷雾流量控制误差在 $\pm 4\%$ 范围内; 整个系统的施药量控制误差在 $\pm 6\%$ 范围内。

关键词: 变量喷施 脉宽调制 施药量 控制

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0087-06

Application Rate Control Characteristics of Blended Pulse Variable Rate Application System

Wei Xinhua¹ Jiang Shan² Zhang Jinmin¹ Li Qinglin¹

(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)

Abstract: In order to study the application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system, a blended pulse variable rate application system was constructed based on a commercial boom sprayer and by integration of high speed direct acting solenoid valves (type 6013), hollow cone nozzles (type TR80-05), pilot-operated proportional relief valve (type DBEE6-1X/50) and a self-designed PWM-based variable rate application controller. Influences of diaphragm pump's input shaft rotating speed, nozzle positions, spray pressure, PWM signal frequency and duty cycle on nozzle's spray flow rate were tested. Computational models of the nozzle's spray flow rate under spray pressure of 0.2 MPa, 0.3 MPa and 0.4 MPa were fitted through monothetic linear regression, and corresponding control models of application rate were deduced. Application rate control characteristics testing experimentation of the blended pulse variable rate application system was performed too. Test results show that influences of nozzle positions and PWM signal frequency on the nozzle's spray flow rate are very little, spray pressure and PWM signal duty cycle have crucial influences on the nozzle's spray flow rate, the ratio of flow regulation is about 10:1 with combine of the solenoid valve and the nozzle used in the system, the control error of spray flow rate is less than $\pm 4\%$ when objective spray flow rate is greater than 0.3 L/min, and the control error of application rate is less than $\pm 6\%$.

Key words: Variable rate application Pulse width modulation Application rate Control

收稿日期: 2012-09-22 修回日期: 2012-11-05

* 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研究重点实验室资助项目(BM2009703)

作者简介: 魏新华, 副教授, 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

引言

农药变量喷施技术可根据农田各小区域内病虫害的具体情况按需施药,既节约农药,又可减少农产品中的农药残留和环境污染,是施药技术的重要发展方向^[1~4]。脉宽调制(PWM)间歇喷雾流量调节式变量喷施系统流量调节范围大、雾化特性一致性好,且通过改变喷雾压力和 PWM 参数可在保持喷施量不变的情况下,获得不同的雾滴粒径,以适应不同环境风速下的喷施需要,是变量喷施的主要控制方式之一^[5~8]。国内外学者对 PWM 变量喷施系统的雾化特性^[7~8]、雾量分布特性^[9]、响应时间^[10]、压力和流量稳定性^[10]等进行了深入研究,但对其施药量控制性能的研究较少。Han 等的研究发现压力波动和电磁阀阀间特性差异对喷施流量的控制精度影响很大^[11]。翟长远等通过二次回归正交试验建立了 PWM 变量喷雾喷头的流量模型,但模型较复杂,不适合实际的喷施量控制应用^[12]。

本文在不同喷雾压力、PWM 信号频率和占空比下,对自主研发的 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统的喷雾流量进行标定,确定其喷雾流量计算模型,并结合喷施机组前进速度确定其施药量控制模型,以期提高其施药量控制精度。

1 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统

PWM 间歇喷雾式变量喷施系统的总体结构如图 1 所示^[13]。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)上加装 6013 型直动式高速电磁阀(德国, Burkert 公司)、DBEE6-1X/50 型先导式比例溢流阀(德国,博世力士乐股份公司)、CYT-101 型压力变送器和 LWGY-6 型流量传感器(北京天宇恒创有限公司),在上海-50 型拖拉机上加装 2 个 JK8002C 型霍尔式接近开关(南京茶花电子有限公司)分别用于驱动轮转速和隔膜泵输入轴转速的测量,再配置自制的 PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器,从而组成一套 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统。系统工作压力 0.3~0.5 MPa、作业速度 3~6 km/h。喷头选用 TR80-05 型圆锥雾喷头(德国, Lechler 公司)。PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器基于数字信号控制器 DSP56F805 开发而成,可输出 12 路独立可调的 PWM 信号,实时检测喷雾机组前进速度、隔膜泵输入轴转速、喷杆压力和各喷杆分区的总喷施流量,并可通过比例溢流阀对喷杆压力进行在线调节。PWM 变量喷施控制器具有单机和联机两种工作模式,单机模式下通过

人机对话接口人工输入各工作参数;联机模式下则通过 CAN 总线与车载计算机进行数据通讯来获取各工作参数。经试验测试,PWM 变量喷施系统的喷施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、喷杆分区总喷施流量检测误差在 ± 0.05 L/min 范围内、经 2 s 压力调节之后的喷杆压力调节误差在 ± 0.01 MPa 范围内。

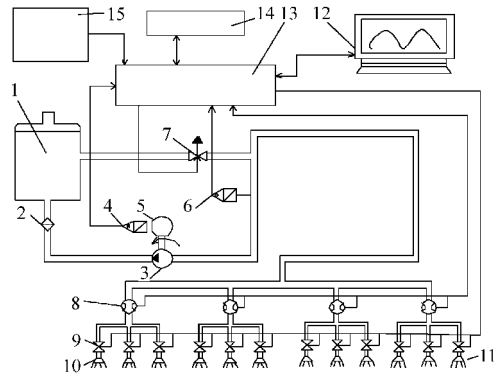


图 1 PWM 变量喷施系统的结构示意图

Fig. 1 Structure of variable rate application system

1. 药液箱 2. 过滤器 3. 隔膜泵 4. 隔膜泵输入轴转速传感器
5. 拖拉机动力输出轴 6. 喷杆压力传感器 7. 比例溢流阀
8. 喷施流量传感器 9. 高速电磁阀 10. 1 号喷头 11. 12 号喷头
12. 人机对话接口 13. PWM 间歇喷雾变量喷施控制器
14. 车载计算机 15. 机组前进速度传感器

喷施作业时,将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。PWM 变量喷施控制器实时检测喷施机组的前进速度,根据机组前进速度、各喷头当前喷施区域内的农药原液设定施用量和药液的体积百分比浓度计算各喷头的实时喷雾流量,并进而确定各喷头电磁阀的 PWM 控制信号频率和占空比,从而实现设定农药原液施用量的定量喷施;同时,实时检测各喷杆分区的喷施总流量,并对各喷头电磁阀的 PWM 控制信号的占空比进行微调;实时检测喷杆压力和隔膜泵输入轴转速,并根据设定喷杆压力通过比例溢流阀对喷杆压力进行实时调节,以实现喷杆压力的稳定控制。

2 喷头喷雾流量标定试验

2.1 试验设备

将 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统挂在上海-50 型拖拉机上,组成如图 2 所示的 PWM 变量喷施机组。12 组电磁阀与喷头组合等间距地安装在喷杆上,并根据连接管路的不同而平分为 4 个

喷杆分区。喷杆主管路分支为左、右对称的2个支管路,每个支管路又分支为2个二级支管路,每个二级支管路连接同一喷杆分区上的3个电磁阀与喷头组合。喷杆压力传感器安装在分支前的喷杆主管路上。喷施流量传感器安装在各个二级支管路上。根据管路连接,1号喷头为左侧支管路最远端喷头,6号喷头为左侧支管路最近端喷头。

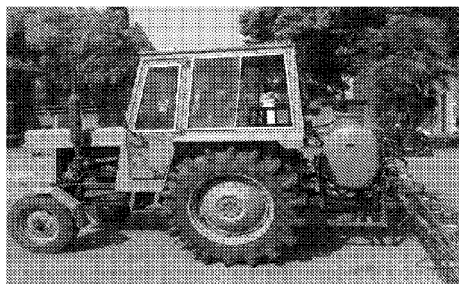


图2 PWM 变量喷施机组

Fig. 2 PWM variable rate application sprayer

2.2 隔膜泵输入轴转速及喷头位置对喷头喷雾流量的影响

以纯净水代替药液。拖拉机挂空挡原地不动。将 PWM 变量喷施控制器设置为单机工作模式,并通过人机对话接口,将所有电磁阀与喷头组合的 PWM 控制信号频率都设定为 2 Hz、占空比都设定为 90%、喷雾压力设定为 0.3 MPa,启用压力稳定控制功能,并关闭流量监测调节功能^[13]。调节拖拉机油门,使隔膜泵输入轴转速(即拖拉机动力输出轴转速)先后稳定在 400、485 和 540 r/min。在每个隔膜泵输入轴转速下,用清洁干燥的塑料水桶(桶口直径 31.5 cm、高度 31 cm,桶口平面与喷头垂直且使喷头位于桶口中心。下同)分别收集 1 号喷头和 6 号喷头喷出的雾滴,持续收集 30 s,然后用精度为 ±0.1 g 的电子天平称量收集到的雾滴质量,并分别换算为 1 号喷头和 6 号喷头的喷雾流量,测试结果如表 1 所示。由表 1 可知,由于压力稳定控制功能的作用,喷雾压力相对比较稳定,隔膜泵输入轴转速的改变对喷头喷雾流量的影响很小;1 号喷头和 6 号喷头的喷雾流量仅相差约 1%,喷头位置对喷头喷雾流量的影响较小。

表 1 隔膜泵输入轴不同转速下的喷头喷雾流量

Tab.1 Spray flow rate under different rotating speed of the diaphragm pump input shaft

隔膜泵输入轴 转速/r·min ⁻¹	喷雾 压力/MPa	1号喷头喷雾 流量/L·min ⁻¹	6号喷头喷雾 流量/L·min ⁻¹
400	0.303	0.980	0.984
485	0.307	0.982	0.986
540	0.294	0.976	0.983

2.3 喷雾压力及 PWM 控制信号参数对喷头喷雾流量的影响

以纯净水代替药液。拖拉机挂空挡原地不动。将 PWM 变量喷施控制器设置为单机工作模式,启用压力稳定控制功能,并关闭流量监测调节功能^[13]。忽略隔膜泵输入轴转速对喷雾流量的影响,调节拖拉机油门,使隔膜泵输入轴转速稳定在 485 r/min,固定油门。通过控制器的人机对话接口,将喷雾压力先后设定为 0.2、0.3 和 0.4 MPa;在每种喷雾压力下,将 PWM 控制信号频率先后设定为 1、2、3、4、5 Hz;在每种压力-频率工况组合下,以 10% 的步长,在 10% ~ 100% 的占空比范围内,连续改变 1 号电磁阀与喷头组合的 PWM 控制信号占空比,其他电磁阀与喷头组合的占空比保持 100% 不变。在每种压力-频率-占空比工况组合下,用清洁干燥的塑料水桶收集 1 号喷头喷出的雾滴,连续收集 30 s,然后用精度为 ±0.1 g 的电子天平称量收集到的雾滴质量,并换算为 1 号喷头的喷雾流量,试验结果如表 2~4 所示。

表 2 0.2 MPa 喷雾压力下 1 号喷头的喷雾流量

Tab.2 Spray flow rate of nozzle No. 1 under spray pressure of 0.2 MPa L/min

占空 比/%	控制信号频率/Hz				
	1	2	3	4	5
10	0.079	0.073	0.075	0.078	0.067
20	0.163	0.156	0.161	0.155	0.153
30	0.225	0.222	0.233	0.229	0.227
40	0.315	0.313	0.319	0.311	0.309
50	0.389	0.375	0.380	0.372	0.377
60	0.453	0.466	0.461	0.449	0.452
70	0.552	0.536	0.545	0.541	0.539
80	0.623	0.599	0.615	0.610	0.603
90	0.670	0.665	0.683	0.663	0.659
100	0.751	0.746	0.748	0.752	0.744

表 3 0.3 MPa 喷雾压力下 1 号喷头的喷雾流量

Tab.3 Spray flow rate of nozzle No. 1 under spray pressure of 0.3 MPa L/min

占空 比/%	控制信号频率/Hz				
	1	2	3	4	5
10	0.118	0.117	0.113		
20	0.243	0.237	0.239	0.231	0.229
30	0.334	0.335	0.347	0.332	0.336
40	0.469	0.471	0.473	0.459	0.447
50	0.578	0.546	0.565	0.553	0.544
60	0.673	0.693	0.689	0.668	0.673
70	0.813	0.797	0.812	0.805	0.794
80	0.927	0.891	0.915	0.907	0.897
90	0.996	0.982	1.020	0.986	0.981
100	1.116	1.109	1.113	1.118	1.106

表4 0.4 MPa 喷雾压力下1号喷头的喷雾流量

Tab.4 Spray flow rate of nozzle No.1 under spray

pressure of 0.4 MPa L/min

占空比/%	控制信号频率/Hz				
	1	2	3	4	5
10	0.157	0.154	0.149		
20	0.336	0.348	0.337	0.332	
30	0.493	0.509	0.512	0.511	0.490
40	0.645	0.639	0.641	0.646	0.637
50	0.797	0.813	0.815	0.808	0.803
60	0.975	0.993	0.998	0.983	0.987
70	1.148	1.145	1.158	1.143	1.139
80	1.325	1.321	1.323	1.326	1.319
90	1.442	1.435	1.438	1.429	1.431
100	1.565	1.561	1.573	1.559	1.560

试验过程中发现,当喷雾压力较大、PWM 控制信号频率大于 3 Hz 且占空比较低时,电磁阀无法正常响应,喷施效果畸变严重,已无法进行正常的喷施作业,如表 3~4 中的空白处所示。

由表 2~4 可知,喷雾压力对喷头喷雾流量的影响很大,当其他工况不变时,喷头喷雾流量随喷雾压力的增大而增大;PWM 控制信号频率对喷头喷雾流量的影响很小,相同喷雾压力和 PWM 控制信号占空比下的喷头喷雾流量基本相同;PWM 控制信号占空比对喷头喷雾流量的影响很大,当其他工况不变时,喷头喷雾流量与 PWM 控制信号占空比近似呈正比关系;不同喷雾压力下的流量调节比(该喷雾压力下喷头的最大与最小喷雾流量之比)基本相同,约为 10:1;随着喷雾压力和 PWM 控制信号频率的增大,最低有效占空比逐渐增大,对本文所述 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统而言,PWM 控制信号的最高有效频率小于等于 5 Hz。

2.4 喷头喷雾流量标定模型

不同喷雾压力下,1号喷头的喷雾流量与 PWM 控制信号频率和占空比之间的关系如图 3 所示。

由图 3 可见,除个别喷雾效果严重畸变的工况之外,在各喷雾压力下,1号喷头的喷雾流量与 PWM 控制信号占空比都近似呈正比关系,而与 PWM 控制信号频率基本无关。所以可忽略 PWM 控制信号频率的影响,采用单因素线性拟合法建立占空比与该占空比下各有效频率所对应的喷头喷雾流量的平均值之间的对应关系模型,以获得各喷雾压力下 1 号喷头的喷雾流量计算模型。忽略喷头位置对喷头喷雾流量的影响,这些计算模型即为各喷雾压力下喷头喷雾流量的统一标定模型。

0.2 MPa 喷雾压力下,喷头的喷雾流量标定模

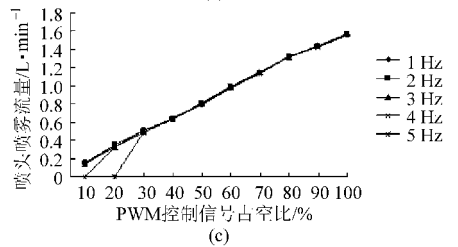
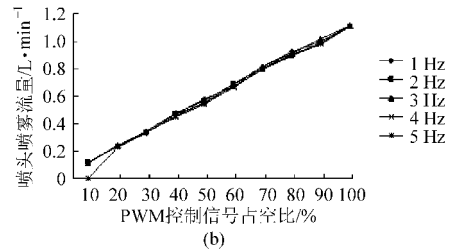
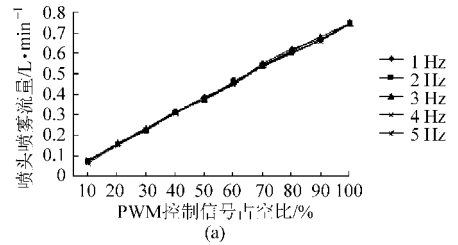


图3 不同喷雾压力下1号喷头的喷雾流量

Fig.3 Spray flow rate of nozzle No.1 under different spray pressure

(a) 0.2 MPa (b) 0.3 MPa (c) 0.4 MPa

型为

$$q_{0.2} = 0.00746\alpha + 0.008 \quad (1)$$

式中 $q_{0.2}$ ——0.2 MPa 喷雾压力下的喷头喷雾流量, L/min

α ——PWM 控制信号占空比, %

模型决定系数 R^2 为 99.8%。但当 PWM 控制信号占空比为 10% 时,最大相对拟合误差达到了 23%;而当 PWM 控制信号占空比大于等于 20% 时,最大相对拟合误差小于等于 5%。

0.3 MPa 喷雾压力下,喷头的喷雾流量计算模型为

$$q_{0.3} = 0.01105\alpha + 0.013 \quad (2)$$

式中 $q_{0.3}$ ——0.3 MPa 喷雾压力下的喷头喷雾流量, L/min

模型决定系数 R^2 为 99.7%。但当 PWM 控制信号占空比为 10% 时,最大相对拟合误差达到了 9%;而当 PWM 控制信号占空比大于等于 20% 时,最大相对拟合误差小于等于 4%。

0.4 MPa 喷雾压力下,喷头的喷雾流量计算模型为

$$q_{0.4} = 0.01580\alpha + 0.023 \quad (3)$$

式中 $q_{0.4}$ ——0.4 MPa 喷雾压力下的喷头喷雾流量, L/min

模型决定系数 R^2 为 99.7%。但当 PWM 控制

信号占空比为10%时,最大相对拟合误差达到了21%;而当PWM控制信号占空比大于等于20%时,最大相对拟合误差小于等于3%。

3 施药量控制模型

由于相邻喷头的雾量分布区域相互重叠,假定每个喷头的雾量分布宽度都是喷施机组喷幅除以喷头个数,则实际变量喷施作业时,各喷头在其当前喷施区域内的目标喷雾流量为^[13]

$$q_0 = \frac{60Q_s W v}{10\,000CN} \quad (4)$$

式中 q_0 ——喷头的目标喷雾流量, L/min

Q_s ——喷头当前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 ——喷施机组的喷幅宽度, m

N ——喷头个数

v ——喷施机组的前进速度, m/s

由于在PWM变量喷施系统中,喷雾压力主要用于调节雾滴粒径和雾滴速度等雾化特性,而很少用于喷雾流量的调节^[3-6]。所以考虑到喷头在各喷雾压力下的喷雾流量范围,可得各喷雾压力下喷头的施药量控制模型。

0.2 MPa 喷雾压力下的施药量控制模型为

$$\alpha = \begin{cases} 10 & (q_0 < 0.075) \\ (q_0 - 0.008)/0.00746 & (0.075 \leq q_0 \leq 0.748) \\ 100 & (q_0 > 0.748) \end{cases} \quad (5)$$

0.3 MPa 喷雾压力下的施药量控制模型为

$$\alpha = \begin{cases} 10 & (q_0 < 0.116) \\ (q_0 - 0.013)/0.01105 & (0.116 \leq q_0 \leq 1.112) \\ 100 & (q_0 > 1.112) \end{cases} \quad (6)$$

0.4 MPa 喷雾压力下的施药量控制模型为

$$\alpha = \begin{cases} 10 & (q_0 < 0.153) \\ (q_0 - 0.023)/0.01580 & (0.153 \leq q_0 \leq 1.562) \\ 100 & (q_0 > 1.562) \end{cases} \quad (7)$$

4 变量喷施试验

4.1 喷雾流量控制精度试验

按照式(5)~(7)设计相应的占空比计算子程序,并更新PWM变量喷施控制器的应用程序,以在喷施过程中根据给定的目标喷施流量 q_0 计算相应PWM控制信号占空比 α 。

以纯净水代替药液。拖拉机挂空挡原地不动。将PWM变量喷施控制器设置为单机工作模式,启用压力稳定控制功能,并关闭流量监测调节功能^[13]。调节拖拉机油门,使隔膜泵输入轴转速稳定在485 r/min,固定油门。通过控制器的人机对话接口,将PWM控制信号频率都设定为3 Hz;除1号喷头外,其他电磁阀与喷头组合的PWM控制信号占空比都设定为100%不变;将喷雾压力先后设定为0.2、0.3、0.4 MPa;在每种喷雾压力下,将1号喷头的目标喷雾流量先后设定为0.2、0.5、0.7 L/min。在每种压力-流量组合下,用清洁干燥的塑料水桶分别收集1号喷头喷出的雾滴,每次连续收集30s,然后用精度为 ± 0.1 g的电子天平称量收集的雾滴质量,并换算为1号喷头的喷雾流量,试验结果如表5所示。由表5可知,由于线性拟合模型对PWM控制信号占空比较低时的喷雾流量拟合精度较低,所以在目标喷施流量较小时,喷雾流量的控制精度较低,实际喷雾流量与目标喷雾流量的相对误差达到了8.5%;而当目标喷雾流量大于等于0.3 L/min时,喷雾流量的控制精度较高,实际喷雾流量与目标喷雾流量的相对误差在 $\pm 4\%$ 范围内。

表5 喷雾流量控制精度试验结果

Tab.5 Results of spray flow rate control accuracy test

喷雾压力/MPa	目标喷雾流量/ L·min ⁻¹	实际喷雾流量/ L·min ⁻¹	相对 误差/%
0.2	0.2	0.203	1.5
0.2	0.5	0.509	1.8
0.2	0.7	0.702	0.3
0.3	0.2	0.191	-4.5
0.3	0.5	0.517	3.4
0.3	0.7	0.715	2.1
0.4	0.2	0.183	-8.5
0.4	0.5	0.513	2.6
0.4	0.7	0.691	-1.3

4.2 施药量控制精度试验

按照式(4)设计相应的目标喷雾流量计算子程序,并更新PWM变量喷施控制器的应用程序,以在喷施过程中根据喷施机组的实时前进速度 v 计算相应的目标喷雾流量 q_0 。对本文所述PWM间歇喷雾式变量喷施系统,喷施机组的喷幅宽度为6 m、喷头个数为12个。以纯净水代替药液,但假定其药液体积比 C 为4 mL/L。

试验在江苏大学农业工程研究院农机大院内的水泥场地上进行。将PWM变量喷施控制器设置为单机工作模式,启用压力稳定控制功能,并关闭流量监测调节功能^[13]。通过控制器的人机对话接口,将

喷雾压力设定为 0.3 MPa;将所有电磁阀与喷头组合的 PWM 控制信号频率都设定为 3 Hz;将所有喷头的给定农药原液设定施用量先后统一设定为 300、525、750 mL/hm²;在每种农药原液设定施用量下,都按 3、4、5、6 km/h 3 种喷施机组前进速度进行直线前进喷施试验。在每种施药量-速度组合下,待喷施机组速度稳定后,用清洁干燥的塑料水桶收集 1 号喷头在 6 m 前进距离内喷出的雾滴,然后用精度为 ±0.1 g 的电子天平称量收集的雾滴质量,并换算为单位面积施药量,试验结果如表 6 所示。在计算单位面积施药量时,1 号喷头的雾量分布宽度按 0.5 m 计算。由表 6 可知,施药量控制误差在 ±6% 范围内。

5 结论

(1) 针对自主研发的 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统,建立了 6013 型直动式高速电磁阀、TR80-05 型圆锥雾喷头组合的喷雾流量单因素线性拟合模型,并结合喷施机组前进速度建立了相应的施药量控制模型,经实际测试,施药量控制误差在 ±6% 范围内。

(2) 在启用压力稳定控制功能的情况下,喷雾压力比较稳定,隔膜泵输入轴转速对喷头喷雾流量

表 6 施药量控制精度试验结果

Tab. 6 Results of application rate control accuracy test

农药原液设定施用量 /mL·hm ⁻²	单位面积设定施药量 /mL·m ⁻²	喷施机组前进速度显示值 /km·h ⁻¹	单位面积实测施药量 /mL·m ⁻²	施药量控制相对误差 /%
300	7.496	3.15	7.9	5.39
300	7.496	4.46	7.7	2.72
300	7.496	5.83	7.6	1.39
525	13.118	3.04	13.8	5.20
525	13.118	4.53	13.4	2.15
525	13.118	5.76	13.1	-0.14
750	18.741	3.11	19.5	4.05
750	18.741	4.35	19.0	1.38
750	18.741	5.92	18.3	-2.35

的影响很小,喷头位置对喷头喷雾流量的影响较小。

(3) 喷头喷雾流量受喷雾压力的影响很大,受 PWM 控制信号频率的影响很小,而与 PWM 控制信号占空比近似呈正比关系。

(4) 可采用单因素线性拟合法对不同喷雾压力下的喷头喷雾流量计算模型进行拟合,得到喷头喷雾流量的控制模型。当目标喷雾流量较小时,PWM 控制信号占空比也较小,模型拟合误差较大,喷雾流量控制精度较低;而当目标喷雾流量较大时,喷雾流量的控制精度较高。

参 考 文 献

- 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 dragging 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)
- 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)
- 陈树人,尹东富,魏新华,等. 变量喷药自适应神经模糊控制器设计与仿真[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(3):272~276.
Chen Shuren, Yin Dongfu, Wei Xinhua, et al. Design and simulation of variable weed spraying controller based on adaptive neural fuzzy inference system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 272~276. (in Chinese)
- 翟长远,朱瑞祥,黄胜,等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(8):70~74.
Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, Huang Sheng, et al. Design and experiment of pesticide application monitoring system based on MCU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 70~74. (in Chinese)
- Giles D K, Downey D. Quality control verification and mapping for chemical application[J]. Precision Agriculture, 2003, 4(1): 103~124.
- 邓巍,何雄奎,丁为民. 基于压力变量喷雾的雾化特性及其比较[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2009,30(6):545~548.
Deng Wei, He Xiongkui, Ding Weimin. Characteristics and comparison of pressure-based variable spray[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(6): 545~548. (in Chinese)
- 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.
- 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)
- 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)

参 考 文 献

- 1 祁力钧,傅泽田,史岩. 化学农药施用技术与粮食安全 [J]. 农业工程学报, 2002,18(6): 203~206.
Qi Lijun, Fu Zetian, Shi Yan. Technology of pesticide application and food security [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 203~206. (in Chinese)
- 2 陆军. 喷雾药液在靶标植株上的沉积与润湿研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
Lu Jun. Study on deposition and wetting of spray liquid on plant target [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 3 Lu Jun, Zhang Hongtao, Wei Deyun, et al. Experimental computation process of the surface energy of leaves by acquiring drop image information [J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2012, 7(2): 173~176.
- 4 Law S E. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 48(11): 25~42.
- 5 陆军,贾卫东,邱白晶,等. 黄瓜叶片喷雾药液持留量试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 60~64.
Lu Jun, Jia Weidong, Qiu Baijing, et al. Experiment on retention of spray liquid on cucumber leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 60~64. (in Chinese)
- 6 刘春景,王科元. 气助式静电喷头雾化性能和荷电效果试验 [J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(1): 116~121.
Liu Chunjing, Wang Keyuan. Atomization quality and charge performance experimentation research on air-assisted electrostatic spraying nozzle [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(1): 116~121. (in Chinese)
- 7 陆军,李萍萍,贾卫东,等. 温室轴流风送药雾靶标沉积试验 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 88~92.
Lu Jun, Li Pingping, Jia Weidong, et al. Experiment of axial-flow air-carried toward-target pesticide deposition in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 88~92. (in Chinese)
- 8 Law S E. Electrostatic pesticide spraying: concepts and practice [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 19(2): 160~168.
- 9 Neeharika A, Mahesh V P, Srikanth V, et al. Effect of three-phase contact line topology on dynamic contact angles on heterogeneous surfaces [J]. Langmuir, 2007, 23(23): 11673~11676.
- 10 Lu Jun, Zhang Hongtao, Wei Deyun, et al. A method for determining surface free energy of bamboo fiber materials by applying Fowkes theory and using computer aided machine vision based measurement technique [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2012, 17(5): 593~597.
- 11 韩书广,周兆兵,江华,等. 酶处理对响叶杨木材表面动态润湿性能的影响 [J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(6): 774~777.
Han Shuguang, Zhou Zhaobing, Jiang Hua, et al. Enzyme pretreatments and dynamic wettability of a poplar surface [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(6): 774~777. (in Chinese)
- 12 张树京,齐立心. 时间序列分析简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 13 王建,白世彪,陈晔,等. Surfer8 地理信息系统制图 [M]. 北京: 中国地图出版社, 2004.
- 14 唐启义,冯明光. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 15 刘同娟,郭键,刘军. MATLAB 建模、仿真及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- 16 高建民,安贵仁,刘昌鉴,等. 叶片吸收雾滴过程中雾滴覆盖面积的变化规律 [J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 198~202.
Gao Jianmin, An Guiren, Liu Changjian, et al. Variation characters of droplet coverage area in leaf droplet water uptake process [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 198~202. (in Chinese)

(上接第 92 页)

- 10 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): 1069~1075.
- 11 Han Shufeng, Hendrickson L L, Ni Bingcheng, et al. Modification and testing of a commercial sprayer with PWM solenoids for precision spraying [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(5): 591~594.
- 12 翟长远,王秀,密雅荣,等. PWM 变量喷雾喷头流量模型 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 40~44.
Zhai Changyuan, Wang Xiu, Mi Yarong, et al. Nozzle flow model of PWM variable-rate spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 40~44. (in Chinese)
- 13 魏新华,蒋杉,孙宏伟,等. PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器设计与测试 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 87~93, 129.
Wei Xinhua, Jiang Shan, Sun Hongwei, et al. Design and test of variable rate application controller of intermittent spray based on PWM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 87~93, 129. (in Chinese)