

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.013

喷嘴直接注入式农药喷洒系统控制方法研究

蔡祥¹ Martin Walgenbach² Malte Doerpmund² Peter Schulze Lammers²
孙宇瑞³ 赵燕东⁴

(1. 北京林业大学信息学院, 北京 100083; 2. 波恩大学农业机械研究所, 波恩 53115;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 4. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了实现农药变量喷洒, 准确计量和控制农药的注入速率和注入量很有必要。提出了一种喷嘴直接注入式系统(DNIS)原型, 并在此基础上研究了农药喷洒量的控制方法。该系统应用快速响应电磁阀(RRV)向水中注入农药, RRV由100 Hz的脉宽调制(PWM)信号驱动, 通过改变PWM信号占空比调节农药注入速率。试验室环境下设计了基于比例-积分-微分(PID)算法的闭环控制策略, 将农药注入速率快速稳定在设定值。通过试验测试了RRV、DNIS系统和PID控制器的工作性能。试验结果表明, 采用RRV可准确计量农药注入速率, 闭环控制策略可获得较稳定的农药速率控制效果, 农药注入速率可在4 s内达到设定值, 注入速率的稳定性相对于没有控制策略有明显提高。

关键词: 农药变量喷洒; 直接注入式; 快速响应电磁阀; 脉宽调制; 闭环控制

中图分类号: S49; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0100-06

Control Methods of Direct Nozzle Injection System

Cai Xiang¹ Martin Walgenbach² Malte Doerpmund² Peter Schulze Lammers² Sun Yurui³ Zhao Yandong⁴
(1. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Institute of Landtechnik, Bonn University, Bonn 53115, Germany
3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
4. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To realize site-specific and variable-rate application of agricultural pesticides, accurately metering and controlling the chemical injection rate is necessary. This study presented a prototype of direct nozzle injection system (DNIS) based on which method of controlling chemical injection rate was studied. In this DNIS, a rapid-reacting solenoid valve (RRV) was utilized for injecting chemicals, and it was driven by pulse-width modulation (PWM) signal at 100 Hz, adjusting the chemical injection rate with varying pulse width. A closed-loop control strategy based on proportional - integral - derivative (PID) method was applied to meter and stabilize the chemical injection rate. Laboratorial experiments were conducted to assess the performance of RRV, including effect of PWM signal with start-up time on pesticide injection, the power consumption of RRV, the input - output characteristics of RRV, and the time elapsed of shutting down pesticide flux completely. The performance of DNIS and PID controller on stabilizing pesticide injecting rate was also evaluated, not only output of flowmeter but also electric conductivity measuring method were employed to indicate the stabilization of pesticide. Test results showed that RRV was capable of precisely metering chemical injection rate. With PID controller, the set-

收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-05-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLX2013033)、国家自然科学基金青年基金项目(31400621)、国家自然科学基金项目(31371537)和中德合作小组项目(GZ494)

作者简介: 蔡祥(1985—), 男, 讲师, 主要从事农业自动化与机械化研究, E-mail: caixiang617@gmail.com

通信作者: 赵燕东(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤水分测量和自动化灌溉研究, E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

point chemical flow rate could be achieved within less than 4 s, and the stability of chemical flow rate was also improved against without control strategy.

Key words: quantitative pesticide spraying; direct injection; rapid-reacting solenoid valve; pulse width modulation; closed-loop control

引言

由于病虫害在农田中随机、不均匀分布,无差异喷洒农药存在以下问题:一方面会对轻微或无病虫害区域造成农药喷洒过量,既增加了农作物生产成本,也增加了环境污染的风险;另一方面对于严重病虫害区域,农药应用不足使得病虫害不能被彻底杀死,导致作物产量降低,病虫害耐药性增强^[1-2]。实施农田定点喷洒和变量喷洒是解决以上问题的有效方法^[3-4]。

传统机械化施药方式的药液在施药前已配置好,喷药过程中施药量只能通过改变传送药液的压力而改变,但压力的变化会直接影响喷嘴对农药的雾化效果,进而影响药效^[5]。直接注入式系统可解决以上问题^[6-7],这种系统将农药和水分开存放,仅当需要喷洒时才将农药注入到水中,经充分混合后喷洒出去,通过改变农药的注入速率,来改变喷药过程农药的施用量。

实时计量农药注入速率是进行变量施药的前提。GEBHARDT 等^[8]指出农药注入速率的计量可通过两种方式实现,一种是通过使用计量泵输送农药,另一种方式在闭环控制系统中使用流量计测量农药传送速率。FROST^[9]开发了一种采用计量水控制农药注入速率的直接注入式系统,该系统的优点在于闭环控制,农药注入速率控制准确。但该系统农药注入点离喷嘴距离较远,从控制器发出改变施药量命令到喷雾浓度真实改变存在较长时间差,导致控制的实时性较差。LAMMERS 等^[10]提出了一

种喷嘴直接注入式系统(DNIS),解决了滞后时间长的问题,并从多方面进行了 DNIS 系统的开发研究。该系统的农药在喷嘴处注入,与水的混合也在喷嘴处进行。通过这种改进,农药在管道中传输路径被大大缩减,显著降低了滞后时间。VONDRICKA 等^[11]讨论了 DNIS 农药混合均匀性问题,DOERPMUND 等^[12-13]评估了 DNIS 系统喷雾后的可清洁性问题。然而,关于 DNIS 农药速率的计量和控制问题目前还没有涉及,而这正是实现定点喷雾和变量喷雾的关键。

本文首先阐述喷嘴直接注入式系统的核心部件快速响应电磁阀(RRV)的控制方法,并在试验室环境下调试 RRV 的控制信号,测试不同环境下 RRV 的工作功耗,完全关闭 RRV 所耗时长,设计基于 PID 算法的闭环农药注入速率控制系统,并测试 DNIS 系统和 PID 控制器的性能。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

图 1a 是 DNIS 喷雾系统的总体结构示意图, DNIS 完全展开时臂展长度为 21 m,每隔 0.5 m 安装 1 个喷雾单元,总计 42 个喷雾单元,平均分成 7 个喷杆组,每相邻 6 个为一组。控制系统以组为单位分配控制信号,同一信号控制组里的 6 个喷雾单元,即每一组里的喷雾单元执行的喷雾动作相同。图 1b 展示的是一个喷雾执行单元的结构,它主要由电气动阀门、RRV、混合腔、电导率传感器和喷嘴组成。

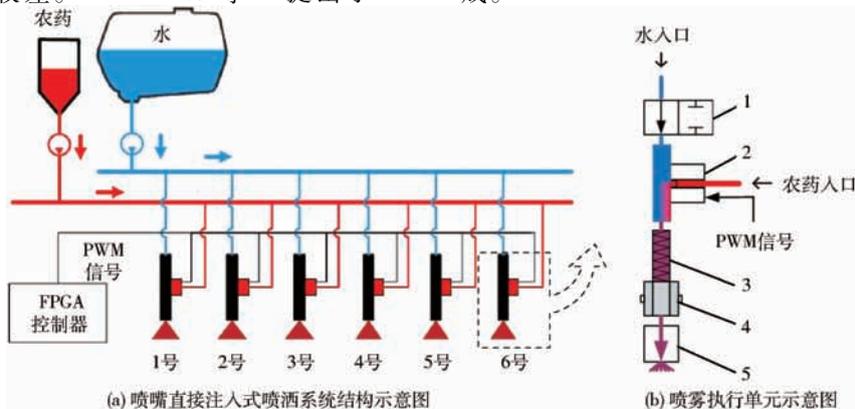


图 1 喷嘴直接注入式喷洒系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematics of experimental setup

1. 电气动阀门 2. 快速响应电磁阀 3. 混合腔 4. 电导率传感器 5. 喷头

1.2 快速响应电磁阀

DNIS 系统使用快速响应电磁阀向水中注入农药,其结构如图 2 所示。主要由圆柱形金属腔体(高 29.6 mm,直径 27.2 mm)、腔体内铜感应线圈(直径 0.8 mm,电阻约 0.23 Ω)、金属球、电磁阀座和橡胶垫圈等组成。当有电流流过铜线圈时,基于电磁感应原理在金属腔体内部产生特定方向的磁场。金属球受到磁场吸引力,当磁吸力远大于金属球受到的农药推力时,金属球离开橡胶垫圈偏向一边,农药入口和电磁阀座孔径间产生了通路,农药从此通路注入,此时 RRV 为打开状态。当没有电流流过铜线圈时,由于加压农药的推力作用使金属球被推至与橡胶垫圈紧密接触,阻断了农药流通,此时 RRV 为关闭状态,详细工作原理参照文献[14]。

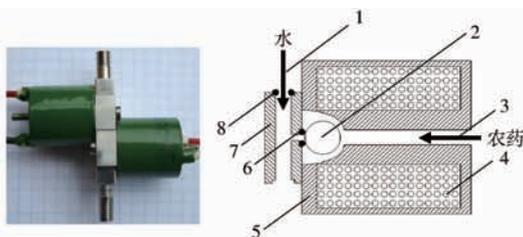


图 2 快速响应电磁阀实物图及剖面图

Fig. 2 Picture and cross section drawn of rapid-reacting valve

1. 水入口 2. 金属球 3. 农药入口 4. 线圈 5. 金属腔体
6,8. 橡胶垫圈 7. 电磁阀座

1.3 农药模拟

试验用农药由 LUVITEC 粉末(聚乙烯吡咯烷酮,简称 PVP)配制的溶液模拟,由于 PVP 溶液常用作农药添加剂以增加农药黏性且对人体无毒害作用,因此适合用于模拟农药进行试验。按质量计算配制比例为:10% LUVITEC 粉末,3% NaCl 晶体和 87% 的水(以上均为质量分数)。LUVITEC 粉末作为添加剂使溶液粘性处于 230 ~ 240 MPa·s,与常用农药粘性相当。添加的 NaCl 晶体使溶液具有导电性,单位时间内模拟农药注入水中的量越多,农药溶液的电导率越高。而在喷嘴处测量的电导性越好又表明注入农药的速率越高。

1.4 流量传感器

流量计用来实时测量 RRV 注入农药速率,并将测量值作为速率闭环控制系统的输入量,实时调整当前实际注入速率,将其稳定在用户设定值。所用流量计(德国 EGE 公司生产,SDN 510 GA 型)基于热力学原理,其内部有加热探头和测温探头,当液体介质流过时,内置探头产生热脉冲加热流体,测温探头在液体流动方向上测量温度梯度,流速由液体介质的温度梯度标定导出。流量计的测量范围可通过手动调节放大系数来确定,本试验根据实际农药注

入速率范围设定其测量范围。图 3 展示的是农药注入速率和传感器输出的标定结果。

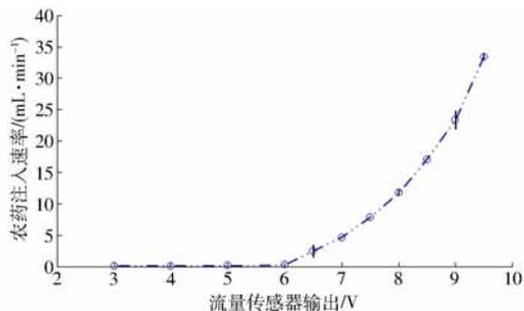


图 3 流量计标定结果

Fig. 3 Results of flowmeter calibration

1.5 电导率传感器

电导率传感器安装在混合腔和喷嘴之间,用于测量农药和水均匀混合后溶液的电导特性。一方面电导率可以反映农药注入速率,另一方面电导率的稳定性也反映了农药注入速率的稳定性和混合腔混合农药的均匀性。图 4 给出了喷嘴处喷洒农药的质量分数和电导率传感器的输出关系,从中可以看出农药质量分数与电导率传感器输出呈负相关关系,当农药质量分数越高,即 RRV 注入农药速率越快时,传感器输出越低。在喷嘴处农药质量分数低于 20% 时,电导率传感器能够较灵敏地检测出农药注入速率的变化。而当质量分数大于 20% 时传感器的输出变化不大。

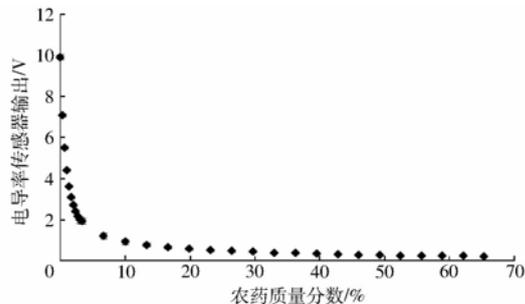


图 4 农药质量分数和电导率传感器输出标定

Fig. 4 Calibration of output of EC sensor and pesticide concentration

1.6 闭环控制策略

利用 RRV 注入农药时,RRV 对外部因素的影响非常敏感,其关闭、打开的速度和程度不仅与 PWM 信号的占空比相关,而且会受到水和农药传送压力、农药粘性以及其他外部因素的影响。另外由于 RRV 的户外工作环境难以保持恒定,开环控制情况下通过 RRV 注入农药的实际速率与期望速率存在偏差。因此设计闭环控制器补偿农药注入速率偏差,保持流速稳定,以便能够实现农药的更精确应用。图 5 是基于 PID 方法的农药注入速率闭环控制框图,控制器通过调节 PWM 信号脉冲宽度(即占空

比)以最小化实测流速和设定速率之差 $\Delta\sigma$ 。

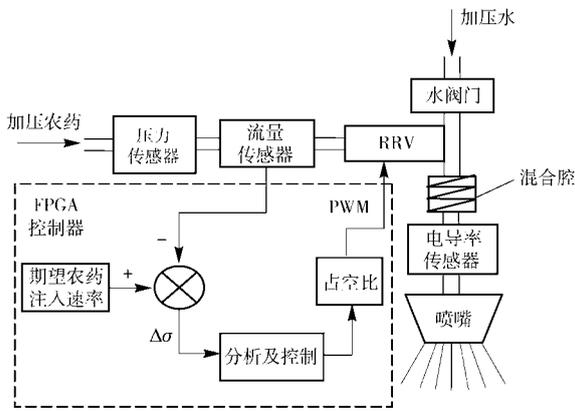


图 5 农药注入速率闭环控制框图

Fig. 5 Closed-loop control of pesticide injection rate

2 结果与讨论

2.1 RRV 控制信号

RRV 由 FPGA 控制器(美国 NI 公司, compact Rio 9014 型)产生的 100 Hz PWM 信号驱动,在一个 PWM 周期内高电平信号驱动 RRV 打开,因此高电平宽度决定了周期内的农药注入时间。通过改变脉冲宽度即 PWM 信号的占空比,便可调节农药的注入速率。

PWM 信号加载在 RRV 上后,农药注入速率从零逐渐上升至设定值。为缩短速率上升时间,使其快速到达稳定值,在标准 PWM 控制信号之前加入一段 80 ms 的高电平时间作为 RRV 的启动时间。较长的高电平时间将 RRV 从完全关闭状态快速切换到打开状态,之后再由 PWM 信号控制农药注入速率。

图 6 是当 PWM 信号高电平宽度设置为 800 μs 驱动 RRV 注入农药时,流量传感器测量农药注入速率的变化过程。从中可以看出当采用不携带启动时间的 PWM 信号驱动时,RRV 农药注入速率需要耗时约 4.5 s 才能从零逐渐上升到稳定值,而当采用携带启动时间的 PWM 信号时,农药注入速率达到稳定值所用时间减小至 1.4 s 左右。

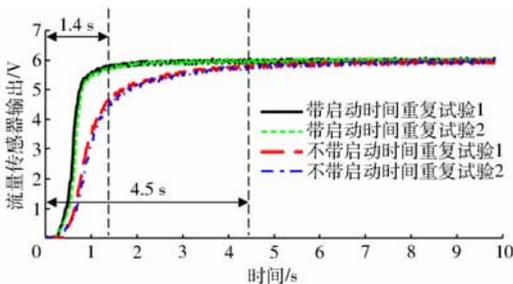


图 6 受不同 PWM 信号控制的 RRV 输出响应对比

Fig. 6 Comparison of RRV activities under different PWM signals

2.2 RRV 输入输出特性

为了测试在不同农药传送压力下,PWM 信号脉

冲宽度 P 和农药注射速率之间的关系,试验设定水的传送压力为 0.3 MPa,农药传送压力依次设置为 0.6、0.7、0.8 MPa,测量 RRV 的输入输出特性,以比较 RRV 的最佳工作条件。图 7 是 RRV 农药注入速率与 PWM 信号脉冲宽度的关系曲线。从图中可以看出,RRV 具有较宽的农药注入速率范围,从低于 0.1 mL/min 至超过 30 mL/min,基本满足农药实际应用速率范围。另外通过试验还可看出,当农药传送压强为 0.7 MPa 时,RRV 的输入输出曲线更加平滑,线性程度更好,通常情况下线性系统更加容易被控制。

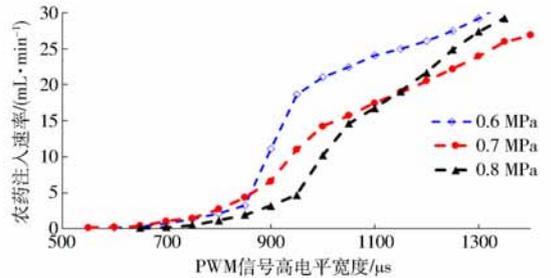


图 7 RRV 输入输出特性

Fig. 7 Input - output characteristics of RRV

2.3 RRV 完全开启功耗测试

RRV 的开合由金属球的受力情况决定,当所受电磁吸力大于农药推力时,RRV 打开。RRV 腔体内电磁场由流过铜感应线圈的电流产生,电流强度决定电磁场大小。当农药传送压强越大时,RRV 打开农药通道需要的电流就越大,即 RRV 的功耗越大。表 1 是 RRV 在不同农药传送压力下完全开启时所需要的电压及功耗,从中可以看出开启 RRV 所需功耗和农药传送压力呈良好的线性正相关关系。应用 RRV 注入农药时,PWM 信号控制 RRV 使其处于快速开启和关闭的交替状态,相同农药传送压力情况下,RRV 实际工作功耗小于完全开启时功耗。

表 1 RRV 完全开启时电压和功耗

Tab. 1 Voltage and consuming power needed for different delivering pressures of pesticide

农药传送压力/MPa	RRV 两端电压/V	RRV 功耗/W
0.1	0.436	0.83
0.2	0.638	1.77
0.3	0.740	2.38
0.4	0.850	3.14
0.5	0.912	3.62
0.6	1.006	4.40
0.7	1.035	4.66
0.8	1.136	5.61
0.9	1.172	5.97
1.0	1.320	7.58

2.4 RRV 关闭时间测试

当 RRV 内部铜线圈没有电流时,金属球受到农

药推力作用被推向橡胶垫圈至紧密结合,阻断了农药传输路径,此时 RRV 呈关闭状态。但金属球并非只受农药推力作用,通过 RRV 电磁阀座的农药注入孔径,金属球也受到加压水的推力作用,由于水的压强小于农药压强且受农药推力的面积远大于水的推力面积,因此金属球的总合力和农药推力方向一致。将开启状态的 RRV 断电关闭时,农药将金属球推向橡胶垫圈至完全阻断农药注入的过程并不是在瞬间完成,这一过程所耗时间与农药粘滞性、水压力以及农药压力有关。图 8 反映了当水压力为 0.3 MPa, 农药传送压力分别为 0.4 ~ 0.7 MPa, 关闭 RRV 时, 农药注入速率降低至零的过程。图表纵轴为表征农药注入速率的流量传感器输出,可以看出当农药传送压力小于 0.4 MPa 时,完全关闭 RRV 所需时间较长(约 10 s),当压力增大至 0.5 MPa 以上时,关闭 RRV 的耗时被大大缩短。当农药传送压力为 0.7 MPa 时,耗时约为 3.5 s。

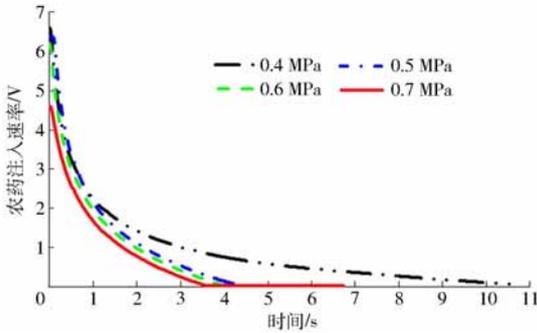


图 8 不同农药传送压力下 RRV 关闭过程

Fig.8 RRV closing procedure under different pesticide transfer pressures

2.5 PID 闭环控制

图 9 是闭环控制农药注入速率的效果,本试验指定流量计输出为 8 V(相当于设置农药速率为 11.8 mL/min)。试验分别采用 Ziegler - Nichols 法^[15]整定的 PID 参数和 2 组随机选择的 PID 参数进行控制比较,通过多次试验微调,发现参数为 $K_c = 25$, $T_i = 0.6$ 和 $T_d = 0$ 时对系统的控制效果最佳。图 9 中 3 条曲线分别表示 3 组不同 PID 参数控制器的控制输出。实线为控制参数为 $K_c = 25$, $T_i = 0.6$ 和 $T_d = 0$ 的控制效果,和 2 组随机选择的 PID 参数控制器相比,它引起的超调量最小且调控过程震荡也最小,虽然每组 PID 参数最终都能将流速控制到设定水平,但全面比较 3 组控制器的瞬态响应,PID 参数 K_c 、 T_i 、 T_d 分别为 25、0.6、0 时控制效果最佳,大约用时 1.3 s 便达到目标流速的稳定状态。

闭环控制器的性能也可通过电导率传感器的输出进行验证,图 10 是 PID 控制器($K_c = 25$, $T_i = 0.6$ 和 $T_d = 0$)将农药速率稳定到 11.8 mL/min(即指定

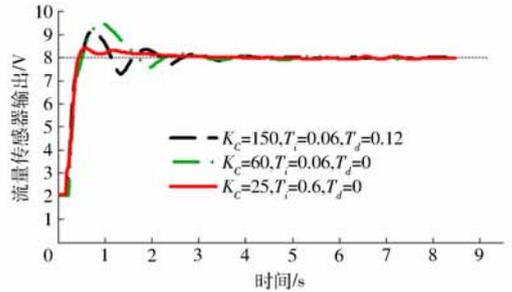


图 9 不同 PID 参数控制农药注入速率

Fig.9 Pesticide dosing injection rate controlled by different PID parameters

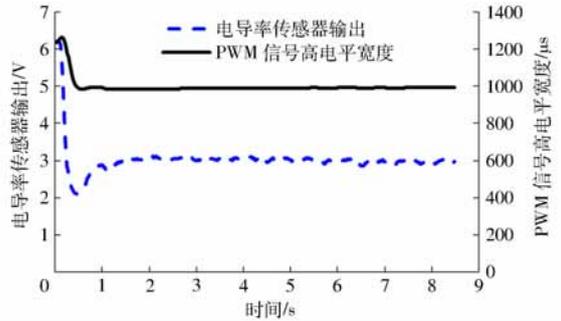


图 10 PID 控制器调整过程

Fig.10 Regulating process of PID controller

流量计输出 8 V) 的调控过程。实线是实时调控的 PWM 信号高电平宽度变化,虚线是电导率传感器在喷嘴处检测的农药浓度信息。比较流量计和电导率传感器的输出可以看出,尽管两者变化趋势相反(电导率传感器与农药速率负相关,而流量计与速率正相关),但同步变化,且相关性极强。由此可以看出流量计输出和电导率均可被用来指示流速。待流速控制进入稳定状态,稳定的电导率也表明混合溶液的浓度稳定,即由闭环控制器控制的农药注入速率稳定。

表 2 为控制器稳定农药注入速率的瞬态响应参数指标。总体而言,系统稳态误差小于 0.021 V(通过流量计的输出标识流速),意味着速率基本可稳定在设定值。调节时间小于 3.17 s 表明控制器可在短时间内将速率调整到设定值。

表 2 控制器瞬态响应指标参数

Tab.2 Transient performance of controlling module					
设定流量 计输出/V	对应农药注入速 率/(mL·min ⁻¹)	调节 时间/s	稳态 误差/V	最大超 调量/%	上升 时间/s
4	0.129	3.09	0.016	24.65	0.42
5	0.174	3.17	0.019	36.88	0.40
6	0.277	2.58	0.021	20.77	0.42
6.5	2.611	3.32	0.020	30.98	0.44
7	4.647	1.31	0.011	6.48	0.38
8	11.809	0.98	0.010	4.13	0.38
9	23.367	1.26	0.013	5.36	0.36

为测试 PID 控制器稳定农药注入速率的性能,

人为改变施药过程中农药传送压强以制造干扰 RRV 工作的因素。图 11a 展示的是农药传送压力

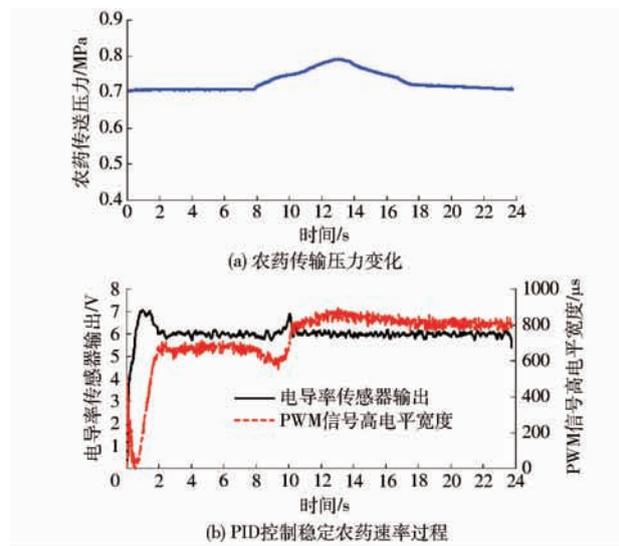


图 11 农药传输压强变化时 PID 控制器稳定农药速率过程

Fig. 11 Process of PID controller regulating pesticide dosing rate as pesticide transfer pressure varying

随时间的变化过程,从 8 s 开始农药传送压力逐渐加大。图 11b 实线是农药注入速率(由电导率传感器输出标识)随时间变化的过程。在 8 ~ 11 s 之间,电导率传感器输出随压强变化有小幅上升,随后经过 PID 控制的调整后又稳定至原值。图中虚线是 PID 控制器实时调控 PWM 信号高电平宽度以达到调节农药注入速率的过程。

3 结束语

本文测试的基于快速响应电磁阀和闭环控制策略的直接喷嘴注入式系统为实现农药定点、变量喷洒提供了一种可行的技术方案。采用 RRV 可准确计量农药注入速率,闭环控制策略可获得较稳定的农药速率控制效果,农药注入速率可在小于 4 s 内达到设定值,注入速率的稳定性相对于没有控制策略有明显提高。

参 考 文 献

- GERHARDS R, OEBEL H. Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying[J]. *Weed Res.*, 2006, 46(3): 185 - 193.
- LUTMAN P J W, MILLER P C H. Spatially variable herbicide application technology; opportunities for herbicide minimisation and protection of beneficial weeds[R]. Research Review Funded by HGCA (Project No. RD - 2006 - 3298), 2007.
- MOHAMMADZAMANI D, RASHIDI M. Generating a digital management map for variable rate herbicide application using the global positioning system[J]. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 2009, 3(1): 101 - 106.
- 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 59 - 72.
- QIU B J, YAN R, MA J, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 59 - 72. (in Chinese)
- MILLER P C H, BUTLER ELLIS M C. Effects of formulation on spray nozzle performance for applications from ground-based boom sprayers[J]. *Crop Protection*, 2000, 19(8 - 10): 609 - 615.
- DENG W, HE X, DING W. Droplet size and spray pattern characteristics of PWM-based continuously variable spray[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2009, 2(1): 8 - 18.
- 胡开群, 周舟, 祁力钧, 等. 直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 70 - 74.
- HU K Q, ZHOU Z, QI L J, et al. Spraying performance of the direct injection variable[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 70 - 74. (in Chinese)
- GEBHARDT M R, KLIETHERMES A R, GOERING C E. Metering concentrated pesticides[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(1): 18 - 23.
- FROST A R. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1990, 46: 55 - 70.
- LAMMERS P S, VONDRICKA J. Direct injection sprayer[M]//OERKE E C, GERHARDS R, MENZ G, et al. *Precision Crop Protection-the Challenge and Use of Heterogeneity*, Berlin: Springer, 2010: 295 - 310.
- VONDRICKA J, LAMMERS P S. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(1): 61 - 66.
- DOERPUND M, CAI X, WALGENBACH M, et al. Assessing the cleanability of a direct nozzle injection system [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 110(1): 49 - 56.
- DOERPUND M, CAI X, WALGENBACH M, et al. The challenge of cleaning direct-injection systems for pesticide application [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(5): 1643 - 1650.
- 蔡祥, WALGENBACH MARTIN, DOERPUND MALTE, 等. 基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 69 - 72.
- CAI X, WALGENBACH M, DOERPUND M, et al. Direct nozzle injection sprayer based on electromagnetic-force valve[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6): 69 - 72. (in Chinese)
- ZIEGLER J G, NICHOLS N B, ROCHESTER N Y. Optimum settings for automatic controllers[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, 115(2B): 220 - 222.