

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.013

基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统*

蔡祥¹ Walgenbach Martin² Doerpmund Malte² Schulze Lammers Peter² 孙宇瑞¹

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

摘要: 设计了一种喷嘴直接注入式农药喷洒系统。通过与传统喷雾机械比较, 简述了喷嘴直接注入式喷雾系统的结构和喷雾执行单元。为了实现农药定量注入, 设计一种基于电磁原理的快速响应阀, 并论述其工作原理和闭环控制方式。通过试验测试了喷雾执行单元的喷雾特性和喷杆组内各喷雾单元的一致性。结果表明在一定喷洒速率范围内, 喷雾执行单元的喷水量和水压强存在多项式关系, 农药注入量和 PWM 信号的高电平时间存在指数关系, 其决定系数均高于 0.9, 并且同一喷杆组内 6 个喷雾单元的喷雾效果大体一致。

关键词: 直接注入式 电磁原理 快速响应阀门 脉宽调制 变量喷雾

中图分类号: S49; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0069-04

Direct Nozzle Injection Sprayer Based on Electromagnetic-force Valve

Cai Xiang¹ Walgenbach Martin² Doerpmund Malte² Schulze Lammers Peter² Sun Yurui¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Landtechnik, Bonn University, Bonn 53115, Germany)

Abstract: A type of direct nozzle injection sprayer was developed. By comparing with traditional spraying machines, the detailed structure and advantage of direct nozzle injection sprayer, especially to the injection unit, were analyzed. In order to dose pesticide precisely, a type of fast reaction valve based on electromagnetic principle was designed. The structure and control strategy were discussed in detail. The test of sprayer performance was carried out. The results showed that there existed a polynomial relationship between the water injection and the water pressure, and an exponential relationship between the pesticide injection and the opening time of PWM signal. The determination coefficients of both models were above 0.9. Besides, the uniformity of the six injection units within one boom section was tested and showed good performance.

Key words: Direct nozzle injection Electromagnetism Fast reaction valve Pulse width modulation Variable rate spraying

引言

农药防治对农产品的高产、稳产至关重要。但随着农药大量使用, 我国落后的农药施药技术使得生态环境遭到严重破坏。不仅如此, 农药有效利用率低、农产品农药残留超标等各种问题也日益凸现^[1]。近年来随着我国农业机械化的普及, 农药机械化喷洒技术也得到了大力推广。但是依靠人工操

作的农药喷洒方式依然十分普遍, 背负式手动喷雾器因其价格便宜, 操作简单而被广泛应用。但该装置存在喷雾效率低, 操作人员接触农药时间长等缺点^[2]。发达国家的农药喷洒基本由机械完成, 较为传统的喷药方式将水和农药事先按比例配制好装入药箱, 通过压力泵传送至执行机构实施喷雾。这种方法具有自动化程度高、节约人力成本等优点, 缺点是没有考虑病虫草害分布差异, 无差别均匀施药很

收稿日期: 2012-06-27 修回日期: 2012-08-07

* 中德合作科研资助项目(GZ494)

作者简介: 蔡祥, 博士生, 主要从事农业自动化与机械化研究, E-mail: caixiang617@gmail.com

通讯作者: 孙宇瑞, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤传感技术及农业自动化研究, E-mail: pal@cau.edu.cn

容易造成农药浪费和环境污染^[3]。为了更加科学、经济和高效地利用农药,变量喷药技术受到广泛关注。该技术的核心是根据农田区域内病虫害差异性,采取高效喷雾技术和变量喷施技术,按需施药^[4-5]。发达国家对于变量执行机械的研发积极,现已基本研制出基于处方图和基于实时传感技术的变量农药喷施系统^[6-7]。

本研究在德国波恩大学农业机械研究所进行,设计一种喷嘴直接注入式农药喷洒系统,并分析该系统变量喷雾执行单元的构造和基于电磁原理的快速反应阀门。作为喷雾执行机构,本研究可为变量施药和定点定量定性施药提供一种新技术支持。

1 系统结构设计

药剂注入式系统作为实现变量喷雾的重要执行机械之一,根据农药注入位置的不同,可分为以下3种形式:中心注入式(图1b),分散注入式(图1c)和喷嘴直接注入式(图1d)。3种形式除了在结构设计和造价成本上有所差别,其主要区别在于系统从控制浓度发生变化到该浓度药液均匀到达喷嘴的延时不同以及农药的混合程度不同,研究表明农药的注入位置离喷头越近延时越小^[8-10]。

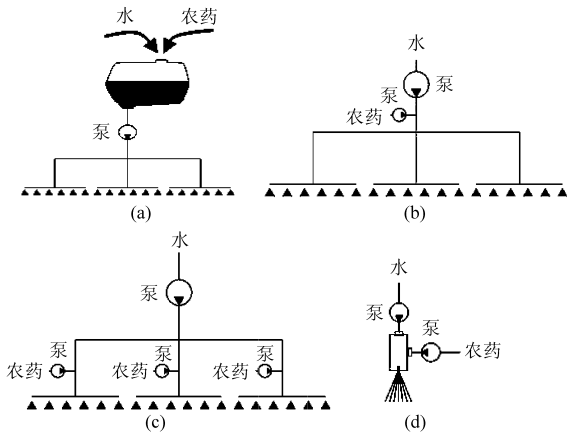


图1 农药喷雾执行机械结构

Fig.1 Structures of four types of sprayer

(a) 传统喷雾机械结构 (b) 中心注入式
(c) 分散注入式 (d) 喷嘴直接注入式

本研究设计的喷嘴直接注入式喷雾系统(图1d),主要由水箱、药剂箱、压力泵、喷雾执行单元和控制系统组成,如图2所示。水泵和药泵分别为水和农药施加定量压力,将液体泵入导管并传送到各喷雾单元。喷雾系统完全伸展时全长21 m,每0.5 m安装1个喷雾单元。所有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动作相同。

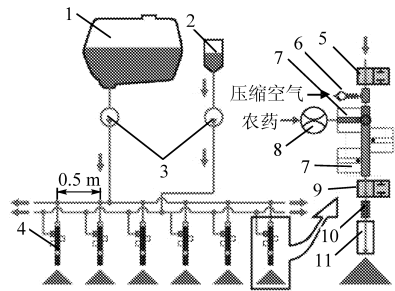


图2 喷嘴直接注入式喷洒系统结构示意图

Fig.2 Structure of direct nozzle injection spraying system

1.水箱 2.药剂箱 3.压力泵 4.喷雾执行单元 5.电气动阀
6.单向阀 7.快速响应阀 8.流量计 9.安全阀 10.混合腔
11.喷头

本文以一个喷杆组为例,论述其构造及工作原理。

2 喷雾执行单元

喷雾执行单元主要由电气动阀,单向阀,快速响应阀,流量计,混合腔,安全阀和喷头组成(图2)。喷洒农药时,电气动阀和安全阀开启,水流泵入喷雾单元,快速响应阀按照剂量注入农药,2种液体流经混合腔内充分混合后从喷嘴喷出。喷药结束后清洗喷雾系统,电气动阀和安全阀关闭,单向阀开启,压缩空气将阀门和管道中未被稀释的农药排回药箱。随后关闭单向阀,打开电气动阀和安全阀,利用压力水冲刷喷雾单元。快速响应阀可以根据实际需求多个并排安装,连接不同种类农药,通过控制器选择快速阀门的关闭,可针对不同喷雾环境选择性注入农药种类,实现目标针对性喷洒。

2.1 快速响应阀

快速响应电磁阀主要由圆柱形金属腔体、腔体内线圈、金属球、阀门座以及橡胶垫圈等组成,如图3所示。

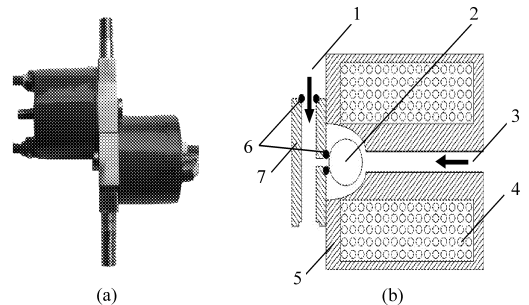


图3 快速响应阀实物及剖面图

Fig.3 Picture and cross section drawn of rapid reaction valve

(a) 实物 (b) 剖面

1.溶剂入口 2.金属球 3.农药入口 4.腔体内线圈 5.金属腔体 6.橡胶垫圈 7.阀门座

2.1.1 快速响应阀工作原理

为了使农药能够顺利注入到溶剂中,快速响应

阀门的农药入口端和出口端必须存在压差,且入口端压强大于出口端。当阀工作在关闭状态时(图4a),阀内金属球受到农药和水的推力。由于农药推力大于水推力,金属球被推至橡胶垫圈与其紧密接触,阻断农药流通。当阀工作在开启状态时(图4b),线圈中有电流通过,基于电磁感应原理,圆柱形金属腔体内产生磁通,由于金属腔体不完全对称的结构设计,在金属球活动范围内产生特定方向的磁场。金属球受到磁场吸引,且磁吸力远大于金属球受到的农药推力,金属球离开橡胶垫圈偏向一边,农药入口和出口间产生了通路,农药从此通路注入。此时金属球所受到的磁吸力为

$$f = -H^2 \cdot \nabla \mu$$

式中 H ——磁场强度 μ ——金属球磁导率

电磁阀受力分析与通过线圈的电流大小、金属球材质和大小、金属腔体结构以及农药出入口压强等均有关。

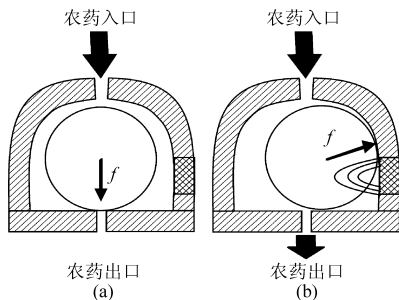


图4 快速响应阀关闭及开启状态示意图

Fig. 4 Closed and opened status of rapid reaction valve

(a) 关闭 (b) 开启

2.1.2 快速响应阀控制

PWM 流量调节是利用 PWM 控制电磁阀在变量喷雾系统管路中启闭时间和动作频率来控制系统中的药液流量。这种控制方式对系统压力和喷洒雾化效果影响较小,但在低频调节下存在喷雾状态不连续的问题。由于电磁阀结构设计的限制,文献[11~13]中基于 PWM 调制的电磁阀大多工作在 1~20 Hz 左右,这样低频的电磁阀如果用在注入式系统中控制农药注入量,其控制范围和准确性极其有限。本文使用的快速响应阀可工作在 100 Hz 或更高的动作频率下,通过调控 PWM 信号的占空比,即 PWM 信号高电平时间(以下称为开启时间,0~10 000 μ s)长短,控制农药注入量。

2.2 混合腔

为确保喷洒雾滴的均匀,注入的农药和水在喷洒之前需要进行充分混合。本研究的喷雾系统充分借用安装在喷头前的混合腔体,实现农药现场混合。考虑到实际喷雾执行单元体积有限,用于实时混合的腔体必须满足在有限混合长度下,达到很好的混

合效果,且液体经过混合腔前、后的压强衰减要小。采用重复叠加的迷宫形方格混合腔体,如图5所示。混合腔体的长度根据实际需要确定,本研究选取 7.5 cm。



图5 混合腔

Fig. 5 Mixing chamber

3 控制系统

控制系统采用美国 NI 公司生产的 compact Rio 9014 型控制器,它具有响应速度快、可靠性好、采用 LabView 图形语言编程、开发时间短等优点。喷雾时为了减小外界对系统干扰的影响,本系统借助流量计,采用闭环控制方式实时控制农药注入量,系统方框图如图6所示。

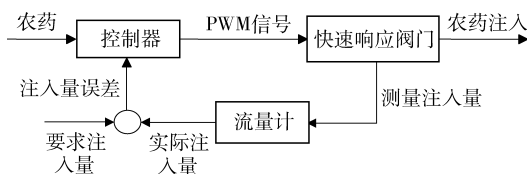


图6 流量闭环控制方框图

Fig. 6 Block diagram of closed-loop control

4 试验

4.1 喷雾单元特性

试验分 2 步完成,步骤 1 测试喷雾单元单位时间内喷水量与水压强之间的关系;步骤 2 测试单位时间内农药注入量与开启时间的关系。

本研究选用扇形雾锥喷嘴(喷雾角 110°)。步骤 1 打开电气动阀和安全阀,调节水泵改变注入水压,测量单位时间内喷洒出水的质量。为了减小误差,连续喷洒 3 min 取平均值。试验结果如图7所示。

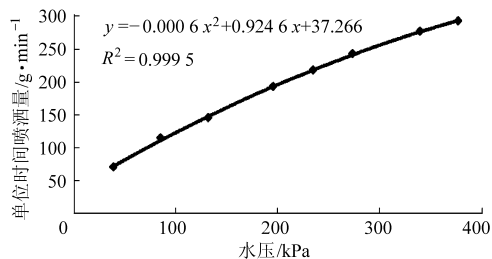


图7 水压与单位时间喷水量关系曲线

Fig. 7 Relationship between water injection rate and water pressure

步骤 2 选用聚乙烯吡咯烷酮粉末(LUVITEC, PVP)配制质量分数为 5% 的溶液,由于 PVP 溶液的

黏性和大部分的农药相同且对人体无毒害作用,因此用于模拟农药进行试验。试验过程关闭电气动阀,打开安全阀,PWM信号频率设置为100 Hz,PVP溶液压强调控至300 kPa。由于农田喷雾量范围从20~5 000 mL/hm²,拖拉机速度为6~10 km/h,因此每个喷雾单元的农药注入量控制在0.1~30 g/min即可满足实际需求。为了减小误差,测量3 min的PVP溶液注入量后取平均值,每个PWM信号下测量3次计算标准差。结果如图8所示,微小的误差条表明快速响应阀可满足精准控制农药注入量的要求。

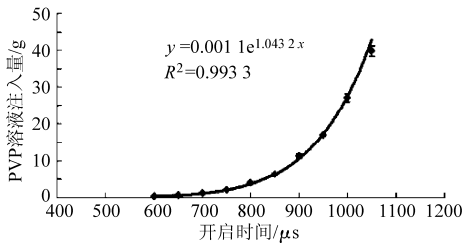


图8 快速响应阀门单位时间内PVP溶液注入量与PWM信号开启时间的关系曲线

Fig. 8 Relationship between PVP solution injection rate and opening time of PWM signal

4.2 喷雾单元一致性

理想情况下,同一喷杆组中的6个喷雾单元应具有相同工作状态,即单位时间内喷洒的农药量相同。但由于喷雾单元所处位置不同,且个体间存在差异,很难确保喷雾单元的喷雾量一致。本试验针对一个喷杆组,打开各喷雾单元的电气动阀和安全阀,快速响应阀的PWM控制信号设置频率为100 Hz

和开启时间为800 μs,水压强和PVP溶液压强分别调控至300 kPa和600 kPa。采用同上一试验相同的数据获取及处理方式,测得结果如图9所示。结果表明喷杆组各喷雾单元喷雾效果大体一致,但仍存在差异。

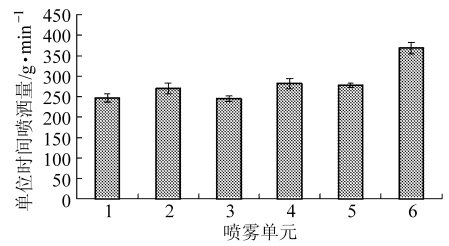


图9 喷杆组内6个喷雾单元单位时间喷雾量

Fig. 9 Injection volumes per minute of six units in one boom section

5 结论

(1)设计了一种基于电磁方法的喷嘴直接注入式农药喷洒系统。实现农药和水分离存放,两者通过混合腔在喷洒时均匀混合,避免了农药浪费,也减少了操作人员与农药的接触时间;药剂由喷嘴处注入,显著缩短了药液到达喷嘴的时间。

(2)设计了一种基于电磁原理的快速响应阀,通过脉宽调制(PWM)方式和闭环控制策略,在保持喷出雾滴特性基本不变的情况下准确改变农药注入量和药液喷洒浓度;且多个快速响应阀并行安装,可根据喷雾环境注入不同种类农药,实现多目标针对性喷洒。试验结果表明快速响应阀的设计为农药的精准计量和多目标选择性喷洒提供了一种实现方法。

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)
- 孙文峰,王立君,陈宝昌,等. 农药喷施技术国内外研究现状及发展[J]. 农机化研究,2009,31(9):225~228.
Sun Wenfeng, Wang Lijun, Chen Baochang, et al. The present situation and development of study on the pesticide applying technology at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2009,31(9):225~228. (in Chinese)
- Schueler J K. A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production[J]. Fertilizer Research, 1992, 33(1):1~34.
- 邱白晶,李会芳,吴春笃,等. 变量喷雾装备及关键技术的探讨[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2004,25(2):97~101.
Qiu Baijing, Li Huifang, Wu Chundu, et al. On variable-rate spraying equipment and its key technology [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,2004,25(2):97~101. (in Chinese)
- 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)
- 王利霞. 基于处方图的变量喷药系统研究[D]. 长春:吉林大学,2010.
- 吴吉麟. 变量喷雾装置喷雾特性及其控制系统的研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- Walker J T, Bansal R K. Development and characterization of variable orifice nozzles for spraying agro-chemicals[C]//1999 ASAE Annual International Meeting, ASAE Paper No. 991008, 1999.

- 8 彭维明. 切向旋风分离器内部流场的数值模拟及试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 20~24.
Peng Weiming. Numerical simulation and experimental research on the flow pattern in tangential inlet cyclone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 20~24. (in Chinese)
- 9 Mushtayer V I, Timonin A S, Tyrin N V, et al. A mathematical model of a spiral dryer for fine polydisperse materials[J]. Drying, 1984; 348~349.
- 10 李文春, 胡桂林, 樊建人, 等. 气固两相平面混合层的直接数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 451~454.
Li Wenchun, Hu Guilin, Fan Jianren, et al. Direct numerical simulation of gas-solid two-phase mixing layer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 451~454. (in Chinese)
- 11 高国华, 李鑫钢, 姜斌, 等. 提升管反应器进料段气-固两相流的 CFD 模拟及结构优化[J]. 石油学报: 石油加工, 2010, 26(6): 959~965.
Gao Guohua, Li Xin'gang, Jiang Bin, et al. Gas-solid flow CFD simulation and structural optimization of feed injecting zone of riser reactor[J]. Acta Petrolei Sinica; Petroleum Processing Section, 2010, 26(6): 959~965. (in Chinese)
- 12 李志强, 魏飞, 李荣先, 等. 修正的 κ - ε - κ_p 双流体模型用于模拟旋流突扩燃烧室内气固两相流动[J]. 热能动力工程, 2003, 18(5): 459~462.
Li Zhiqiang, Wei Fei, Li Rongxian, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flows in a swirling-flow combustor through the use of a modified κ - ε - κ_p two-fluid model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(5): 459~462. (in Chinese)
- 13 陈义良. 湍流计算模型[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991.
- 14 Bandrowski J, Kaczmarzyk G. Gas-to-particle heat transfer in vertical pneumatic conveying of granular materials[J]. Chemical Engineering Science, 1978, 33(10): 1303~1310.
- 15 Matsumio S, David C T P. A mathematical analysis of pneumatic drying of grains— I. Constant drying rate [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(6): 843~849.
- 16 韩凤琴, 王幼青, 高海鹏, 等. 涡轮出口旋流对扩大管压力恢复性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 25~29.
Han Fengqin, Wang Youqing, Gao Haipeng, et al. Effect of runner outlet swirling flow on diffuser pressure recovery[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(1): 25~29. (in Chinese)
- 17 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 99~103.
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. CFD simulation on cavitation characteristics in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 99~103. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 72 页)

- 9 Hloben P. Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides[D]. Bonn: University of Bonn, 2007.
- 10 Vondřička J. Study on the process of direct nozzle injection for real-time site-specific pesticide application [D]. Bonn: University of Bonn, 2007.
- 11 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 Kaiqun, Zhou Zhou, Qi Lijun, et al. Spraying performance of the direct injection variable rate sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 70~74. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 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)
- 14 陈超, 李红, 袁寿其, 等. 出口可调式变量喷头喷灌均匀性[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(6): 536~541.  
Chen Chao, Li Hong, Yuan Shouqi, et al. Irrigation uniformity of nozzle-changeable variable-rate sprinkler[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 536~541. (in Chinese)