

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.009

PWM 变量喷雾喷头流量模型*

翟长远¹ 王 秀² 密雅荣¹ 范鹏飞² 马永兵¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

【摘要】 基于脉宽调制(PWM)的变量喷雾控制中,尤其对喷头进行独立控制时,喷头流量模型不可或缺。设计了能够精确控制喷雾压力,便捷设定 PWM 参数的试验平台,并使用该平台进行了二次回归正交试验,针对 TEEJET AITXA 8002 型、8003 型和 8004 型喷头分别建立了喷头流量模型。参数检验和失拟检验表明喷头流量模型合适。模型普适性试验表明,8002 型喷头模型最大相对误差为 7.05%,最小相对误差为 0.14%;8003 型喷头模型最大相对误差为 7.27%,最小相对误差为 0.31%;8004 型喷头模型最大相对误差为 7.94%,最小相对误差为 0.71%;模型计算流量和实际测量流量具有很好的一致性。

关键词: 变量喷雾 脉宽调制 喷头流量模型

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0040-05

Nozzle Flow Model of PWM Variable-rate Spraying

Zhai Changyuan¹ Wang Xiu² Mi Yarong¹ Fan Pengfei² Ma Yongbing¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract

Nozzle flow model is indispensable in variable-rate spraying control based on pulse width modulation (PWM) technology, especially when nozzles are controlled independently. A variable-rate test platform which could control spraying pressure precisely and was easy to set PWM parameters was designed. The central composite orthogonal regression tests were completed by using the test platform, and the flow models of TEEJET AITXA nozzles of type 8002, 8003 and 8004 were obtained. The results of equation hypothesis test and test for lack of fit of flow models showed that the three flow models were agreeable. The maximum relative error of the TEEJET AITXA nozzle model of type 8002 was 7.05%, while the minimum relative error was 0.14%. For the type 8003, the maximum and minimum relative errors were 7.27% and 0.31%. And for the type 8004, the maximum and minimum relative errors were 7.94% and 0.71%. Nozzle flow model validation trials showed that the relative errors between model flow and actual flow were small.

Key words Variable-rate spraying, Pulse width modulation, Nozzle flow model

引言

变量喷雾技术是对靶喷药实施的保障,主要有

改变压力控制流量法、改变行走速度调节施药量法和基于脉宽调制(PWM)技术的流量控制法^[1~2]。改变压力控制流量法依据喷雾流量与液压的平方根

收稿日期: 2011-09-09 修回日期: 2011-12-20

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B06)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA101904-6)、陕西省科技计划资助项目(2011K02-05)和西安市科技创新支撑计划资助项目(NC1122(1))

作者简介: 翟长远,讲师,博士生,主要从事农业机械化工程、农业电气化及其自动化技术研究,E-mail: zhaichangyuan@163.com

通讯作者: 王秀,研究员,主要从事智能农业装备相关技术研究,E-mail: wangx@nercita.org.cn

呈比例,通过改变喷雾压力可以改变喷雾流量^[3~5],但对于一定流量控制范围,所需要的压力调节范围须非常宽,而压力的变化会改变雾滴粒径和喷雾分布方式,很难达到喷雾性能要求。改变行走速度调节施药量法,由于行走速度变化较慢,应用范围具有较大局限性。基于 PWM 技术的流量控制法利用 PWM 波控制电磁阀频繁开关以控制工作流量,进而对喷雾量按需控制^[6~12],研究表明 PWM 变量喷雾流量调节范围宽,工作稳定。基于 PWM 技术进行变量喷雾,喷头流量模型是必不可少的^[13]。Lebeau、杨莉等使用线性方程对喷头特性进行了描述,方程使用方便,但没有考虑喷雾压力和 PWM 频率对喷头流量的影响,只能在某一确定压力和固定频率下使用^[14~15]。刘大印等采用正交组合设计方法,在 PWM 频率为 10 Hz 的条件下,建立了压力、PWM 占空比和流量的关系模型,没有考虑 PWM 频率对流量的影响,使用范围受到限制^[16]。

本文旨在设计 PWM 变量喷雾喷头流量模型试验台的基础上,通过二次回归正交设计试验建立 TEEJET AITXA 8002 型、8003 型、8004 型喷头流量模型。

1 材料与方法

1.1 试验平台搭建

为了建立喷头流量模型,搭建了一个能够精确控制喷雾压力,便捷设定 PWM 参数的试验平台,如图 1 所示。

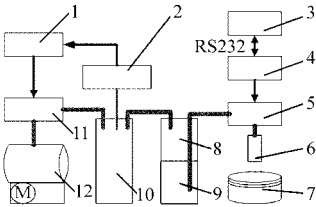


图 1 喷头流量模型试验平台框图

设定压力。在试验过程中液位变化不大,且喷头与液位近似处于同一高度,可以认为气罐气体压力即为喷雾压力。PWM 波发生模块包含计算机、PWM 波发生器和电磁阀,用户使用计算机软件设置 PWM 波频率和占空比,计算机通过 RS232 串口将参数发送给 PWM 波发生器发出 PWM 波,按要求控制电磁阀频繁开闭。调压控制器和 PWM 波发生器如图 2 和图 3 所示。计算机软件界面如图 4 所示。

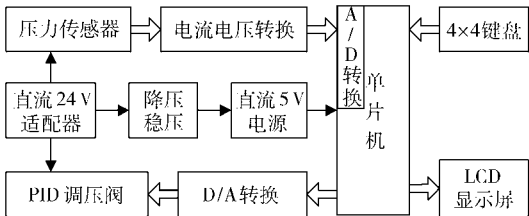


图 2 调压控制器原理框图

Fig. 2 Block diagram of spraying pressure controller

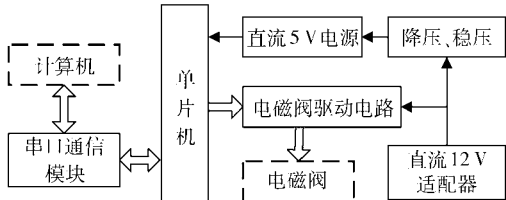


图 3 PWM 波发生器框图

Fig. 3 Block diagram of PWM waveform generator

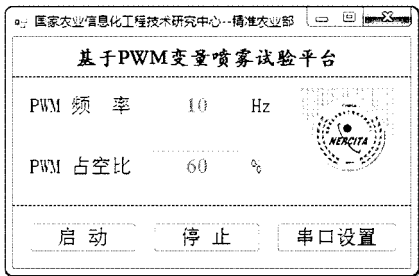


图 4 计算机软件界面

Fig. 4 Computer software interface

喷头流量模型试验平台包括药液供给模块、压力控制模块和 PWM 波发生模块。药液供给模块包括气泵、气罐、药罐、喷头和收集皿,气泵压缩空气向气罐提供一定压力的气体,气体通过管道进入药罐,药液在气体压力的作用下沿药罐底部管道经过喷头喷射出去,收集皿能够收集药液以测量其体积。压力控制模块由调压控制器、PID 调压阀和压力传感器组成,调压控制器通过压力传感器采集气罐内气体压力,并实时控制 PID 调压阀,使压力恒定于用户

调压控制器的核心是单片机 STC12C5A60S2,它集成了 8 路数模转换器。4 × 4 键盘和 128 × 64 LCD 显示屏作为控制器的输入输出设备,用于和用户进行信息交换,接收用户压力设置并将设置压力和实际压力显示给用户。压力传感器(AST4100 型,美国传感器技术公司)将压力信息转换为 4 ~ 20 mA 电流信号,经电流、电压转换后送给单片机内置的 A/D 转换模块,单片机根据用户设置压力和实际压力输出数字控制信号,该信号经过数模转换后控制 PID 调压阀(FESTO MPPE-3-1/8-6-420-B)。直流 24 V 适配器为压力传感器和 PID 调压阀提供电源,降压、稳压模块将 24 V 电压转换为直流 5 V 电源为单片机供电。

PWM 波发生器由单片机(STC12C5A60S2)、串

口通信模块、电磁阀驱动电路和电源转换模块组成。串口通信模块用于实现计算机和单片机通信。电磁阀(GE8200-2 型,浙江温岭捷凯阀业有限公司)驱动电压为 12 V,单片机无法直接驱动,需要设计驱动电路对单片机驱动信号进行放大。降压、稳压电路实现直流 12 V 向直流 5 V 的转换,为单片机供以 5 V 稳定电压。

计算机软件主要具有串口设置、PWM 波参数输入和 PWM 波输出启停功能。串口设置用于设置和单片机通信的串口号、波特率、校验位、数据位和停止位等参数。当用户发出启动命令,软件会打开串口并通过串口向 PWM 波发生器发送 PWM 参数和启动命令字符串;当发出停止命令时,软件发送停止命令字符串以使 PWM 波发生器停止输出 PWM 波信号并关闭计算机串口。

1.2 二次回归正交组合设计

PWM 变量喷雾喷头流量会受到喷雾压力、PWM 频率和占空比的影响,为了建立喷头流量模型,本文采用二次回归正交组合设计方法^[17],试验因素水平如表 1 所示。

针对 3 种锥形喷头 TEEJET AITXA 8002 型、8003 型和 8004 型,从每种类型中随机选出一个喷头,使用喷头流量模型试验平台,分别进行试验。根据二次回归正交试验方法,每一个喷头需要手工测量 17 组流量数据,每组包含 3 次重复。每次测量

中,用秒表记录喷雾时间(约 20 s),用量杯测量液体体积,进而计算出喷头流量。

表 1 试验因素水平
Tab.1 Experiment factors and levels

水平	因素		
	压力 x_1 /MPa	频率 x_2 /Hz	占空比 x_3
γ	0.50	10	0.90
1	0.46	9	0.82
0	0.35	6	0.60
-1	0.24	3	0.38
$-\gamma$	0.20	2	0.30

2 结果及其分析

2.1 TEEJET AITXA 8002 型喷头流量模型

TEEJET AITXA 8002 型喷头流量模型试验结果如表 2 所示,流量 1~3 是手工测量的 3 次重复数据,平均流量是这 3 次重复的平均值。17 组试验中前 14 组是正交试验数据,后 3 组是中心点重复试验数据。计算出失拟检验统计量 $F_{L_f} = 3.94 < F_{0.95}(5, 2) = 19.3$, $F = 126.6 > F_{0.95}(9, 7) = 3.7$,说明所得喷头流量模型是合理的。计算出回归模型为

$$y = 27.69pd - 5.34p + 4.81d + 1.34 \tag{1}$$

式中 p ——喷雾压力,MPa
 d ——占空比 y ——喷头流量,mL/s

表 2 TEEJET AITXA 8002 型喷头流量模型试验结果
Tab.2 Flow model trial results of TEEJET AITXA nozzle of type 8002

试验	压力 x_1 /MPa	频率 x_2 /Hz	占空比 x_3	流量 1/mL·s ⁻¹	流量 2/mL·s ⁻¹	流量 3/mL·s ⁻¹	平均流量/mL·s ⁻¹
1	0.46	9	0.82	12.48	12.56	12.72	12.59
2	0.46	9	0.38	5.23	5.24	5.28	5.25
3	0.46	3	0.82	13.74	13.64	14.01	13.80
4	0.46	3	0.38	5.66	5.69	5.78	5.71
5	0.24	9	0.82	9.28	9.41	9.69	9.46
6	0.24	9	0.38	4.50	4.46	4.46	4.48
7	0.24	3	0.82	9.42	9.52	9.50	9.48
8	0.24	3	0.38	4.46	4.36	4.43	4.41
9	0.50	6	0.60	9.91	9.62	9.56	9.70
10	0.20	6	0.60	5.96	6.05	6.00	6.00
11	0.35	10	0.60	7.83	7.85	7.89	7.86
12	0.35	2	0.60	8.23	8.43	8.21	8.29
13	0.35	6	0.90	12.44	12.28	12.26	12.33
14	0.35	6	0.30	3.64	3.64	3.64	3.64
15	0.35	6	0.60	8.87	9.07	9.01	8.98
16	0.35	6	0.60	8.81	8.67	8.53	8.67
17	0.35	6	0.60	8.44	8.41	8.40	8.42

为分析流量模型的普适性,随机选取 3 个同类型的喷头,随机选择不同压力和 PWM 参数的4 种组合对该流量模型进行了验证试验,试验结果如表 3 所示。由表可知,模型流量和实际测量流量具有很好的一致性,最大相对误差为 7.05%,最小误差为 0.14%。

2.2 TEEJET AITXA 8003 型和 8004 型喷头流量模型

TEEJET AITXA 8003 型喷头流量模型为

$$y=0.0456f^2+8.47d^2+21.90pd-$$

$$1.14p-0.67f+1.39d+3.86$$
 (2)

式中 f ——PWM 频率,Hz

模型流量和实测流量有很好的一致性(表 3),最大相对误差为 7.27%,最小误差为 0.31%。

TEEJET AITXA 8004 型喷头流量模型为

$$y=0.09f^2+21.69d^2+23.97pd+1.07p-1.09f-9.97d+7.11$$
 (3)

该模型普适性试验(表 3)表明最大相对误差为 7.94%,最小误差为 0.71%。

表 3 TEEJET AITXA 喷头流量模型普适性分析
Tab.3 Universal analysis of TEEJET AITXA nozzle flow model

喷头 型号	压力/ MPa	频率/ Hz	占空比	模型值 /mL·s ⁻¹	喷头 1 测量值		喷头 2 测量值		喷头 3 测量值	
					流量 /mL·s ⁻¹	相对误 差/%	流量 /mL·s ⁻¹	相对误 差/%	流量 /mL·s ⁻¹	相对误 差/%
8002	0.5	10	0.90	15.46	14.37	7.05	14.64	5.30	15.03	2.78
	0.4	5	0.50	7.15	7.12	0.42	6.99	2.24	7.14	0.14
	0.3	10	0.70	8.92	9.10	2.02	9.21	3.25	8.72	2.24
	0.2	6	0.90	9.59	9.71	1.25	9.91	3.34	9.43	1.67
8003	0.5	10	0.90	19.12	19.18	0.31	18.86	1.36	18.10	5.33
	0.4	5	0.50	8.39	9.00	7.27	8.75	4.29	8.48	1.07
	0.3	10	0.70	11.10	11.63	4.77	10.84	2.34	10.38	6.49
	0.2	6	0.90	13.31	14.25	7.06	12.70	4.58	12.97	2.55
8004	0.5	10	0.90	25.13	23.86	5.05	24.03	4.38	23.62	6.01
	0.4	5	0.50	9.57	9.93	3.76	10.33	7.94	10.21	6.69
	0.3	10	0.70	14.21	13.90	2.18	13.47	5.21	13.99	1.55
	0.2	6	0.90	16.93	17.05	0.71	16.77	0.95	17.57	3.78

3 结论

(1)设计了基于 PWM 变量喷雾喷头流量模型试验台,该试验台能够精确控制喷雾压力,便捷设定 PWM 频率和占空比等参数。

(2)针对 TEEJET AITXA 8002 型、8003 型和 8004 型喷头分别建立了喷头流量模型,并对其进行了参数检验和失拟检验,结果表明喷头流量模型合

适。

(3)随机选择同类喷头的其他喷头进行了模型普适性试验,其中 8002 型喷头模型最大相对误差为 7.05%,最小相对误差为 0.14%;8003 型喷头模型最大和最小相对误差分别为 7.27%和 0.31%;8004 型喷头模型最大和最小相对误差分别为 7.94%和 0.71%,结果表明,模型流量和实际测量流量均具有很好的一致性。

参 考 文 献

1 李丽,宋坚利,何雄奎. 农作物喷雾靶标自动探测器设计与应用[J]. 农业机械学报,2010,41(7):54~56.
Li Li, Song Jianli, He Xiongkui. Design and application of crop automatic target detection device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):54~56. (in Chinese)

2 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)

3 Unavut J K, Schueller J K, Mason P A C. Continuous control of a sprayer pinch valve [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(4): 829~837.

4 Hoffmann W C, Bagley W E, Fritz B K, et al. Effects of water hardness on spray droplet size under aerial application

- conditions [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(1):11~14.
- 5 Guzman J L, Rodriguez F, Sanchez-Hermosilla J, et al. Robust pressure control in a mobile robot for spraying tasks [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(2):715~727.
- 6 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)
- 7 邓巍,何雄奎,丁为民. 用大喷头脉宽调制间歇喷雾提高沉积率的试验研究[J]. 农业工程学报,2009,25(1):104~108.
Deng Wei, He Xiongkui, Ding Weimin. Experimental study on improving deposition rate using PWM-based intermittent spray from enlarged nozzle[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(1):104~108. (in Chinese)
- 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 its spray characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):77~80. (in Chinese)
- 9 Bora G C, Schrock M D, Oard D L, et al. Reliability tests of pulse width modulation (PWM) valves for flow rate control of anhydrous ammonia[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005,21(6):955~960.
- 10 Zhu Hang, Lan Yubin, Wu Wenfu, et al. Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Bionic Engineering, 2010, 7(3):276~283.
- 11 邹伟,李丽,王秀,等. 基于 PWM 调速的变流量喷药系统[J]. 农机化研究, 2011,33(2):163~166.
Zou Wei, Li Li, Wang Xiu, et al. Variable pesticide spraying system based on PWM speed control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(2):163~166. (in Chinese)
- 12 随顺涛,朱瑞祥,王丽丽. 基于脉宽调制的变量喷药技术控制系统[J]. 农机化研究, 2009,31(4):143~145.
Sui Shuntao, Zhu Ruixiang, Wang Lili. Controlling system based on pulse width modulation for variable spraying [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(4):143~145. (in Chinese)
- 13 Delen R, Clijmans L, Anthonis J, et al. A non-linear model to approximate the dynamics of a pulse width-modulated spray nozzle[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004,65:39~48.
- 14 Lebeau F, Bahir L El, Destain M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,43:149~161.
- 15 杨莉. 基于 ARM7 的自动变量喷药系统设计与算法研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
Yang Li. Design and algorithm research of the auto variable spraying system based on ARM7 [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 16 刘大印,王秀,毛益进,等. 基于单片机 PWM 变量农药喷洒控制系统研究[J]. 农机化研究, 2011,33(5):99~103.
Liu Dayin, Wang Xiu, Mao Yijin, et al. Study on PWM variable pesticide spraying control system based on MCU [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5):99~103. (in Chinese)
- 17 李志西,杜双奎. 试验优化设计与统计分析[M]. 北京:科技出版社,2010:226~238.
- 18 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)

(上接第 30 页)

- 9 机械工程手册编辑委员会. 机械工程手册—机械产品(四)[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- 10 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- 11 傅锡敏,吕晓兰,丁为民,等. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化,2009(6):10~13,17.
Fu Ximin, Lü Xiaolan, Ding Weimin, et al. Present state and technical requirement about orchard plant protection machinery in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009(6):10~13, 17. (in Chinese)
- 12 Hewitt A J. Spray drift: impact of requirements to protect the environment [J]. Crop Protection, 2000,19(8~10):623~627.
- 13 王贵恩. 果树仿形喷雾机理及其关键技术研究[D]. 广州:华南农业大学,2003.
Wang Guen. Profile modeling spray mechanism and its technology foundation for fruit trees [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 14 Holownick R, Doruchowski G, Godyn A, et al. Variation of spray deposit and loss with air-jet directions applied in orchards [J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 77(2):129~136.