

基于 BOOST 电路的电磁阀流量控制器设计与试验

沈 跃 黄忠裕 刘 慧
(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 精准施药过程中变量喷雾电磁阀对流量的控制起着至关重要的作用。为了提高电磁阀工作的线性区间, 设计了由单片机、脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)发生器和电磁阀驱动电路组成的电磁阀流量控制器。该控制器利用电磁阀的电感特性, 将 BOOST 电路和传统的电磁阀驱动电路相结合, 为储能电容提供高电位电能。采用双电压驱动的电磁阀, 无需额外的电源电压转换电路, 通过对电磁阀高频通断工作模式的精准控制, 实现了高电压打开、低电压高频率维持导通, 关闭时快速释放能量。测试了改进前后不同压力(110、180、250、320、390 kPa)和不同占空比(3%~97%)下的流量。结果表明, 5种压力下, 改进后的流量线性区间分别从10%~92%、10%~92%、10%~92%、10%~92%、8%~92%提高至4%~92%、4%~94%、4%~94%、4%~94%、3%~94%。与未改进的方法相比, 设计的基于 BOOST 电路的电磁阀流量控制器适用于更宽范围的流量线性区间。

关键词: 变量喷雾电磁阀; BOOST 电路; PWM; 线性区间; 模糊控制

中图分类号: S491; TH138.52 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)02-0410-08 OSID: 

Design and Experiment of Solenoid Valve Flow Controller
Based on BOOST Circuit

SHEN Yue HUANG Zhongyu LIU Hui
(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In the field of agricultural spraying, precise adjustment of electromagnetic valve flow is an important role to achieve variable spray. Due to mechanical inertia and electromagnetic inertia during the operation of solenoid valve, the response of solenoid valve is delayed. In order to improve the linear range of solenoid valve, a flow controller of solenoid valve was designed based on BOOST circuit by using the inductance characteristics of solenoid valve. Firstly, the hardware circuit of the controller was completed, including microcontroller unit, pulse width modulation (PWM) generator and solenoid valve drive circuit, and the appropriate energy storage capacitor was selected to store the output high potential of BOOST circuit. Secondly, the solenoid valve driven by double voltage did not need additional power supply voltage conversion circuit. By precisely controlling the high frequency on-off mode of the solenoid valve, it realized high voltage opening, low voltage and high frequency maintenance of conduction, and fast release of energy when closing. In the maintenance mode, fuzzy control algorithm was used to set the duty cycle of maintaining on mode, which ensured that the energy storage capacitance can provide enough power for accelerating opening mode. With the help of the spray flow acquisition platform, the flow data under different pressures (110 kPa, 180 kPa, 250 kPa, 320 kPa and 390 kPa) and duty cycles (3%~97%) before and after the improvement were tested. The results showed that under the five pressures, the improved linear range of flow was increased from 10%~92%, 10%~92%, 10%~92%, 10%~92% and 8%~92% to 4%~92%, 4%~94%, 4%~94%, 4%~94% and 3%~94%, respectively. The designed solenoid valve flow controller based on BOOST circuit had wider flow liner range than the commonly traditional method.

Key words: variable-rate spraying electromagnetic valve; BOOST circuit; PWM; linear interval; fuzzy control

0 引言

随着人们保护环境和节约资源意识的提高,精准施药技术得到越来越多的推广和应用^[1-3]。其中,脉冲宽度调制(Pulse width modulation,PWM)变量喷雾是精准喷雾过程中的一种重要控制方式,诸多学者对此进行了研究^[4-7]。尽管 PWM 变量喷雾技术有良好的流量调节特性,但由于电磁阀的磁滞现象和阀芯机械惯性,造成了 PWM 对电磁阀进行控制时存在死区^[8-9]。

为了提高电磁阀的动态响应特性,蒋焕煜等^[10]使用响应面法对改进型脉冲宽度调制控制参数进行优化,有效缩短了电磁阀响应时间,但试验电路使用传统的单电压驱动电路;LIU 等^[11]设计了一种多通道变量喷雾数字流量控制器,提高了电磁阀的使用寿命,喷雾流量控制精度高,但适用的线性范围只能达到控制周期的 10%~90%;刘浩等^[12]设计了一种宽电压输出的驱动电路,通过多级自适应电压激励驱动策略,减少了阀芯的开启、关闭时间,但是需要额外的电源变换电路,降低了能量使用效率。

本文在前人的研究基础上,利用电磁阀的电感特性^[13],设计基于 BOOST 电路的电磁阀流量控制器。采用双电压驱动的电磁阀,无需电源电压转换电路,能更精确宽范围地控制多个独立喷嘴的流量。

1 电磁阀特性和 BOOST 电路原理

1.1 电磁阀工作原理

变量喷雾使用的电磁阀为常闭状态,为了使电磁阀正常打开,电磁线圈流过的电流需产生足够强度的磁场,使电磁阀上的动铁和定铁吸合^[14]。图 1 是电磁阀常闭和打开结构示意图。

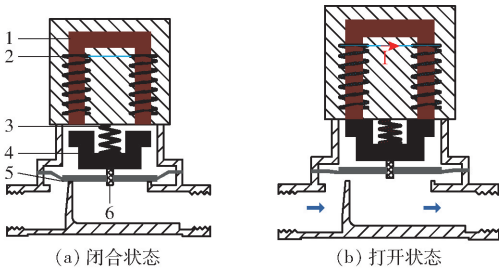


图1 电磁阀结构示意图

Fig. 1 Schematics of solenoid valve structure

1. 定铁 2. 电磁线圈 3. 弹簧 4. 动铁 5. 密封圈 6. 阀芯

1.2 响应时间的理论分析

由于常闭电磁阀阀芯在动作过程中受到电磁惯性和机械惯性^[15-16],造成了电磁阀的响应延时。在电磁阀动作过程中,阀芯主要受到电磁力、液压力、弹簧力、阻尼力的作用^[17]。为了缩短电磁阀的开启

响应时间,需要在阀芯动作时提供较大的电磁力。忽略电磁阀动作过程中电感的变化,可得电磁力方程为

$$F_m = \frac{L^2 i^2}{N^2 A_e \mu_o} \tag{1}$$

式中 F_m ——电磁力,N
 L ——电磁线圈电感,H
 i ——电磁线圈流过的电流,A
 N ——线圈匝数
 A_e ——电磁作用面积,m²
 μ_o ——空气磁导率,H/m

由式(1)可知,在电磁阀结构参数不变的情况下,电磁力取决于电磁阀线圈电流。再由电感的伏安特性可知,提高电磁阀的输入电压可以增大电磁线圈的电流,从而缩短电磁阀的响应时间。

1.3 BOOST 电路工作原理

BOOST 电路拓扑结构如图 2 所示,BOOST 是一种开关直流升压电路,它可以使输出电压比输入电压高^[18-19]。BOOST 电路采用恒频控制方式,占空比可调。如图 2 所示,MOSFET 管 Q 导通时电感 L 充电,并开始储能,二极管 D 防止电容对地放电;管 Q 关断时,电感 L 存储的能量通过二极管 D 给电容 C 充电,电容两端电压升高,且高于输入电压,升压完毕。

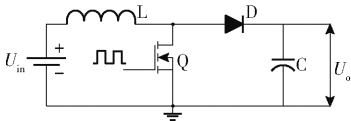


图2 BOOST 电路拓扑结构

Fig. 2 BOOST circuit topology

本文利用电磁线圈的电感特性和阀体保持阶段高频的 PWM 信号对输出电容进行升压,并将存储在电容中的高电位电压用于电磁阀的打开阶段,加速电磁阀导通。

2 控制器设计及参数确定

2.1 总体设计

为了降低电磁阀工作的死区,改进了喷嘴流量和占空比的线性区间,设计了一款多喷嘴输出的电磁阀流量控制器,结构示意图如图 3 所示。流量控制器由 1 个单片机、2 个基于 I²C 总线控制的 PWM 信号发生器和电磁阀驱动电路组成,输入电压为 12V DC。流量控制器通过 RS-485 总线连接上位机,并基于 Modbus 通信协议接收上位机的控制指令。

2.2 电磁阀驱动电路设计

设计了基于 BOOST 电路的电磁阀驱动电路,如图 4 所示。它由图腾柱驱动电路、BOOST 电路和高

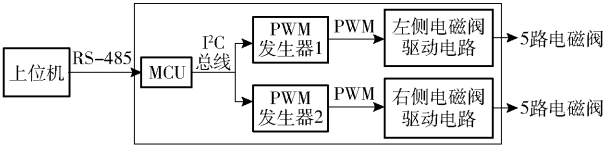


图 3 电磁阀流量控制器结构示意图

Fig. 3 Structure sketch of solenoid valve flow controller

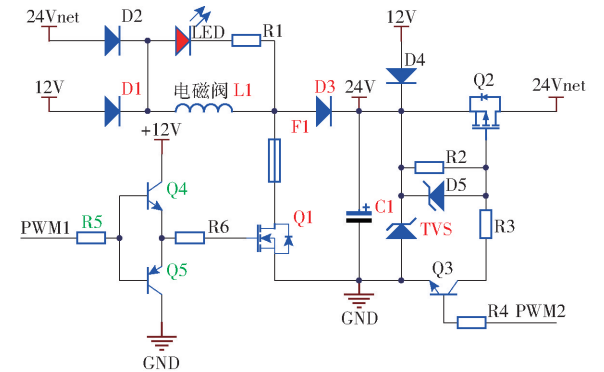


图 4 电磁阀驱动电路原理图

Fig. 4 Principle diagram of solenoid valve driving circuit

电位电磁阀驱动电路组成。R5、Q4 和 Q5 组成的图腾柱驱动电路,如图 4 中绿色标号器件。二极管 D1、电磁阀电磁线圈 L1、保险丝 F1、MOSFET 管 Q1、肖特基二极管 D3、瞬态抑制二极管 TVS 和电解电容 C1 组成 BOOST 电路,如图 4 中红色标号器件。MOSFET 管 Q2、二极管 D2、电磁阀电磁线圈 L1、保险丝 F1 和 MOSFET 管 Q1 组成高电位电磁阀驱动电路。图 4 中, PWM1 端口输入的信号控制 MOSFET 管 Q1, PWM2 端口输入的信号控制 MOSFET 管 Q2。

PWM 信号发生器由 2 个 PCA9685PW 和外围电路组成。在 IAR for STM8 开发平台下,用 C 语言编写单片机 STM8S005K6T 的程序。单片机通过 I²C 总线向 PCA9685PW 发送控制指令,使每片 PCA9685PW 输出 10 路占空比可调的 PWM 信号,电路板如图 5 所示。

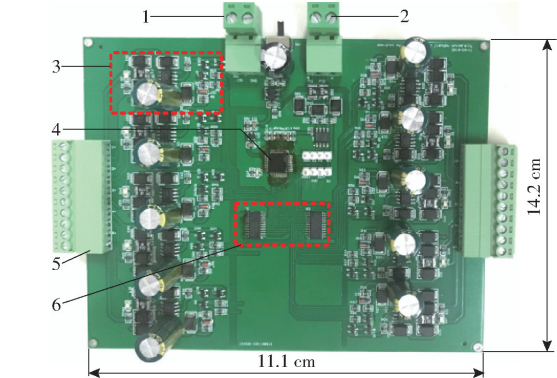


图 5 电磁阀流量控制器电路板

Fig. 5 Solenoid valve flow controller circuit board

1. 电源输入 2. 485 接口 3. 1 路电磁阀驱动电路 4. 单片机
5. 电磁阀接口 6. PWM 发生器

2.3 参数选择

本文使用的电磁阀为美国 TeeJet 公司生产的 DS55295-12 型电磁阀,该电磁阀参数如表 1 所示。

表 1 DS55295-12 型电磁阀参数

Tab. 1 Parameters of DS55295-12 solenoid valve

参数	数值
最小工作电压/V	12
额定功率/W	10
最大工作压力/kPa	680
流量/(L·min ⁻¹)	3.41 (69 kPa 压力下)
电感/mH	9

如图 4 所示,在电容 C1 升压过程中,为了防止电磁线圈 L1 产生的反电动势超出电容 C1 的耐压值和 MOSFET 管 Q1 的漏源电压,在电容 C1 端并联单向瞬态抑制二极管 TVS,将电压箝位到 24V DC。经测试,电磁阀在 24V DC 下导通 5 ms,可有效打开。电容 C1 所需要的容值计算式为

$$Q_L = Pt_c \tag{2}$$

$$Q_c = \frac{1}{2}C_1(U_h^2 - U_l^2) \tag{3}$$

- 式中 Q_L ——电磁阀吸收能量,J
- P ——电磁阀功率,W
- t_c ——Q2 和 Q1 导通时间,s
- Q_c ——电容 C1 释放的能量,J
- C_1 ——电容容值,F
- U_h ——高电位电压,24 V
- U_l ——低电位电压,12 V

根据能量守恒定律,可知 Q_L 等于 Q_c ,代入数值得到 C_1 为 231.5 μ F。为了减少电容电压的衰减,取计算容值的 2~3 倍为电容 C1 容值,因此选择耐压值为 35 V,电容值为 680 μ F 的电解电容。

3 模糊控制策略

3.1 电磁阀驱动电路的工作模式

电磁阀依次工作在加速导通、维持导通和关闭模式。

加速导通模式:高电位电磁阀驱动电路工作,控制 Q2 和 Q1 导通,电容 C1 存储的高电位的 24V DC 通过 MOSFET 管 Q2 和二极管 D2 流过电磁阀的电磁线圈 L1,电磁阀打开,如图 6a 所示。相比较于 12V DC,24V DC 驱动的电 磁 阀 能 更 快 地 达 到 峰 值 电 流,提 高 了 开 阀 响 应 速 度。

维持导通模式:BOOST 电路工作,Q2 始终关闭,Q1 工作在高频通断状态。此时电磁阀电感线圈 L1 中维持的电流足够保持电磁阀导通。在 Q1 导通

时,输入 12V DC 通过二极管 D1 流过电磁阀的电磁线圈 L1,电磁阀线圈 L1 开始储能,并维持电磁阀导通,如图 6b 所示。Q1 关闭时,由于电磁线圈 L1 的电感特性,电流不能突变,存储在电磁线圈 L1 的能量通过二极管 D3 流向电容 C1,电容 C1 电压升高到瞬态抑制二极管 TVS 击穿电位 24V DC,如图 6c 所示。如表 1 所示,电磁阀电磁线圈电感为 9 mH,电

磁线圈储能较强,为了减少电磁阀在高频状态下对电路的干扰,设定 BOOST 电路在维持导通模式下的工作频率为 1 kHz。

关闭模式:BOOST 电路、高电位电磁阀驱动电路都停止工作,Q2 和 Q1 关闭,电磁线圈 L1 中的能量通过二极管 D3 和瞬态抑制二极管 TVS 迅速释放到地端,电磁阀关闭,如图 6d 所示。

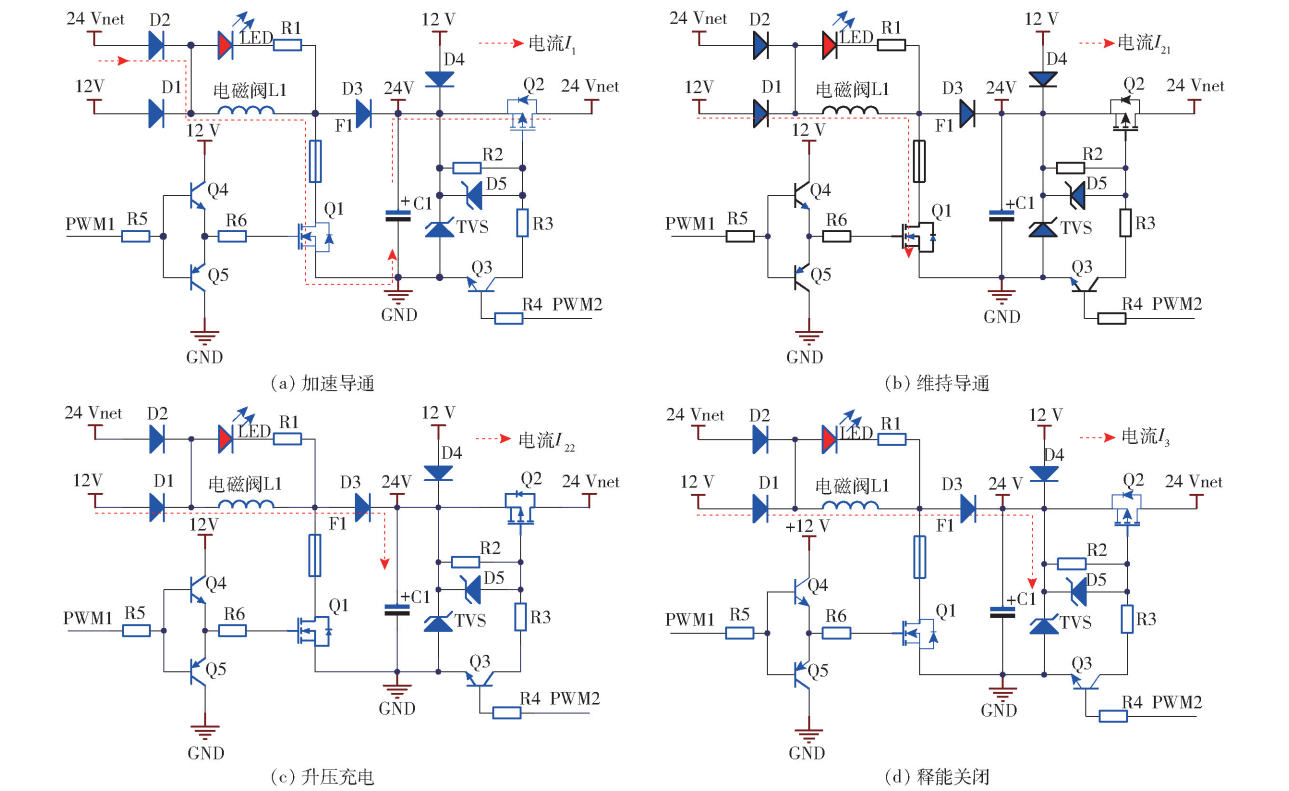


图 6 电磁阀工作状态
Fig.6 Working state of solenoid valve

3.2 维持导通占空比的模糊控制

由于电磁阀的电磁特性,造成了电磁阀的回滞现象^[20]。在电磁阀维持导通模式下,设置 MOSFET 管 Q1 的占空比为 0 ~ 100%,每 10% 步进,测试不同占空比状态下电磁阀的开关状态,如图 7 所示。测得电磁阀的关闭阈值为 20% 占空比,导通阈值为 70% 占空比。同时,为了保证 BOOST 电路能为电容 C1 充电,设定高频模式下控制周期的 20% 为死区时间。最终,设定维持导通模式下的占空比在 20% ~

80% 区间内。本文通过模糊控制算法设置维持打开占空比工作在合适的值,保证了储能电容能为加速打开模式提供足够的电能。

模糊控制是把精确的数值转换为模糊集合中的元素,再经过模糊推理得到模糊化的输出变量,最后对输出变量进行解模糊,输出精确的控制量^[21-22]。如图 8 所示,模糊控制器的输入为当前周期与上一周期电磁阀导通占空比的差值以及当前周期电磁阀导通占空比,经过模糊推论,输出维持导通占空比。

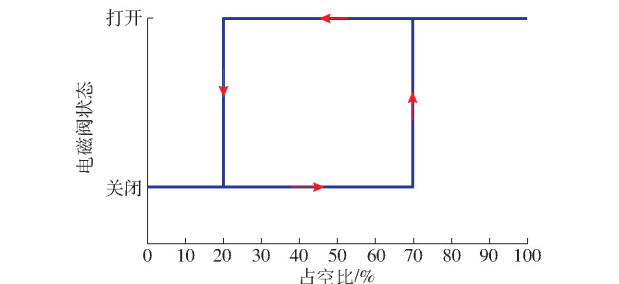


图 7 不同占空比下的电磁阀状态

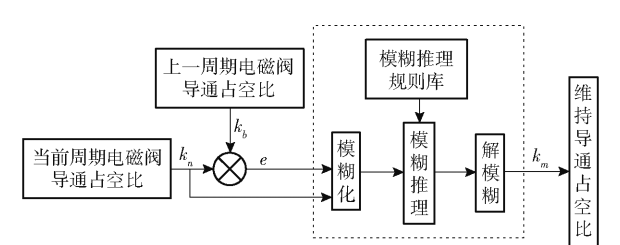


图 8 维持打开占空比模糊控制结构图

Fig.8 Fuzzy control structure diagram for maintaining open duty ratio

Fig.7 State of solenoid valve under different duty ratios

当前周期电磁阀打开占空比 k_n , 模糊语言值为 $\{ZO(\text{零})、PS(\text{正小})、PM(\text{正中})、PB(\text{正大})\}$, 变化范围为 $[0, 100]$, 论域为 $\{0, 30, 60, 90, 100\}$; 当前周期与上一周期电磁阀导通占空比的差值 e , 模糊语言值为 $\{NB(\text{负大})、NS(\text{负小})、ZO(\text{零})、PS(\text{正小})、PB(\text{正大})\}$, 变化范围为 $[-30, 30]$, 论域为 $\{-30, -10, 0, 10, 30\}$; 输出维持导通占空比 k_m 模糊语言值为 $\{S(\text{小})、M(\text{中})、B(\text{大})、VB(\text{极大})\}$, 变化范围为 $[20, 80]$, 论域为 $\{20, 40, 60, 80\}$, 输入输出的隶属函数为对称三角形函数。根据试验操作经验可知, 当前周期电磁阀导通占空比 k_n 较小时, 输出维持导通占空比 k_m 应设置较大值, 为储能电容提供足够的电能; 当前周期与上一周期电磁阀导通占空比的差值 e 较大或者较小时, 储能电容中存储的电量将受到影响。模糊推理规则采用 IF-THEN 语句, 维持导通占空比设定值的推理规则如表 2 所示。运用 Matlab 软件的 FIS 编辑器对模糊控制进行仿真得到模糊规则曲面, 如图 9 所示。

表 2 模糊控制规则

Tab. 2 Fuzzy control rule

电磁阀导通 占空比	电磁阀导通占空比差值				
	NB	NS	ZO	PS	PB
ZO	VB	VB	VB	VB	VB
PS	B	B	B	VB	VB
PM	S	M	M	M	B
PB	S	S	S	S	M

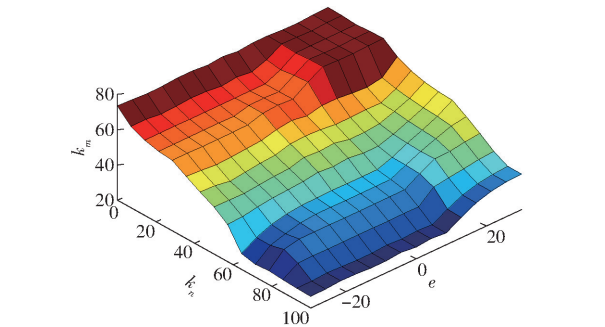


图 9 输入、输出变量关系曲面

Fig. 9 Input-output variable relation surface graph

3.3 软件设计

当前,成熟的变量喷雾电磁阀驱动策略主要为单电压普通 PWM 模式激励。但这种驱动方式的电磁阀开启响应时间相较于双电压驱动方式较长。本文在电磁阀由关闭到打开阶段,设置电磁阀工作在加速导通模式;电磁阀有效打开后设置电磁阀工作在维持导通模式,维持导通工作频率为 1 kHz,通过模糊控制算法选择维持导通占空比 k_m ;在电磁阀由打开到关闭过程阶段,设置电磁阀工作在关闭模式。电磁阀的控制周期为 100 ms,有效打开时间为 5 ms,

电磁阀控制流程图如图 10 所示。图 11 为传统和改进 PWM 控制方法波形图,占空比均为 60%。图 11 中 1 阶段为加速导通模式,2 阶段为维持导通模式,3 阶段为关闭模式,其中 2 阶段维持导通占空比为 44%。

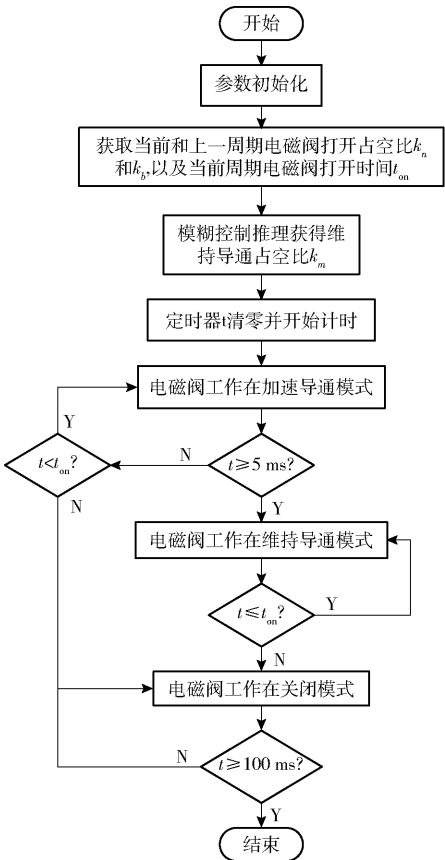


图 10 电磁阀控制流程图

Fig. 10 Flow chart of solenoid valve control

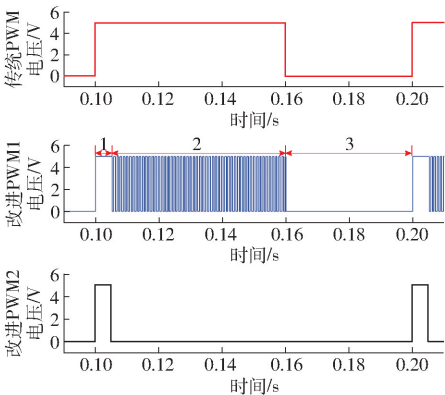


图 11 传统和改进 PWM 控制方法波形图

Fig. 11 Waveform diagram of traditional and improved PWM control methods

4 试验平台与方法

4.1 电磁阀流量采集试验平台

试验平台如图 12 所示,主要包括人机控制部分、恒压控制部分和变量喷雾部分。其中人机控制部分主要由计算机、USB 转串口和串口转 485 模块

组成;恒压控制部分主要由药箱、隔膜泵 (DP-70 型,上海新西山实业实业有限公司)、压力传感器 (WMB2012-HS 型,烨立工控)和隔膜泵控制器组成;变量喷雾部分由电磁阀驱动器、电磁阀和喷头 (XR8001VS 型,美国 TeeJet 公司)组成,喷头适用压力范围为 100~400 kPa。量杯用于收集电磁阀喷洒的药液。喷头喷雾角为 80°,量杯杯口距离喷嘴 1.5 cm,喷头垂直于量杯,防止喷出的药液落入量杯之外。

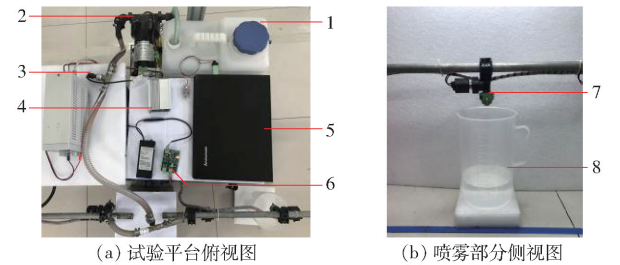


图 12 流量采集试验平台

Fig. 12 Flow acquisition test platform

1. 药箱 2. 隔膜泵 3. 压力传感器 4. 隔膜泵控制器 5. 计算机 6. 电磁阀驱动器 7. 带喷嘴电磁阀 8. 量杯

4.2 流量获取

在电磁阀喷雾过程中,需要对压力进行闭环控

制,保证采集流量数据的准确性。计算机将期望的压力发送到隔膜泵控制器,隔膜泵控制器检测压力传感器的压力信号,通过 PID 控制算法,实现输出压力的恒定。设定喷雾时间为 60 s,喷雾结束后读取量杯中液体的体积,计算流量。

4.3 试验设计

为了研究传统方式^[11]和本文方法的电磁阀流量和占空比之间的线性关系,测试 XR8001 型喷嘴在 110、180、250、320、390 kPa 压力下的流量,试验占空比依次为 3%、4%、6%、8%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、92%、94%、96%、97%,占空比小于 3% 电磁阀不能打开,流量为 0,大于 97% 电磁阀不能有效关闭,输出流量停止变化。每组试验重复 5 次,求取平均值和标准差,如表 3 所示。选取采集数据中每组最大流量数据和 XR8001 型喷嘴手册中的连续喷雾流量数据对比,在 100、150、200、250、300、400 kPa 压力下,对应的手册流量为 0.23、0.28、0.32、0.36、0.39、0.45 L/min。不同压力下手册数据和试验的最大流量数据相对误差小于 5%,说明采集的试验数据可靠。

表 3 传统方式和本文方式采集的流量

Tab.3 Flow collected by traditional mode and this mode										L/min
占空比/%	喷雾压力为 110 kPa		喷雾压力为 180 kPa		喷雾压力为 250 kPa		喷雾压力为 320 kPa		喷雾压力为 390 kPa	
	传统方式	本文方式	传统方式	本文方式	传统方式	本文方式	传统方式	本文方式	传统方式	本文方式
3	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0.059±0.003
4	0±0	0.046±0.001	0±0	0.059±0.000	0±0	0.064±0.002	0±0	0.068±0.003	0±0	0.079±0.003
6	0±0	0.056±0.001	0±0	0.062±0.002	0±0	0.072±0.000	0±0	0.077±0.002	0±0	0.088±0.002
8	0±0	0.064±0.002	0±0	0.082±0.002	0±0	0.086±0.002	0±0	0.092±0.002	0.089±0.003	0.099±0.002
10	0.062±0.002	0.068±0.002	0.070±0.002	0.090±0.002	0.090±0.002	0.095±0.002	0.101±0.003	0.109±0.002	0.114±0.002	0.113±0.002
20	0.086±0.002	0.092±0.001	0.108±0.002	0.112±0.002	0.124±0.002	0.127±0.002	0.131±0.002	0.136±0.002	0.142±0.002	0.149±0.003
30	0.108±0.001	0.108±0.001	0.134±0.002	0.138±0.001	0.158±0.002	0.160±0.001	0.165±0.002	0.170±0.001	0.186±0.001	0.187±0.001
40	0.134±0.001	0.134±0.001	0.160±0.001	0.168±0.002	0.190±0.001	0.192±0.000	0.206±0.002	0.209±0.002	0.232±0.002	0.228±0.002
50	0.156±0.001	0.158±0.000	0.186±0.001	0.192±0.000	0.222±0.001	0.222±0.001	0.244±0.001	0.246±0.001	0.272±0.001	0.272±0.002
60	0.180±0.001	0.182±0.001	0.218±0.002	0.218±0.001	0.254±0.002	0.255±0.001	0.286±0.001	0.285±0.002	0.314±0.002	0.314±0.001
70	0.208±0.001	0.210±0.001	0.246±0.000	0.246±0.001	0.287±0.000	0.287±0.002	0.324±0.002	0.326±0.001	0.355±0.002	0.353±0.002
80	0.232±0.002	0.234±0.002	0.276±0.001	0.276±0.001	0.319±0.002	0.319±0.001	0.360±0.002	0.360±0.002	0.393±0.001	0.390±0.002
90	0.248±0.001	0.250±0.002	0.294±0.002	0.296±0.001	0.350±0.002	0.343±0.001	0.396±0.003	0.381±0.002	0.424±0.002	0.418±0.001
92	0.252±0.002	0.252±0.001	0.304±0.002	0.302±0.002	0.353±0.002	0.350±0.002	0.401±0.001	0.396±0.002	0.440±0.002	0.428±0.002
94	0.252±0.002	0.252±0.001	0.304±0.002	0.304±0.001	0.353±0.001	0.353±0.001	0.401±0.001	0.401±0.001	0.440±0.001	0.440±0.001
96	0.252±0.000	0.252±0.001	0.304±0.000	0.304±0.000	0.353±0.000	0.353±0.000	0.401±0.001	0.401±0.001	0.440±0.001	0.440±0.002
97	0.252±0.000	0.252±0.000	0.304±0.000	0.304±0.000	0.353±0.000	0.353±0.000	0.401±0.001	0.401±0.000	0.440±0.000	0.440±0.001

4.4 结果与讨论

传统模式在前 4 种压力试验下,占空比 3%~8% 对应采集的流量为 0,在压力 390 kPa 试验下,占空比 3%~6% 对应采集的流量为 0,说明电磁阀并没有打开,为了保证数据拟合的有效性,只对非零数据区间进行线性拟合;同理,改进模式也只对非零数据区间进行拟合,并计算决定系数和适用区间,处理

结果如表 4 所示。拟合线性方程为

$$Q=aD_c+b$$
(4)

式中 Q ——喷嘴流量,L/min

a 、 b ——标定常数

D_c ——PWM 占空比,%

由表 4 可知,随着压力的增大,传统方式和本文方式线性回归方程的决定系数均有所增加。传统方

式喷雾压力为 110、180、250、320、390 kPa 时,决定系数为 0.994 6、0.995 8、0.996 2、0.996 3、0.996 7,同样,改进方式决定系数为 0.995 4、0.996 3、0.996 9、0.997 2、0.997 3。此外,同一喷雾压力下,改进方式的决定系数比传统方式的决定系数略高。改进模式占空比适用范围得到了提高,在 110、180、250、320、390 kPa 压力下,PWM 线性区间分别从 10% ~ 92%、10% ~ 92%、10% ~ 92%、10% ~ 92%、8% ~ 92% 提高至 4% ~ 92%、4% ~ 94%、4% ~ 94%、4% ~ 94%、3% ~ 94%。电磁阀流量和占空比适用区间的增加提高了农药利用率,尤其在占空比(0,10%)区间内,改进方式药液使用量分别是传统方式的 86.85%、92.09%、83.15%、85.57%、86.54%。在

压力 250 kPa 下根据拟合的线性回归方程进行变量喷雾,为了确保靶标上有足够的药液沉积,传统方法输出流量对应占空比低于 10% 的均设为 10%,对应占空比大于 92% 的均改为 100%,而改进方法输出流量对应占空比低于 4% 的设为 4%,对应占空比大于 94% 的设为 100%。因此,在压力 250 kPa 下,传统方式输出流量对应占空比在(0,10%)区间,输出流量均为 0.957 L/min,而改进方式输出流量对应占空比在(0,4%)区间输出流量均为 0.074 L/min,占空比在[4%,10%)区间对应输出流量线性区间为[0.074,0.092 6) L/min,对占空比在(0,10%)区间的流量进行面积分析,发现改进方式药液使用量是传统方式的 83.15%。

表 4 改进前后数据处理
Tab.4 Data processing before and after improvement

试验组	喷雾压力/kPa	线性回归方程	拟合区间/%	决定系数	适用区间/%
传统方式	110	$Q=0.002\ 3D_c+0.042\ 7$	10~97	0.994 6	10~92
	180	$Q=0.002\ 7D_c+0.051\ 6$	10~97	0.995 8	10~92
	250	$Q=0.003\ 1D_c+0.064\ 7$	10~97	0.996 2	10~92
	320	$Q=0.003\ 6D_c+0.062\ 6$	10~97	0.996 3	10~92
	390	$Q=0.004\ 0D_c+0.068\ 9$	8~97	0.996 7	8~92
本文方式	110	$Q=0.002\ 2D_c+0.044\ 3$	4~97	0.995 4	4~92
	180	$Q=0.002\ 6D_c+0.057\ 3$	4~97	0.996 3	4~94
	250	$Q=0.003\ 1D_c+0.061\ 6$	4~97	0.996 9	4~94
	320	$Q=0.003\ 6D_c+0.063\ 5$	4~97	0.997 2	4~94
	390	$Q=0.004\ 0D_c+0.066\ 3$	3~97	0.997 3	3~94

5 结论

(1)设计了一款应用于农业变量喷雾领域的电磁阀流量控制器,利用电磁阀的电感特性,将 BOOST 电路和传统的电磁阀驱动电路相结合,实现了电磁阀的双电压供电。使用改进型 PWM 控制方式,在电磁阀打开时接入高电压,维持阶段使用高频 PWM 控制,并为储能电容充电,通过瞬态抑制二极管迅速释放电流,使电磁阀快速关闭。

(2)使用 XR8001 型喷头,通过搭建的试验平

台,测试了 110、180、250、320、390 kPa 压力下改进前后的占空比和流量,并进行了线性拟合,结果表明,流量对应占空比的线性区间分别从 10% ~ 92%、10% ~ 92%、10% ~ 92%、10% ~ 92%、8% ~ 92% 提高到了 4% ~ 92%、4% ~ 94%、4% ~ 94%、4% ~ 94%、3% ~ 94%。更宽范围的线性区间提高了药液使用率,尤其是占空比在(0,10%)区间内,改进方式药液使用量是传统方式的 86.85%、92.09%、83.15%、85.57%、86.54%。

参 考 文 献

[1] 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):59-72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150309&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009. (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] 周良富,薛新宇,周立新,等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报,2017,33(23):80-92.
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 80-92. (in Chinese)

- [4] 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)
- [5] 翟长远,王秀,密雅荣,等. PWM 变量喷雾喷头流量模型[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 40-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.009. (in Chinese)
- [6] CHEN Y, ZHU H, OZKAN H E, et al. Developmen of a variable-rate sparyer with laser scanning senor to synchronize spary outputs to tree strucures[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(3): 773-781.
- [7] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等. 基于高频电磁阀的脉宽调制变量喷头喷雾特性[J]. 农业工程学报,2016,32(1):97-103.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Spray characteristics on pulse-width modulation variable application based on high frequency electromagnetic valve[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 97-103. (in Chinese)
- [8] 高钦和,刘志浩,宋海洲,等. 基于高速开关阀的液压缸速度控制系统设计[J]. 流体传动与控制,2013,57(2):5-9.
GAO Qinhe, LIU Zhihao, SONG Haizhou, et al. Design of hydraulic cylinder speed control system based on high-speed on-off valve[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2013, 57(2): 5-9. (in Chinese)
- [9] 孙成伟,初亮,郭建华,等. 电磁阀阶梯减压控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):380-385.
SUN Chengwei, CHU Liang, GUO Jianhua, et al. Stepped decompression control method of solenoid valve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 380-385. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171247&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.047. (in Chinese)
- [10] 蒋焕煜,张利君,周鸣川,等. 基于响应面法的电磁阀响应时间优化[J]. 农业工程学报,2016,32(9):67-73.
JIANG Huanyu, ZHANG Lijun, ZHOU Mingchuan, et al. Optimization for response time of solenoid valve through response surface methodology[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 67-73. (in Chinese)
- [11] LIU H, ZHU H, SHEN Y, et al. Development of digital flow control system for multi-channel variable-rate sprayers[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(1): 273-281.
- [12] 刘浩,赵丁选,张祝新,等. 基于 BP 神经网络的高速开关阀多级电压控制策略研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):420-426.
LIU Hao, ZHAO Dingxuan, ZHANG Zhuxin, et al. High-speed switch valve based on BP neural network under combinedcontrol strategy of multistage adaptive voltage incentive[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 420-426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190448&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.048. (in Chinese)
- [13] SCHRADER K. System and methods for operating a solenoid valve: WO2019028345-A1[P]. 2019-02-07.
- [14] TAGHIZADEH M, GHAFARI A, NAJAFI F. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications [J]. Comptes Rendus Mécanique, 2009, 337(3): 131-140.
- [15] 高钦和,刘志浩,牛海龙,等. 高速开关阀控液压缸的位置控制[J]. 中国机械工程,2014,25(20):2775-2781.
GAO Qinhe, LIU Zhihao, NIU Hailong, et al. Position control of hydraulic cylinder controlled by high-speed on-off valve[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(20): 2775-2781. (in Chinese)
- [16] 刘志浩,高钦和,管文良. 高速开关阀流量非线性分析及补偿控制验证[J]. 兵工学报,2015,36(1):163-174.
LIU Zhihao, GAO Qinhe, GUAN Wenliang. Flow nonlinear analysis and compensation control validation for high-speed on-off valve[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 163-174. (in Chinese)
- [17] ZHOU Xingxiang, LIU Haihong, WU Shu, et al. Influence of solenoid valve response times on water hammer in variable rate spraying system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 64-69.
- [18] [美]普利斯曼,比利斯,莫瑞. 开关电源设计[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [19] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [20] 刘鹏,范立云,白云,等. 高速电磁阀电磁力近似模型的构建与分析[J]. 农业工程学报,2015,31(16):96-101.
LIU Peng, FAN Liyun, BAI Yun, et al. Modeling and analysis of electromagnetic force approximate model of high-speed solenoid valve[J]. Transactions of the CSAE,2015, 31(16): 96-101. (in Chinese)
- [21] 郭娜,胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(8):56-64.
GUO Na, HU Jingtao. Design and experiment of variable rate spaying system on Smith-Fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 56-64. (in Chinese)
- [22] 张伶俐,王润涛,张长利,等. 基于调亏理论和模糊控制的寒地水稻智能灌溉策略[J]. 农业工程学报,2016,32(13):52-58.
ZHANG Lingyi, WANG Runtao, ZHANG Changli, et al. Intelligent irrigation strategy based on regulated deficit theory and fuzzy control for rice in coid region[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 52-58. (in Chinese)