

# 基于 PWM 的电控精量喷嘴体设计与试验

印 祥<sup>1</sup>, 王亚林<sup>1</sup>, 杜 娟<sup>1\*</sup>, 安广顺<sup>1</sup>, 金诚谦<sup>1,2</sup>, 王艳鑫<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210000)

**摘 要:** 针对现有农田施药系统变量喷雾精准化程度低、喷头不能独立控制等问题, 该研究设计了具备流量调节功能的电控精量喷嘴体。根据精量喷雾系统工作要求, 基于电磁学理论设计了由电磁线圈、定铁芯、阀芯和复位弹簧组成的电磁吸合机构, 实现阀芯的高频往复运动。结合喷嘴体水流通道的结构和阀芯往复运动过程, 设计了阀芯末端型式和双向通水阀, 实现水流的通断控制。采用脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 信号控制电磁吸合机构的动作状态, 改变每个周期内出水通道的开启时间, 实现喷头流量的实时调节。设置不同的 PWM 信号频率和占空比、水泵压力, 并采用高速相机测量电控精量喷嘴体在不同压力下单个周期内的喷雾时间, 验证所设计的电控精量喷嘴体的工作性能。试验结果表明, 当 PWM 信号频率为 20 Hz、系统压力为 0.3 MPa 时, 阀芯可开启的最小占空比为 7%, 阀芯可关闭的最大占空比为 96%; 在占空比区间[7%, 96%]内, 单个周期喷雾时间的平均相对误差为 7.5%, 相对误差最大值为 55.1%; 在占空比区间[20%, 96%]内, 单个周期喷雾时间的平均相对误差为 3.1%, 相对误差最大值为 13.1%。说明该电控精量喷嘴体在占空比[7%, 19%]范围内控制效果较差, 在占空比[20%, 96%]范围内具备良好的控制稳定性和准确性, 能够满足精量喷雾的基本要求。

**关键词:** 农药; 试验; 精量喷头; 变量喷雾; 脉冲宽度调制; 液压电磁阀

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.003

中图分类号: S491

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0018-09

印祥, 王亚林, 杜娟, 等. 基于 PWM 的电控精量喷嘴体设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 18-26. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.003 <http://www.tcsae.org>

Yin Xiang, Wang Yalin, Du Juan, et al. Design and performance test of electronic control precision nozzle body based on PWM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 18-26. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.003 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

农作物病虫害的防治是农业生产中的重要环节之一, 目前, 施用农药仍然是防治病虫害、实现稳产高产的重要手段<sup>[1-4]</sup>。随着农业生产智能化和机械化的发展, 植保机械作业已经逐步替代了传统的人工喷洒作业, 提高了喷雾的效率和安全性, 但传统的植保作业不考虑作业区域病虫害分布不均等差异, 通常使用作业区域同一施药量连续喷洒的作业方式, 易导致农药过量施用、生态环境恶化等问题。变量喷雾技术可以根据目标信息实时调节药量, 减少药液使用量<sup>[5-10]</sup>。

变量喷雾技术是根据作物生长状况、作物受病虫害程度和车体速度实时调整喷药量。现阶段, 变量喷雾控制方式主要有压力调节式、浓度调节式和脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 调节式 3 种<sup>[11-13]</sup>。其中脉宽调制调节式具有响应速度快、可调范围大等优势, 相对于压力调节式具有更好的雾化效果和流量调节特性, 相对于浓度调节式具有更短的延迟时间<sup>[14-16]</sup>。因此,

PWM 精量喷雾技术具有良好的发展潜力。为了满足精准施药的要求, 国内外专家学者进行了诸多研究。李龙龙等<sup>[17-18]</sup>设计了高于 20 Hz 的脉宽调制喷雾系统, 研究 PWM 频率和占空比对喷雾特性的影响, 为高频电磁阀在 PWM 变量施药系统中的应用及参数选择提供了理论基础。Lebeau 等<sup>[19-20]</sup>设计了基于喷杆速度变化的 PWM 变量施药控制系统, 研究了喷杆速度变化对喷雾沉积分布均匀性的影响, 经过试验采用频率为 16 Hz 的控制器进行速度补偿。Mangus 等<sup>[21]</sup>设计了一种 PWM 流量控制系统, 研究了行驶速度和喷雾带宽度变化对喷雾覆盖度的影响。蒋焕煜等<sup>[22-24]</sup>采用基于机器行驶速度或作物空间变异的精量喷雾控制方法, 调节 PWM 占空比以达到施药量的自动控制。Liu 等<sup>[25]</sup>开发了一种自动流量控制系统, 通过多路 PWM 信号独立控制每个喷头。Needham 等<sup>[26]</sup>通过比例电磁阀与喷头相耦合改变喷雾压力, 实现喷雾量和雾滴尺寸分别可控。Giles 等<sup>[27]</sup>将直动式电磁阀直接连接到标准农用喷嘴尖端, 通过改变阀门的频率和占空比来获得可变流量。

电磁阀是用电磁控制的快速吸合机构。电磁线圈通电时产生电磁力, 电磁力克服弹簧力推动阀芯离开阀门, 阀门打开; 电磁线圈断电时电磁力消失, 弹簧力推动阀芯接近阀门, 阀门闭合。通过快速控制阀门的通断, 获得可变流量<sup>[28-30]</sup>。

针对目前农田施药系统变量喷雾精准化程度低、喷头不能独立控制等问题, 本文设计了基于 PWM 信号控制

收稿日期: 2022-07-27 修订日期: 2022-10-24

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010734); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020MC085); 国家自然科学基金项目 (32171910)

作者简介: 印祥, 博士, 教授, 研究方向为农机自主导航与智能作业装备。

Email: 666513@163.com

\*通信作者: 杜娟, 博士, 讲师, 研究方向为农业装备自动控制。

Email: dujuan0427@163.com

的电控精量喷嘴体, 并对其工作性能进行了试验验证, 以期实现独立控制每个喷头进行变量喷雾, 提高变量施药效果。

## 1 总体结构与工作原理

如图 1 所示, 电控精量喷嘴体主要由电磁吸合机构、连接螺帽、双向通水阀、喷体、喷嘴等部分组成。其中, 电磁吸合机构主要包括电磁线圈外壳、电磁线圈、绕线骨架、定铁芯、阀芯、复位弹簧、套筒等。定铁芯通过卡扣与套筒固定连接, 二者设置在电磁线圈内部; 阀芯设置在套筒内腔, 可自由滑动; 阀芯与定铁芯之间设有复位弹簧; 套筒另一端与双向通水阀固定连接。双向通水阀中央有通孔为双向通水阀出水口, 四周有五个通孔为双向通水阀进水口, 连接螺帽套将双向通水阀与喷体连接起来。喷体有三个端口, 进水口、回流口、出水口, 回流口包括内腔和成环形设置在内腔外侧的外腔; 内腔连通双向通水阀的出水口, 外腔连通双向通水阀的进水口。

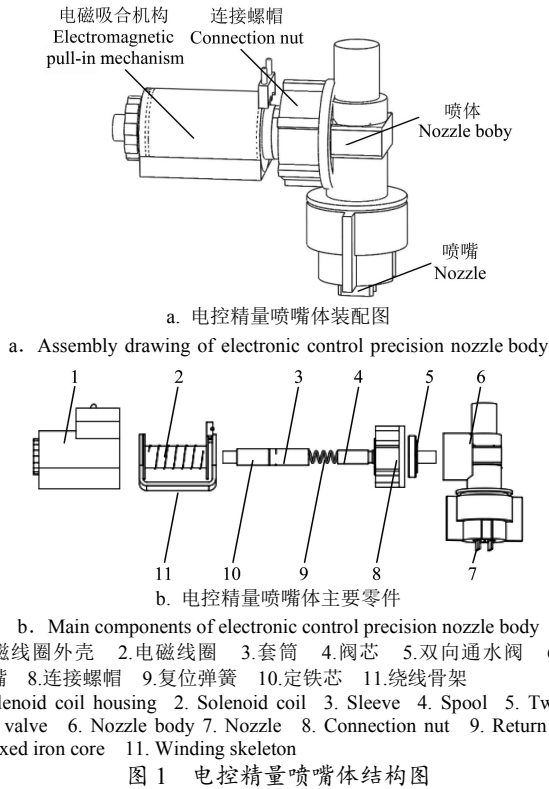


图 1 电控精量喷嘴体结构图

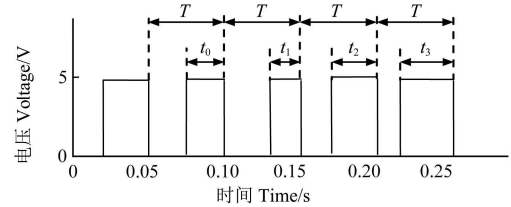
Fig.1 Structure diagram of electronic control precision nozzle body

其工作原理是: 线圈通电产生磁动势, 定铁芯、阀芯磁化, 阀芯受磁场力作用被吸附离开双向通水阀出水口, 双向通水阀导通, 药液从出水口喷出; 电磁线圈断电时磁场消失, 阀芯在复位弹簧的作用下迅速堵住双向通水阀的出水口, 药液被阻断。电控精量喷嘴体工作时, 在上位机设置所需喷药量, 通过串口发送至 PIC18F258 单片机, 单片机根据指令调节对应的 PWM 占空比。

## 2 PWM 精量喷雾控制原理

电控精量喷嘴体采用脉冲调制技术实现变量喷雾, 其原理是利用微处理器的数字输出对模拟电路进行控制, 改变 PWM 输出信号的频率和占空比, 即改变高低电

平信号的单个脉冲周期的输出时间和单位时间内的通断次数。图 2 为 PWM 数字信号。电磁吸合机构由 PWM 变量喷施控制单元输出的多路独立可调的 PWM 信号控制。根据电控精量喷嘴体的结构和工作原理, 当输出高电平信号时, 电磁吸合机构通电打开, 阀芯远离双向通水阀出水口, 喷嘴喷出药液; 输出低电平信号时电磁吸合机构断电关闭, 阀芯堵住双向通水阀, 喷嘴停止喷雾。通过改变电磁吸合机构的通断时间(即相应 PWM 控制信号的占空比)即可调节喷嘴的药液流量。



注:  $T$  为脉冲周期, s;  $t_0 \sim t_3$  为导通时间, s。

Note:  $T$  is pulse period, s;  $t_0 \sim t_3$  is the conduction time, s.

图 2 PWM 数字信号

Fig.2 Pulse Width Modulation (PWM) digital signal

PWM 占空比为单个脉冲周期高电平输出时间与脉冲周期之比, 脉冲信号占空比的计算公式如下:

$$\alpha = \frac{t_0}{T} \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为脉冲信号占空比,  $t_0$  为导通时间(高电平输出时间), s;  $T$  为脉冲周期, s。

实际作业过程中, 机器的行驶速度是变化的, 在车速改变时, 为了保证喷雾效果, 喷雾流量和喷雾频率也要随之改变。喷雾流量的调节主要与 PWM 占空比相关, 可以根据式(2)求解对应的 PWM 占空比。

$$Q = \frac{6000Q_0}{vs} = \frac{6000q_m \sum_{i=1}^c \alpha_i}{vs} \quad (2)$$

式中  $Q$  为施药量,  $L/hm^2$ ;  $Q_0$  为喷嘴流量,  $L/min$ ;  $q_m$  为电控精量喷嘴体最大流量,  $L/min$ ;  $\alpha_i$  为占空比;  $c$  为喷头数量;  $v$  为喷药机行驶速度,  $km/h$ ;  $s$  为喷幅,  $m$ 。

当 PWM 频率较小时, 在 2 个喷雾周期之间容易出现漏喷。为保证喷雾的连续性和均匀性, 在正常作业速度下, PWM 频率应足够大。将雾滴沿机器行驶方向在地面的覆盖长度定义为喷嘴临界间隔距离, 当 2 个喷雾周期之间机器的行驶距离等于临界间隔距离时, 将此时的喷雾周期定义为临界周期, 此时的喷雾频率定义为临界频率。

为在不同作业速度下, 选择合适的 PWM 频率, 本文选取扇形喷嘴对其雾滴进行运动分析, 在静止状态下, 雾滴会形成一个扇形喷雾面, 在垂直于喷雾扇面方向上, 由于雾滴速度很快, 雾滴从喷嘴喷出, 脱离固体边界的约束, 在喷射过程中做扩散流动。扇形喷嘴喷雾的扩散角一般为  $6^\circ \sim 10^\circ$ , 本文取最小值  $6^\circ$  进行计算, 根据式(3)求出喷雾雾滴垂直于喷雾扇面的地面覆盖长度, 即沿机器行驶方向雾滴地面覆盖长度。

$$l = 2h \tan \frac{\delta}{2} \quad (3)$$

式中  $l$  为垂直于喷雾扇面方向雾滴在地面的覆盖长度, m;  $h$  为喷嘴的离地高度, m;  $\delta$  为扩散角, ( $^\circ$ )。

喷嘴入口和出口处的液体状态满足伯努利方程。另外, 由于喷嘴入口和出口的距离较短, 所以重力对速度的影响可以忽略不计, 出口与环境压力相同, 压力为 0, 出口处的液体流速和喷雾压力满足如下关系<sup>[31]</sup>:

$$v_p = C \sqrt{\frac{2P_0}{\rho_0}} \quad (4)$$

式中  $v_p$  为雾滴初始速度, m/s;  $P_0$  为喷嘴压强, Pa;  $C$  为流量系数;  $\rho_0$  为药液密度, kg/m<sup>3</sup>。

假设喷雾雾滴速度在沿喷雾机移动方向和向下方向的运动过程中保持不变, 根据雾滴的初始速度以及喷嘴离地高度, 通过式 (5) 计算边界上雾滴沉积时间, 通过式 (6) 计算雾滴纵向沉积距离。

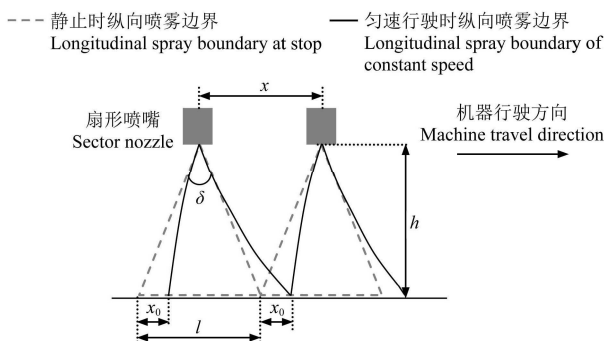
$$t_c = \frac{h}{v_p \cdot \cos(\frac{\delta}{2})} \quad (5)$$

$$x_0 = v \cdot t_c \quad (6)$$

式中  $t_c$  为雾滴沉积时间, s;  $x_0$  为雾滴纵向沉积距离, m。

图 3 为喷嘴临界间隔距离。在匀速行驶状态下, 沉积时间  $t_c$  和喷雾机运动速度  $v$  不变, 所以雾滴纵向沉积距离不变, 垂直于喷雾扇面方向雾滴在地面纵向覆盖长度不变。2 个喷雾周期之间机器向前行驶的距离小于等于临界间隔距离, 可以保证不漏喷, 当两者相等时, 根据式 (7) 可以求出临界周期。当占空比 50%, 喷嘴离地高度 0.5 m, 扩散角  $6^\circ$  时, 不同行驶速度下的 PWM 临界频率如表 1 所示, 在机器作业过程中可以根据临界频率, 在不同作业速度下选择合适的 PWM 频率, 保证不漏喷、不重喷。

$$T = \frac{l}{v(1-\alpha)} \quad (7)$$



注:  $\delta$  为扩散角, ( $^\circ$ );  $l$  为机器行驶方向雾滴地面覆盖长度, m;  $h$  为喷嘴离地高度, m;  $x_0$  为雾滴纵向沉积距离, m;  $x$  为 2 个喷雾周期之间机器行驶的距离, m。

Note:  $\delta$  is the diffusion angle, ( $^\circ$ );  $l$  is the ground coverage length of the droplets in the direction of machine travel, m;  $h$  is the height of the nozzle from the ground, m;  $x_0$  is the longitudinal deposition distance of droplets, m;  $x$  is the machine traveled distance by the between two spray cycles, m.

图 3 喷嘴临界间隔距离

Fig.3 Nozzle critical separation distance

表 1 PWM 临界频率

Table 1 PWM critical frequency

行驶速度 Travel speed/(km·h <sup>-1</sup> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
临界频率 Critical frequency/Hz	3	5	8	11	13	16	18	21	24	26

### 3 电控精量喷嘴体关键部件设计

#### 3.1 设计需求

所研制的电控精量喷嘴体安装在自走式高地隙喷药机喷杆上, 为了满足喷药机基本喷雾参数和智能化控制的需求, 对电控精量喷嘴体提出如表 2 所示的技术指标。

表 2 电控精量喷嘴体技术指标

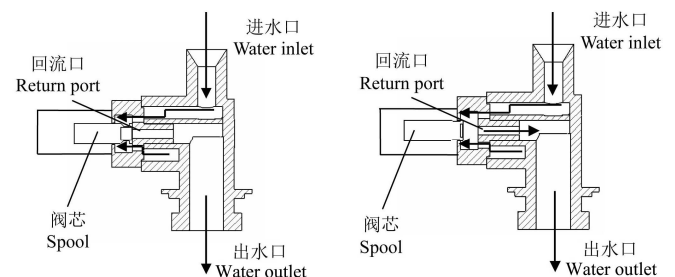
Table 2 Technical indicators of electronic control precision nozzle body

参数 Paramete	值 Value
压力范围 Pressure range/MPa	0~0.5
额定电压 Rated voltage/V	12
占空比范围 Duty cycle range/%	7~96
响应时间 Response time/ms	10
频率范围 Frequency range/Hz	0~40

#### 3.2 喷体和双向通水阀设计

为了实现喷嘴体的自动通断, 设计一个回流口, 其包括内腔以及成环形设置在内腔外侧的外腔。进水口和出水口分别与回流口外腔和回流口内腔相连通。由于使用阀芯直接堵住回流口密封性较差, 所以设计了双向通水阀增强密封性。双向通水阀包括中央通孔和四周均匀分布的 5 个通孔, 分别为双向通水阀出水口和进水口。进水口与回流口外腔连通, 出水口与回流口内腔连通。

图 4 为双向通水阀和喷体内部结构剖面图。静止状态时, 阀芯堵住出水口, 药液从进水口进入, 流到双向通水阀被堵截; 工作时, 阀芯离开双向通水阀出水口, 药液从双向通水阀出水口流出, 进入出水口。图 5 为双向通水阀导通和闭合示意图, 通过阀芯实现对双向通水阀出水口的打开和闭合。



a. 静止状态内部结构  
a. Internal structure in static state

b. 工作状态内部结构  
b. Internal structure in working state

图 4 双向通水阀和喷体的内部结构剖面图

Fig.4 Section of internal structure of two-way water valve and nozzle body

双向通水阀的流量由方程式 (7) 来计算, 根据技术指标要求的最大流量, 计算双向通水阀出水口半径。

$$Q_1 = K_L A \Delta p^m \quad (8)$$

式中  $Q_1$  为流经双向通水阀出水口的流量, L/min;  $K_L$  为节流系数, 根据经验通常取 0.7;  $A$  为节流口通流面积, (m<sup>2</sup>);  $\Delta p$  为节流孔前后压差, N/m<sup>2</sup>;  $m$  为节流口形状系数, 细长孔  $m=1$ , 薄壁孔  $m=0.5$ 。

经过计算, 本文双向通水阀出水口截面半径为 1.5 mm。

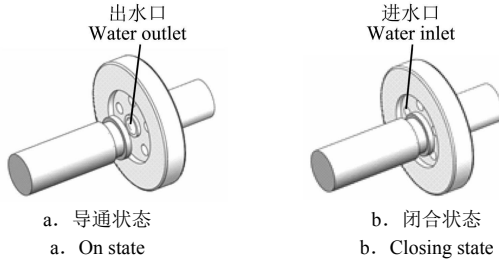


图 5 双向通水阀导通和闭合状态示意图

Fig.5 Schematic diagram of on and closing state of two-way water valve

### 3.3 电磁吸合机构设计

为保证阀芯在静止时能够紧密贴合双向通水阀,对阀芯开槽,通过改变阀芯凹槽两端截面积,使阀芯头部(贴合双向通水阀一端)直径 $d_a$ 大于阀芯尾部(伸入线圈一端)直径 $d_c$ 。药液作用在阀芯两端的液体压力分别记为 $F_1$ 和 $F_2$ 。

在阀芯闭合时,由于阀芯凹槽两端截面积不同形成压力差,产生液压复位力,阀芯闭合的复位力由弹簧力和液压力共同提供,既保证了阀芯闭合需要的复位力,又降低了弹簧的设计强度,延长弹簧的使用寿命。

$$F_0 = F_1 - F_2 = P \cdot S_1 - P \cdot S_2 \quad (9)$$

式中 $F_0$ 为液压复位力, N;  $P$ 为水的压强, MPa;  $S_1$ 为阀芯头部与阀芯凹槽部分面积差,  $m^2$ ;  $S_2$ 为阀芯尾部与阀芯凹槽部分面积差,  $m^2$ 。

喷雾所用的高速电磁阀额定压力一般为0~1 MPa,由于管路系统中液体流经弯管等处会造成压力损失,本文取实际喷雾压力为0.8 MPa进行液压复位力计算。已知双向通水阀出水口内径为3 mm,外径为5 mm,为保证密封性,阀芯头部设置一长3 mm、内径5 mm的内腔,则阀芯头部外径 $d_a=8$  mm。综合考虑电磁力克服复位力及时打开阀芯及关闭阀芯,设计复位力共6 N,其中弹簧力由式(10)和式(11)计算,为2 N。

$$K = \frac{G \cdot d_t^4}{8D^3 \cdot n} \quad (10)$$

$$F_t = K \cdot \Delta S \quad (11)$$

式中 $K$ 为弹性系数, $G$ 为切变模量,所选弹簧材料为800 MPa; $d_t$ 为弹簧钢丝直径, mm;  $D$ 为弹簧中径, mm;  $n$ 为弹簧有效圈数; $\Delta S$ 为弹簧压缩量, mm;  $F_t$ 为弹簧力, N。

复位力6 N,弹簧力2 N,则液压复位力为4 N,根据式(8)进行计算阀芯尾部直径和阀芯凹槽部分直径,得出阀芯尾部直径 $d_c=7.6$  mm,阀芯凹槽部分直径 $d_h=6$  mm。为保证电磁吸合机构正常开合,由文献[32]可知,电磁力比复位力一般大30%左右,取为8 N。

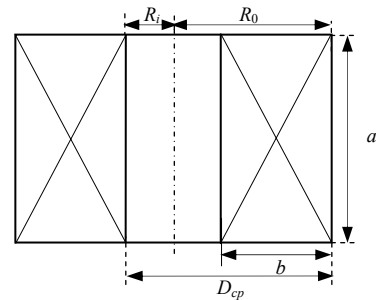
为了保证所需的电磁吸力,需要有足够的磁势。本文电磁吸力计算不考虑线圈内电阻、铁芯磁阻和饱和情况。电磁吸合机构采用螺管式电磁铁结构,作用在阀芯上的吸力主要由主磁通产生的端面吸力和漏磁通产生的螺管力组成,作用在阀芯的吸力表达式如下:

$$F = 6.4 \times 10^{-8} (IN)^2 \left[ \frac{\pi r^2}{\zeta^2} + \frac{2\pi}{\ln \frac{R_0}{r_c}} \left( \frac{\lambda}{a} \right)^2 \right] \quad (12)$$

式中 $F$ 为阀芯所受电磁吸力, kg;  $I$ 为线圈电流, A;  $N$ 为所需要线圈匝数,  $R_0$ 为线圈外半径, cm;  $r_c$ 为阀芯尾部半径, cm;  $\zeta$ 为气隙长度, cm;  $\lambda$ 为阀芯深入线圈内腔长度, cm;  $a$ 为线圈长度, cm。

根据文献[32],当阀芯运动至线圈内不同位置时,其吸力也不相同,当阀芯进入线圈总长度约40%时,吸力达到最大值,此后几乎保持不变,当到达全长约80%时,吸力便开始减小。为满足所需的吸力值,本文设计的阀芯在线圈内运动至极限时阀芯深入线圈长度占线圈总长度 $a$ 的60%,精量喷雾作业要求电磁吸合结构内阀芯具备高频通断功能,其内部气隙长度较小,本文取气隙长度为2.5 mm。

已知阀芯尾部直径为7.6 mm,加上绕线骨架的厚度,确定线圈的内径 $R_i=6$  mm。为保证阀芯在线圈内运动至极限时阀芯深入线圈长度占线圈总长度 $a$ 的60%,线圈长度设计为阀芯长度的1.6倍。线圈的长度 $a$ 与其宽度 $b$ 之比为 $\beta$ ,本文取 $\beta$ 值为7.5<sup>[32]</sup>。线圈截面尺寸示意图见图6。



注:  $R_i$ 为线圈内半径, cm;  $R_0$ 为线圈外半径, cm;  $a$ 为线圈长度, cm;  $b$ 为线圈宽度, cm;  $D_{cp}$ 为线圈平均直径, cm。

Note:  $R_i$  is the inner radius of the coil, cm;  $R_0$  is the outer radius of the coil, cm;  $a$  is the coil length, cm;  $b$  is the coil width, cm;  $D_{cp}$  is the average diameter of the coil, cm.

图 6 线圈截面尺寸示意图

Fig.6 Schematic diagram of the cross-sectional size of the coil

由于大部分喷药机自带电源为12 V直流电源,电磁吸合机构采用12 V直流电源驱动。线圈导线的直径与线圈电压、磁势、导线电阻率和线圈平均直径有关(具体如式(13))。

$$d = \sqrt{\frac{4\rho D_{cp} IN}{U}} \quad (13)$$

式中 $d$ 为导线直径, mm;  $U$ 为电磁线圈电压值, V;  $D_{cp}$ 为线圈平均直径, mm;  $\rho$ 为导线电阻率,铜导线在20℃电阻率时为 $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。

线圈匝数取决于电流密度大小,线圈的电流可通过容许的电流密度求出,由于所设计的电磁吸合机构需要短时控制通断,该种反复工作状况下导线截面的电流密度 $j=5 \sim 12$  A/mm<sup>2</sup><sup>[32]</sup>,本文实际计算取 $j=10$  A/mm<sup>2</sup>,为求出所需线圈匝数,根据公式(15)求出通过线圈的电流。为保证导线能够全部放入线圈,实际可绕线圈匝数

根据式 (16) 进行计算。

$$N = \frac{4(IN)}{\pi j d^2} \tag{14}$$

$$I = jq \tag{15}$$

$$W = \frac{4f_k ab}{\pi d^2} \tag{16}$$

式中  $q$  为导线截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $W$  为实际可绕线圈匝数;  $f_k$  为填充系数, 一般取  $0.87^{[32]}$ 。

基于以上分析, 根据已确定的电磁吸合机构结构参

数, 同时考虑电控精量喷嘴体在喷杆实际安装时的紧密性、稳定性、流量等问题, 计算阀芯长度为  $15\sim 30\text{ mm}$  时所对应喷嘴体特性参数, 见表 3。

分析表 3 可知, 当阀芯长度为  $15\sim 17\text{ mm}$  时, 理论所需的线圈匝数小于实际设计线圈可绕匝数, 故不能满足设计需求, 当阀芯长度为  $18\sim 30\text{ mm}$  时, 理论上可以满足设计需求, 本文综合考虑电磁执行机构安装紧密性、耗材等问题, 选择阀芯长度为  $20\text{ mm}$  所对应电磁吸合机构相关数据进行设计, 具体设计参数见表 4。

表 3 电控精量喷嘴体特性参数

Table 3 Characteristic parameters of electronically controlled precision nozzle body

阀芯长度 Spool length/mm	线圈长度 Coil length/mm	线圈外半径 Coil outer radius/mm	阀芯深入线圈长度 Spool length in depth coil/mm	导线直径 Wire diameter/mm	线圈电流 Coil current/A	理论所需线圈匝数 Theoretical required number of turns	实际可绕线圈匝数 Actual winding turns
15	25.00	9.33	5.5	0.342	1.100	1 168	863
16	26.67	9.56	6.5	0.343	1.112	1 151	968
17	28.33	9.78	7.5	0.345	1.124	1 133	1 077
18	30.00	10.00	8.5	0.347	1.137	1 117	1 190
19	31.67	10.22	9.5	0.349	1.150	1 101	1 308
20	33.33	10.44	10.5	0.351	1.163	1 085	1 428
21	35.00	10.67	11.5	0.353	1.177	1 070	1 553
22	36.67	10.89	12.5	0.355	1.191	1 055	1 681
23	38.33	11.11	13.5	0.358	1.205	1 041	1 812
24	40.00	11.33	14.5	0.360	1.219	1 027	1 946
25	41.67	11.56	15.5	0.362	1.234	1 013	2 084
26	43.33	11.78	16.5	0.364	1.248	1 000	2 224
27	45.00	12.00	17.5	0.366	1.263	987	2 367
28	46.67	12.22	18.5	0.368	1.278	974	2 513
29	48.33	12.44	19.5	0.370	1.293	962	2 661
30	50.00	12.67	20.5	0.373	1.308	950	2 812

表 4 电磁吸合机构相关参数

Table 4 The parameters of the electromagnetic suction mechanism

主要参数 Main parameter	数值 Value
阀芯尾部半径 Spool tail radius/mm	3.8
线圈内半径 Inner radius of coil/mm	6
气隙长度 Air gap length/mm	2.5
阀芯长度 Spool length/mm	20
线圈长度 Coil length/mm	33
线圈外半径 Coil outer radius/mm	10.5
阀芯深入线圈长度 Spool length in depth coil/mm	10.5
工作电压 Operating voltage/V	12
导线直径 Wire diameter/mm	0.35
线圈匝数 Coil turns	1 428

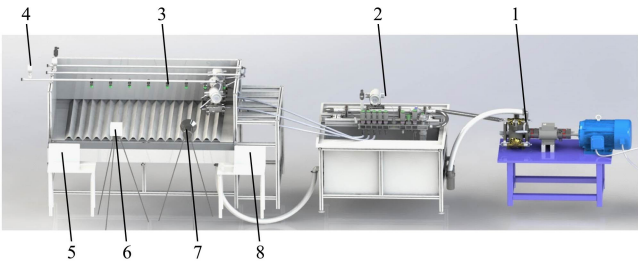
4 性能试验与分析

为了验证本文所研制的电控精量喷嘴体的性能特性, 于 2021 年 4 月 18 日在山东理工大学农机装备实验室开展试验。

4.1 试验装置

试验装置包括精量喷雾试验台、高速相机、补光灯、数据采集系统、计算机、电控精量喷嘴体等, 如图 7 所示。电控精量喷嘴体如图 8 所示, 电控精量喷嘴体在外壳上安装了指示灯用来显示电控精量喷嘴体是否导通。喷头上连接的喷嘴为 11003 标准扇形喷嘴, 喷雾角为

$110^\circ$ , 压力范围为  $0\sim 0.5\text{ MPa}$ 。精量喷雾实验平台主要包括动力系统、药液循环系统、压力表等, 工作时, 由计算机通过串行数据通讯接口将 PWM 信号发送给控制器, 通过控制阀芯的启闭时间控制喷头流量, 操作人员根据试验需求输入所需频率和占空比。通过高速相机测量电控喷嘴体在不同压力下单个周期内的喷雾时间以验证所设计的电控精量喷嘴体的工作性能, 高速相机为美国 Vision Research 公司的 Phantom VEO 410, 具有更高的拍摄速率、灵敏度及曝光精度, 能有效避免强光对成像的影响, 可以连接模拟和数字监视器实时显示拍摄图像, 性能参数见表 5。



1.动力系统 2.液体循环系统 3.电控精量喷嘴体 4.压力表 5.数据采集系统 6.高速相机 7.补光灯 8.计算机  
1. Power system 2. Liquid circulation system 3. Electronic control precision nozzle body 4. Pressure gauge 5. Data acquisition system 6. High-speed camera 7. Fill light 8. Computer

图 7 试验平台

Fig.7 Test platform



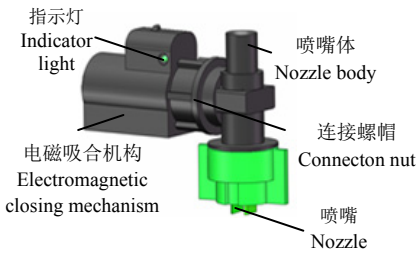


图 8 电控精量喷嘴体  
Fig.8 Electronic control precision nozzle body

表 5 高速相机的性能参数  
Table 5 Performance parameters of high-speed cameras

参数 Parameter	值 Value
最高分辨率 Highest resolution/Pixel	800
最小曝光时间 Minimum exposure time/ns	1 000
时间精度 Time accuracy/ns	20
最高拍摄速率 Maximum shooting rate/(帧·s <sup>-1</sup> )	600 000
两次曝光最小时间间隔 Minimum time interval between two exposures/ns	480
工作温度 Operating temperature/℃	-10~+50

4.2 试验方法

为验证阀芯导通占空比与和设定占空比之间的线性关系，将设计的电控精量喷嘴体安装到精量喷雾试验台上，在 0.1~0.5 MPa 的压力范围内进行电控精量喷嘴体通断试验。试验设定 PWM 信号频率为 20 Hz，压力值分别设置为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 MPa。采用高速相机进行拍摄，将单个周期内有喷雾雾滴的照片数量乘以高速相机的帧时长，得到电控精量喷嘴体单个周期内的导通时间。试验过程中，PWM 占空比从 0 递增到 100%，每次递增 1%，通过测量每组占空比下 5~6 个周期喷雾时间，取中间 3 组通断时间数据的平均值求出单个周期内的喷雾时间及对应阀芯导通占空比，与设定占空比进行比对。拍摄速率为 5 200 帧/s，曝光时间为 0.2 ms，图片像素为 1 280×800。

4.3 结果与分析

不同压力下精量喷嘴体导通时间误差如表 6 所示。由表 6 可知，试验过程中，0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 MPa 压力下，阀芯可开启的最小占空比为 7%，阀芯可关闭的最大占空比为 96%；阀芯可关闭的最大占空比为 96%。

占空比为[7%，96%]时，单个周期导通时间的最大相对误差的最大值为 148%，平均相对误差最大值为 16.0%，最大绝对误差的最大值为 20.5 ms，均方根误差最大值为 9.2 ms；占空比为[10%，96%]时，单个周期导通时间的最大相对误差的最大值为 55.1%，平均相对误差最大值为 14.1%，最大绝对误差的最大值为 20.5 ms，均方根误差最大值为 9.2 ms；占空比为[15%，96%]时，单个周期导通时间的最大相对误差的最大值为 45.9%，平均相对误差最大值为 12.4%，最大绝对误差的最大值为 20.5 ms，均方根误差最大值为 9.0 ms；占空比为[20%，96%]时，单个周期导通时间的最大相对误差的最大值为 32.8%，平均相对误差最大值为 11.5%，最大绝对

误差的最大值为 20.5 ms，均方根误差最大值为 8.9 ms。占空比为[20%，96%]时，在不同系统压力下导通时间相对误差都较低，说明该电控精量喷嘴体在占空比[7%，20%]范围内控制效果较差，在占空比[20%，96%]范围内具备良好的控制稳定性和可靠性，能够满足精量喷雾的基本要求。

表 6 精量喷嘴体导通时间误差分析  
Table 6 Error analysis of conduction time of precision nozzle body

喷雾压力 Spray pressure/ MPa	占空比区间 Duty cycle interval	最大相对误差 Maximum relative error/%	平均相对误差 Mean relative error/%	最大绝对误差 Maximum absolute error/ms	均方根误差 Root mean square error/ms
0.1	[7%, 96%]	48.9	6.49	9.3	3.4
	[10%, 96%]	31.9	5.27	7.1	3.1
	[15%, 96%]	21	4.18	7.1	2.4
	[20%, 96%]	14.1	3.65	7.1	2.8
0.2	[7%, 96%]	53.1	14.3	18.7	8.9
	[10%, 96%]	51.3	13.5	18.7	8.8
	[15%, 96%]	37.1	11.6	18.7	8.5
	[20%, 96%]	34.4	10.7	18.7	8.3
0.3	[7%, 96%]	55.1	7.5	18.3	4.9
	[10%, 96%]	55.1	7.1	18.3	4.9
	[15%, 96%]	41.8	4.4	14.9	3.6
	[20%, 96%]	13.1	3.1	4.7	2.2
0.4	[7%, 96%]	60.7	10.3	18.0	6.7
	[10%, 96%]	53.8	9.3	18.0	6.4
	[15%, 96%]	45.9	6.9	17.6	5.3
	[20%, 96%]	32.6	5.2	13.3	4.1
0.5	[7%, 96%]	148	16	20.5	9.2
	[10%, 96%]	44.6	14.1	20.5	9.2
	[15%, 96%]	33.9	12.4	20.5	9.0
	[20%, 96%]	26.7	11.5	20.5	8.9

不同压力下的 PWM 设置占空比与实际占空比对比如图 9 所示。结合图 6 和图 9a、图 9c、图 9d 可知，系统压力为 0.1、0.3 和 0.4 MPa 时，[7%，96%]范围内实际占空比与设置占空比平均相对误差分别为 6.49%、14.3%和 10.3%，误差较大不适合实际应用；在[20%，96%]范围内实际占空比与设置占空比相对误差不大于 5.2%，线性度高，线性回归决定系数大于 0.98。结合表 6 和图 9b、图 9e 可知：系统压力为 0.2 和 0.5 MPa 时，[7%，96%]范围内实际占空比高于设置占空比，平均相对误差分别为 14.3%和 16%，但总体线性度较高，线性回归决定系数大于 0.98。经过多次重复试验，分析可知：阀芯闭合时药液会对阀芯产生一定的阻力，系统压力为 0.2 MPa 时，由于喷嘴内压强较低导致液压复位力较小，电磁力消失后复位力不能及时克服药液阻力闭合阀芯；系统压力为 0.5 MPa 时，由于药液阻力太大，阀芯同样不能及时闭合。但当系统压力为 0.1 MPa 时，由于药液对阀芯的阻力太小只需要弹簧复位力就可以及时闭合阀芯；当系统压力为 0.3 和 0.4 MPa 时，复位力足够大并且药液对阀芯的阻力较小，阀芯可以及时闭合。

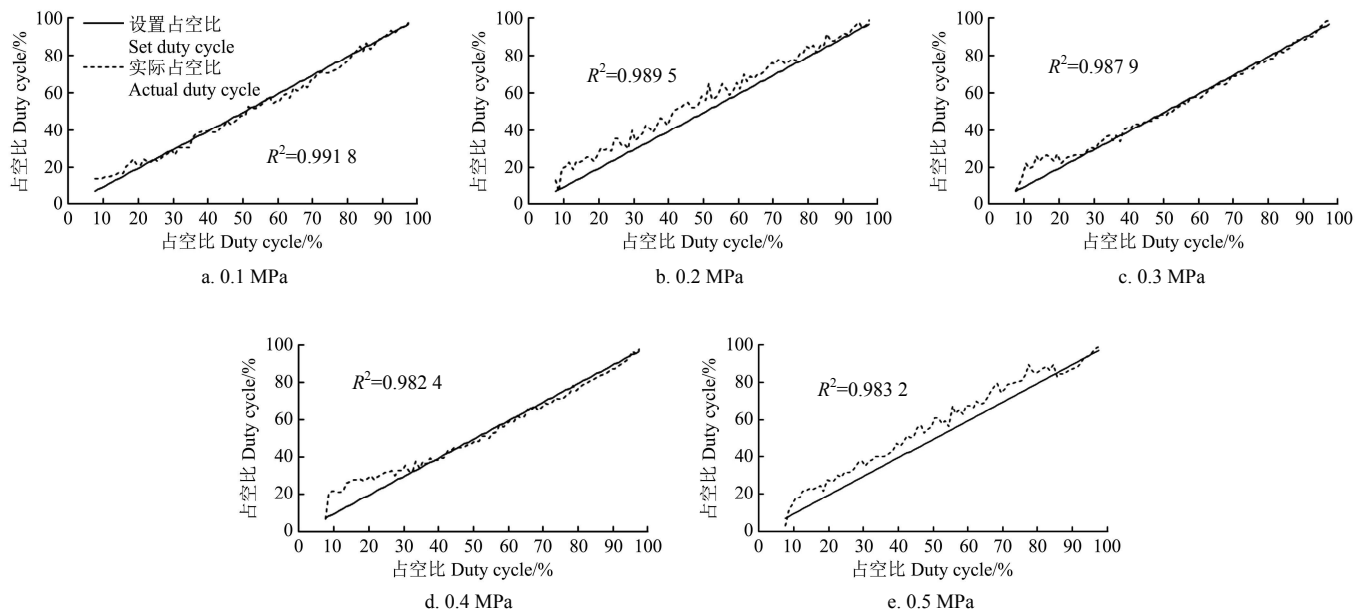


图9 不同压力下设置占空比与实际占空比

Fig.9 Setted duty cycle and actual duty cycle under different pressures

## 5 结论

为了解决现有农田施药系统喷头不能独立控制、变量喷雾精准化程度低等问题,设计了具备流量调节功能的电控精量喷嘴体,并进行理论分析与参数计算,通过喷雾试验平台验证阀芯导通占空比与和设定占空比之间的线性关系,得出以下结论:

1) 采用 PWM 信号控制电磁吸合机构的动作状态,改变每个周期内出水通道的开启时间,可实现喷头流量的实时调节。

2) 性能试验结果表明:在 PWM 频率为 20 Hz 时,0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 MPa 压力下,阀芯可开启的最小占空比为 7%,阀芯可关闭的最大占空比为 96%。当 PWM 信号频率为 20 Hz 时,0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 MPa 系统压力下,在占空比为[7%, 96%]时,单个周期喷雾时间的平均相对误差分别为 6.49%、14.3%、7.5%、10.3%和 16.0%;在占空比为[20%, 96%]时,单个周期喷雾时间的平均相对误差分别为 3.65%、10.7%、3.1%、5.2%和 11.5%。说明该电控精量喷嘴体在占空比[7%, 20%]范围内控制效果较差,在[20%, 96%]占空比范围内具备良好的控制稳定性和准确性,能够满足精量喷雾的基本要求。

### 【参 考 文 献】

- [1] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业, 2020, 2(1): 133-146.  
He Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133-146. (in Chinese with English abstract)
- [2] 张波, 翟长远, 李瀚哲, 等. 精准施药技术与装备发展现状分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 1-5.  
Zhang Bo, Zhai Changyuan, Li Hanzhe, et al. Development status analysis of precision pesticide application techniques and equipments[J]. Journal of Agricultural Mechanization

- Research, 2016, 38(4): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [3] 冯耀宁, 裴亮, 陈晓, 等. 变量施药关键技术综述[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 65-71.  
Feng Yaoning, Pei Liang, Chen Xiao, et al. Summary of the key technology of variable rate application[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 65-71. (in Chinese with English abstract)
- [4] Tang Y, Hou C J, Luo S M, et al. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 1-7.
- [5] Butts T R, Luck J D, Fritz B K, et al. Evaluation of spray pattern uniformity using three unique analyses as impacted by nozzle, pressure, and pulse-width modulation duty cycle[J]. Pest Management Science, 2019, 75(7): 1875-1886.
- [6] Zhai C, Wang X, Liu D, et al. Nozzle flow model of high pressure variable-rate spraying based on PWM technology[J]. Advanced Materials Research, 2011, 422: 208-217.
- [7] Jiang H, Zhang L, Shi W. Effects of operating parameters for dynamic pwm variable spray system on spray distribution uniformity[J]. IFAC-Papers OnLine, 2016, 49(16): 216-220.
- [8] 黄晓宇, 兰玉彬, 尹选春. 基于磁流变液的农用变量喷头设计及试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 92-99.  
Huang Xiaoyu, Lan Yubin, Yin Xuanchun. Design and test of an agricultural variable nozzle based on magnetorheological fluid[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 92-99. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐艳蕾, 包佳林, 付大平, 等. 多喷头组合变量喷雾系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 47-54.  
Xu Yanlei, Bao Jialin, Fu Daping, et al. Design and experiment of variable spraying system based on multiple combined nozzles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 47-54. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王定康, 于丰华, 许童羽, 等. 基于单神经元 PID 的变量喷雾系统精准控制方法研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 61-66.

- Wang Dingkang, Yu Fenghua, Xu Tongyu, et al. Research on precision control method of variable spray system based on single neuron PID[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(1): 61-66. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 80-92. (in Chinese with English abstract)
- [12] Grella M, Gioelli F, Marucco P, et al. Field assessment of a pulse width modulation (PWM) spray system applying different spray volumes: Duty cycle and forward speed effects on vines spray coverage[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(1): 219-252.
- [13] Thomas R B, Liberty E B, Joe D L, et al. Droplet size and nozzle tip pressure from a pulse-width modulation sprayer[J]. Biosystems Engineering, 2019, 178: 52-69.
- [14] 史岩, 祁力钧, 傅泽田, 等. 压力式变量喷雾系统建模与仿真[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 118-121.
- Shi Yan, Qi Lijun, Fu Zetian, et al. Model development and simulation of variable rate of pressure spray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 118-121. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李君, 许绩彤, 杨洲, 等. 风送式喷雾机实时混药系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 62-69.
- Li Jun, Xu Jitong, Yang Zhou, et al. Design and experiment on real-time mixing system for air-assisted sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(11): 62-69. (in Chinese with English abstract)
- [16] 邱白晶, 马靖, 邓斌, 等. 在线混药喷雾系统混药性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 78-85.
- Qiu Baijing, Ma Jing, Deng Bin, et al. Experiment on mixing performance of online mixing spray system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(17): 78-85. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(1): 97-103. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张瑞瑞, 李龙龙, 付旺, 等. 脉宽调制变量控制喷头雾化性能及风洞环境雾滴沉积特性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 42-51.
- Zhang Ruirui, Li Longlong, Fu Wang, et al. Spraying atomization performance by pulse width modulated variable and droplet deposition characteristics in wind tunnel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 42-51. (in Chinese with English abstract)
- [19] Lebeau F. Modeling the dynamic distribution of spray deposits[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(3): 255-265.
- [20] Lebeau F, Bahir L E I, Destain M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(2): 149-161.
- [21] Mangus D L, Sharda A, Engelhardt A, et al. Analyzing the nozzle spray fan pattern on an agricultural sprayer using pulse width modulation technology to generate an on-ground coverage map[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(2): 315-325.
- [22] 蒋焕煜, 张利君, 刘光远, 等. 基于 PWM 变量喷雾的单喷头动态雾量分布均匀性实验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 41-46.
- Jiang Huanyu, Zhang Lijun, Liu Guangyuan, et al. Experiment on dynamic spray deposition uniformity for PWM variable spray of single nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [23] Mariano G, Luis E, Manuel P, et al. Autonomous systems for precise spraying-Evaluation of a robotised patch sprayer[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 165-182.
- [24] Nuytens D, Zwervaegher I, Dekeyser D. Spray drift assessment of different application techniques using a drift test bench and comparison with other assessment methods[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 14-24.
- [25] 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: 273-281.
- [26] Needham D L, Holtz A J, Giles D K, et al. Actuator system for individual nozzle control of flow rate and spray droplet size[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55 (2): 379-386.
- [27] 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.
- [28] 刘勇, 王运圣, 胡雯雯, 等. 远近一体的农用电磁阀控制系统研发[J]. 上海农业学报, 2022, 38 (1): 101-107.
- Liu Yong, Wang Yunsheng, Hu Wenwen, et al. Research and development on remote and near integration control system of solenoid valve for agriculture[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2022, 38(1): 101-107. (in Chinese with English abstract)
- [29] 范玉, 杨建国, 贺玉海, 等. 双复位弹簧高速电磁阀动态特性研究[J]. 内燃机工程, 2021, 42(1): 101-108.
- Fan Yu, Yang Jianguo, He Yuhai, et al. Dynamic characteristics of high speed solenoid valve with double return spring[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2021, 42(1): 101-108. (in Chinese with English abstract)
- [30] 蔡胜年, 朱亮, 庞宝林. 基于 PWM 技术的开关电磁阀流量特性研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(8): 62-65.
- Cai Shengnian, Zhu Liang, Pang Baolin. Research on flow characteristic of switch solenoid valve based on PWM technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(8): 62-65. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王帅. 扇形喷嘴的雾化特性研究及粒径试验分析[D]. 镇



江: 江苏大学, 2021.

Wang Shuai. Study on Atomization Characteristics and Particle Size Test Analysis of a Fan-Shaped Nozzle[D].

Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[32] 蔡国廉. 电磁铁[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.

## Design and performance test of electronic control precision nozzle body based on PWM

Yin Xiang<sup>1</sup>, Wang Yalin<sup>1</sup>, Du Juan<sup>1\*</sup>, An Guangshun<sup>1</sup>, Jin Chengqian<sup>1,2</sup>, Wang Yanxin<sup>1</sup>

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low precision of variable spray in the existing farmland pesticide application system and the inability of independent control of the nozzle, an electronic control precision nozzle body with a flow adjustment function was designed. According to the working requirements of the precision spray system, based on the electromagnetic theory, an electromagnetic pull-in mechanism composed of a solenoid coil, a fixed iron core, a spool and a return spring was designed to realize the high-frequency reciprocating motion of the valve core. Combined with the structure of the water flow channel of the nozzle body and the reciprocating movement process of the valve core, the end type of the spool and the two-way water flow valve were designed to realize the on-off control of the water flow. The Pulse Width Modulation (PWM) signal was used to control the action state of the electromagnetic pull-in mechanism, change the opening time of the water outlet channel in each cycle, and realize the real-time adjustment of the nozzle flow. By setting different pulse width modulation signal frequency and duty ratio, water pump pressure, and using a high-speed camera to measure the spray time of the electronically controlled precision nozzle body in a single cycle under different pressures, the working performances of the designed electronically controlled precision nozzle body were verified. The test results showed that when the pulse width modulation signal frequency was 20 Hz and the system pressure was 0.3 MPa, the minimum duty cycle that the valve core could open was 7%, and the maximum duty cycle that the valve core could close was 96%; the average relative error of spray time in a single cycle was 7.5% and the maximum relative error was 55.1% at the duty cycle of [7%, 96%]; the average relative error of spray time in a single cycle was 3.1% and the maximum relative error was 13.1% at the duty cycle of [20%, 96%]. It showed that the control effects of the electronic precision nozzle body were poor at the duty cycle of [7%, 19%], and had good control stability and accuracy at the duty cycle of [20%, 96%].

**Keywords:** pesticide; test; precision sprinkler; variable spray; PWM; hydraulic solenoid valve