错相位驱动 PWM 变量喷雾系统设计与试验

张春凤^{1,2},张 萌^{1,3},邹 伟¹,翟长远^{1,3},张 驰^{1,4},赵春江^{1,2*}

(1. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京100097;2. 西北农林科技大学机械与电子工程学院,杨凌712100;3. 江苏大学农业工程学院,镇江212013;4. 北京农学院智能科学与工程学院,北京100096)

摘 要:针对脉宽调制(pulse width modulation, PWM)变量喷雾系统电磁阀同步启闭造成管路压力波动严重的问题,该研究提出一种基于错相位驱动的压力波动抑制方法,基于 C37 控制器开发了支持不同相位差驱动的 PWM 变量控制系统,设计并搭建试验平台,开展 PWM 变量喷雾系统压力波动特性试验、雾化特性试验及雾滴沉积试验。压力波动试验结果表明,错相位驱动方式有效降低了系统压力波动峰峰值和变异系数,且随着占空比的增加,压力波动降低趋势逐渐缩小。当占空比为 20% 和 70% 时,错相位 120°的压力波动变异系数(CV)比同相位驱动分别减小 66.61% 和 19.48%。占空比对变异系数影响最小的相位差区间是 60°~90°驱动,相位差 120°时,不同占空比下系统压力波动 CV 值均最小;对比试验结果表明,错相位驱动的系统雾滴粒径统计项均略低于同相位驱动,错相位驱动系统的雾滴相对跨度(RS)低于同相位驱动,占空比 50% 时,RS 下降最多,为 5.56%;雾滴沉积对比试验结果表明,错相位驱动 PWM 喷雾系统的雾滴覆盖率变异系数相比同相位驱动方式减小了 31.75%,错相位驱动方式可有效改善 PWM 变量喷药系统低频控制条件下药液沉积均匀性。研究结果可为 PWM 变量喷雾技术研发与应用提供依据,为精准变量施药装置的进一步优化提供技术支撑。关键词: PWM;变量喷雾;压力波动;雾化特性;雾滴粒径;雾滴沉积

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202501056

中图分类号: S232.2 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2025)-12-0358-10

张春凤,张萌,邹伟,等. 错相位驱动 PWM 变量喷雾系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2025,41(12):358-367. doi: 10. 11975/j.issn.1002-6819.202501056 http://www.tcsae.org

ZHANG Chunfeng, ZHANG Meng, ZOU Wei, et al. Design and experiment of staggered-phase driven PWM variable spray system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(12): 358-367. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202501056 http://www.tcsae.org

0 引 言

变量施药技术是根据处方信息或实时获取作物长势、 病害发生情况,并基于机组前进速度实时调整施药量, 实现按需喷药的技术手段,可最大限度地提高杀虫剂或 除草剂的利用效率,减少过度施药对环境造成的污染, 降低农产品药液残留^[1-3]。变量施药主要有压力调节^[4]、 浓度调节^[5]和 PWM(pulse width modulation, PWM)间 歇喷雾流量调节控制^[6-9] 三种方式,其中,基于 PWM 的 喷雾流量调节系统具有响应速度快、调节流量范围大、 雾化质量好等优势,且使用常规喷头即可获得良好的喷 雾性能^[10-13],

PWM 变量喷雾技术是目前应用最为广泛的变量喷 药技术之一,多年来国内^[14-16] 及国外^[17-19] 学者开展了诸 多研究。GILES 等^[20] 开发了 PWM 变量喷头,利用 PWM 信号的快速通断调节喷头结构内部的移动插销的启闭时 间,控制喷雾流量,并在车载喷雾机上成功使用。SALCEDO

收稿日期: 2025-01-09 修订日期: 2025-03-12

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2021302)、北京市农林科学院 改革与发展项目(GGFZ20240112)联合资助

作者简介:张春凤,博士生,研究方向为肥药精准施用技术及装备。

Email: zhangchunfeng2022@163.com

※通信作者:赵春江,博士,研究员,中国工程院院士,研究方向为农业 信息化技术。Email: zhaocj@nercita.org.cn 等^[21]研究发现,与传统恒速喷药机相比,激光-PWM 控制喷雾系统减少了 90.3%的总空气漂移量和 85.0%的总地面沉积损失,大大提高了农药利用率。邓巍等^[22]对 PWM 变量喷雾系统调流过程中的雾化特性进行了大量研究,发现随着占空比变小,雾量分布向中央集中的趋势很小,雾滴粒径稍增大,喷雾角、雾滴粒径随流量的变化率很小,雾滴速度基本无变化,流量对喷雾特性的影响也较小。

相比压力调节方式,PWM 流量控制对雾滴粒径和 速度的影响相对较小^[23-25]。但由于系统电磁阀开、关延 迟和喷嘴的频繁开、关动作,仍然存在系统压力波动、 喷雾覆盖精度和均匀性不佳的问题^[26]。HAN等^[27]对一 套商购 PWM 变量喷施系统的压力、流量波动进行了测 试分析,发现系统压力波动引起喷头在一个周期内流量 上下浮动 0.5%~2.2%,而不同位置各喷头间的喷雾流量 在一个周期内的变异高达~15%~+12%。BUTTS等^[28]研 究了喷头类型、占空比对喷雾均匀性的影响,发现文丘 里喷头不适用 PWM 系统,电磁阀脉冲调控会造成喷头 压力损失,40% 或以上的 PWM 占空比对喷雾均匀性的 影响较小,喷雾压力越大喷雾越均匀。蒋焕煜等^[29]发现: 随着 PWM 频率和占空比越大,雾滴沉积分布变异系数 越小,雾滴覆盖越均匀。

综上所述,增大 PWM 控制频率、占空比及喷雾压 力可以有效提高雾滴均匀性,但提高频率会缩短电磁阀 的使用寿命,影响流量调节倍数,加剧系统压力波动; 增大喷雾压力,雾滴粒径会急剧变小,影响药液在作物 上的粘附性, 增加漂移风险; PWM 占空比由喷头所需 流量决定,不能任意调整。随着精准农业的发展需求, 植保作业向精量对靶喷雾方向发展,但目前大田粮食作 物等低附加值作物的植保作业由于成本及靶标对象探测 限制仍无法实现精准对靶作业,且变量喷雾作业精度也 较低。喷杆喷雾机一般配有 20~30 个喷头甚至更多,喷 幅可达十余米,在 PWM 控制的变量施药作业过程中, 众多电磁阀同时启闭,加剧了喷杆内压力波动,影响施 药精准性。为寻求一种低频且能减小喷雾压力波动、提 高雾化及沉积均匀性的控制方法,本文针对常规同相位 PWM 控制喷雾系统电磁阀同时启闭造成的湍流、压力 冲击、雾滴粒径变异等问题,提出一种基于错相位驱动 方式的低频 PWM 变量喷雾控制方法,搭建不同相位差 驱动的 PWM 变量喷雾系统,开展喷雾压力波动特性、 雾化特性及沉积性能研究,以期为农业植保作业 PWM 变量施药系统开发与应用提供依据,提高农药有效利用 率,为精准变量施药技术及装置的优化提供支撑。

1 PWM 变量喷雾试验台设计

喷药机主要依靠拖拉机动力输出轴带动隔膜泵转动, 吸排药箱内的药液输送到喷杆后通过喷头雾化完成喷雾 作业,动力输出轴转速调节主要依靠调控油门大小实现, 故隔膜泵转速的量化控制困难。为了探究 PWM 变量喷 雾系统压力波动特性与雾化及沉积特性,本文设计了支 持喷雾压力、流量无级调控的 PWM 变量喷雾控制系统 与试验台,如图1所示。PWM 变量喷雾系统主要由喷 雾压力控制模块、PWM 变量喷雾模块、数据采集模块 及上位机等组成。喷雾压力控制模块主要通过变频电机 调频改变同轴连接隔膜泵的转速,实现药液输出量以及 喷雾压力的调节,系统设置回流管路,通过改变回流比 例阀开度调整回流量; PWM 变量喷雾模块主要通过 ECU(Electronic Control Unit) 控制器实现 PWM 信号输 出控制,改变 PWM 控制频率及占空比等参数实现喷头 流量调节;数据采集模块主要应用高频数据采集卡采集 喷杆处压力传感器及流量传感器的电流信号和脉冲信号, 并通过 RS485 与上位机通讯,实现喷雾压力和流量数据 的实时采集与存储。





如图 2 所示, PWM 变量喷雾系统试验平台主要由 药箱、变频电机、隔膜泵、安全阀、回流比例阀、过滤 器、流量传感器、分段控制阀组、流量传感器、喷杆、 喷头、电磁阀以及控制箱等组成,控制箱内包含变频器 及主控制器。变频电机同轴连接隔膜泵,通过变频器调 频改变隔膜泵的输入转速,进而实现隔膜泵的输入流量 无级调节,药液通过隔膜泵进入喷药系统主管路,回流 比例球阀实现一部分药液回流至药箱,另一部分药液通 过分段控制阀组径喷杆喷头实现有效喷雾,分段控制阀 组主要由分配器、开关阀等组成,可将总药液均匀分配 给5个支路喷杆,各支路喷杆独立控制,每个支路喷杆 等距(50 cm)设置6个喷头,通过电磁阀的频率占空比 间歇控制喷头流量大小实现变量喷雾。管路中安装的安 全阀可设置系统压力上限,超过安全压力立即打开回流 管路卸荷,以确保系统安全作业。试验台所用阀件型号 及参数如表1所示。



a. 结构示意图 a. Schematic diagram of structure



b. 实物图 b. Physical picture

 1.控制箱 2.压力传感器 3.分段控制阀组 4.流量传感器 5 过滤器 6.回流比例 阀 7.安全阀 8.压力传感器 9.电磁阀 10.喷头 11.隔膜泵 12.电机
 1. Control box 2. Pressure sensor 3. Segmented control valve group 4. Flow sensor 5. Filter 6. Return proportional valve 7. Safety valve 8. Pressure sensor 9. Solenoid valve 10. Nozzle 11. Diaphragm pump 12. Motor

图 2 试验台结构图

Fig.2 Diagram of test bench structure

表1 试验阀件型号与参数

Table 1 Model and parameters of valve parts of experimental

system		
名称 Name	型号 Model	参数 Parameter
变频器 Frequency converter	V8	功率: 2.2 kW
变频电机 Variable frequency motor	YVP-90 L-6	功率: 2.2 kW
隔膜泵 Diaphragm pump	MB396/3.0	流量: 70~90 L·min ⁻¹
回流比例阀 Return proportional valve	Q911F-16P	电压: 12 V; 智能调节型
电磁阀 Solenoid valve	DS115880-12	电压: 12 V, 额定电流: 0.9 A; 工作压力: ≤0.7 MPa
喷嘴 Nozzle	TP8002	压力: 0.2~0.4 MPa
压力传感器 Pressure sensor	AS-131	量程: 0~4MPa; 精度: 0.5%
流量传感器 Flow sensor	SK-DN25-Hz	量程: 2~60 L·min ⁻¹ ; 精度: 1%
数据采集卡 Data acquisition card	USB7660AS/2	采样频率; >1 kHz
控制器 Controller	C37	通讯: CAN; 编程环境: CodeSys v2.3

2 基于错相位驱动的 PWM 变量喷雾控制系统设计

2.1 错相位驱动控制原理

PWM 变量喷雾主要通过 PWM 电信号控制电磁阀开 启和关闭的时间占比和周期改变喷头流量大小,可实现 喷头流量快速调节。传统同相位控制条件下(所有电磁阀同一时刻启闭)系统压力冲击严重,药液沉积均匀性及喷雾效果差^[30-32]。为此本文提出一种错相位驱动控制方法,即对每路电磁阀的 PWM 控制信号触发时刻设置一定的相位差,以避免多个电磁阀同时启闭时产生的液压冲击叠加,减少上游喷杆压力的剧烈波动,提高喷雾精准性,具体原理如下:

设电磁阀的一个完整开闭周期为 T (360°),错相 位驱动旨在错开不同电磁阀控制信号的触发时刻,并不 改变 PWM 信号的频率及占空比,因此不影响喷头流量 的控制。如图 3 所示,设 PWM 控制频率为5Hz、占空比 DC (duty cycle)为 30% 时,3 路 PWM 控制信号依次错开 1/6 和 1/3 个控制周期。错相位驱动可避免所有电磁阀同 时动作,分散液压冲击波的叠加效应,从而有效抑制管 路中的液压波动。为研究错相位驱动控制方法在较低控 制频率下的喷雾压力稳定效果,探索低频稳压控制新方 法,延长电磁阀使用寿命,变量喷雾低频控制频率范围 为 3 ~7 Hz^[11,17,22],故设定本文后续试验中 PWM 控制频 率为 5 Hz。







2.2 系统设计与实现

本试验系统中单喷杆等距设置6个喷头,为了实现 6路 PWM 信号错相位驱动,将6个喷头分成3组,如 图4所示,其中1号和4号喷头为一组,2号和5号喷 头为一组,3号和6号喷头为一组。由C37控制器发出 3路频率和占空比一致的 PWM 控制信号,分别控制3 组喷头动作,同组喷头动作一致,每组喷头控制信号的 相位差相同。

C37 控制器具备开关量输出端口,可输出高低电平,利用 CoDeSys V2.3 软件内的 TON (timer on-delay,通

电延时定时器)功能块,实现多路 PWM 信号的错相位 高低电平输出。TON 功能块主要实现开启延迟,包含4 个变量:声明输入参数 IN (数据类型: BOOL) 和 PT (数据类型: TIME),分别表示触发信号和预设时间值; 输出参数 Q_N (数据类型: BOOL) 和 ET (数据类型: TIME),分别表示定时完成状态和已计时时间值。基于定 时器中断的 PWM 信号生成工作流程如图 5 所示,在系统 初始化阶段配置定时器周期寄存器 PT 以确定 PWM 周期 T长度, 定时器计数器 ET 基于 1 ms 时间基准进行递增计 数。当 ET 计数值达到 PT 设定阈值时,触发定时器溢出 中断并执行中断服务程序,此时系统将 ET 复位清零并 生成周期同步信号,同时为多通道重新加载相位参数, 进入下一控制周期。在单周期运行过程中,定义动态参 数对 (N_1, N_2) , 当 ET \in $[N_1, N_2]$ 时, Q_N 端口输出高电平(占 空比 DC=(N2-N1)/PT),其余时段保持低电平。针对多 路信号相位控制需求,系统采用单定时器多通道架构, 通过为3路信号分别配置独立的(N₁ N₂)参数组实现相位 偏移,同时借助定时器同步重新加载机制确保各通道周 期严格同步。







图 5 TON 功能模块工作流程图 Fig.5 Workflow diagram of TON(time on-delay) functional module

3 试验台性能测试

3.1 单喷头流量测试

PWM 变量喷雾系统主要通过改变控制信号的占空 比实现喷头流量快速调节,喷头流量与占空比成线性关

系^[9],但电磁阀开关存在响应时间,故实际开启和关闭 时间占比与设定占空比存在一定差距[27]。本文采用称量 法测量 TeeJet 电磁阀 PWM 变量喷雾的流量特性曲线。 电磁阀频率设置为5Hz,喷雾压力为0.2MPa,测试电磁 阀占空比 10%~100% 范围内单喷头喷雾流量。试验时, 用1000 mL 量杯接住喷头喷出的清水,用秒表记录喷雾 时间(约60s),电子秤(精度0.1g)称量量杯液体质 量,通过计算得出喷头流量(L/min),每次试验重复3 次取平均值,得到 PWM 控制电磁阀在不同占空比下的 单喷嘴流量与占空比的关系如图 6 所示,可知喷头流量 随 PWM 占空比增加而增加,在占空比 10%~80% 区间, 喷头流量与占空比成较好的线性关系。占空比大于80% 后单喷头流量几乎不再增加,说明电磁响应时间不足以 完成关闭动作。因此在初始工作压力 0.2MPa、PWM 控 制频率 5Hz 情况下该电磁阀的有效调节占空比控制区间 为10%~80%,在此区间内流量与占空比关系如公式(1) 所示, R²=0.9801, 拟合度高。

$$y = 0.0059 x + 0.216 5 R^2 = 0.980 1$$
(1)





3.2 基于同相位驱动的喷雾系统压力测试

为了探究 PWM 控制方式对喷雾系统压力波动的影响,首先开展传统同相位驱动方式下喷雾系统压力波动 测试。调节回流比例阀开度,设置回流比例为 40%,回 流支路保证 PWM 间歇喷雾安全作业^[33]。通过变频器调 节喷雾系统的输入流量,读取主管路压力传感器示数, 设置初始工作压力为 0.2 MPa(占空比为 100% 时喷雾压 力)。上位机通过 CAN 通讯向 C37 控制器发送 PWM 控制信号,设置电磁阀频率 5 Hz,据参考文献 [34] 和喷 头流量与占空比关系试验结果,占空比设置为 20%、 30%、40%、50%、60%、70%。数据采集卡采集频率 500 Hz,采集时间 4 s,采集喷杆中间位置压力传感器信 号值,压力采样点位置如图 7 所示,将每 10 个原始试验 数据为一组进行中值滤波,数据处理结果如图 8 所示。

根据文献 [35], 压力波动评价指标选用喷杆实时压力标准差 δ_P 和压力波动峰峰值 P_{op} :

$$\delta_P = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{N} \left(P_i - P_{mean}\right)^2}{N}} \tag{2}$$

式中 P_i 为喷杆压力采样数据, MPa; P_{mean} 为压力平均值, MPa; N为采样点。

$$P_{p-p} = P_{max} - P_{min} \tag{3}$$

式中 P_{max} 为压力最大值, MPa; P_{min} 为压力最小值, MPa。



1. No.1 喷头 2.喷杆 3.数据采集卡 4.计算机 5.电磁阀 6.C37 控制器 7.电磁阀 1. No.1 nozzle 2. Boom 3. Data acquisition card 4. Computer 5. Solenoid valve 6. C37 controller 7. Solenoid valve



Fig.7 Diagram of pressure sampling point position in nozzle





由图 8 可知,喷杆内压力与 PWM 信号占空比成反 比,当占空比减小时,管路中的压力会明显上升。随着 占空比的增大,压力波动幅度逐渐减小,占空比为 20% 时压力峰峰值最大,为 0.162 MPa,70% 占空比时最小, 为 0.043 MPa,20% 占空比的压力峰峰值是 70% 占空比 的 3.76 倍,标准差是 70% 占空比的 5.11 倍。由此可知, PWM 变量喷雾在调节占空比调流量过程中,喷杆压力 波动较大,且占空比越小,压力波动幅度越大,影响精 准施药。

3.3 基于错相位驱动的 PWM 变量喷雾系统压力测试 3.3.1 试验设计

为了验证错相位驱动的 PWM 变量喷雾系统不同相 位差对喷雾系统压力波动的影响,设计如下试验:试验 液体选择自来水,喷嘴选取 TP8002标准扇形喷嘴,回 流比例与占空比同 3.2节;相位差设置为 30°、60°、90°、 120°、150°;初始工作压力设置为 0.2 MPa, PWM 控制 频率设为 5 Hz,采用 USB7660AS/2 数据采集卡实时采 集喷杆中间位置的压力传感器数据,数据采样点位置同 图 7,采样频率为 500 Hz,采样时间为 4 s,每组试验重 复 3 次。

3.3.2 试验结果与分析

压力实时数据经过中值滤波处理,如图9所示为不同相位差PWM驱动下50%占空比条件下喷杆内压力的变化情况。可以看出,喷杆压力呈周期性波动,与同相位驱动(相位差为0°)相比,错相位驱动(相位差为30°、60°、90°、120°、150°)的系统压力波动幅度明显

减小,变化趋势是先减小后增大,在相位差为120°时, 系统压力波动幅度最小,系统压力最稳定。



图 9 50% 占空比条件下不同相位差驱动的 PWM 变量喷雾系 统压力数据



整理不同相位差、不同占空比下所有试验数据,求 得系统平均压力和压力波动峰峰值,如图 10 所示。由 图 10a 可以看出,错相位驱动对压力平均值影响较小, 压力平均值主要受占空比影响,占空比越小管路压力平 均值越高。图 10b 可以看出,在不同占空比下,相位差 120°时的压力峰峰值最小。随着占空比的增加,同相位 和错相位驱动下的压力峰峰值差距逐渐缩小。当占空比 为 20% 时,错相位 120°驱动的压力峰峰值比同相位驱动 的减小 76.79%;当占空比为 70% 时,错相位 120°驱动 的压力峰峰值比同相位驱动的减小 45.03%。由此可见, 在相同初始工作压力及控制频率下,错相位控制可以明 显减小压力波动。



图 10 不同占空比及相位差下管路平均压力平均及压力 波动峰峰值

Fig.10 Average pipeline pressure and peak-to-peak pressure fluctuation under different duty cycle and phase difference

为了探究不同相位差和占空比下系统压力波动程度, 根据式(4)计算系统压力波动变异系数 CV。

$$CV = \delta_P / P_{mean} \times 100\% \tag{4}$$

图 11 为 PWM 变量喷雾系统不同占空比、不同相位 差条件下的压力波动变异系数曲线。变异系数越小说明 压力越稳定,雾滴越均匀,喷雾系统作业效果越好。由 图 11 可以看出,相比同相位驱动,错相位驱动的喷杆压 力波动变异系数减小,且随相位差的增加变异系数整体 呈下降趋势。在不同占空比条件下,相位差为120°时压 力变异系数均最小,压力最稳定。占空比分别为20%、 30%、40%、50%、60%、70%时,120°错相位与同相位 驱动相比,变异系数分别减小66.61%、58.88%、56.46%、 40.85%、31.79%、19.48%, 压力波动抑制效果最为明显; 占空比为 20%、30% 时变异系数变化最为明显,原因是 占空比较低时错相位驱动可以使 3 路 PWM 信号完全错 开,没有重叠时段,在一个周期内保证同一时刻有且只 有一组电磁阀开启,故压力稳定效果较好。随着占空比 增加,3路信号无法实现完全错开,虽然与同相位驱动 相比压力变异系数减小但是降幅也变小。占空比对变异 系数影响较小的相位差为 60°~90°, 说明在此区间内占 空比变化对系统压力波动影响较小,适合频繁改变占空 比调节流量。因此,当PWM喷雾频率为5Hz, 喷头电磁阀分为3组控制时,建议选取120°相位差驱动 以保持管路压力稳定,保证雾化效果。





4 基于错相位驱动的 PWM 变量喷雾系统雾化试验

4.1 试验设计

为了验证错相位驱动对 PWM 变量喷雾系统雾化特性的影响,依据《JBT 9782-2014 植保机械通用试验方法》^[36]要求,在实验室开展雾化试验。依据文献[37],雾化试验采用清水为介质,环境温度和相对湿度分别为22.4 ℃和40%。应用所设计的变量喷雾系统搭建雾化试验台,如图 12 所示。选取喷杆上任意一个喷嘴放置于激光发射装置与镜头连线的中间位置,距离激光束的垂直距离为0.5 m,旋转喷头使喷雾面垂直于激光束,以确保镜头以最佳视野采集雾滴粒径。雾滴粒径测量仪型号为VisiSize P15 (英国 Oxford Lasers Ltd),激光强度设定为100%,来自发射器的激光束照射通过聚焦区域的液滴,相机以15 帧/s 的速度拍摄液滴图像,收集到10 000 个有效聚焦液滴后自动停止,每组试验重复 3 次。

试验测试变量为 2 种电磁阀控制方式(同相位和错相位相位差 120°)和 6 种占空比的组合(20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%),试验条件同 3.3.1 节,初始工作压力为 0.2 MPa,电磁阀控制频率为 5 Hz。



1.压力表 2.开关阀 3.分流器 4.微量调节阀 5.控制箱 6.电磁阀 7.上位机 8.变 频电机 9.隔膜泵 10 压力传感器 11 喷头 12 雾滴粒径测量仪

1. Pressure gauge 2. On-off valve 3. Diverter 4. Micro regulating valve 5. Control box 6. Solenoid valve 7. Computer 8. Variable frequency motor 9. Diaphragm pump 10. Pressure sensor 11. Nozzle 12.Spray droplet size measuring instrument

图 12 雾化特性测量试验台

Fig.12 Atomization characteristic measurement test bench

试验选择 $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 、 $D_{10.9}$ 以及 RS 为主要评价指标,其中 $D_{10.1}$ 、 $D_{10.5}$ 、 $D_{10.9}$ 分别表示取样雾滴的体积按雾滴从小到大的顺序积累,当累积值分别等于取样雾滴总体积的 10%、50%、90% 时所对应的雾滴直径,其中 $D_{10.5}$ 又称为体积中值直径。RS (relative span of the droplet spectrum)为雾滴粒径分布跨度,无量纲参数,表征液滴粒径尺寸分布的均匀性,RS 值越小,表示液滴尺寸分布越窄,即均匀性越好,RS 的计算式为

$$RS = \frac{D_{V0.9} - D_{V0.1}}{D_{V0.5}} \tag{5}$$

4.2 试验结果与分析

对激光粒子分析仪采集到的所有雾滴粒子直径数据 进行统计分析,将粒径按从小到大进行排序和分区统计, 计算出每个雾滴粒径统计区间内所有雾滴粒子的体积和 占雾滴群总体积的百分比和累计体积占比(大于或小于 某一特定粒径的所有雾滴粒子的总体积占雾滴群总体积 的百分比)。如图 13 所示,横坐标为雾滴粒径(µm), 分箱数量上限为 140 个,基于雾滴粒径跨度和分箱数划 分对数刻度,柱状图高度表示雾滴粒径区间内雾滴体积 之和占雾滴群总体积百分比(%),折线表示特定粒径 雾滴累计体积占雾滴群总体积百分比(%)。由 13 图可 知,占空比对 PWM 变量喷雾系统的雾滴粒径影响较小, 不同占空比同相位与错相位驱动方式下雾滴粒径累积体 积曲线趋势基本一致,占空比为 50% 时,同相位与错相 位驱动的雾滴累计体积占比差异相对较大。

图 14 为同相位与错相位驱动不同占空比的雾滴体积 直径变化折线图,由图 14 可知,在初始工作压力 0.2 MPa 下,占空比对雾滴粒径大小没有明显影响。随着占空比 的增加, *D*_{10.1}、*D*_{10.5} 和 *D*_{10.9} 均呈上升趋势。同相位和错 相位驱动在相同压力和占空比下运行的相同喷嘴雾滴尺 寸分布相似,错相位雾滴粒径统计项均略低于同相位。 同相位 PWM 变量喷雾系统 *D*_{10.1}、*D*_{10.5} 和 *D*_{10.9} 在 20% 至 70% 占空比之间的标准差分别为 4.334、7.523 和 7.855,错相位驱动方式下,*D*_{10.1}、*D*_{10.5} 和 *D*_{10.9}的标准差 分别为 4.270、5.852 和 5.990。表明错相位驱动可以有效 减少占空比变化对雾滴粒径分布的影响。 农业工程学报(http://www.tcsae.org)



图 13 不同占空比及不同驱动方式下的雾滴体积分布 Fig.13 Droplet volume distribution under different duty cycles and driving modes



注: D_{10.1}, D_{10.5}, D_{10.9}分别表示小于该直径的所有液滴容积分别占液滴总体积的 10%、50% 和 90%。

Note: $D_{10,1}$, $D_{10,5}$, and $D_{10,9}$ denote the droplet diameters below which the cumulative volume of droplets accounts for 10%, 50%, and 90% of the total droplet volume, respectively.

图 14 不同驱动方式下占空比对雾滴粒径的影响 Fig.14 Influence of duty cycles on droplet size under different driving modes

如图 15 为不同占空比下同相位错相位驱动的雾滴粒 径分布跨度 RS 变化情况,由图 15 可以看出,RS 总体上 随着占空比的增加而降低,同相位和错相位驱动方式下,20% 占空比时的 RS 分别为 70% 占空比时的 1.20 和 1.16 倍。





但错相位驱动在占空比为 40% 时的 RS 略有升高, 分析原因可能是在该条件下电磁阀与泵的动作频率发生 了谐振,使得压力波动较大。大多数条件下,错相位驱 动的 RS 均低于同相位驱动,特别是在占空比 50% 时, RS 下降最多,为 5.56%。这表明错相位驱动可以使雾滴 粒径更均匀,雾化效果更好。

5 基于错相位驱动的 PWM 变量喷雾系统沉积试验

5.1 试验设计

为了对比错相位驱动方式与常规同相位驱动方式的 喷雾系统药液沉积均匀性,在实验室开展沉积试验,试 验采用清水为介质,环境温度和相对湿度分别为23.6℃ 和36.2%。试验台布置如图16所示。为了验证作业方向 的雾滴沉积均匀性,选用电控调速水平轨道车采集雾滴 数据,轨道车行驶速度设置为1m/s,喷头距离轨道车平 面高度为50 cm,在喷头正下方布置一条水敏纸采集带, 由2条宽3.5 cm,长40 cm 水敏纸(重庆六六山下植保 科技有限公司)连接而成,左右两侧12.5 cm 距离处分 别布置2条相同采集带。

试验分成 2 组进行,试验压力均为 0.3 MPa,设置 电磁阀控制频率为 5 Hz,占空比 50%,错相位相位差为 120°。根据运行速度和 PWM 控制频率计算出电磁阀每 个开闭周期轨道运行距离为 20 cm,每个控制周期设置 6 个采集单元,每列采样距离为 80 cm,共 24 个采集单 元,采集 3 列作业方向雾滴沉积数据,将每列的同一行 数据进行叠加取平均值,求得喷杆前进方向的雾滴沉积 覆盖率,并计算 24 个采样单元雾滴覆盖率的变异系数。



图 16 沉积特性试验台 Fig.16 Sedimentary characteristics test bench

5.2 试验结果与分析

采用重庆六六山下植保科技有限公司的雾滴分析软件分析得出每个采样单元雾滴沉积覆盖率数据,绘制如图 17 所示曲线,可以看出,低频控制条件下,同相位驱动的喷雾系统雾滴覆盖率呈现较大波动,错相位驱动系统的覆盖率波动减小。相比同相位驱动,错相位驱动 PWM 变量喷雾系统沉积覆盖率略小,这是因为错相位驱动方式系统的平均压力偏小,喷头流量偏小,雾滴覆盖率即偏小。计算同相位和错相位驱动方式系统雾滴覆盖率变异系数分别为 28.47% 和 19.43%,错相位驱动系统雾滴覆盖率变异系数下降了 31.75%,说明错相位驱动喷雾系统雾滴沉积更均匀。



图 17 不同驱动方式下雾滴沉积覆盖率



6 结 论

1)设计了 PWM 变量喷雾系统试验平台,通过试验 得出,在初始工作压力 0.2 MPa, PWM 控制频率 5 Hz 情况下,电磁阀有效调节流量占空比控制区间为 10%~80%;同相位驱动的喷雾系统压力波动测试结果 表明,喷杆内实时压力的平均值、压力波动峰峰值以及 标准差均与占空比呈现反比例关系,20%占空比的压力 波动峰峰值和标准差分别是 70% 占空比的 3.76 倍和 5.11 倍。

2) 基于 C37 控制器开发了一种错相位驱动 PWM 变 量喷雾系统,可实现 30°、60°、90°、120°、150°相位差 的驱动;压力波动特性试验结果表明,错相位驱动方式 相比同相位驱动系统的平均压力变化不大,但压力波动 峰峰值和变异系数变化较大。错相位驱动可有效降低系 统压力波动峰峰值和变异系数,且随着占空比的增加, 这种影响逐渐缩小。当占空比为 20% 和 70% 时,错相 位 120°驱动的压力波动峰峰值比同相位驱动分别减小 76.79% 和 45.03%,压力波动变异系数分别减小 66.61% 和 19.48%。占空比对变异系数影响最小的错相位相位差 区间是 60°~90°,相位差 120°时,不同占空比下系统压 力波动变异系数均最小。由此可见,对于占空比频繁改 变的变量喷雾系统相位差区间建议选择 60°~90°,对于 变量喷雾压力稳定性要求较高的作业场景相位差建议选 择 120°。

3) 基于错相位驱动的 PWM 变量喷雾系统雾化试验 结果表明,占空比对雾滴直径影响较小。占空比增大, 雾滴直径 *D*_{10.1}、*D*_{10.5} 和 *D*_{10.9} 均略微增大,雾滴粒径分布 跨度 RS 值逐渐减小。错相位驱动系统的雾滴粒径统计 项均略低于同相位驱动。错相位驱动系统的 RS 基本低 于同相位驱动,特别是在占空比 50% 时,RS 下降最多, 为 5.56%。占空比 40% 时,RS 略微增大,考虑为系统 共振影响。整体趋势表明错相位驱动可以使喷雾雾滴粒 径更均匀,雾化效果更好。

4) PWM 变量喷雾系统沉积对比试验结果表明,错 相位驱动系统的雾滴覆盖率较同相位驱动略低,但雾滴 覆盖率变异系数比同相位驱动减少了 31.75%,可见错相 位驱动可减少 PWM 变量喷药系统低频控制造成的非均 匀性地面沉积。

[参考文献]

- 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]. 2020, 2(1):133-146. (in Chinese with English abstract)
 [2] 杨光玉 孔振 兰玉彬 第 精准亦量施菇关键抹去及应
- [2] 杨光玉,孔辉,兰玉彬,等.精准变量施药关键技术及应用现状[J].农业技术与装备,2022,1(1):96-97.
 YANG Guangyu, KONG Hui, LAN Yubin, et al. Key technologies and application status of precise variable application[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022, 1(1):96-97. (in Chinese with English abstract)

- [3] CHEN L, WALLHEAD M, ZHU H, et al. Control of insects and diseases with intelligent variable-rate sprayers in ornamental nurseries[J]. Journal of Environmental Horticulture. 2019, 37: 90-100.
- [4] 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 (Transaction of CSAE), 2004, 20(5): 118-121. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蔡祥, WALLHEAD M, DOERPMUND M, 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, 200. CAI Xiang, WALLHEAD M, DOERPMUND M, et al. Nozzle injection sprayer based on electromagnetic - force valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 69-72, 200. (in Chinese with English abstract)
- [6] SHAHEMABADI A R , MOAYED M J . An algorithm for pulsed activation of solenoid valves for variable rate application of agricultural chemicals[C].// International Symposium on Information Technology. Kuala Lumpur, Malaysia,2008: 1-3.
- [7] 魏新华,于达志,白敬,等.脉宽调制间歇喷雾变量喷施
 系统的静态雾量分布特性[J].农业工程学报,2013,29(5):
 19-24.
 WEL Vielens, VII, Darki, PAL ling, et al. Statis and statis

WEI Xinhua, YU Dazhi, BAI Jing, et al. Static spray deposition distribution characteristics of PWM-based intermittently spraying system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transaction of CSAE), 2013, 29(5): 19-24. (in Chinese with English abstract)

- [8] 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.
- [9] 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)

- [10] 翟长远,赵春江,NING Wang,等.果园风送喷雾精准控制方法研究进展[J].农业工程学报,2018,34(10):1-15. ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, NING Wang, et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(10): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [11] 蒋焕煜,周鸣川,童俊华,等.基于卡尔曼滤波的 PWM 变 量喷雾控制研究[J]. 农业机械学报,2014,5(10): 60-65.
 JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, TONG Junhua, et al. PWM variable spray control based on Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 5(10): 60-65. (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 Agric, 2022, 23: 219-252.
- [13] SALCEDO R, ZHU, H, ZHANG Z, et al. Foliar deposition and

coverage on young apple trees with PWM-controlled spray systems[J]. Comput. Electron. Agric, 2020, 178: 105794.

- [14] FABULA J, SHARDA A, LUCK J D, et al. Nozzle pressure uniformity and expected droplet size of a pulse width modulation (PWM) spray technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106388.
- [15] LEBEAU F, El B L, 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: 149-161.
- [16] ZHU H, ZONDAG R H, DERKSEN R C, et al. Influence of spray volume on spray deposition and coverage within nursery trees[J]. Journal of Environmental Horticulture, 2008, 26: 51-57.
- [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] 刘海红. PWM 变量喷施系统特性试验台的设计及液压冲击的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
 LIU Haihong. Design of Test Equipment of PWM Controlled Variable Rate Application and Study of Hydraulic impacts[D].
 Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [19] MANGUS D L, SHARDA A, ENGEIHARDT A, et al. Analyzing the nozzle spray fan pattern of 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.
- [20] GILES D K, HENDERSON G W, FUNK K. Digital control of flow rate and spray droplet size from agricultural nozzles for precision chemical application[C]. //Precision Agriculture Proc. 3rd Conference, USA: 1996.
- [21] SALCEDO R, ZHU H, OZKAN E, et al. Reducing ground and airborne drift losses in young apple orchards with PWMcontrolled spray systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189(6): 106389.
- [22] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. [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 with English abstract)
- [23] GILES D K. Pulse width modulation for nozzle flow control: Principles, development and status of the technology[J]. Aspects of Applied Biology, 2021, 144: 59-66.
- [24] GOPALA P S, TIAN L, ZHENG J. Evaluation of a flow control system for site-specific herbicide applications[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(4): 863-870.
- [25] ZHANG C, ZHAI C, ZHANG, M, et al. Staggered-phase spray control: a method for eliminating the inhomogeneity of deposition in low-frequency pulse-width modulation (PWM) variable spray[J]. Agriculture, 2024, 14: 465.
- [26] ZHOU X, LIU H, WU S, et al. Influence of solenoid valve response times on water hammer in variable rate spraying system[J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 64-69.

- [27] HAN S F, HENDRICKSON L L, NI B C, et al. Modification and testing of a commercial sprayer with PWM solenoids for precision spraying[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(5): 591-594.
- [28] BUTTS T, BUTTS L, LUCK J, et al. Droplet size and nozzle tip pressure from a pulse-width modulation sprayer.[J].Biosystems Engineering. 2019, 178: 52-69.
- [29] 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)

- [30] GILES D K, COMINO J A. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow con-troller for spray nozzles[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 47: 249-267.
- [31] CAMPOS J, GALLART M, LLOP J, et al. On-farm evaluation of prescription map-based variable rate application of pesticides in vineyards[J]. Agronomy, 2020, 10(1): 102.
- [32] CERRUTO E, MANETTO G, LONGO D, et al. A model to estimate the spray deposit by simulated water sensitive

papers[J]. Crop Protection, 2019, 124: 104861.

- [33] 张春凤, 翟长远, 赵学观, 等. 对靶喷药系统压力波动特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 31-39. ZHANG Chunfeng, ZHAI Changyuan, ZHAO Xueguan, et al. Experimental study on the pressure fluctuation characteristics of target spray system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 31-39. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李龙龙,张瑞瑞,陈立平,等.PWM 占空比对雾滴飘移特性影响的风洞试验[J]. 农机化研充, 2022, 4(10): 118-125.
 LI Longlong, ZHANG Ruirui, CHEN Liping, et al. experimental study on influence of PWM duty cycle on spray drift characteristics in wind tunnel[J]. Transactions of Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 4(10): 118-125. (in Chinese with English abstract)
- [35] 宋俊伟. 施药系统中隔膜泵压力波动的研究[D]. 镇江: 江苏 大学, 2018.
 SONG Junwei. Study on Pressure Fluctuation of Diaphragm Pump Spraying System[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [36] 中华人民共和国工业和信息化部,植物保护机械通用试验 方法 JB/T9782-2014 [S].北京:机械工业出版社,2014.
- [37] 钱丽娟, 熊红兵, 林建忠. 液体物性对雾化射流液雾粒径 的影响[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 246-250.

Design and experiment of staggered-phase driven PWM variable spray system

ZHANG Chunfeng^{1,2}, ZHANG Meng^{1,3}, ZOU Wei¹, ZHAI Changyuan^{1,3}, ZHANG Chi^{1,4}, ZHAO Chunjiang^{1,2}*

Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;
 College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
 College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
 College of Intelligent Science and Engineering, Beijing University of Agriculture, Beijing 100096, China;

Abstract: In response to the pronounced pressure fluctuations in pipelines of pulse width modulation (PWM) variable-rate spraying systems, which stem from the synchronous actuation of solenoid valves, this study introduces a staggered-phase driving approach aimed at mitigating such fluctuations. Leveraging a C37 controller, a PWM variable-rate control system was developed, enabling operation with varying phase differences. Subsequently, a dedicated experimental platform was designed and constructed to comprehensively investigate the pressure fluctuation characteristics, atomization performance, and droplet deposition behavior of the PWM variable-rate spraying system. Pressure fluctuation test results demonstrate that the staggeredphase driving mode effectively reduces the peak-to-peak value and coefficient of variation (CV) of system pressure fluctuations. Moreover, with the increase of duty cycle, the decreasing trend of pressure fluctuations gradually diminishes. Notably, as the duty cycle increases, the rate of decrease in pressure fluctuations gradually diminishes. Specifically, at duty cycles of 20% and 70%, the CV of pressure fluctuations under a 120° phase difference exhibits reductions of 66.61% and 19.48%, respectively, when compared to the same-phase driving condition. The phase difference range between 60° and 90° demonstrates the least sensitivity to changes in the duty cycle, while a 120° phase difference consistently yields the lowest CV values across different duty cycles.Comparative analysis further indicates that the statistical parameters of droplet size in the staggered-phase driven system are marginally lower than those of the same-phase driven system. Additionally, the relative span (RS) of droplets in the staggered-phase system is consistently smaller, with the most significant reduction of 5.56% observed at a 50% duty cycle. Droplet deposition experiments highlight that the CV of droplet coverage in the staggered-phase driven PWM spraying system is decreased by 31.75% relative to the in-phase driven system. This improvement underscores the efficacy of the staggered-phase driving approach in enhancing the uniformity of liquid medicine deposition under lowfrequency control conditions. Collectively, these findings not only provide a theoretical foundation for the development and application of PWM variable-rate spraying technology but also offer practical guidance for the optimization of precision variable-rate pesticide application equipment.

Keywords: PWM; variable spray; pressure fluctuation; atomization characteristics; droplet size; droplet deposition