

## 对靶喷药系统压力波动特性的试验研究

张春风<sup>1,2</sup>, 翟长远<sup>2,3</sup>, 赵学观<sup>2</sup>, 邹伟<sup>2</sup>, 张萌<sup>2,3</sup>, 赵春江<sup>1,2,3\*</sup>

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

**摘要:** 针对精准对靶喷药系统作业中由于不同数量喷头反复启闭造成管路压力波动严重的问题, 该研究开展了对靶喷药系统回流比例对管路压力波动影响的研究。设计了对靶喷药压力波动试验平台, 基于 AMESim 建立对靶喷药压力波动系统仿真模型。设置系统初始压力 0.2~0.4 MPa, 回流比例为 0~0.9, 分别关闭 1/5~4/5 数量的喷头进行了仿真试验。结果表明, 关闭喷头的占比越大, 管路压力波动越大, 当系统初始压力 0.2 MPa, 回流比为 0, 关闭 4/5 数量的喷头, 管路压力从 0.2 MPa 上升至 5.15 MPa, 波动率达 2 400%; 系统初始工作压力越大, 关闭喷头数量对压力波动影响越大。设置回流管路可有效减小管路压力波动, 且回流比越大效果越明显, 当系统初始压力 0.2 MPa、回流比例为 0.6 时, 部分喷头关闭的压力波动率最大为 64.53%。兼顾泵的利用率, 回流比例建议小于 0.6。系统初始压力 0.3 MPa 时, 回流比例建议小于 0.7; 系统初始压力 0.4 MPa 时, 回流比例建议小于 0.8。根据对靶喷药压力波动容忍度要求, 系统初始压力 0.2 MPa 时, 喷施靶标在作业行中的占比量最佳回流比例关系为: 靶标占比 1/5 的最佳回流比例区间为 0.5~0.6; 靶标占比 2/5 的最佳回流比例区间为 0.5~0.6; 靶标占比 3/5 的最佳回流比例区间为 0.2~0.3; 靶标占比 4/5 的最佳回流比例区间为 0~0.1。系统初始压力 0.3 MPa 时, 喷施靶标在作业行中的占比与最佳回流比例区间关系为: 靶标占比 1/5 的最佳回流比例区间为 0.6~0.7; 靶标占比 2/5 的最佳回流比例区间为 0.5~0.6; 靶标占比 3/5 的最佳回流比例区间为 0.2~0.4; 靶标占比 4/5 的最佳回流比例区间为 0~0.1。初始压力为 0.4 MPa 时, 靶标占比 1/5 的最佳回流比例区间为 0.7~0.8; 靶标占比 2/5 的最佳回流比例区间为 0.6~0.7; 靶标占比 3/5 的最佳回流比例区间为 0.4~0.5; 靶标占比 4/5 的最佳回流比例区间为 0~0.3。研究结果可为农业植保作业对靶变量施药技术应用及工况参数的选择提供依据, 为精准对靶施药装置的进一步优化提供支撑。

**关键词:** 仿真; 植保; 对靶喷药; 压力波动; AMESim; 回流比

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.18.004

中图分类号: S232.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-18-0031-09

张春风, 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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.18.004 <http://www.tcsae.org>

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 (Transactions of the CSAE), 2022, 38(18): 31-39. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.18.004 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

目前, 国内病虫草害防治仍以化学农药喷施为主, 传统连续喷施作业模式导致过量施药, 农药利用率低, 引起食品安全与环境污染等社会问题<sup>[1-4]</sup>。精准施药技术可通过传感器探测靶标信息, 驱动变量执行机构实现按需喷药作业<sup>[5]</sup>, 可有效解决上述问题。精准施药技术核心主要包括对靶施药技术和变量施药技术<sup>[6-8]</sup>。对靶施药技术是基于靶标有无、分布特性等进行的按需喷药控制技术。变量施药技术是基于机组前进速度、病害严重程度等进行的喷药量控制技术。在对靶施药和变量施药控制作业过程中, 喷头的

频繁启闭会使管路药液压力发生大范围波动, 影响药液雾滴粒径、药液沉积分布以及喷药系统使用寿命<sup>[9-11]</sup>。

为了探究精准施药技术管道压力波动特性, 国内外的学者进行了诸多研究<sup>[12-17]</sup>。Han 等对一套商购 PWM (Pulse Width Modulation) 变量喷施系统的压力、流量波动进行了测试分析, 发现系统中压力波动引起喷头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一个周期内变异高达 15%~12%<sup>[18]</sup>; 黄胜等基于 PID 控制和施药量模糊控制方法设计了变量施药机的恒压变量控制系统, 以保持喷药系统压力恒定, 但系统响应时间 0.85 s, 远大于对靶喷药几十毫秒响应要求, 无法用于对靶喷药压力波动消除<sup>[19]</sup>; 韩润哲等搭建了施药性能测试试验台, 进行不同回流比例下管路压力波动测试。发现管路压力波动值与回流比例有直接关系, 且同时开启的喷头数目会对管路压力造成一定的影响, 但影响特性尚未分析<sup>[20]</sup>; Zhou 等基于 CFD (Computational Fluid Dynamics) 仿真技术研究了变量喷施系统电磁阀响应时间对液压冲击的影响, 推算出了电磁阀关闭过程中

收稿日期: 2022-04-08 修订日期: 2022-08-16

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX (21) 2006); 江苏省重点研发计划项目 (BE2021302); 北京市农林科学院智能装备技术研究中心开放课题 (KF2020W010)

作者简介: 张春风, 博士生, 研究方向为肥药精准施用装备技术。

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@nrcita.org.cn

水击压力计算模型<sup>[21]</sup>。

目前,针对施药系统压力波动特性的研究大多集中于系统固有阀件的结构参数与功能参数产生的影响,如隔膜泵<sup>[22]</sup>、比例溢流阀<sup>[23]</sup>和电磁阀<sup>[24]</sup>等;以及基于 PWM 控制信号频率和占空比等参数对管路压力波动以及雾化特性影响<sup>[25-28]</sup>,精准喷药系统对靶过程中压力波动影响特性仍需进一步探索。

本文设计对靶喷药压力波动试验系统,以对靶喷药过程中部分喷头启闭过程为研究对象,通过试验验证与仿真分析,探索对靶喷药过程中部分喷头关闭引起的系统压力波动特性,并提出通过增设回流管路消除压力波动方法,得出不同回流比例对管路压力波动的影响特性,以为农业植保对靶变量施药技术应用以及其工况参数的选择提供依据,减少农药浪费,提高农药利用率,为精准对靶施药装置的进一步优化提供支撑。

## 1 对靶喷药压力波动试验台

### 1.1 试验台总体结构

本文设计的对靶喷药压力波动试验台如图 1 所示,主要由喷杆、喷头、集雾槽、组合控制阀、药箱、隔膜泵、变频电机、机架、控制柜、压力表等组成。试验台设置 5 路平行等距喷杆(长度 1 m),每个喷杆等距安装 5 个喷头;集雾槽可收集喷雾雾滴并回流至药箱,便于试验药液循环使用。

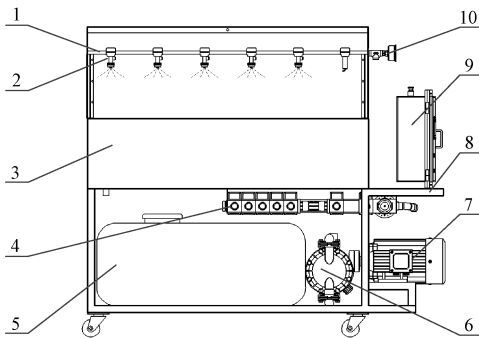


图 1 对靶喷药压力波动试验台结构图

Fig.1 Structure diagram of target spraying pressure fluctuation test bench

### 1.2 试验台管路系统

如图 2 所示,试验台管路部分主要连接药箱、隔膜泵、过滤器、安全阀、回流比例阀、开关阀、喷杆等。变频电机为系统提供动力,驱动隔膜泵吸取药箱药液,流入组合控制阀,药液经过过滤器和稳压装置形成稳定恒流源,通过回流比例阀一部分流向 5 路喷杆完成喷雾,一部分回流至药箱。当系统压力超过安全阀阈值,安全阀打开药液可全部卸荷至药箱。

### 1.3 试验台监控系统

如图 3 所示,监控系统主要由控制单元、执行单元、信号采集单元组成。系统通过控制变频电机频率进而控

制隔膜泵的转速改变隔膜泵药液输出量。5 路喷杆独立开闭控制,实现对靶施药系统一定数量喷头的启闭。回流比例阀通过设置计时器控制开启时长改变回流阀的开度进而改变回流量。系统通过流量传感器监测主管路流量与回流量,通过压力传感器实时监测各喷杆压力变化,通过数据采集和存储模块获得压力和流量数据。

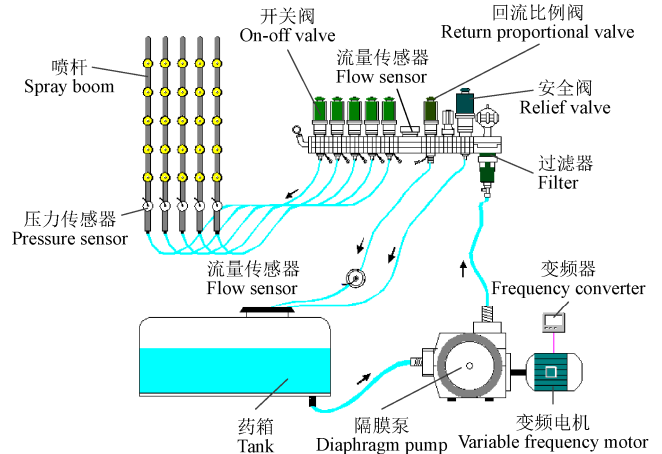


图 2 管路系统设计图

Fig.2 Design diagram of pipeline system

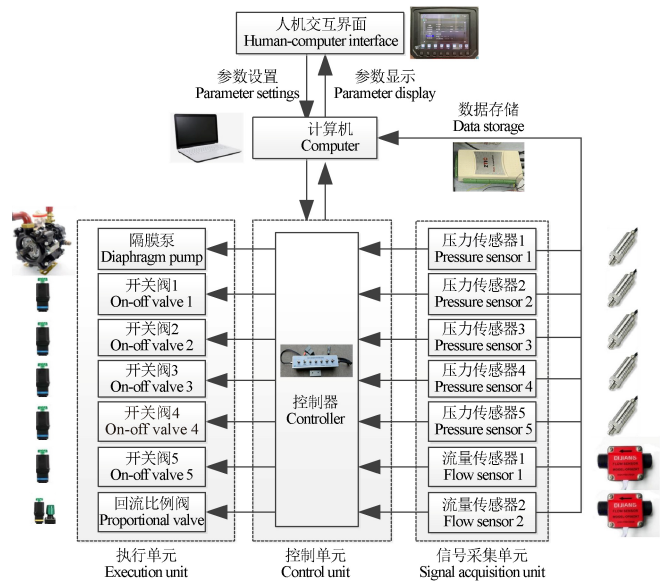


图 3 控制系统结构图

Fig.3 Structure diagram of control system

实物图如图 4 所示,各阀件及传感器具体型号信息如表 1 所示。试验台集雾装置可维持药箱药液恒定,减少试验药箱药液存量变化差异对试验结果的影响。

### 1.4 试验台性能测试试验

根据 GB/T20183.2—2006 植物保护机械喷雾设备,第 2 部分:液力喷雾机试验方法<sup>[29]</sup>进行试验台工作压力、流量调节范围测试。

通过调节变频器频率改变变频电机的转速进而调节隔膜泵的输入转速改变隔膜泵的输出流量,提高系统的喷雾压力,在不断提高控制频率过程中观察系统管路稳定性以及系统震动情况,最终测试结果显示,该试验台

稳定工作压力范围 0.1~0.7 MPa，隔膜泵输出流量调节范围 12~60 L/min。

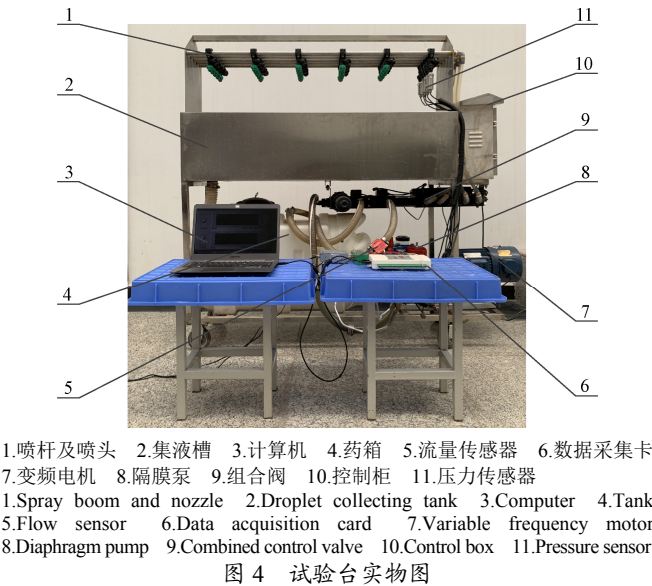


图 4 试验台实物图

Fig.4 Layout of test bench

表 1 试验台所用阀件型号

Table 1 Model 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-90L-6	功率：2.2 kW	
隔膜泵 Diaphragm pump	MB396/3.0	流量：70~90 L·min <sup>-1</sup> (100 Pa)	
组合控制阀 Combined control valve	LC-17A	量程：10~200 L·min <sup>-1</sup> ; 0~2.5 MPa	
喷头 Nozzle	110VP015	压力：0.2~0.4 MPa	
压力传感器 Pressure sensor	AS-131-Z	量程：0~2.5 MPa; 精度：0.5%	
流量传感器 Flow sensor	7-24	量程：1~50 L·min <sup>-1</sup> ; 精度：1%	
数据采集卡 Data acquisition card	USB7660AS/2	采样频率>1 kHz	

2 压力波动试验系统建模与仿真

2.1 喷药系统压力波动理论分析

喷头药液通过喷嘴时，由于惯性作用，发生收缩现象，在靠近孔口的后方出现收缩最大的过流断面，而后进行雾化扩散，如图 5 所示。

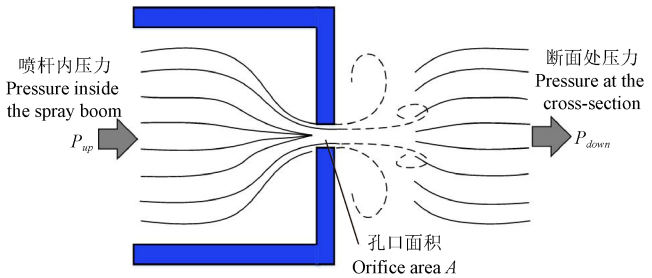


图 5 喷头液流扩散示意图

Fig.5 Schematic diagram of nozzle liquid diffusion

根据质量守恒及缩流断面和节流口之间的伯努利方程推导，可得出喷头流量公式<sup>[30]</sup>

$$Q=C_qA\sqrt{\frac{2}{\rho}(P_{up}-P_{down})}$$
 (1)

式中  $Q$  为喷头流量，L/min； $C_d$  为流量系数； $\rho$  为液体密度，kg/m<sup>3</sup>； $P_{up}$  为喷杆内压力，MPa； $P_{down}$  为断面处压力，MPa。由于  $P_{down}=0$  MPa， $C_d$ 、 $A$ 、 $\rho$  针对本系统为固定数值，因此令  $C_qA\sqrt{\frac{2}{\rho}}=k$ ，得到：

$$Q=k\sqrt{P_{up}}$$
 (2)

由式 (2) 可知，喷头流量与喷杆压力的平方根成正比，因此，当系统总流量不变的情况下，随着对靶喷药作业喷头启闭数量变化，喷头喷雾流量改变，导致系统压力波动严重。

2.2 压力波动试验系统仿真模型

基于 2.1 节理论分析，单喷头流量突变会导致系统压力激增，造成阀件损坏，甚至管路爆开。本文应用 AMESim 软件建立压力波动试验系统仿真模型探索对靶喷药过程中喷雾压力波动特性，如图 6 所示。该模型中，活塞式的隔膜泵简化为周期波动的恒流源，喷头等效为喷孔流通面积的节流孔<sup>[31]</sup>，回流比例阀等效为常数信号控制的可调节流阀，开关阀等效为阶跃信号控制的可调节流阀，仿真介质选择水。仿真系统基本参数设置与试验平台保持一致，具体如表 2 所示。

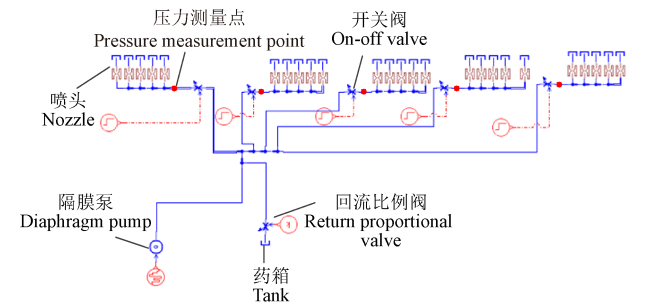


图 6 精准喷药测试系统仿真模型

Fig.6 Simulation model of precision spraying test system

表 2 仿真模型参数设置

Table 2 Simulation model parameters			
名称 Name	基本参数 Basic parameters	数值 Value	
仿真介质 Simulated liquid	温度 / °C	20	
	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 000	
喷杆 Spray boom	长度/ m	1	
	直径/ mm	20	
喷头 Nozzle	直径/ mm	1	
开关阀 On-off valve	最大孔口直径/ mm	5	
回流比例阀 Proportional valve	最大孔口直径/ mm	12	
药箱 Tank	药箱压力/ MPa	0	

2.3 仿真试验

2.3.1 仿真参数设置

大田喷药机工作压力范围一般为 0.2~0.4 MPa<sup>[32]</sup>。仿真试验首先设置系统初始工作压力 0.2 MPa，并根据本试验所选喷头型号在 0.2 MPa 工作压力下流量为 0.49 L/min 可得系统 25 个喷头总流量为 12.25 L/min，故仿真系统初始恒流源（隔膜泵）输出流量设置为 12.25 L/min。仿真总时长 20 s，

关闭若干喷杆动作在第 10 s, 故仿真过程中一直开启的喷杆开关阀阶跃信号 step time 设置为 20 s, 中间过程关闭喷杆开关阀阶跃信号 step time 设置为 10 s。采样间隔设置为 0.006 s。仿真系统回流比例设置通过调节回流比例阀的常数信号 constant value 改变比例阀的开度大小实现<sup>[32]</sup>, 为保证不同回流比下喷杆初始喷雾压力与流量一致, 改变回流比的同时按比例改变恒流源输出流量, 回流比例与对应的恒流源流量值如表 3 所示。

表 3 不同回流比例下恒流源流量

Table 3 Constant current source input flow value under different reflux ratio

回流比例 Reflux ratio	恒流源流量 Constant current source input flow/(L·min <sup>-1</sup> )
0.1	13.61
0.2	15.31
0.3	17.50
0.4	20.42
0.5	24.50
0.6	30.63
0.7	40.83
0.8	61.25
0.9	122.50

### 2.3.2 仿真试验方案

为了研究对靶喷雾过程中不同数量喷头关闭后系统压力波动特性和回流量比例对系统压力波动的影响特性, 设计 2 组仿真试验。第 1 组试验为关闭不同数量喷头对管路压力波动影响试验。设置恒流源输出流量 12.25 L/min, 回流比例阀关闭, 仿真开始时 25 个喷头全部打开, 分别在第 10 s 关闭 1/5、2/5、3/5、4/5 比例的喷头, 采集未关闭喷杆实时压力数据完成 4 组试验, 每组试验重复 3 次。第二组试验为回流比例对管路压力波动影响试验, 按表 3 设置回流比例阀回流比例以及恒流源输出流量值, 开始与第一组相同的试验流程, 并采集相关数据。

初始压力值 0.3 和 0.4 MPa 的参数设置与试验过程与 0.2 MPa 的一致。

### 2.4 仿真模型验证与分析

本文系统压力波动评价指标采用平均压力与平均压力波动率<sup>[33]</sup>:

$$P_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad (3)$$

$$C = \frac{P_{mean2} - P_{mean1}}{P_{mean1}} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $P_i$  为喷杆每次采样压力, MPa;  $P_{mean}$  为平均压力, MPa;  $C$  为平均压力波动率;  $P_{mean1}$  为喷杆喷头全开时平均压力, MPa;  $P_{mean2}$  为关闭若干喷头后喷杆平均压力, MPa;  $N$  为压力采样数。

根据 2.3 节仿真试验方案进行压力波动试验, 验证仿真模型可靠性。基于 1.4 节试验台性能测试试验得出的该试验台压力和流量调节范围, 压力波动试验可进行回流比例 0、0.2 和 0.4, 关闭喷头数量占比 1/5、2/5 和 3/5 试验。

试验系统隔膜泵输出流量通过变频器调节设置, 回流比例通过回流比例阀设置。试验过程中, 首先根据表 3 通过调节变频器频率值设置不同回流比例对应隔膜泵的输出流量, 再设置回流比例, 开启喷雾系统, 试验初始状态 25 个喷头全部开启, 在第 10 s, 分别关闭 1/5、2/5 和 3/5 的喷头数量 (0 回流比例条件下, 关闭 3/5 喷头数量时压力增至 1 MPa 以上, 已超过试验台压力调节范围, 故没有做关闭 3/5 喷头数量时的验证试验), 采集未关闭喷杆实时压力数据, 每组试验重复 3 次, 采样间隔 0.006 s。

试验结果如表 4 所示, 并与相同试验过程的仿真平均压力值对比可知相对误差  $\leq 8.3\%$ , 该仿真模型可靠, 可用作后续探究回流比例对系统压力波动影响特性的仿真分析。

表 4 不同回流比例及不同关闭喷头数量占比下喷杆压力试验值与仿真值对比

Table 4 Comparison of spray pressure test value and simulation value under different reflux ratio and different proportion of closed nozzles

回流比例 Reflux ratio	喷头关闭数量 占比 Proportion of closed nozzles	试验值 Test value/MPa	仿真值 Simulation value/MPa	相对误差 Relative error/%
0	1/5	0.328	0.306	7.19
	2/5	0.584	0.548	6.57
0.2	1/5	0.294	0.283	3.89
	2/5	0.421	0.412	2.18
	3/5	0.663	0.723	8.30
0.4	1/5	0.280	0.262	6.87
	2/5	0.353	0.345	2.32
	3/5	0.533	0.495	7.68

## 3 回流比例对管路压力波动的影响

由 2.4 节试验结果表明, 增大回流比例对对靶喷雾系统由于喷头启闭数量变化导致的压力波动具有一定消除作用, 但同时考虑到系统回流比例越大, 要达到相同喷雾工作压力和流量, 就要无限增大泵的流量, 这使得试验平台完成大回流比试验困难, 且关闭喷头越多, 喷杆压力激增越大, 会损坏系统阀件与管路, 故采用仿真模型进行回流比例对管路压力波动影响特性分析。根据 2.1 节喷雾压力波动理论分析, 系统压力波动和流量波动是成比例关系的, 因此可根据压力波动情况得到流量波动情况, 回流压力、回流量变化与喷雾压力关系不是很大, 因此未作分析。

### 3.1 系统压力波动仿真试验结果

根据 2.3 节仿真试验方法, 进行不同数量喷头关闭对管路压力波动试验, 系统回流比为 0 时, 分别关闭 1/5、2/5、3/5、4/5 数量喷头时, 采集未关闭喷杆压力数据, 得出平均压力值如图 7 所示。可以看出, 关闭喷头数量占比越大, 系统压力波动越大, 且压力是陡然增加的, 当关闭 4/5 的喷头时, 系统平均压力上升至 5.15 MPa, 根据公式 (2) 可知, 关闭喷头数量越多, 单喷头流量越大, 压力波动即会呈指数型增长。但正常喷雾系统会设置安全阀, 在系统压力过大时卸荷起到保护管路作用, 本文



为了定量研究系统极端情况下压力的最大波动，探索不同回流比例对系统压力波动的消除效果。

回流比例对管路压力波动影响测试，系统回流比为 0.1~0.9 时，喷头关闭数量占比为 1/5、2/5、3/5、4/5 时，结果如图 8 所示，由图 8a~8d 可以看出，系统关闭喷头数量越多，压力波动越大，回流比例越大对系统压力波动的消除作用越明显。按公式（4）计算系统不同回流比例下平均的压力波动率计算，结果如表 5 所示，结果表明，设置回流比例可有效减小对靶喷药喷头频繁关闭引起的压力波动，当系统关闭 4/5 喷头时，回流比例为 0.9 时的压力波动率相比不设回流系统消除近 300 倍。

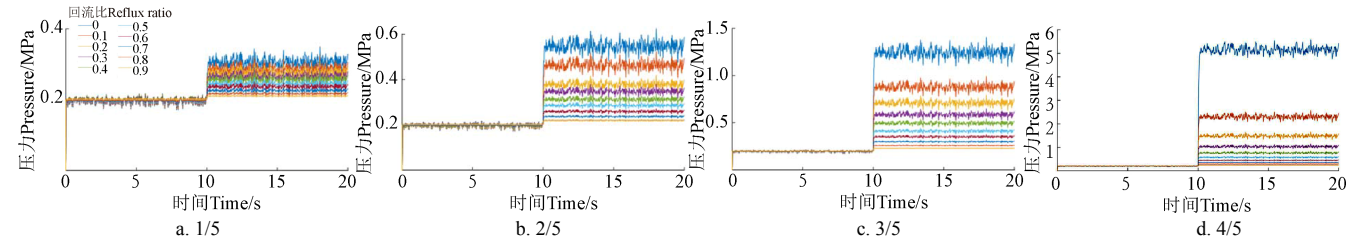


图 8 不同回流比下不同喷头关闭数量的压力波动（初始压力 0.2 MPa）  
Fig.8 Pressure fluctuation for closing different nozzle numbers and different reflux ratio under the initial pressure of 0.2 MPa

表 5 初始压力 0.2~0.4 MPa 下关闭不同喷头数量的平均压力波动率

Table 5 Average pressure fluctuation rate for closing different nozzle numbers under initial pressure of 0.2-0.4 MPa (%)					
初始压力 Initial pressure/MPa	回流比例 Reflux ratio	关闭喷头数量占比 Proportion of closed nozzles			
		1/5	2/5	3/5	4/5
0.2	0	55.00	175.00	525.00	2 400.00
	0.1	44.40	133.43	343.75	1 070.17
	0.2	38.78	110.45	259.54	653.11
	0.3	33.57	90.98	196.36	422.16
	0.4	28.52	73.38	146.96	279.92
	0.5	23.95	59.00	111.31	194.26
	0.6	10.34	22.98	40.06	64.53
	0.7	8.96	17.68	28.51	42.73
	0.8	7.78	13.14	19.31	26.93
	0.9	0.47	2.73	5.15	8.16
0.3	0	53.00	173.33	521.33	2 473.33
	0.1	44.33	135.00	352.00	1 116.33
	0.2	39.00	112.33	265.00	673.67
	0.3	32.67	90.00	195.00	421.33
	0.4	25.00	68.33	138.67	265.67
	0.5	20.67	53.33	101.33	177.33
	0.6	16.67	40.67	73.00	118.67
	0.7	11.33	27.33	47.67	73.33
	0.8	4.67	14.00	25.00	38.00
	0.9	5.67	10.33	15.33	21.33
0.4	0	93.75	246.00	686.50	3 154.75
	0.1	83.00	200.25	482.00	1 486.00
	0.2	75.25	168.50	362.25	880.00
	0.3	67.50	140.25	273.00	557.25
	0.4	61.25	117.50	209.00	374.75
	0.5	53.50	95.25	156.50	252.75
	0.6	46.25	76.25	116.00	172.25
	0.7	41.25	61.75	87.00	119.25
	0.8	33.75	46.00	59.50	76.50
	0.9	35.25	41.25	47.75	55.00

3.2 关闭喷头数量占比对压力波动的影响

由图 8a~8d 可以看出，系统关闭喷头数量占比越大压力波动越大，当系统初始压力为 0.2 MPa、回流比为 0

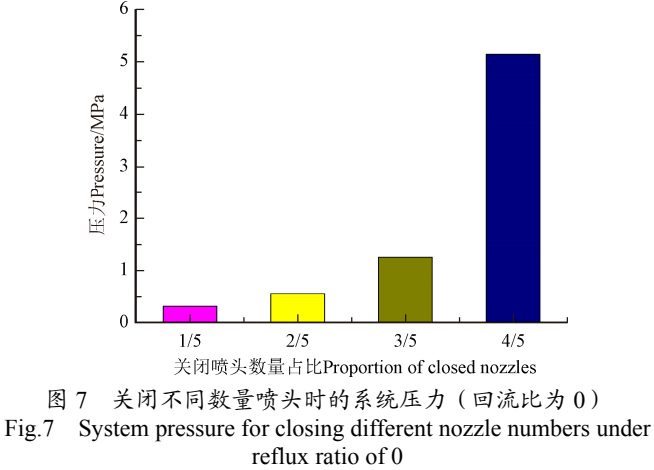


图 7 关闭不同数量喷头时的系统压力（回流比为 0）  
Fig.7 System pressure for closing different nozzle numbers under reflux ratio of 0

时，关闭 4/5 占比喷头，压力波动率可达 2 400%。喷药系统关闭一部分喷头，管路压力一般会出现瞬时高压再减小的波动，称之为水击波，但由于水击波的相长毫秒级别的相比本文试验系统开关阀的关闭时间是非常渺小的，根据水击压力公式可得出压力波动非常小，小波动已经叠加到隔膜泵的反复吸排运动造成的压力波动里，因此瞬间高压再减小的现象在本文试验过程中并不明显。

3.3 回流比例对压力波动的消除效果分析

如图 9a~9c 所示，回流比对压力波动消除作用是明显的，尤其是系统关闭喷头数量占比高时，呈指数趋势。由图 9a 可以看出，系统回流比例为 0.6 时，喷头关闭比例对系统压力波动的影响已不大，最大波动率为 64.53%。若再增大回流比例，会使系统大部分输出流量回流，泵的利用率降低，而压力波动降低不明显。故在系统初始压力 0.2 MPa 时，回流比例选择建议小于 0.6；由图 9b 可以看出，系统回流比例为 0.7 时，最大波动率为 73.33%，故在系统初始压力 0.3 MPa 时，回流比例选择建议小于 0.7；由图 9c 曲线可以看出，系统回流比例为 0.8 时，压力最大波动率为 76.50%，故在系统初始压力 0.4 MPa 时，回流比例选择建议小于 0.8。

3.4 最佳回流比分析

对靶喷药是指针对靶标（果树，病害或杂草等）喷施药液的一种按需喷药技术，在喷施过程中会根据靶标占比（喷施的靶标面积占总面积的比例）关闭相应比例的喷头，即靶标占比=1-关闭喷头数量占比。对靶喷雾系统管路压力波动最大波动率为 100%。由表 5 试验数据确定对靶喷药系统在初始压力 0.2~0.4 MPa 时，不同喷施靶标占比对应的最佳回流比区间如表 6 所示，该结果可为后续精准对靶施药系统设计与优化提供依据。

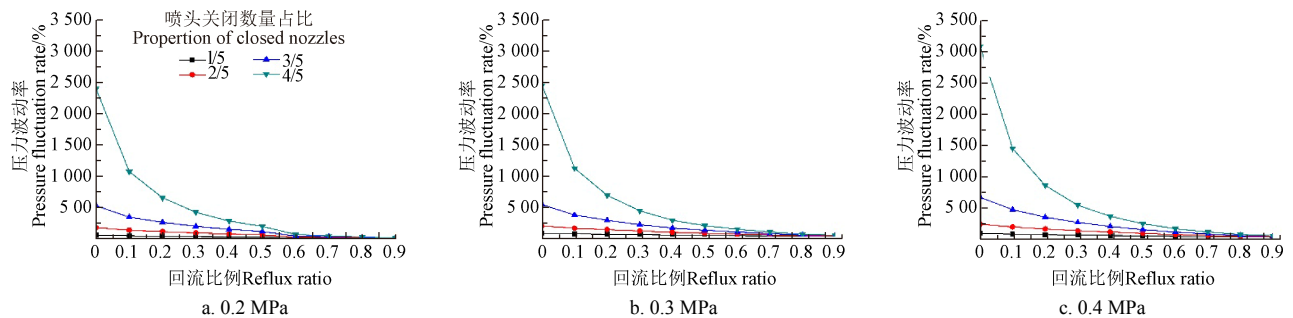


图 9 不同初始压力下回流比例对不同喷头关闭数量时系统压力波动率的影响

Fig.9 Effects of reflux ratio on system pressure fluctuation rate with different nozzle closing ratios under different initial pressures

表 6 不同初始压力下各靶标占比的系统最佳回流比区间  
Table 6 Optimum reflux ratio range of the system for each target proportion under different initial pressures

初始压力 Initial pressure/MPa	靶标占比 Target proportion	最佳回流比区间 Optimal range of reflux ratio
0.2	1/5	0.5~0.6
	2/5	0.5~0.6
	3/5	0.2~0.3
	4/5	0~0.1
0.3	1/5	0.6~0.7
	2/5	0.5~0.6
	3/5	0.2~0.4
	4/5	0~0.1
0.4	1/5	0.7~0.8
	2/5	0.6~0.7
	4/5	0~0.3

4 讨 论

对靶喷药系统管路压力波动是制约其实现精准精量作业的主要瓶颈。本文研究发现，对靶喷药系统喷头如关闭数量越多，压力波动越大；如回流比例越大，管路压力波动越小，该结果与文献[20]结论一致。但本文更进一步进行了定量分析，得出当回流比为 0、系统关闭 4/5 占比的喷头，管路的压力波动可达 2 400%，如此巨大的压力冲击是正常喷雾系统管件和阀门无法承受的。而当系统初始压力 0.2 MPa、回流比为 0.6 时，管路压力波动降可至 64.53%，有效地将系统压力波动减弱至允许的范围內。

由于部分喷头关闭会导致管路压力剧增，而常规喷药系统管路及其阀件的耐压性不足，无法开展宽范围的压力波动试验，本文建立了对靶喷药系统压力波动仿真模型，并通过试验完成模型验证，开展了高压冲击仿真试验，得到了不同回流比例和关闭不同数量喷头下的压力波动数据。

高回流比可有效减弱对靶喷药系统压力波动，但同时也降低了泵的利用率。本文针对常规大田喷药压力 0.2~0.4 MPa 提出了最佳回流比区间建议（表 6），可针对不同靶标占比量给出最佳回流比区间，如大田对靶喷药应用于大田蔬菜病害喷药和大田除草喷药，在喷药前可对整个地块的靶标占比量进行预估，设置合适初始回

流比，可消除大部分管路压力波动，避免不必要的能量浪费，回流量及回流压力的设置需要综合考虑泵的性能、回流搅拌和药箱容量。

不同比例喷头突然关闭和突然开启，压力均会波动明显，而且喷头关闭时长也会影响压力波动，本研究的最终目标是探究如何保持压力平衡，但影响压力变化的因素很多，本文只做了一少部分研究，后续会进行更多因素影响下压力波动特性研究，以提出更加精准的喷药稳压控制方法和系统。

### 5 结 论

1) 设计了对靶喷药压力波动试验平台，通过试验得出，试验台稳定工作压力范围为 0.1~0.7 MPa，隔膜泵输出流量调节范围为 12~60 L/min；在对靶喷药过程中，关闭喷头占比越大，系统压力波动越大；增大系统回流比例可有效降低压力波动幅值。

2) 基于 AMESim 建立了对靶喷药系统压力波动仿真模型，并通过试验验证了该模型压力波动的仿真值与试验值相对误差≤8.3%，可用作后续精准对靶喷药系统回流比例对管路压力波动影响特性研究。

3) 仿真分析表明：喷头关闭数量占比越大，压力波动越大，当系统初始压力为 0.2 MPa 时，回流比为 0、关闭 4/5 占比喷头，系统压力可从 0.2 MPa、波动至 5.15 MPa，波动率达 2 400%；设置回流管路可有效减弱对靶喷药过程中由于喷头频繁启闭造成的压力波动，当系统初始压力 0.2 MPa、回流比例为 0.6 时，由于部分喷头关闭引起的管路压力最大波动率为 64.53%。兼顾泵的利用率，回流比例建议小于 0.6；当系统初始压力 0.3 MPa、系统回流比例为 0.7 时，最大波动率为 73.33%，回流比例建议小于 0.7；系统初始压力 0.4 MPa、系统回流比例为 0.8 时，最大波动率为 76.50%，回流比例建议小于 0.8；系统初始压力越大，关闭喷头数量占比对系统压力波动影响越大。

4) 针对不同初始压力、不同喷施靶标占比量分析了对靶喷药系统最佳回流比区间：初始压力为 0.2 MPa 时，靶标占比 1/5，最佳回流比区间为 0.5~0.6；靶标占比 2/5，最佳回流比区间为 0.5~0.6；靶标占比 3/5，最佳回流比区间为 0.2~0.3；靶标占比 4/5，最佳回流比区间为 0~0.1；初始压力为 0.3 MPa 时，靶标占比 1/5，最佳回流比区间为 0.6~0.7；靶标占比 2/5，最佳回流比区间为 0.5~

0.6; 靶标占比 3/5, 最佳回流比区间为 0.2~0.4; 靶标占比 4/5, 最佳回流比区间为 0~0.1; 初始压力为 0.4 MPa 时, 靶标占比 1/5, 最佳回流比区间为 0.7~0.8; 靶标占比 2/5, 最佳回流比区间为 0.6~0.7; 靶标占比 3/5, 最佳回流比区间为 0.4~0.5; 靶标占比 4/5, 最佳回流比区间为 0~0.3。

#### [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]. 2020, 2(1): 133-146. (in Chinese with English abstract)
- [2] 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.  
Yuan Huizhu, Yang Daibin, Yan Xiaojing, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. Plant Protection, 2011, 37(5): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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)
- [4] 邱白晶, 闫润, 马靖, 等. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刁智华, 刁春迎, 魏玉泉, 等. 精准施药机器人关键技术研究进展[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 1-6.  
Diao Zhihua, Diao Chunying, Wei Yuquan, et al. Progress in research on the key technology of precision spraying robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [6] Loghavi M, Behzadi M B. Development of a target oriented weed control system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 112-118.
- [7] 杨征鹤, 杨会民, 喻晨, 等. 设施蔬菜自动对靶喷药技术研究现状与分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8): 1547-1557.  
Yang Zhenghe, Yang Huimin, Yu Chen, et al. Research status and analysis of automatic Target spraying technology for facility vegetables[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(8): 1547-1557. (in Chinese with English abstract)
- [8] 关桂娟. 变量喷药技术在农业植保中的应用与优势分析[J]. 农机使用与维修, 2022(2): 117-119.  
Guan Guijuan. Application and advantage analysis of variable spraying Technology[J]. Agricultural Mechanization Using & Maintenance, 2022(2): 117-119. (in Chinese with English abstract)
- [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] Bennur P J, Taylor R K. Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(6): 1069-1075.
- [11] Paice M E R, Miller P C H, Day W, et al. Control requirements for spatially selective herbicide sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1996, 14(2/3): 163-177.
- [12] Tumbo S D, Salyani M, Miller W M, et al. Evaluation of a variable rate controller for aldicarb application around buffer zones in citrus groves[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 147-160.
- [13] Anglund E A, Ayers P D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(3): 273-282.
- [14] 于达志, 陈树人, 魏新华. PWM 间歇喷雾变量喷施系统压力脉动及液压冲击综合测试[J]. 农机化研究, 2014, 36(1): 194-198.  
Yu Dazhi, Chen Shuren, Wei Xinhua. A comprehensive study on pressure pulsation and hydraulic impact in PWM-based intermittent spraying variable rate application system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(1): 194-198. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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, 45(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, 45(10): 60-65. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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.  
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 (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [17] John P Lang. Evaluation of pulse width modulation sprays for spray quality[C]. Kansas City, Missouri, 2013 ASAE Paper No. 131620682, 2013.
- [18] Han S F, Hendrickson L L, Ni Bi 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.
- [19] 黄胜, 朱瑞祥, 王艳芳, 等. 变量施药机的恒压变量控制系统设计及算法[J]. 农机化研究, 2011, 33(2): 19-22.  
Huang Sheng, Zhu Ruixiang, Wang Yanfang, et al. Design and algorithm of constant pressure and variable flow control system of variable pesticide application machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(2): 19-22. (in Chinese with English abstract)
- [20] 韩润哲, 朱瑞祥, 翟长远, 等. 施药机压力波动特性研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(7): 26-30.  
Han Runzhe, Zhu Ruixiang, Zhai Changyuan, et al. Research on pressure fluctuation characteristics of spraying Machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 26-30. (in Chinese with English abstract)
- [21] Zhou X X, Liu H 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.
- [22] 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, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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)
- [24] 蒋斌, 李林, 李晋阳, 等. PWM 变量喷施控制系统中电磁阀通径对喷雾压力的影响[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 164-169, 174.  
Jiang Bin, Li Lin, Li Jinyang, et al. Influence on spray pressure fluctuation from pipe diameter in PWM-based variable rate application system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 164-169, 174. (in Chinese with English abstract)
- [25] 吕晓兰, 傅锡敏, 吴萍, 等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 70-75.  
Lü Xiaolan, Fu Ximin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 70-75. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 with English abstract)
- [27] 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)
- [28] 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)
- [29] 中国国家标准化管理委员会, 植物保护机械 喷雾设备第 2 部分: 液力喷雾机试验方法 GB/T 20183. 2-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [30] 闻建龙. 工程流体力学 (第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [31] 刘文浩, 颜镬钊, 张蕊, 等. 基于 AMESim 仿真的燃油系统压力脉动分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(4): 23-27.
- [32] 史万苹, 王熙, 王新忠, 等. 基于 PWM 控制的变量喷药技术体系及流量控制试验研究[J]. 农机化研究, 2007, 10(10): 125-127.  
Shi Wanping, Wang Xi, Wang Xinzong, et al. Study on variable rate spraying technology based on pulse width modulation and volume control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 10(10): 125-127. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘峰. 高压共轨燃油喷射系统压力波动特征研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2014, 43(2): 63-66, 96.



## Experimental study on the pressure fluctuation characteristics of target spray system

Zhang Chunfeng<sup>1,2</sup>, Zhai Changyuan<sup>2,3</sup>, Zhao Xueguan<sup>2</sup>, Zou Wei<sup>2</sup>, Zhang Meng<sup>2,3</sup>, Zhao Chunjiang<sup>1,2,3\*</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Precise target spraying can be widely used to detect the target information for the on-demand operation using sensors and variable actuators. An effective way can prevent the excessive spraying from the environmental pollution of food safety caused by the traditional continuous spraying, particularly for the high pesticide utilization. Nevertheless, there is the a serious fluctuation of pipeline pressure at present, due to the repeated opening and closing of different numbers of nozzles in the process of target spraying. A great threat has been posed to the droplet size, deposition distribution, and service life of the spraying system. In this study, a test platform was designed to investigate the influence of the reflux ratio on the pipeline pressure fluctuation in the target spraying system. A simulation model of target spraying pressure fluctuation was established using AMESim software. A test was also carried out to verify the model. The initial pressure of the system was set as 0.2-0.4 MPa, and the reflux ratio as 0-0.9 in the simulation. The number of closed nozzles was accounted for the a large proportion of 1/5-4/5, indicating the more serious fluctuation of pipeline pressure. The reflux ratio was 0 at the initial pressure of 0.2 MPa. Once the 4/5 proportion nozzles were closed, the pressure of the pipeline system rose from 0.2 to 5.15 MPa, indicating a 2 400% fluctuation rate. The more significant ratio was obtained in the number of closed nozzles to the pressure fluctuation at the large initial working pressure of the system. The return pipeline was effectively reduced the pressure fluctuation of the target spraying system. Specifically, the greater the return ratio was, the more significant the elimination effect was. The maximum pressure fluctuation rate was 64.53% caused by the closure of some nozzles, when the initial pressure of the system was 0.2 MPa and the return ratio reached 0.6. Therefore, the reflux ratio was recommended to be less than 0.6, in terms of the utilization rate of the pump. Once the initial pressure values of the system were 0.3 and 0.4 MPa, the reflux ratios were recommended to be less than 0.7, and 0.8, respectively. Finally, an optimal combination of target proportion and reflux ratio was achieved, according to the requirements for the tolerance of the pressure fluctuation in the target spraying system. When the initial pressure of the system was 0.2 MPa, the combination of the proportion of the target and the optimal reflux ratio were 1/5 and 0.5-0.6, 2/5 and 0.5-0.6, 3/5 and 0.2-0.3, or 4/5 and 0-0.1, respectively. When the initial pressure of the system was 0.3 MPa, the relationship groups between the proportion of the spraying target and the optimal reflux ratio were 1/5 and 0.6-0.7, 2/5 and 0.5-0.6, 3/5 and 0.2-0.4, or 4/5 and 0-0.1, respectively. When the initial pressure of the system was 0.4 MPa, the relationship groups between the proportion of the spraying target and the optimal reflux ratio interval were 1/5 and 0.7-0.8, 2/5 and 0.6-0.7, 3/5 and 0.4-0.5, or 4/5 and 0-0.3, respectively. This finding can provide a strong reference to optimize the precision target operation for the technical variables and working parameters in the plant protection spraying.

**Keywords:** simulation; plant protection; target spray; pressure fluctuation; AMESim; reflux ratio