doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.028

基于多传感器同步采集的喷雾机喷嘴性能检测仪设计与试验

胡　军[1,2]　封　超[1,2]　刘昶希[1,2]　李宇飞[1,2]　石　航[1,2]

(1.黑龙江八一农垦大学工程学院,大庆 163319;2.农业农村部大豆机械化生产重点实验室,大庆 163319)

摘要:检测喷嘴性能是植保作业过程中的重要参数,直接关系到农药的喷洒效果,进而严重影响植保作业质量和效率。本研究设计一款基于多传感器同步采集的喷雾机喷嘴性能检测仪,以实现田间作业前对喷嘴性能失效程度的精确评估,保障植保作业高效、精准执行。采用 STM32 微控制器为核心处理单元,集成多个高精度流量与压力传感器,实时同步采集喷嘴尖端数据并通过蓝牙传输到 LabVIEW 平台,实现高效、可视化的数据分析、预警与存储,达到实时检测喷嘴性能状态要求。试验结果表明,对失效喷嘴压力检测时压力测量最大误差为 2.174%,流量测量最大误差为 1.936%;对多个喷嘴性能同步检测验证时,压力测量最大相对误差为 1.515%,平均误差为 0.887%,流量测量最大相对误差为 2.061%,平均误差为 1.151%;对多个喷嘴性能田间试验时,压力最大相对误差为 1.990%,平均误差为 1.629%,流量最大相对误差为 2.713%,平均误差为 2.014%,符合喷嘴性能检测要求。该装置为喷雾机喷嘴性能检测提供了可靠、高效的智能检测手段,满足植保标准化作业前检测的技术要求。

关键词:喷雾机;喷嘴性能检测;流量传感器;压力传感器;LabVIEW;STM32

中图分类号:S491　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)02-0305-09　　**OSID**:

Design and Testing of Sprayer Nozzle Performance Testing Instrument

HU Jun[1,2]　FENG Chao[1,2]　LIU Changxi[1,2]　LI Yufei[1,2]　SHI Hang[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*

2. *Key Laboratory of Soybean Mechanized Production*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Daqing* 163319, *China*)

Abstract: The failure of nozzle performance is currently the most common and critical issue in plant protection operations. It directly affects the efficacy of pesticide spraying, consequently, has a significant impact on the quality and efficiency of plant protection tasks. Aiming to develop a nozzle performance failure detector for sprayers, enabling accurate evaluation of nozzle failure before field operations and ensuring efficient and precise plant protection. The system used an STM32 microcontroller as the core processing unit, integrating high-precision flow and pressure sensors to collect real-time data from the nozzle tip. The data was transmitted via Bluetooth to the LabVIEW platform, facilitating efficient, visual data analysis, early warnings, and storage to meet real-time nozzle performance monitoring requirements. The experimental results showed that for failed nozzle pressure detection, the maximum pressure measurement error was 2.174%, and the maximum flow measurement error was 1.936%. During the simultaneous performance testing of multiple nozzles, the maximum relative pressure measurement error was 1.515%, with an average error of 0.887%, while the maximum relative flow measurement error was 2.061%, with an average error of 1.151%. During field validation tests of multiple nozzle performances, the maximum relative pressure measurement error was 1.990%, with an average error of 1.629%. The maximum relative flow measurement error was 2.713%, with an average error of

收稿日期:2024-10-14　修回日期:2024-10-30

基金项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023E106)、黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG2023-045)、中国高校产学研创新基金项目(2023RY059)、黑龙江省重点研发计划项目(2023ZX01A06)和九三大豆产业创新研究院项目(2022402)

作者简介:胡军(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械研究,E-mail:gcxykj@126.com

2.014%, meeting the requirements for nozzle performance testing. This device provided a reliable and efficient intelligent method for detecting nozzle performance failures, meeting the technical requirements for pre-operational testing in standardized plant protection tasks.

Key words: sprayer; nozzle performance testing; flow sensor; pressure sensors; LabVIEW; STM32

0 引言

植保作业是农业生产中必不可缺少的环节,是作物高产、提升农药利用率、保障农业可持续发展的重要手段[1-6]。但是由于以家庭农场为主的小规模经营模式,农药滥用与喷嘴维护滞后致药害频发、农药有效利用率低、污染严重,阻碍“农药化肥双减”政策的实施。

植保机械标准化作业强调提升规范性、效率与安全。喷嘴作为关键部件,其性能的细微变化均能显著影响喷雾效果与农药利用率,直接关系到病虫害的防控[7-11]。欧盟已将喷嘴性能检测纳入标准化流程,在此背景下,AAMS 公司已研发出用于流量与压力的精准即时测量的便携式喷嘴检测仪[12],而我国仍依赖于传统手工方法,缺乏实时压力监测,技术较为滞后。近年来,科研机构和研究人员致力于研发更高效的喷嘴检测技术。例如,陈彬等[13]研制了一种喷杆喷雾机变量控制特性测试系统,可精确评估机具的流量控制和随速调节特性,但缺乏喷嘴工作状态的有效监测功能。郭俊杰等[14]研制的喷雾机喷头流量在线测量系统,虽实现了主管道压力与 6 个喷头流量同步测量,但受限于其较大的测量误差,该系统难以实现对各类喷雾机喷头流量的高精度监测需求。郑申玉等[15]研制了喷嘴尖端压力数据采集系统,分析喷嘴尖端压力动态,未涉及喷嘴流量的直接监测。文献[16-20]虽都研制了喷雾机流量监测系统,但这些系统均未精确评估喷嘴工作状态是否达标。张瑜[21]提出的基于声信号的农用喷嘴滤网堵塞检测技术,虽为农用喷嘴滤网故障监测提供了技术支持,但不适用于田间生产前的预防性评估。文献[22-23]通过为每个喷嘴安装流量计监测工作状态,异常时流量变化反馈至机载计算机,此法成本高且其喷洒模式并不可靠。RUIZ-GONZALEZ 等[24]探索了麦克风监测农用喷雾喷嘴流量的可能性,但田间恶劣环境影响了其检测效果。

由上述研究分析可知:当前国内研究均采用单一的传感器实现对作业过程中管道系统压力或流量的单独监测,忽视喷嘴尖端压力的精准量化,导致在宽幅作业趋势下,压力流量数据失真,难以为喷嘴性能提供有效评估依据。在植保机械标准化作业前,喷雾性能的精确检测至关重要。然而,在生产实际中,仅少数植保机械配备实时监测系统,多数仍依赖低效的人工检测手段,且国内缺少便携、同步且高效的喷嘴性能检测设备。

为了解决上述问题,本文设计一款多个喷嘴尖端压力与流量同步采集的喷雾机喷嘴性能失效检测仪,实现喷嘴尖端压力、流量实时检测与喷嘴性能可视化评估,为植保标准化作业前喷嘴性能评估提供技术支撑。

1 系统结构总体设计

喷雾机喷嘴性能失效检测仪由控制单元、信息采集单元、信息传输单元及信息展示界面构成。其核心技术依托于高性能的 STM32H750 微控制器作为核心处理器,搭配 AD7606 采集模块,实现对压力、流量数据的精准采集与处理,从而实现对喷嘴性能的精准评估。系统结构总体设计图如图 1 所示。

检测系统采用 LabVIEW 图形化编程平台构建,实现高效的数据传输、分析及可视化功能。检测系统接收 STM32 传输的实时数据,于 PC 端集成数据分析、图形显示及故障预警三大核心模块。数据分析模块精确处理接收到的数据,确保数据处理的时效性与准确性;图形显示模块则直观呈现压力-时间曲线与流量-时间曲线,便于快速识别压力稳定时间及流量波动范围;故障预警模块运用颜色指示灯作为警示手段,依据检测压力与标准值的比值,自动对比检测流量与标准流量,精确判断喷嘴失效程度,实现故障即时预警。针对喷雾机在工作过程中复杂的压力波动问题,本系统基于流量与压力关系的数学模型[25],引入综合考虑各种外部条件和内部损耗的新型评估策略,以提供更为精确的喷嘴性能评估。

$$\frac{Q_1}{Q_2}=\sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \tag{1}$$

式中 Q_1——喷嘴实际检测流量,L/min

Q_2——喷嘴标准流量,L/min

P_1——喷嘴所在位置实际检测压力,MPa

P_2——喷嘴标准压力,MPa

由式(1)可得

$$Q_1=\sqrt{\frac{P_1}{P_2}}Q_2 \tag{2}$$

通过喷嘴所在位置处理论流量 Q 与喷嘴实际检测的流量 Q_1 计算喷嘴磨损程度,磨损度 W 计算依据美

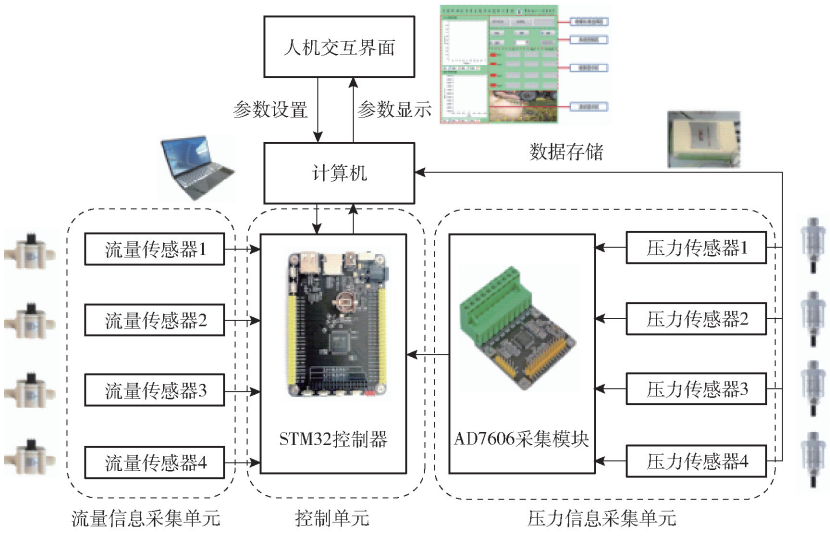


图 1　系统结构总体设计图

Fig. 1　Overall design drawing of system structure

国农业工程学会(ASAE)制定的农用液力式喷头的磨损失效标准[26-27],其计算公式为

$$W = \frac{Q_1 - Q}{Q} \times 100\% \tag{3}$$

本系统采用高度直观化的指示灯颜色变化机制,以精确反映喷嘴失效状况。具体而言,该系统设定了 3 级失效预警机制:若喷嘴失效率低于 5% 时,指示灯呈现绿色,表示喷嘴状态良好,无需更换;若喷嘴失效率介于 5% ~15% 之间时,指示灯转变为黄色,警示用户需密切关注喷嘴性能;一旦喷嘴失效率超过 15%[28-29],指示灯即刻转为红色,明确提醒用户喷嘴已面临严重失效,亟需进行更换处理。此设计不仅显著增强了喷嘴失效检测的直观性与即时性,还大幅提升了检测效率,为喷雾机喷嘴性能高效检测提供了坚实的保障。

2　检测仪核心组件选型

检测仪核心组件主要包括 STM32 开发板、压力传感器、流量传感器、标定喷嘴。

2.1　STM32H750 开发板

STM32H750 核心板集成了电源模块和 ARM 微控制器系统,具有高性能特点。其工作温度范围为 -40 ~85℃,工作电压为 1.8 ~3.6 V,工作频率高达 480 MHz,并配备浮点单元,适用于数字信号和图像处理等高精度计算领域,满足设计需求。

2.2　传感器选型

田间检测作业对传感器的稳定性和抗干扰性能要求更为严格,旨在确保在各种复杂环境下获取精确且可靠的测量结果。因此选用 PCM300D 型压力传感器和瑞士 Digmesa 公司 938 - 1538/03 型微型流量传感器,相关技术参数见表 1、2。

表 1　压力传感器技术参数

Tab. 1　Technical parameters of pressure sensor

参数	数值
输出电压/V	0.5 ~4.5
测定压力范围/MPa	0 ~1
工作温度/℃	-20 ~80
测量误差/%	0 ~0.5
长期稳定性/%	<0.1

表 2　流量传感器技术参数

Tab. 2　Technical parameters of flow sensor

参数	数值
供电电源电压/V	3.8 ~24.0
压力/MPa	0.2(20℃)
输出口径/mm	3.00
脉冲采集数/($P \cdot L^{-1}$)	593
流量测量范围/($L \cdot min^{-1}$)	0.102 ~5.630
测试精度/%	±2
重复测量/%	±0.25

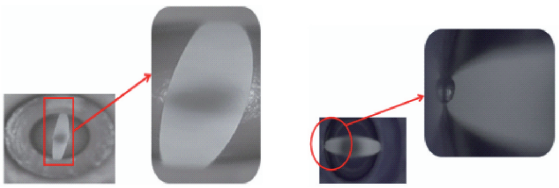
2.3　标定喷嘴选型

在运用高精度显微镜对国产喷嘴内部结构实施深入细致的微观表征分析过程中,明确观测到其内部存在显著的缺陷与结构不完整性问题,具体图像如图 2 所示。相比之下,Lechler 公司生产的扇形喷嘴则展现出高度的平滑性,这一特性对于保障喷嘴性能稳定性至关重要。鉴于上述对比结果,选用 Lechler 公司的扇形喷嘴作为标定基准对象,以确保研究的精确性与科学性。

3　检测装置数据采集与分析系统设计

3.1　LabVIEW 界面设计

本系统采用 LabVIEW 软件构建了显示界面,其程序逻辑严格遵循图 3 所示的程序流程图。在操作



(a) Lechler扇形喷嘴 (b) 国产扇形喷嘴

图 2 国内外喷嘴内部结构对比

Fig. 2 Comparison of internal structure of nozzle at home and abroad

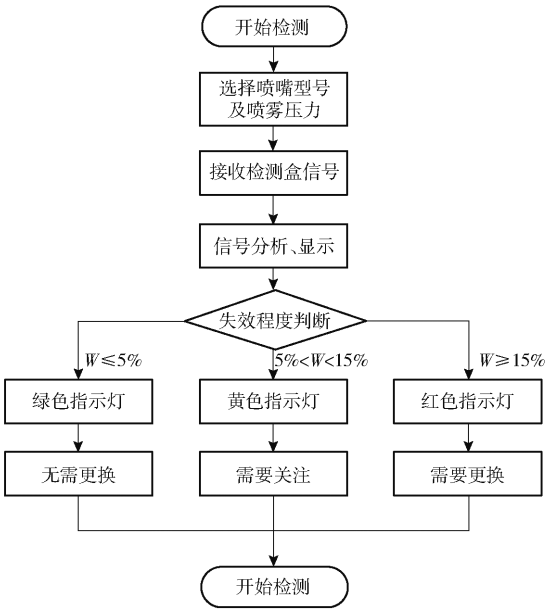


图 3 程序逻辑流程图

Fig. 3 Flowchart of program logic

过程中,需精确选定待检测的喷嘴型号。通过 STM32 微控制器高效采集的实时数据传输至 PC 端,LabVIEW 利用其强大的 VISA 串口通信功能,实现数据的快速收集、精确处理、直观显示及安全存储,图 4 为喷雾机喷嘴性能失效检测系统运行页面。

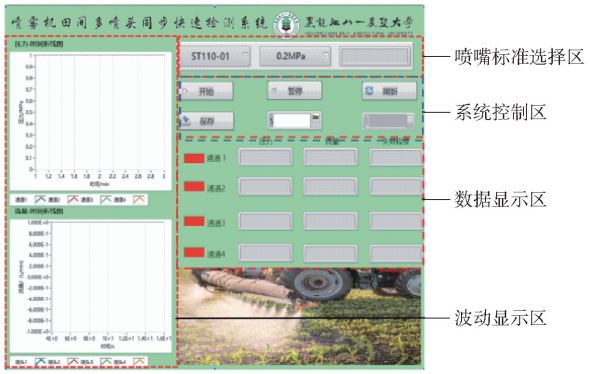


图 4 LabVIEW 运行界面

Fig. 4 LabVIEW running interface

本系统 LabVIEW 界面集成了压力-时间、流量-时间关系图的实时可视化,精准呈现稳定状态关键数据信息。同时,界面通过指示灯颜色变换,直观反映了喷嘴失效状况。图 5 为数据采集程序的结构化框图,确保了数据的精确采集与处理。

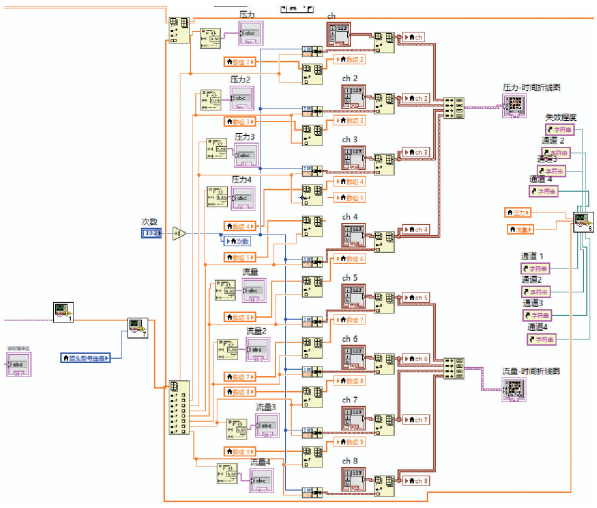


图 5 LabVIEW 数据采集程序框图

Fig. 5 Block diagram of LabVIEW data collection program

3.2 流量信息获取与验证

3.2.1 流量信息获取

流量传感器的输出脉冲信号与流量之间的关系为

$$q=\frac{60p}{Kt}+b \tag{4}$$

式中 q——检测仪检测流量,L/min

p——流量传感器时间 t 内输出脉冲数,P/min

t——流量传感器脉冲输出时间,s

K——流量传感器系数,取 593 P/L

b——补偿系数,L/min

鉴于流量传感器安装位置邻近喷嘴尖端,喷嘴出口截面的变化成为影响传感器采集流量数据精确性的潜在因素。为有效削弱这一因素导致的测量误差,需引入恰当的补偿系数对流量进行校准。以 ST110-03 型喷嘴为例,补偿系数取 0.002 024,其计算方法为

$$b=\frac{60\left|p-p_1\right|}{Kt} \tag{5}$$

式中 p_1——流量传感器理论输出脉冲数

3.2.2 流量采集验证

为验证系统流量测量精确性,试验以 ST110-03 型喷嘴为例,在恒压 0.20~0.60 MPa 条件下,利用单喷头性能测试试验台,连续采集 3 min 内的流量数据检测值。通过对比检测流量与喷嘴理论流量,计算得出各压力点下最大相对误差为 0.96%,且标准差严格控制在 0.009 8~0.011 3 L/min 范围内,试验数据如表 3 所示。图 6 为流量测试结果及误差分析曲线,误差与均方差均处于合理界限内,数据离散度低,有力证明了该流量传感器具备高度的精确性与稳定性,充分满足系统设计要求。

表 3　流量稳定性和准确性试验结果

Tab. 3　Test results of flow stability and accuracy

压力/MPa	流量理论值/(L·min⁻¹)	流量最大值/(L·min⁻¹)	流量最小值/(L·min⁻¹)	流量平均值/(L·min⁻¹)	流量误差/%	流量标准差/(L·min⁻¹)
0.20	0.97	0.992	0.971	0.979	0.88	0.010 2
0.30	1.19	1.214	1.194	1.201	0.94	0.009 8
0.35	1.28	1.315	1.275	1.285	0.82	0.011 3
0.40	1.37	1.396	1.375	1.381	0.83	0.010 6
0.50	1.53	1.558	1.538	1.545	0.96	0.010 4
0.60	1.68	1.700	1.680	1.692	0.69	0.010 1

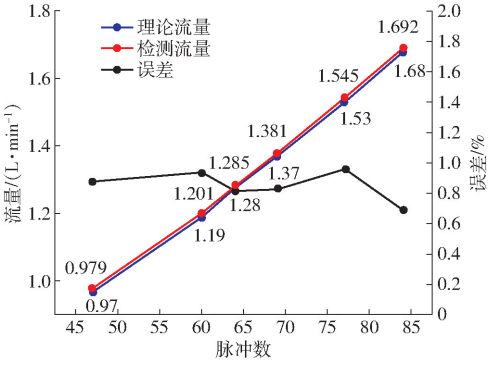


图 6　流量测试结果及误差分析曲线

Fig. 6　Flow test results and error analysis diagram

3.3　压力信息获取及验证

3.3.1　压力信息获取

鉴于各型号喷嘴结构尺寸的差异对检测管路压力造成显著影响，为确保压力测量的精确度，设计了对每种喷嘴型号独立进行压力-电压信号标定的方法。标定流程涉及在不同压力设定下，收集各型号喷嘴产生的模拟信号，并利用这些数据点通过数学拟合手段，构建各喷嘴型号的压力-电压关系模型。以 ST110－03 型喷嘴为例，通过重复试验(10 次)并计算平均值，以减少随机误差，所得试验数据如表 4 所示，为后续压力精确测量与分析提供了数据基础。

表 4　数字信号平均值

Tab. 4　Average values of digital signals　mV

压力/MPa	数字信号平均值	电压信号差值
0	1 645	0
0.10	2 820	1 175
0.15	3 398	1 753
0.20	4 087	2 442
0.25	4 722	3 077
0.30	5 232	3 587
0.35	5 781	4 136
0.40	6 523	4 878
0.50	7 628	5 983
0.60	8 776	7 131

分析表 4 中的数据，可明确观察到压力与传感器输出的电压信号之间存在显著的线性相关性。因此，通过最小二乘法精确拟合出两者之间的数量关系，数学模型为

$$y = 8.365\,27 \times 10^{-5} x - 0.138\,38 \tag{6}$$

式中　y——检测仪输出压力，MPa

x——压力传感器输出的电压信号，mV

该模型准确地描述了压力与电压信号之间的线性映射关系，为压力输出采集提供了数学依据。

如图 7 所示，拟合优度 R^2 高达 0.999 43，表明所构建的数学模型与试验数据之间具有极高的拟合度，充分验证了本研究方法的有效性和数据处理的可靠性。

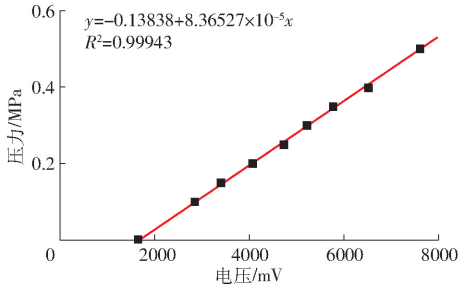


图 7　标准压力与数字信号关系曲线

Fig. 7　Plot of standard pressure value and digital signal

3.3.2　压力采集验证

为验证系统压力测试的准确性与稳定性，试验利用单喷头性能测试试验台，通过调整试验台压力至 0.20～0.60 MPa 各恒定压力条件下，持续监测并记录 3 min 内的压力检测值。结果表明，各压力条件下的标准差维持在 0.001 1～0.002 9 MPa 内，波动幅度较小，最大相对误差为 1.85%，试验数据如表 5 所示。图 8 为压力稳定性测试曲线。误差与均方差均在合理范围内，数据离散程度小，表明该压力传感器较准确和稳定，满足设计需求。

4　系统性能验证试验

4.1　喷嘴失效验证试验

为了精确验证检测仪对喷嘴失效检测的准确性，试验采用 ST110－03 型失效喷嘴进行验证，其喷雾失效图如图 9 所示。试验过程中，通过检测仪采集失效喷嘴在60 s内喷嘴尖端处的压力与

表 5 压力稳定性和准确性试验结果

Tab. 5 Pressure stability and accuracy test results

压力/MPa	检测最大值/MPa	检测最小值/MPa	检测平均值/MPa	误差/%	标准差/MPa
0.20	0.198	0.195	0.196	1.85	0.001 1
0.25	0.255	0.245	0.251	1.18	0.002 9
0.30	0.300	0.295	0.297	1.08	0.001 4
0.35	0.353	0.346	0.349	0.63	0.002 3
0.40	0.406	0.403	0.405	1.30	0.001 2
0.50	0.504	0.495	0.499	0.48	0.002 7
0.60	0.599	0.595	0.597	0.56	0.001 2

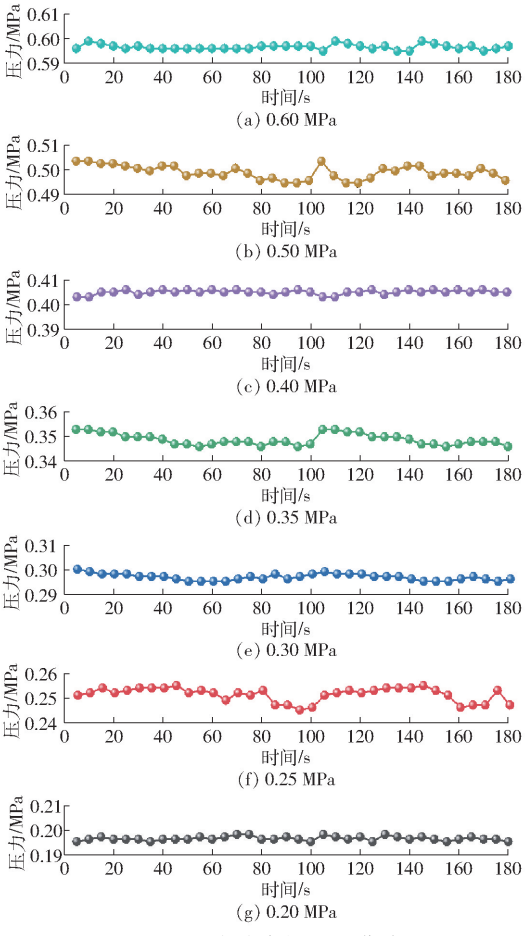


图 8 压力稳定性测试曲线

Fig. 8 Pressure stability test result curves

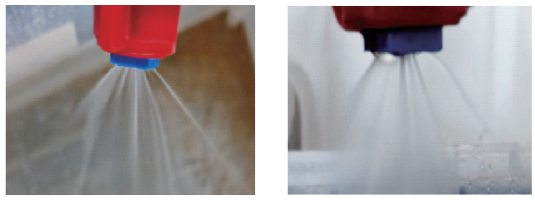


图 9 失效喷嘴喷雾状态图

Fig. 9 Failure nozzle spray status diagram

流量,与对照组进行对比,计算两者相对误差,试验数据如表 6、7 所示。试验数据表明,对失效喷嘴进行压力测试时,最大误差为 2.174%,流量测试最大误差为 1.936%。图 10 为 3 种不同失效率的喷嘴,对其进行验证试验,结果表明,对照组与试验组失效率差值最大为 2.88%,最小为 0.267%,试验数据如表 8 所示。

表 6 喷嘴失效压力验证试验结果

Tab. 6 Nozzle failure pressure verification test data

标准压力/MPa	对照值/MPa	试验值/MPa	相对误差/%
0.2	0.110	0.108	1.818
0.3	0.151	0.148	1.987
0.4	0.230	0.225	2.174

表 7 喷嘴失效流量验证试验结果

Tab. 7 Nozzle failure flow validation test data

压力/MPa	平均时间/s	平均体积/L	实际流量/(L·min^{-1})	测量流量/(L·min^{-1})	相对误差/%
0.2	60.39	1.196	1.188	1.165	1.936
0.3	60.46	1.358	1.347	1.332	1.113
0.4	60.36	1.648	1.638	1.624	0.855

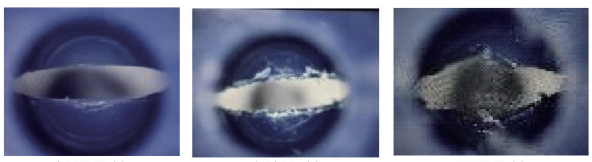


图 10 不同失效程度下喷嘴显微图像

Fig. 10 View of nozzle microscope at different failture degress

表 8 不同喷嘴失效率验证试验结果

Tab. 8 Verification test results of different nozzle failure

试验组别	试验台压力/MPa	对照组压力/MPa	对照组流量/(L·min^{-1})	对照组失效率/%	试验组压力/MPa	试验组流量/(L·min^{-1})	试验组失效率/%	失效率差值/%
1	0.2	0.146	0.901	8.636	0.153	0.910	7.367	1.269
	0.3	0.263	1.200	7.694	0.257	1.176	6.847	0.847
	0.4	0.373	1.441	8.919	0.364	1.401	7.192	1.727
2	0.2	0.136	0.972	21.517	0.131	0.964	22.802	1.285
	0.3	0.229	1.246	19.842	0.221	1.253	22.722	2.880
	0.4	0.325	1.494	20.972	0.319	1.466	19.869	1.103
3	0.2	0.110	1.188	65.229	0.108	1.165	63.394	1.835
	0.3	0.151	1.347	59.597	0.148	1.332	59.330	0.267
	0.4	0.230	1.638	57.652	0.225	1.624	57.977	0.325

4.2　多喷嘴性能采集验证试验

多喷嘴性能采集验证试验在黑龙江八一农垦大学工程学院植保实验室多喷头喷雾性能综合试验台进行，图 11 为室内试验现场。试验过程中，为确保试验数据的精确与连续性，利用标准量筒采集固定时间内的流量，结合称重法精确转换为流速；利用视频录制的方式连续监测精度等级为 0.2 级的数显压力表变化，并基于 OpenCV 框架，利用 Python 编程语言实现对视频帧的高效提取，从而精确获取一定时间间隔的真实压力表数据，求取其平均值，作为对照组数据；将检测仪采集到的 4 组喷嘴在连续工作状态下尖端压力和流量作为试验组，计算其与对照组数据的相对误差，试验结果如表 9 所示。试验数据表明：压力测量最大相对误差为 1.515%，平均误差为 0.887%；流量测量最大相对误差为 2.061%，平均误差为 1.151%。

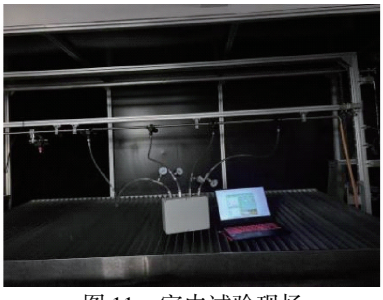


图 11　室内试验现场

Fig. 11　Field validation test plot

表 9　多喷嘴性能采集室内验证试验结果

Tab. 9　Verification test results collected through multiple channels

试验组号	通道号	压力			流量		
		对照组/MPa	试验组/MPa	相对误差/%	对照组/(L·min^{-1})	试验组/(L·min^{-1})	相对误差/%
1	1	0.203	0.202	0.493	1.019	0.998	2.061
	2	0.204	0.202	0.980	1.014	0.996	1.775
	3	0.198	0.201	1.515	1.012	0.993	1.877
	4	0.202	0.201	0.495	1.014	1.004	0.986
2	1	0.315	0.312	0.952	1.233	1.244	0.892
	2	0.309	0.312	0.971	1.249	1.237	0.961
	3	0.308	0.311	0.974	1.241	1.248	0.564
	4	0.313	0.311	0.639	1.237	1.241	0.323
3	1	0.413	0.416	0.726	1.416	1.403	0.918
	2	0.412	0.417	1.214	1.399	1.411	0.858
	3	0.413	0.415	0.484	1.418	1.398	1.410
	4	0.415	0.410	1.205	1.428	1.411	1.190

4.3　多喷嘴性能田间试验

多喷嘴性能田间试验在黑龙江省尖山农场进行，试验机型为山东祥瑞 3WPZ－1300A 型自走式喷杆喷雾机，其喷幅 24 m，压力调节范围为 0.20 ~ 0.80 MPa。

图 12 为田间试验现场图，试验过程中，在喷雾机管路压力相对稳定状态下，利用标准量筒采集固定时间内的喷嘴处流量，结合称重法准确转换为流速；使用压力表连续监测各喷嘴工作期间的压力变化，计算其平均值作为基准对照；将检测仪实时采集到的数据设定为试验组样本，通过对比分析计算两者的相对误差，试验结果如表 10 所示。试验结果显示：压力测量最大相对误差为 1.990%，平均误差为 1.629%；流量测量最大相对误差为 2.713%，平均误差 2.014%。



图 12　田间试验场景

Fig. 12　Field test scenarios

表 10　多喷嘴性能采集田间验证试验结果

Tab. 10　Verification test results collected through multiple channels

试验组号	通道号	压力			流量		
		对照组/MPa	试验组/MPa	相对误差/%	对照组/(L·min^{-1})	试验组/(L·min^{-1})	相对误差/%
1	1	0.204	0.201	1.471	1.119	1.092	2.412
	2	0.199	0.202	1.508	1.115	1.091	2.152
	3	0.201	0.197	1.990	1.113	1.094	1.707
	4	0.200	0.203	1.500	1.116	1.089	2.419
2	1	0.309	0.314	1.618	1.267	1.251	1.263
	2	0.305	0.311	1.967	1.271	1.247	1.888
	3	0.308	0.302	1.948	1.272	1.253	1.494
	4	0.312	0.317	1.603	1.268	1.250	1.420
3	1	0.352	0.356	1.136	1.361	1.332	2.131
	2	0.356	0.362	1.685	1.357	1.329	2.063
	3	0.354	0.359	1.412	1.364	1.327	2.713
	4	0.350	0.356	1.714	1.359	1.325	2.502

5　结论

(1)研制了一款喷雾机喷嘴性能检测仪。该检测仪集成了高精度流量传感器和压力传感器，实时监测喷嘴尖端压力和流量变化，以 STM32 主处理器为核心搭配 AD 采集模块完成信号的收集、传递，利用 LabVIEW 实现数据的实时分析、可视化显示、异常预警和存储，实现对喷嘴性能的精准评估。

(2)通过对压力和流量数据进行验证试验，验证了压力传感器和流量传感器具有高精准度和稳定的可靠性。各压力条件下压力标准差波动范围限制在 0.001 1 ~ 0.002 9 MPa 之内，最大误差为 0.96%；计算

得到各压力条件下流量最大相对误差为 1.85%,标准差波动范围在 0.009 8 ~0.011 3 L/min 内。

(3)经过对失效喷嘴信息获取、多喷嘴性能采集及田间验证试验,证明了该检测仪的准确性和稳定性。对失效喷嘴进行性能检测时,压力测量最大误差为 2.174%,流量测量最大误差为 1.936%;多喷嘴性能采集验证试验表明:压力测量最大相对误差为 1.515%,平均误差为 0.887%,流量测量最大相对误差为 2.061%,平均误差为 1.151%;多喷嘴性能田间试验结果表明:压力测量平均误差为 1.629%;流量测量平均误差为 2.014%,均满足设计要求。

(4)该检测仪可实时检测喷雾机喷嘴尖端处压力和流量,可实现对喷雾机喷嘴处压力可视化,有效避免传统人工检测方法中因管路压力不稳而造成喷嘴流量数据失真的问题,为喷嘴性能提供更加精确的评估,一定程度上提高了喷雾机雾化质量检测效率和准确性。

参 考 文 献

[1] 郑加强,徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(3):1 - 16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Progress and prospects of environmentally friendly pesticide spraying machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3): 1 - 16. (in Chinese)

[2] 刘政,金诚谦,冯玉岗,等. 植保机械智能化技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2024,5(1):40 - 50.
LIU Zheng, JIN Chengqian, FENG Yugang, et al. Research status and trends of intelligent technology in plant protection machinery[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024,5(1): 40 - 50. (in Chinese)

[3] 王果,张晓,陈晓,等. 农药精准施用技术与装备研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2023,44(6):68 - 73.
WANG Guo,ZHANG Xiao,CHEN Xiao,et al. Current research status and prospects of precision pesticide application technology and device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(6):68 - 73. (in Chinese)

[4] 龚艳,张晓,刘燕,等. 基于层次分析法的植保机械适用性综合评价方法[J]. 农业机械学报,2016,47(9):73 - 78.
GONG Yan, ZHANG Xiao, LIU Yan, et al. Comprehensive evaluation method for the applicability of plant protection machinery based on hierarchical analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9): 73 - 78. (in CHinese)

[5] 李天华,董广胜,姚玉康,等. 连栋温室分段变距喷雾机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):170 - 179.
LI Tianhua, DONG Guangsheng, YAO Yukang, et al. Design and experiment of segmented and variable distance spraying robot for multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2): 170 - 179. (in Chinese)

[6] 廖娟,陶婉琰,臧英,等. 农作物病虫害遥感监测关键技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(11):1 - 19.
LIAO Juan, TAO Wanyan, ZANG Ying, et al. Research progress and prospects of key technologies for remote sensing monitoring of crop diseases and insect pests[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11): 1 - 19. (in Chinese)

[7] 陈宝昌,李存斌,王立军,等. 植保机械喷头磨损和损坏的研究[J]. 农机使用与维修,2014(7):14 - 17.
CHEN Baochang, LI Cunbin, WANG Lijun, et al. Study on nozzle wear and damage of plant protection machinery[J]. Use and Maintenance of Agricultural Machinery, 2014(7): 14 - 17. (in Chinese)

[8] 翟恩昱. 扇形雾喷头磨损规律和失效预测研究[D]. 南京:南京林业大学,2012.
ZHAI Enyu. Study on wear characteristics and failure pridiction of flat-fan nozzles[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012. (in Chinese)

[9] 翟恩昱,郑加强,周宏平,等. 扇形雾喷头磨损对微生物农药施药性能的影响[J]. 林业工程学报,2018,3(1):109 - 116.
ZHAI Enyu, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Effects of flat-fan nozzle wear on application of microbial pesticides [J]. Journal of Forestry Engineering, 2018,3(1): 109 - 116. (in Chinese)

[10] 王相友,胡周勋,李学强,等. 多回流式变量喷药控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):123 - 131.
WANG Xiangyou, HU Zhouxun, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of multi-reflux variable spray control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(2): 123 - 131. (in Chinese)

[11] 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]. 农机化研究,2022,44(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]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(10): 118 - 125. (in Chinese)

[12] 翟长远,张焱龙,邹伟,等. 基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2): 160 - 169.
ZHAI Changyuan, ZHANG Yanlong, ZOU Wei, et al. Design and test of accurate variable injection monitoring system based on pesticide spray traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2): 160 - 169. (in Chinese)

[13] 陈彬,陈小兵,于庆旭,等. 喷杆喷雾机变量控制特性测试系统设计与试验[J]. 中国农机化学报,2021,42(1):85 - 92.

CHEN Bin, CHEN Xiaobing, YU Qingxu, et al. Design and experiment of test system for variable control characteristics of boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021,42(1): 85 - 92. (in Chinese)

[14] 郭俊杰,翟长远,朱瑞祥,等. 喷雾机喷头流量在线测量系统设计与试验[J]. 农机化研究,2013,35(12):133 - 136.
GUO Junjie, ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, et al. Design and experiment of sprayer nozzle flow online measuring[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(12): 133 - 136. (in Chinese)

[15] 郑申玉,赵学观,张新伟,等. 喷杆喷雾机独立喷嘴控制的实时压力动态研究[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2023,51(4):57 - 65.
ZHENG Shenyu, ZHAO Xueguan, ZHANG Xinwei, et al. Real-time pressure dynamics research on independent nozzle control of boom sprayer[J]. Journal of Jianghan University (Natural Science Edition), 2023,51(4): 57 - 65. (in Chinese)

[16] 王晓萌,窦汉杰,高松,等. 支持地址自设定的喷雾机喷头流量总线监测系统设计[J]. 农机化研究,2024,46(3):98 - 104,109.
WANG Xiaomeng, DOU Hanjie, GAO Song, et al. Support the design of spray head flow bus monitoring system with self-set address[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024,46(3): 98 - 104,109. (in Chinese)

[17] 芦泽阳,李树江,王向东. 采用 RBF 网络的喷雾机喷杆自适应动态面跟踪控制[J]. 应用数学和力学,2019,40(7): 801 - 809.
LU Zeyang, LI Shujiang, WANG Xiangdong. Adaptive RBF-network dynamic surface tracking control of sprayer boom systems [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2019,40(7): 801 - 809. (in Chinese)

[18] 李井祝,朱凤武. 基于 PLC 自动对靶喷雾控制系统的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2017,38(8):55 - 58.
LI Jingzhu, ZHU Fengwu. Design and experiment of automatic targeting spraying control system based on PLC[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017,38(8): 55 - 58. (in Chinese)

[19] 李井祝. 履带式喷雾机智能控制及预警系统研究[D]. 长春:吉林农业大学,2020
LI Jingzhu. Research on intelligent control and early warning system of crawler sprayer[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[20] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2022,53(4):1 - 20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(4): 1 - 20. (in Chinese)

[21] 张瑜. 基于声信号的农用喷嘴堵塞检测方法及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
ZHANG Yu. Experimental syudy on detecetion method of cloging of spray nozzle based on acoustic signal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[22] ARENSON M A, DAVENPORT J, STONE S G. Spraying apparatus with spray nozzle flow sensing and monitoring system: U. S. Patent 9,532,563 A1[P]. 2017 - 01 - 03.

[23] SOBOYEJO A B O, OZKAN H E, PAPRITAN J C, et al. A new multiparameter approach to the prediction of wear rates in agricultural sprayer nozzles[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2001, 29(4): 372 - 379.

[24] RUIZ-GONZALEZ R, STOMBAUGH T S, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ V, et al. An acoustic method for flow rate estimation in agricultural sprayer nozzles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 255 - 266.

[25] 张志强. 喷头磨损度电子评价系统的研究与开发[D]. 太原:太原理工大学,2014.
ZHANG Zhiqiang. Research and development degree nozzle wear electronic evaluation system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese)

[26] REICHARD D L, OZAKAN H E, FOX R D. Nozzle wear rates and test procedure[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(6): 2309 - 2316.

[27] KRISHNAN P, EVANS T, BALLAL K, et al. Scanning electron microscopic studies of new and used fan nozzles for argricultural sprayers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004,20(2):133.

[28] 翟恩昱,郑加强,周宏平,等. 液力式喷头磨损检测方法分析[J]. 广西轻工业,2009(1):55 - 57.
ZHAI Enyu, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Analysis of detection method of hydraulic nozzle[J]. Light Industry in Guangxi, 2009(1): 55 - 57. (in Chinese)

[29] 柳平增. 喷头综合性能精密测试试验台的研制及扇形雾喷头性能研究[D]. 南京:南京农业大学,2007.
LIU Pingzeng. Design of distribution bench for precision measuring spray nozzle integrative performance and on fan spray nozzle [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese)