

果园精准喷雾机研究现状与发展趋势

李文静 王彬彬 陈恒 何雄奎*

(中国农业大学理学院, 北京 100193)

摘要: 果园植保施药是保障果树健康与农产品安全的关键环节,其机械化和精准化水平直接影响果园生产效益与生态环境。中国果园以小规模农户种植管理为主,现有施药装备普遍存在作业效率低、雾滴沉积分布不均、农药流失严重及环境污染风险高等问题。精准喷雾机研发起步相对较晚,当前主流装备常采用大容量淋洗式或固定剂量连续喷洒方式,易产生过密雾滴,导致农药利用率低,资源浪费加剧。基于此,该文以果园精准智能喷雾机为研究对象,系统综述其国内外研究现状与技术演进,重点分析系统构成与关键技术进展,总结其在不同果园场景下的应用效果,并对其未来发展趋势进行展望,以期为果园植保装备的智能化升级和农药减量增效提供参考。

关键词: 精准施药; 变量施药; 对靶; 植保机械; 农药利用率; 研究进展

Current status and development trends of researches on precision sprayers for orchards

Li Wenjing Wang Binbin Chen Heng He Xiongkui*

(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Orchard plant protection and pesticide application is the key link to ensure the health of fruit trees and the safety of agricultural products. Its mechanization and precision level directly affect the orchard production efficiency and ecological environment. The orchards in China are mainly managed by small-scale farmers. The existing pesticide application equipment generally has problems such as low operating efficiency, uneven distribution of droplet deposition, serious pesticide loss and high risk of environmental pollution. The research and development of precision sprayers started relatively late. At present, the mainstream equipment often adopts large-capacity leaching or fixed-dose continuous spraying, which is prone to producing dense droplets, resulting in low utilization rate of pesticides and increased waste of resources. Thus, this article takes precision and intelligent orchard sprayers as the research object, systematically reviews its research status and technology evolution in China and abroad, focuses on the analysis of system composition and key technological progress, summarizes the application effect in different orchard scenarios, and foresees its future development trend, thereby providing a reference for the intelligent upgrading of orchard plant protection equipment and pesticide reduction and efficiency improvement.

Key words: precise application; variable spraying; target; plant protection machinery; pesticide utilization rate; research progress

果园是中国重要的经济作物生产体系,具有树体结构复杂、行距不规则和作业空间受限等特点。

国家统计局数据显示,2024年中国果园面积达1 273.8万 hm^2 ,水果总产量突破3.2亿t,果园生产规模居世界前列(<https://www.stats.gov.cn/sj/nds/2024/index.htm>)。果园经营主体以中小规模农户为主且机械化基础薄弱,这导致果园植保施药长期存在作业效率低、雾滴沉积分布不均和农药流失严重等问题,严重影响果品产量、品质及生态环境。

在果树整个生长周期内,病虫害普遍发生,且具有发生周期长、分布范围广和繁殖速度快等生物学特性,是影响果园稳产优质的主要因素(徐树仁等,2021)。农药在果园病虫害防控中仍发挥着重要作用,但施药技术与植保机械的发展速度远落后于农药产量的增长,导致农药有效利用率低,仅为20%~40%(何雄奎,2018)。传统固定剂量、连续喷雾方式难以满足果树冠层结构复杂、病虫害空间异质性强的作业需求,农药减量增效和果品质量安全面临较大挑战(何雄奎,2020)。近年来,传感器技术、智能控制算法与农业装备工程的快速发展为果园精准施药提供了新的技术路径。通过传感器技术可对果树冠层结构和病虫害靶标进行精准感知,通过智能控制算法和农业装备工程实现对果树冠层和病虫害的变量、对靶喷雾,从而显著提高农药利用率,降低飘移与环境污染风险。例如,郑永军等(2020)研究表明智能喷雾系统可将农药利用率提高至40%以上,同时智能喷雾系统推动施药作业由人工作业向自动化、智能化转型(Lei et al., 2023)。在此背景下,果园精准智能喷雾机逐步由单一喷雾装备向集感知、决策、执行与自主行走于一体的系统化装备演进,并成为植保机械领域的重要研究方向。本文以果园精准喷雾机为研究对象,系统综述其国内外研究现状与技术演进,重点分析系统构成与关键技术进展,总结其在不同果园场景下的应用效果,并对其未来发展趋势进行展望,以期果园植保装备的智能化升级和农药减量增效提供参考。

1 果园精准喷雾机发展概况

1.1 国外研究进展

国外果园精准喷雾研究起步较早,已形成较为系统的技术体系。20世纪80年代,传感驱动的靶向施药技术开始走出实验室进入田间试验。Giles et al.(1989)基于超声波传感器研制了果园风送喷雾器,该喷雾器可对检测的目标树冠进行间歇式喷雾,田间试验证实该喷雾器可节省28%~52%的药液,该研究首次在工程层面验证了感知触发喷雾可有效减

少农药浪费。同期,Nelson et al.(1988)将机载脉冲激光系统用于评估森林生物量,这为激光传感技术在植被靶标参数探测中的应用奠定了基础。随后,激光测距和激光高度计被引入作物参数检测领域中,例如,Ritchie et al.(1993)验证了激光测高传感器在作物结构量化中的可行性;Wei & Salyani(2005)使用激光扫描仪对果树冠层结构进行了精细化扫描,从而为变量喷雾提供了高精度靶标参数。

进入21世纪后,欧美国家学者围绕高价值果园作物开展了基于冠层结构感知的变量喷雾研究,其中超声波、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)和机器视觉逐步成为主流感知手段,并与脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)电磁阀等控制技术相结合,实现按需变量施药。例如,Gil et al.(2007)基于超声波传感器开发了葡萄园变量喷雾系统,该系统根据树冠结构差异调节喷量,使农药使用量减少约57%;PWM技术被广泛用于果园变量喷雾装备中,其通过调节占空比实现喷量连续可调,在保证雾滴覆盖均匀性的同时避免非靶标区域过量喷洒(Grella et al., 2022)。Zhu et al.(2010)开发了激光引导变量喷雾器,在多次田间试验中该喷雾器可节省29.7%~77.6%的喷雾量,同时对病虫害有较好的防控效果;Wei et al.(2023)将超声波传感器、全球定位系统(global positioning system, GPS)和速度传感器集成,利用集成的传感器采集树冠参数,基于树冠参数构建树冠体积模型,利用构建的树冠体积模型可对树冠精准施药,液体节省率最低可达23%。上述研究推动了果园精准喷雾技术的工程化与产业化应用,相关商业装备已在欧美果园中推广。

1.2 国内研究进展

中国果园精准喷雾研究起步相对较晚,但近年来发展迅速,研究重点集中在复杂果园环境下其适应性改进和低成本实现路径。针对果园地形复杂、种植行距不统一等特点,国内学者在深度学习算法优化、装备集成创新及本土化场景适配等方面取得了突破(何雄奎,2017);将自动化、信息化技术与新型传感器应用于精准施药技术和智能植保机械的研发(翟长远等,2010);在超声波感知、LiDAR三维建模及变量喷雾控制等方面取得了一些进展。

在关键技术层面,国内研究逐步由单一传感器触发喷雾向多源感知融合与实时变量施药控制演进。例如,基于多线LiDAR的果树三维重构技术被用于果园场景中,扫描误差能控制在较低水平,从而有效提升了对冠层结构的感知精度(Qiao et al.,

2024);针对果园风送喷雾器,姜红花等(2020)提出基于超声波感知的风量调控方法,该方法通过动态调节风机转速来增强药液在冠层内部的穿透能力。在自主行走与协同作业方面,国内学者围绕路径规划、跟踪控制与多机协同开展研究,引入机器学习和深度学习方法,从而实现果园喷雾机器人的高精度导航与协同作业(Qin et al., 2022; Ren et al., 2022)。

随着人工智能技术的融入,国内研究正向更高维度的智能化迈进。例如, Ning et al. (2022)将YOLOv4-CBAM深度学习模型嵌入喷雾系统中,在高密度种植场景中该系统的定位精度达90%; Ren et al. (2022)基于强化学习算法Double DQN实现了果园喷雾机器人的高精度路径跟踪; Qin et al. (2022)构建了喷雾-配药机器人组协同系统; Li et al. (2023)则进一步提出了多单元协同任务规划及空地协同立体植保系统,该系统将无人机与地面设备配合,优化了冠层尤其是上层与内层的沉积均匀性。尽管中国在算法和集成应用上进展迅速,但在核心传感器国产化及其长期稳定性方面仍有待提升(何雄奎, 2022),这也成为当前国内研究亟需攻克的关键环节。

1.3 技术演进特征

果园精准喷雾技术经历了由固定剂量连续喷雾向变量、对靶喷雾转变,由人工经验操作向基于感知与模型的智能控制发展,并由单一喷雾装置向集感知、决策、执行与自主行走于一体的系统化装备演进。综合国内外发展进程,果园精准喷雾机演进呈现出3个鲜明特征。首先是探测维度由单一向融合演进,核心探测技术从早期的单一超声波探测,向LiDAR、视觉感知及多传感器融合发展,实现了从无检测到三维精准量化的跨越。其次是控制方式由机械向智能演进,施药控制从简单的机械式开关发展为基于PWM的实时变量控制,并进一步结合深度学习算法,实现了按需施药与病虫害精准识别。最后是作业模式由单机向协同演进,随着作业场景复杂度的提升,技术重心逐步从机械结构优化转向信息感知、多源数据融合与智能决策,多变量协同控制、装备智能化与施药绿色化,为后续系统集成与规模化应用奠定了基础。

2 果园精准喷雾机系统组成

果园精准喷雾机因要面向树冠结构复杂、地形条件多变和作业空间受限的果园环境,其系统设计需在保障喷雾精准性的同时兼顾行走通过性、作业

稳定性与长期可靠性。与传统果园喷雾装备以单一喷雾功能为主不同,精准喷雾机更突出系统集成理念,通过感知、决策、执行与行走等多子系统协同实现对靶、变量和低飘移施药。

果园精准喷雾机系统主要由靶标探测与识别系统、智能控制与决策系统、喷雾执行与变量调控系统、动力与驱动系统、药液供给与混药系统、行走与支撑系统以及监测与反馈系统七大部分组成,其中,靶标探测与识别系统、智能控制与决策系统、喷雾执行与变量调控系统是实现精准施药的核心技术部分。靶标探测与识别系统是果园精准喷雾机实现变量、对靶施药的核心,负责精准定位作物靶标并区分非靶标,避免药液浪费与误喷,核心组件包括红外传感器、激光雷达、超声波传感器、轻量化深度学习识别模块等。智能控制与决策系统是果园精准喷雾机系统的大脑,根据靶标信息制订变量喷雾策略,实现自动化作业,核心组件包括意法半导体基于ARM Cortex-M内核开发的32位微控制器(STM32)/可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)控制芯片、无线通信模块、变量决策算法等模块(王定康等, 2022)。喷雾执行与变量调控系统直接决定施药效果,可实时调节流量、风量、雾滴粒径与喷雾方向,核心组件包括变量喷头、高速电磁阀、风机、雾滴粒径调节机构(王贵恩等, 2004)。监测与反馈系统用于评估喷雾效果、优化作业参数,核心组件包括雾滴沉积监测模块、环境传感器、设备运行状态监测组件(田勇等, 2022)。动力与驱动系统为整机运行提供动力保障,确保药液输送压力稳定与设备移动顺畅,核心组件包括电机、液压调控装置、气压调控装置、稳压组件、电源模块;药液供给与混药系统实现农药与水的精准混合及持续供给,解决传统预混药液不均、残留问题,核心组件包括在线混药装置、药液箱、过滤净化组件、输送管道与阀门;行走与支撑系统适配平原、丘陵山地等不同果园地形,保障作业稳定性与地形适应性,核心组件包括履带式/轮式行走机构、固定支撑结构、地形自适应调节组件。

3 果园精准喷雾关键技术研究进展

3.1 冠层感知与靶标识别技术

果园精准喷雾技术中的冠层感知与靶标识别通过整合多类型传感器与跨层级融合算法实现冠层与靶标参数、病虫害状态、环境条件的全维度检测,打破单一传感器的感知局限,为精准施药提供全面、可

靠的数据支撑,是变量控制与智能决策的核心前提。靶标探测识别是果园喷雾机精准变量对靶喷雾技术的“眼睛”,是实现按需施药的核心前提,其通过实时获取果树位置、冠层形态、病虫害分布等关键信息,从根本上破解传统果园喷雾盲目喷施、靶标适配性差、农药浪费严重等痛点,为减药增效、绿色植保提供技术支撑。

3.1.1 常用传感器及其特性分析

精准施药的基石在于对靶标的有效感知识别,精准喷雾技术中常用传感器主要包括超声波传感器、激光雷达传感器、红外传感器、北斗定位传感器、物联网传感器和多光谱传感器等,各类传感器在测量精度、响应速度、环境适应性等方面都具有不同应用价值(表1)。

表1 精准喷雾技术传感器特点

Table 1 Characteristics of precision spray technology sensor

传感器类型 Sensor type	核心应用场景 Core application scenario	优点 Advantage
超声波传感器 Ultrasonic sensor	靶标距离测量、冠层轮廓探测、作业速度辅助监测、树干定位 Target distance measurement, canopy contour detection, operation speed auxiliary monitoring, trunk positioning	价格低廉、购买方便;方向性好,不易受光照影响;测量精度达10 mm,满足基础对靶需求 Low price, easy to buy; good directionality, not easily affected by light; the measurement accuracy is up to 10 mm, which meets the requirements of basic target alignment
激光雷达传感器 Laser radar sensor	冠层3D建模、精准对靶定位、自主导航避障、变量喷雾流量调控、树行识别 Canopy 3D modeling, accurate target positioning, autonomous navigation obstacle avoidance, variable spray flow regulation, tree line recognition	测量精度高,响应速度快;可获取树冠体积、密度等细节信息;抗干扰能力强,受光照影响小 High measurement accuracy, fast response speed; can obtain detailed information such as crown volume and density; strong anti-interference ability, less affected by light
红外传感器 Infrared sensor	靶标识别、近距离对靶喷雾触发、病虫害初步监测、自动对靶喷雾 Target recognition, close to the target spray trigger, preliminary monitoring of pests and diseases, automatic target spray	响应速度快,能快速触发喷雾动作;结构简单,集成成本低;可在弱光环境下工作 Fast response speed, can quickly trigger the spray action; the structure is simple and the integration cost is low; it can work in weak light environment
北斗定位传感器 Beidou positioning sensor	作业路径规划、精准定位施药、作业面积统计、处方图施药 Operation path planning, precise positioning application, operation area statistics, prescription map application	定位精度高,支持厘米级差分定位;能实现全域作业覆盖,避免重复、漏喷;与变量系统联动性强 High positioning accuracy, support centimeter-level differential positioning; it can realize global operation coverage and avoid duplication and leakage; strong linkage with variable system
物联网传感器 Internet of Things sensors	水肥药协同调控、作物需水状况监测、辅助优化施药时机、土壤养分动态监测 Coordinated regulation of water, fertilizer and pesticide, monitoring of crop water demand, auxiliary optimization of application timing, and dynamic monitoring of soil nutrients	能获得作物生理状态和土壤环境数据,支撑精准决策;可长期连续监测,数据稳定性强;功耗低,适合果园长期部署 It can obtain crop physiological status and soil environment data to support accurate decision-making; it can be monitored continuously for a long time and has strong data stability; low power consumption, suitable for long-term deployment of orchard
多光谱传感器 Multispectral sensor	植被长势监测、病虫害大范围定位、土壤水分和有机碳反演、冠层叶绿素含量监测 Vegetation growth monitoring, large-scale positioning of pests and diseases, soil moisture and organic carbon inversion, canopy chlorophyll content monitoring	覆盖范围广,可实现全域快速监测;能反演多种植被指数,支撑宏观施药决策;非接触式测量,不干扰作物生长 It has a wide coverage and can achieve rapid monitoring of the whole region; it can invert a variety of vegetation indices and support macro-application decision-making; non-contact measurement that does not interfere with crop growth

3.1.2 单一传感技术的研发应用

果树精准喷雾技术中的感知与识别技术的进步始于单一传感技术的不断迭代与场景适配。早在2003年,何雄奎等(2003)利用光电传感技术研制出果园自动对靶静电喷雾机,该喷雾机将靶标识别间距压缩至0.5 m以内,并实现了探测距离的可调化,该研究将传统的常规连续喷雾转变为自动对靶喷雾,完成了从漫灌到滴灌的理念跨越。此后,红外传

感器与PWM脉宽调制技术进一步被引入,确立了有靶喷雾、无靶停喷的作业范式(Zhou et al., 2012; 何雄奎, 2022)。针对中小果园的特定需求,邓巍等(2008)基于850 nm特征波长开发的红外系统成功将最小识别距离控制在0.3 m以内,该红外系统展现了极佳的场景适应性。随着对测量精度要求的提升,LiDAR技术开始被用于果树精准喷雾技术中。例如,乔白羽等(2020)研发的16线3D LiDAR传感

器将冠层高度的平均测量误差降至4.59%，显著强化了空间感知的准确性；同时Wei et al. (2023)还深入对比了超声波与LiDAR的技术特性，明确超声波虽然具有成本优势，但存在发散角大、空间分辨率低的局限。果树精准喷雾技术中感知与识别技术未来的核心路径在于自动对靶、高效仿形与精准变量技术的深度协同。

3.1.3 感知技术与喷雾系统的集成

感知技术与喷雾系统的集成创新，通过建立传感数据与执行单元的实时联动机制，推动精准施药从技术研发向实际应用跨越。在早期探索阶段，向海涛等(2004)较早尝试建立树木图像实时采集与识别感知系统，完成了实时采集树木图像的分割与识别以及树木图像特征提取，将识别结果实时响应至施药系统，从而实现选择性对靶施药，为技术落地提供依据。随着感知技术与图像处理技术的升级，薛秀云等(2020)利用LiDAR检测技术获取表征树冠特征参数的叶墙面积(leaf wall area, LWA)，建立了基于决策系数 K_{LWA} 的施药量计算模型，将计算得出的电磁阀PWM占空比实时响应至执行单元以动态调节喷头流量，从而实现基于LWA的变量喷雾，试验验证该技术比纯对靶定量喷雾省药达32.77%。为进一步提升系统响应速度，束义平等(2020)开发基于激光雷达探测的变量对靶喷雾系统，建立了系统的硬件架构，并研发了变量喷雾控制算法以及软件系统，实现了从靶标采集、体积计算、PWM生成到电磁阀启闭控制的全流程闭环，在不同速度和检测距离下该系统靶标体积计算相对误差均控制在10%以内，PWM与流速呈线性关系，且电磁阀机械响应滞后约20 ms。针对更复杂的作业场景，刘慧等(2024)搭建的履带式林果园多变量喷雾机器人系统可实现三维激光雷达与作业单元的实时通信，其轻量化PointNet网络识别平均用时32.4 ms，准确率达92.49%，能满足实时作业需求。

3.1.4 感知技术与机器视觉的融合

机器视觉与先进感知技术的深度融合显著提升了复杂环境下目标识别的精度与广度。在视觉图像处理与特征增强方面，针对复杂背景下的分割难题，曲峰(2017)通过奇异值分解算法分割苹果叶部病害区域，有效解决了复杂背景下病害定位的难题；针对高光谱相机用于植物健康评估的成本与复杂性难题，Sarkis et al. (2024)提出了一种基于RGB图像重建植物高光谱数据的方法，利用简化版高光谱卷积神经网络-密集型架构(hyperspectral convolutional

neural network-dense, HSCNN-D)模型在可见光至近红外波段进行针对性训练，在小样本条件下实现了与先进模型媲美的重建精度，为低成本植物健康评估提供了新思路。在病虫害精细化识别领域，深度学习与多光谱感知技术的结合展现了强大的分类能力。例如，冯洁等(2008)将多光谱成像与人工神经网络结合并用于识别黄瓜红粉病、黑星病、白粉病等病害，识别的准确率分别达96.67%、93.3%和100%，凸显了光谱技术与机器学习融合的优势。

3.1.5 多模态传感融合

面对日益复杂的田间环境，单一传感器难以满足精准作业需求，多模态传感融合技术应运而生。该技术通过梳理与交叉验证不同传感模态的优势，为系统设计提供理论支撑与实战方案。在理论选型与框架构建方面，邱白晶等(2015)系统梳理了变量喷雾核心技术体系后提出多模态传感融合框架，利用该框架比较超声波、激光与LiDAR的性能差异，明确LiDAR在三维形貌重建中的优势并建立量化模型；齐亚聪等(2022)构建多维靶标探测技术矩阵，利用该矩阵系统比较红外、LiDAR、机器视觉等传感模态的技术特性与适用场景。在系统集成与应用验证方面，Zou et al. (2015)设计了果园自动对靶喷雾机，融合双红外传感器探测果树与霍尔传感器监测车速，实现了特定工况下的精准按需喷雾；马秀博等(2017)则基于经典靶向喷雾模型，引入双目视觉快速检测算法搭建了精准喷雾系统，该系统验证了视觉技术在复杂果园环境中的有效性。

尽管靶标探测识别技术已取得突破性进展，但在复杂环境适应性、实时性、多传感协同及通用性方面仍存在亟待突破的瓶颈。

3.2 高效仿形喷雾技术

感知驱动的变量仿形施药系统是果树精准施药技术体系研发的核心方向，其通过冠层感知建立冠层的量化模型，变量仿形施药系统根据冠层量化模型提供的树冠结构动态调节喷雾参数，为精准施药提供理论与技术支撑。例如，李龙龙等(2017a)设计了果园自动仿形喷雾机，该喷雾机以激光传感器为探测源构建冠层分割模型，以电磁阀和无刷直流风机为执行元件，通过调节PWM信号实时适配风机转速和喷头流量，且该喷雾机具有独立的雾化单元，其借助高速气流助力雾滴穿透冠层；李琪等(2024)设计了支持风机转速、进风口面积和出风口面积独立调控的果园风送喷雾机试验台，通过开展风机转速、进风口面积及出风口导流板倾斜角度的独立调

控试验构建了风机转速、进风口面积与出风口最大风速风量的量化关系模型,并据此提出了一种基于果树冠层体积和枝叶稠密度变化的风力在线调控新方法。

为适应多变的作业环境,需要对喷雾机结构进行优化,从而实现喷雾距离与姿态的实时调节。例如,陈子文等(2023)设计了对称交叉双自由度仿形喷雾机构,该机构通过融合树干感知定位、喷头动态伺服控制等技术实现环绕式仿形对靶喷药,雾滴沉积量和密度分别较传统的定距施药提升36.3%和58.3%。为进一步解决执行粗放的问题,姜春森等(2025)设计单侧六自由度双摇臂式苹果树冠层仿形作业臂;房开拓等(2022)设计了柔性对称双摇臂式多自由度机构,该机构通过水平伸缩与竖直升降实现喷雾姿态和距离的实时调节;遇宝俊(2014)不仅优化了喷杆还设计了液压缸折叠仿形机构,该机构采用单侧移动仿形-右侧隧道式喷雾组合模式,能满足不同冠层、行距与株高的果园需求。针对丘陵山地等特殊果园环境,董继伟等(2025)设计了履带式果园对靶仿形施药机,该施药机通过升降开合机构调整施药距离与高度,采用可调超声波传感器检测树冠表面距离,从而实现对不同形状果树的精准施药,并能有效适配丘陵山地的复杂地形条件。

3.3 智能集成控制技术

精准控制算法优化与参数动态调控是智能集成控制技术的核心环节,即通过引入先进控制理论与调控策略,提升施药参数调节的稳定性、响应速度与均匀性。例如,Wang et al.(2024)开发了低成本模块化无人机自主喷雾控制系统,该系统集成回归森林模型的喷雾均匀性控制算法,采用LoRa传输技术并利用GPS对数据进行校正,确保变异系数低于30%,所有目标区域的定向喷洒性能指标均超过0.87;Jin et al.(2023)开发了草坪精准除草智能喷雾机,该喷雾机利用集成ResNet等深度学习模型检测杂草且独立控制单喷嘴,该喷雾机使用的除草剂用量较传统广播喷雾机显著减少,但防效与传统广播喷雾机相当。

多传感融合与数据-控制联动技术的研发不仅实现了探测数据向控制指令的快速转化,还拓展了复杂场景下集成控制的适用性。例如, Lee et al.(2010)对用于特色作物精准生产的传感系统进行了综述,指出作物生物量、杂草及土壤养分检测技术已相对成熟,而基于复杂植物-传感器交互的病害与水分检测技术在田间应用仍具挑战,此外,该文还系统探讨了各类传感技术在精准农业中的应用现状及实施难点。Palacin et al.(2006)基于激光扫描技术

建立叶面积与冠层体积的线性模型,该线性模型的相关系数达0.81,误差小于6%,所建立的模型可直接用于计算变量施药量。

通信适配与硬件集成体系的构建是技术落地的关键,即通过优化通信策略与硬件架构,保障多模块联动的同步性与稳定性。例如,Koc et al.(2023)研发了集成物联网技术的果园变量喷雾装置,该喷雾装置通过立体相机成功实现了室外环境下树冠探测,从而精确控制农药的喷洒量,同时喷雾系统的喷嘴通过电子控制单元发出的电信号来实现单独控制,进而实现智能控制喷雾,在600 kPa压力、1.1 mm喷嘴孔径、15 kV静电电压及1.0 km/h行进速度下,雾滴覆盖率最优达到68.91%;Mao et al.(2025)设计了基于PLC控制的结球蔬菜对靶喷雾压力稳定系统,该系统采用一进两出管路与两位三通电磁阀、电动球阀协同控制方案,试验结果显示该系统的压力稳定与喷雾一致性好。

感知技术拓展与技术价值评价完善了智能集成控制体系,即一方面拓展了病害检测等感知维度,另一方面建立了多维评价标准。在感知技术拓展方面,Boutonne et al.(2025)将功能化电容式微机械超声传感器阵列与k-NN算法结合,该方法可对植物挥发性气体进行检测,对病害的识别准确率高达98%。在技术价值评价方面,Fessler et al.(2023)首次通过生命周期评价验证智能喷雾技术的环境价值,其中在橡树病害防治中对靶技术使农药暴露风险降低57%,并建立防治效果-生态影响-经济成本三维评价体系。

4 不同场景下果园精准喷雾机的应用效果

4.1 标准果园场景下的应用效果

李龙龙等(2017b)设计了基于LiDAR扫描探测技术的果园自动仿形变量喷雾机,该喷雾机可通过实时调节喷雾参数适配树冠特征;与常规喷雾方式相比,仿形变量喷雾最高可节省药液45.7%;与传统风送喷雾机和定向风送喷雾机相比,仿形变量喷雾机的雾滴飘移分别减少23.2%和42.7%,地面流失分别减少67.4%和58.8%。基于此技术,窦汉杰等(2022)基于果树冠层网格化体积计算方法建立了单喷头PWM流量控制模型,研发了果园对靶变量喷药控制系统并集成样机,该样机可根据果树冠层位置和体积变化进行精准对靶变量喷药。在葡萄园中,宋坚利等(2012)针对篱架型葡萄设计II型循环喷雾机,该喷雾机采用雾滴拦截回收与循环喷雾技

术将未沉积农药回收再利用,使农药利用率提高10%以上;Gil et al.(2007)开发了基于超声波传感器的葡萄园变量喷雾系统,该系统搭载3个超声波传感器与电磁阀门,基于树行体积原理建立流量实时调节模型,喷嘴喷射的总流量会根据超声波传感器测量的作物宽度变化而调整,从而适应作物结构,这在保持覆盖范围和渗透率的同时显著减少了喷雾量;与恒定剂量施用相比该系统平均节约58%药液,但施药质量不变。

4.2 智慧果园场景下的应用效果

韩冷等(2022)在果园中构建了智能管理平台,该平台融合物联网、大数据、装备智能化等技术;与传统果园生产模式相比,该生产模式可减少人工成本50%以上,节省农药30%~40%,节省肥料25%~35%,节约灌溉用水量60%~70%,综合经济效益提升32.5%。Koc et al.(2023)开发并生产了一种配备物联网技术及装置的可变速率树木喷雾原型机,该设备通过摄像头检测树冠并进行农药施用,其喷头由电子控制单元发送的电信号独立控制。

4.3 丘陵山地场景下的应用效果

针对东南亚丘陵柑橘果园地形特点,Bao et al.(2022)设计了远程控制、缆绳驱动的目标喷药机器人,该机器人由小型履带车辆、六自由度柔性机械臂及喷药系统组成,并建立了机械臂正向与逆向运动学模型,该模型有利于提高机器人作业灵活性,果园试验结果显示该机器人可在树冠内部灵活穿越交错树枝,精准定位病虫害区域并喷药,完整操作仅需3.5 s。根据丘陵果园农艺特点,李文伟等(2023)设计了自走式小型靶标跟随喷雾机,该喷雾机集成靶标探测追踪系统与自主导航系统,采用双喷头联动设计,果园试验结果表明,与非对靶喷雾模式相比,该喷雾机喷施用水量降低26.70%,地面流失量降低84.93%,冠后飘移流失量降低53.50%,同时显著提升冠层中下部叶片雾滴分布均匀性;李进海(2017)研制了定向风送式枸杞喷雾机,该喷雾机融合风送辅助与仿形技术,并针对丘陵山地枸杞种植特点优化喷雾方向与风量,果园试验结果显示,该喷雾机每公顷可节省药液212 L,同时有效提升冠层内部雾滴穿透性;董继伟等(2025)设计了履带式对靶仿形施药机,该设备通过升降开合机构与可调阵列式超声波传感器动态调整施药距离和高度,从而适应山地果园各类作物,果园试验结果显示,该设备对靶施药雾滴密度达78.2个/cm²,雾滴覆盖率较固定施药提升20.6%,节约26%施药量;Qi et al.(2022)研发了六

旋翼枝向对靶无人机,该无人机对机体结构进行了优化,使风场沿枝条方向穿透树体,改善了山地果园施药穿透性不足的问题,适用于丘陵山地各类果园,果园试验结果显示,该无人机的作业效率为0.67 hm²/h,可节省农药30%以上。

综上,果园精准喷雾机已形成地面装备-无人机-机器人或单一或协同的多元产品体系,通过融合不同探测技术与控制策略,利用靶标追踪、仿形施药、LiDAR引导等核心技术,有效提升了施药精准度与穿透性,实现了减药增效的目标。但不同果园类型、树龄及修剪方式对施药效果影响显著,需进一步开展多场景系统验证研究。

5 展望

尽管果园精准喷雾技术已在多源信息感知、变量施药控制与多场景装备适配等方面取得阶段性成果和突破性进展,为推动农业绿色发展与农药减量增效提供核心支撑。但在规模化应用与全链条优化过程中仍面临诸多挑战。首先,感知系统在强光、雨雾等复杂环境下稳定性不足,多源传感融合与在线校准技术仍需进一步完善;其次,现有决策模型在不同果园类型间的通用性有限,缺乏统一的评价指标与标准体系;此外,果园精准喷雾装备在系统集成度、长期可靠性及关键传感器国产化方面仍存在不足,制约了其大规模推广应用。

为实现精准喷雾的规模化、稳定化与可持续发展,建议从技术、产业与政策层面同步推进以下方面:第一,构建高鲁棒性的多模态感知体系。融合LiDAR、毫米波雷达与视觉传感器的优势,结合抗干扰与弱光增强算法,提高复杂场景下靶标参数提取的稳定性与准确性。第二,构建跨场景通用的多因素决策模型。将作物生理、冠层结构与气象条件纳入模型设计,建立由植株特征反馈喷药量的智能匹配决策系统,提高施药决策精准性和通用性。第三,建立喷头级闭环控制与实时沉积监测体系。部署边缘计算与雾滴沉积在线监测技术,搭建短时延喷头级反馈控制回路,提高变量施药的动态响应与沉积精准度。第四,推进多装备协同标准化与高效调度算法。制定数据接口与通信协议标准,开发支持地空协同的任务调度与资源分配算法,实现不同平台间的协同感知、协同决策与协同执行。第五,加快核心部件国产化与低成本化设计。鼓励关键传感器、电磁阀等国产替代品与产业化,优化成本结构,降低装备准入门槛;同时构建完善的维护与配套服务体

系,提升用户易用性与可持续运维能力。第六,推进可解释与安全的智能决策体系。发展知识引导、物理约束结合的可解释AI,提高决策透明度与可靠性,便于监管、推广与用户信任构建。第七,加强政策支持与人才培养。建议国家层面加大科研与资金投入,支持关键技术攻关与示范推广;同时建立系统的培训与服务体系,降低用户使用门槛,促进精准喷雾技术在农业生产中的广泛应用。通过上述技术攻关与制度保障的协同推进,可为构建全链条优化的精准喷雾体系提供关键支撑,推动植保装备产业升级,助力实现农药减量增效与农业绿色可持续发展的目标。

参 考 文 献 (References)

- Bao XL, Niu YX, Li YS, Mao JC, Li SJ, Ma XJ, Yin QL, Chen BY. 2022. Design and kinematic analysis of cable-driven target spray robot for citrus orchards. *Applied Sciences*, 12(18): 9379
- Boutonnet C, Shaw A, Bastien JC, Blard F, Vialletelle A, Pinon V, Le Blanc C, Herrier C, Livache T, Fain B. 2025. Characterization of a multi-channel CMUT gas sensor. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 34(1): 4–14
- Chen ZW, Hu ZR, Xiong YF, Wang P, Yu Y, Peng M, Yang MJ. 2023. Design and test of the canopy wrap-around profiling-to-target sprayer for orchards. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 39(3): 23–32 (in Chinese) [陈子文, 胡宗锐, 熊扬凡, 王沛, 余永, 彭森, 杨明金. 2023. 树冠环绕式仿形对靶施药机设计与试验. *农业工程学报*, 39(3): 23–32]
- Deng W, He XK, Zhang LD, Zeng AJ, Song JL, Zou JJ. 2008. Target infrared detection in target spray. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 28(10): 2285–2289 (in Chinese) [邓巍, 何雄奎, 张录达, 曾爱军, 宋坚利, 邹建军. 2008. 自动对靶喷雾靶标红外探测研究. *光谱学与光谱分析*, 28(10): 2285–2289]
- Dong JW, Pan L, Cao ZH, Zhan XM, Li YL, Sun ZQ, Liu WS, Ren GY. 2025. Design and experiment of tracked orchard target alignment and profiling sprayer machine. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 47(9): 251–260 (in Chinese) [董继伟, 潘良, 曹中华, 湛小梅, 李亚丽, 孙志强, 刘汶树, 任桂英. 2025. 履带式果园对靶仿形施药机设计与试验. *农机化研究*, 47(9): 251–260]
- Dou HJ, Zhai CY, Wang X, Zou W, Li Q, Chen LP. 2022. Design and experiment of the orchard target variable spraying control system based on LiDAR. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(3): 11–21 (in Chinese) [窦汉杰, 翟长远, 王秀, 邹伟, 李琪, 陈立平. 2022. 基于LiDAR的果园对靶变量喷药控制系统设计与试验. *农业工程学报*, 38(3): 11–21]
- Fang KT, Zhou LF, You LH. 2022. Design and evaluation of orchard profiling pneumatic sprayer. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 43(3): 68–74, 83 (in Chinese) [房开拓, 周良富, 尤丽华. 2022. 果园仿形风送喷雾机构设计与试验. *中国农机化学报*, 43(3): 68–74, 83]
- Feng J, Liao NF, Zhao B, Luo YD, Li BJ, Dai ZF. 2008. Multispectral imaging techniques diagnosing plant diseases and insect pests using artificial neural networks. *Optical Technique*, 34(5): 717–720 (in Chinese) [冯洁, 廖宁放, 赵波, 罗永道, 李宝聚, 戴志福. 2008. 多光谱成像技术诊断植物病虫害的人工神经网络模型. *光学技术*, 34(5): 717–720]
- Fessler L, Sun XC, Wright WC, Zhu HP, Fulcher A. 2023. Intelligent, variable-rate spray technology reduces total pesticide output while controlling foliar disease of Shumard oak. *Journal of Environmental Horticulture*, 41(3): 109–120
- Gil E, Escolà A, Rosell JR, Planas S, Val L. 2007. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection*, 26(8): 1287–1297
- Giles DK, Delwiche MJ, Dodd RB. 1989. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics: orchard architecture and spray liquid savings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 43: 271–289
- Grella M, Gioelli F, Marucco P, Zwertvaegher I, Mozzanini E, Mylonas N, Nuyttens D, Balsari P. 2022. Field assessment of a pulse width modulation (PWM) spray system applying different spray volumes: duty cycle and forward speed effects on vines spray coverage. *Precision Agriculture*, 23(1): 219–252
- Han L, He XK, Wang CL, Liu YJ, Song JL, Qi P, Liu LM, Li T, Zheng Y, Lin GH, et al. 2022. Key technologies and equipment for smart orchard construction and prospects. *Smart Agriculture*, 4(3): 1–11 (in Chinese) [韩冷, 何雄奎, 王昌陵, 刘亚佳, 宋坚利, 齐鹏, 刘理民, 李天, 郑义, 林桂海, 等. 2022. 智慧果园构建关键技术装备及展望. *智慧农业*, 4(3): 1–11]
- He XK. 2017. Plant protection precision pesticide application technology and equipment. *Agricultural Engineering Technology*, 37(30): 22–26 (in Chinese) [何雄奎. 2017. 植保精准施药技术装备. *农业工程技术*, 37(30): 22–26]
- He XK. 2018. Spray system and application technology of plant protection UAV in China. *Agricultural Engineering Technology*, 38(9): 33–38 (in Chinese) [何雄奎. 2018. 我国植保无人机喷雾系统与施药技术. *农业工程技术*, 38(9): 33–38]
- He XK. 2020. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China. *Smart Agriculture*, 2(1): 133–146 (in Chinese) [何雄奎. 2020. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议. *智慧农业*, 2(1): 133–146]
- He XK. 2022. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: a review. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 389–397 (in Chinese) [何雄奎. 2022. 高效植保机械与精准施药技术进展. *植物保护学报*, 49(1): 389–397]
- He XK, Yan KR, Chu JY, Wang J, Zeng AJ, Liu YJ. 2003. Design and testing of the automatic target detecting, electrostatic, air assisted, orchard sprayer. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 19(6): 78–80 (in Chinese) [何雄奎, 严苛荣, 储金宇, 汪健, 曾爱军, 刘亚佳. 2003. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究. *农业工程学报*, 19(6): 78–80]
- Jiang CM, Ji C, Chen JC, Feng QC, Zhang J. 2025. Design and experiment of apple tree canopy contour spraying arm. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 46(3): 93–100 (in Chinese) [姜

- 春森, 纪超, 陈金成, 冯青春, 张景. 2025. 苹果树冠层仿形喷雾作业臂设计与试验. 中国农机化学报, 46(3): 93-100]
- Jiang HH, Niu CQ, Liu LM, Wang DW, Wang JS, Mao WH. 2020. Design and experiment of air volume control system of orchard multi-pipe air sprayer. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 51(Suppl. 2): 298-307 (in Chinese) [姜红花, 牛成强, 刘理民, 王东伟, 王家胜, 毛文华. 2020. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验. 农业机械学报, 51(增刊2): 298-307]
- Jin XJ, Liu T, Yang Z, Xie JC, Bagavathiannan M, Hong XW, Xu ZW, Chen X, Yu JL, Chen Y. 2023. Precision weed control using a smart sprayer in dormant bermudagrass turf. Crop Protection, 172: 106302
- Koc C, Duran H, Gerdan Koc D. 2023. Orchard sprayer design for precision pesticide application. Erwerbs-Obstbau, 65(5): 1819-1828
- Lee WS, Alchanatis V, Yang C, Hirafuji M, Moshou D, Li C. 2010. Sensing technologies for precision specialty crop production. Computers and Electronics in Agriculture, 74(1): 2-33
- Lei XH, Yuan QC, Xyu T, Qi YN, Zeng J, Huang K, Sun YH, Herbst A, Lyu XL. 2023. Technologies and equipment of mechanized blossom thinning in orchards: a review. Agronomy, 13(11): 2753
- Li JH. 2017. Design of directional air-blowing wolfberry sprayer. Master thesis. Yinchuan: Ningxia University (in Chinese) [李进海. 2017. 定向风送式枸杞喷雾机的研制. 硕士学位论文. 银川: 宁夏大学]
- Li LL, He XK, Song JL, Liu Y, Wang ZC, Li JY, Jia XM, Liu ZX. 2017a. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 33(16): 56-63 (in Chinese) [李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 刘杨, 王志翀, 李进耀, 贾晓铭, 刘志雄. 2017a. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验. 农业工程学报, 33(16): 56-63]
- Li LL, He XK, Song JL, Wang XN, Jia XM, Liu CH. 2017b. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 33(1): 70-76 (in Chinese) [李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 王潇楠, 贾晓铭, 刘朝辉. 2017b. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验. 农业工程学报, 33(1): 70-76]
- Li Q, Dou HJ, Zhai CY, Gao YY, Yang S, Zhao CJ. 2024. Design and test of the airflow adjustment test bench for orchard air-assisted spraying. Journal of Agricultural Mechanization Research, 46(2): 132-138 (in Chinese) [李琪, 窦汉杰, 翟长远, 高原源, 杨硕, 赵春江. 2024. 果园风送喷雾风力调控试验台设计及试验. 农机化研究, 46(2): 132-138]
- Li WW, Jiang SJ, Xu PF, Ma HT, Yang SH, Zheng YJ. 2023. Design and experiment of self-propelled small target following sprayer for hilly orchard. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 54(9): 188-197 (in Chinese) [李文伟, 江世界, 徐平凡, 马恒涛, 杨圣慧, 郑永军. 2023. 丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机设计与试验. 农业机械学报, 54(9): 188-197]
- Li YF, Han L, Liu LM, Huang Z, Wang CL, He XK. 2023. Design and spray performance evaluation of an air-ground cooperation stereoscopic plant protection system for mango orchards. Agronomy, 13(8): 2007
- Liu H, Du ZP, Yang F, Zhang Y, Shen Y. 2024. Real-time recognizing spray target in forest and fruit orchard using lightweight PointNet. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 40(8): 144-151 (in Chinese) [刘慧, 杜志鹏, 杨锋, 张钰, 沈跃. 2024. 基于轻量化PointNet网络的林果园喷雾作业靶标实时识别方法. 农业工程学报, 40(8): 144-151]
- Ma XB, Sun XW, Zhang DQ, Wang LY. 2017. Time delay estimation for automatic target spraying system based on machine vision. Journal of Agricultural Mechanization Research, 39(6): 50-54, 59 (in Chinese) [马秀博, 孙熊伟, 张德青, 王良燕. 2017. 基于机器视觉的对靶喷雾系统时延估计方法研究. 农机化研究, 39(6): 50-54, 59]
- Mao ZX, Xue XY, Sun Z, Xu Y, Zhou QQ, Jiao YX, Zhou HW, Ding SM. 2025. Design and testing of a PLC-controlled pressure stabilization system for targeted spraying on heading vegetables. Agriculture, 15(5): 452
- Nelson R, Krabill W, Tonelli J. 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. Remote Sensing of Environment, 24(2): 247-267
- Ning ZT, Luo LF, Ding XM, Dong ZQ, Yang BF, Cai JH, Chen WL, Lu QH. 2022. Recognition of sweet peppers and planning the robotic picking sequence in high-density orchards. Computers and Electronics in Agriculture, 196: 106878
- Palacin J, Salse JA, Sanz R, Ribes-Dasi M, Masip J, Arno J, Llores J, Valles JM, Escola A, Massana P, et al. 2006. Real-time tree foliage estimation using a ground laser scanner//2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. IEEE, pp. 1227-1232
- Qi P, He XK, Liu YJ, Ma Y, Wu ZM, Wang JW. 2022. Design and test of target-oriented profile modeling of unmanned aerial vehicle spraying. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 15(3): 85-91
- Qi YC, Yang HM, Chen YF, Zhou X, Ma Y, Wang XN. 2022. Research status and prospect of variable spray target detection technology. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 43(6): 83-89, 149 (in Chinese) [齐亚聪, 杨会民, 陈毅飞, 周欣, 马艳, 王学农. 2022. 变量喷雾靶标探测技术研究现状与展望. 中国农机化学报, 43(6): 83-89, 149]
- Qiao BY, Han L, Wang ZC, Li YF, Wang LX, Han H, Liu YJ, He XK. 2024. Design and testing of an intelligent variable-rate spraying system based on LiDAR-guided application. Crop Protection, 184: 106874
- Qiao BY, He XK, Wang ZC, Han L, Liu WH, Dong X, Liang WP. 2020. Development of variable-rate spraying system for high clearance wide boom sprayer based on LiDAR scanning. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 36(14): 89-95 (in Chinese) [乔白羽, 何雄奎, 王志翀, 韩冷, 刘伟洪, 董祥, 梁文鹏. 2020. 基于LiDAR扫描的高地隙宽幅喷雾机变量施药系统研制. 农业工程学报, 36(14): 89-95]
- Qin JF, Wang W, Mao WJ, Yuan MX, Liu H, Ren ZG, Shi SQ, Yang

- FZ. 2022. Research on a map-based cooperative navigation system for spraying-dosing robot group. *Agronomy*, 12(12): 3114
- Qiu BJ, Yan R, Ma J, Guan XP, Ou MX. 2015. Research progress analysis of variable rate sprayer technology. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 46(3): 59-72 (in Chinese) [邱白晶, 闫润, 马靖, 管贤平, 欧鸣雄. 2015. 变量喷雾技术研究进展分析. *农业机械学报*, 46(3): 59-72]
- Qu F. 2017. Study on disease detection and precision spray method of fruit trees and key technical equipment. PhD thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [曲峰. 2017. 果树病害检测与精准喷施方法及关键技术装备研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Ren ZG, Liu ZJ, Yuan MX, Liu H, Wang W, Qin JF, Yang FZ. 2022. Double-DQN-based path-tracking control algorithm for orchard traction spraying robot. *Agronomy*, 12(11): 2803
- Ritchie JC, Evans DL, Jacobs D, Everitt JH, Weltz MA. 1993. Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter. *Transactions of the ASAE*, 36(4): 1235-1238
- Sarkis S, Issa I, Abou Jaoude D, Talhouk S. 2024. Leveraging deep learning for the reconstruction of plant hyperspectral data from RGB images//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, pp. 8058-8063
- Shu YP, Li QJ, Zhou HP, Tao R, Xu LY. 2020. Design of variable rate spray control system based on LiDAR detection. *China Forestry Science and Technology*, 5(1): 139-147 (in Chinese) [束义平, 李秋洁, 周宏平, 陶冉, 许林云. 2020. 基于激光雷达探测的变量喷雾控制系统设计. *林业工程学报*, 5(1): 139-147]
- Song JL, He XK, Zhang J, Liu YJ, Zeng AJ. 2012. Design of Π -type recycling tunnel sprayer. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 43(4): 31-36 (in Chinese) [宋坚利, 何雄奎, 张京, 刘亚佳, 曾爱军. 2012. “ Π ”型循环喷雾机设计. *农业机械学报*, 43(4): 31-36]
- Tian Y, Ding SM, Xue XY, Xu Y, Sun Z, Jiao YX. 2022. Research on the dosage monitoring method of diaphragm pump based on acoustic signal. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 43(6): 142-149 (in Chinese) [田勇, 丁素明, 薛新宇, 徐阳, 孙竹, 焦雨轩. 2022. 基于声信号的隔膜泵施药量监测方法研究. *中国农机化学报*, 43(6): 142-149]
- Wang DK, Yu FH, Xu TY, Chen CL, Yao WX. 2022. Research on precision control method of variable spray system based on single neuron PID. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 43(1): 61-66 (in Chinese) [王定康, 于丰华, 许童羽, 陈春玲, 姚伟祥. 2022. 基于单神经元PID的变量喷雾系统精准控制方法研究. *中国农机化学报*, 43(1): 61-66]
- Wang GE, Hong TS, Li J, Ke XR, Yue XJ. 2004. Position control system of profile modeling spray for fruit trees. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 20(3): 81-84 (in Chinese) [王贵恩, 洪添胜, 李捷, 可新荣, 岳学军. 2004. 果树施药仿形喷雾的位置控制系统. *农业工程学报*, 20(3): 81-84]
- Wang PG, Saiful Hanif A, Yu SH, Lee CG, Ho Kang Y, Lee DH, Han XZ. 2024. Development of an autonomous drone spraying control system based on the coefficient of variation of spray distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227: 109529
- Wei J, Salyani M. 2005. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: phase 2, foliage density measurement. *Transactions of the ASAE*, 48(4): 1595-1601
- Wei ZM, Xue XY, Salcedo R, Zhang ZH, Gil E, Sun YT, Li QL, Shen JX, He QH, Dou QQ, et al. 2023. Key technologies for an orchard variable-rate sprayer: current status and future prospects. *Agronomy*, 13(1): 59
- Xiang HT, Zheng JQ, Zhou HP. 2004. Real-time tree image acquisition and recognition system based on machine vision. *Scientia Silvae Sinicae*, 40(3): 144-148 (in Chinese) [向海涛, 郑加强, 周宏平. 2004. 基于机器视觉的树木图像实时采集与识别系统. *林业科学*, 40(3): 144-148]
- Xu SR, Liu WC, Zeng J, Jiang YY, Zhang LK, Li TJ. 2021. Review and prospect of plant protection in China for 70 years. *China Plant Protection*, 41(4): 29-32 (in Chinese) [徐树仁, 刘万才, 曾娟, 姜玉英, 张力科, 李天娇. 2021. 我国植物保护70年回顾与展望. *中国植保导刊*, 41(4): 29-32]
- Xue XY, Xu XF, Li Z, Hong TS, Xie JX, Chen JZ, Song SR. 2020. Design and test of variable spray model based on leaf wall area in orchards. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(2): 16-22 (in Chinese) [薛秀云, 许旭锋, 李震, 洪添胜, 谢家兴, 陈建泽, 宋淑然. 2020. 基于叶墙面积的果树施药量模型设计及试验. *农业工程学报*, 36(2): 16-22]
- Yu BJ. 2014. Tree-profiling multi-joint sprayer and its key components. Master thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University (in Chinese) [遇宝俊. 2014. 多关节树木仿形喷雾机及其关键部件研究. 硕士学位论文. 南京: 南京林业大学]
- Zhai CY, Zhu RX, Zhang ZJ, Ma LL, Zhang QY. 2010. Status analysis of precision pesticide application techniques. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 32(5): 9-12 (in Chinese) [翟长远, 朱瑞祥, 张佐经, 马亮亮, 张启遇. 2010. 精准施药技术现状分析. *农机化研究*, 32(5): 9-12]
- Zheng YJ, Chen BT, Lyu H, Kang F, Jiang SJ. 2020. Research progress of orchard plant protection mechanization technology and equipment in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(20): 110-124 (in Chinese) [郑永军, 陈炳太, 吕昊曦, 康峰, 江世界. 2020. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展. *农业工程学报*, 36(20): 110-124]
- Zhou J, He X, Landers AJ. 2012. Dosage adjustment for pesticide application in vineyards. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(6): 2043-2049
- Zhu H, Lan YB, Wu WF, Hoffmann WC, Huang YB, Xue XY, Liang J, Fritz B. 2010. Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles. *Journal of Bionic Engineering*, 7(3): 276-283
- Zou W, Wang X, Deng W, Su S, Wang SL, Fan PF. 2015. Design and test of automatic toward-target sprayer used in orchard//IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE, pp. 697-702