

分类号: S224
学号: 20222109023

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



苹果树冠层仿形装置及控制系统设计与试验

学位申请人	谭玉磊
指导教师	赵岩 教授 纪超 研究员 张景 副研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年05月

分类号: S224
学号: 20222109023

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



苹果树冠层仿形装置及控制系统设计与试验

学位申请人	谭玉磊
指导教师	赵岩 教授 纪超 研究员 张景 副研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年05月

**Design and Experiment of an Apple Tree Canopy Profiling Device
and Control System**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Tan Yu-lei

(Agricultural Mechanisation Engineering)

Dissertation Supervisor: Zhao Yan

May,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：谭玉磊

时间：2025年5月18日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：谭玉磊

时间：2025年5月18日

导师签名：纪超

时间：2025年5月18日

摘要

中国是世界上最大的苹果生产国，苹果产量在全球总产量中占比超过 50%，新疆是中国的重要苹果生产基地。2023 年全疆苹果产量 216 万吨。病虫害防治是果园生产中的重要环节，传统施药方式往往存在农药过量施用和药液飘移的问题，农药利用率仅有 20%~30%，对果园周边的土壤、水源和空气造成污染，甚至对生态系统造成破坏。因此，果园施药作业迫切需求高精度、高效率、自动化的果树冠层对靶施药机械，为此设计了一种 9 自由度摇臂式果园仿形作业装置，并设计了仿形对靶施药控制系统。通过控制机具仿形包络苹果树冠层，提高喷雾作业精准度、提升药液利用率、改善喷施均匀性。主要研究内容如下：

(1) 根据测量的苹果园果树参数，设计了 9 自由度摇臂式仿形装置，装置包含 3 个平移自由度与 6 个旋转自由度。其中仿形作业臂设计为单侧仿形结构，主要由主臂、上侧臂、下侧臂、上小臂、下小臂、水平伸缩臂、旋转机构以及驱动各作业臂的电动推杆、减速电机组成。

(2) 基于拉格朗日法建立装置动力学方程，分析装置动力学特性，基于 Adams 建立装置动力学模型，通过分析装置在运动过程中的受力情况验证装置设计的合理性。同时建立仿形作业臂各关节坐标系，对仿形作业臂进行正运动学分析、逆运动学分析，通过 Simulink 仿真验证了运动学算法的准确性，为控制系统设计提供理论支撑。

(3) 完成作业臂仿形控制系统设计。苹果树冠层仿形控制系统主要由单片机系统、有刷直流电动推杆、电机驱动模块、超声波测距模块、人机交互模块、姿态检测模块等组成，基于 STM32F103ZET6 设计单片机系统，并设计了直流有刷电机驱动模块作为从控制器接收来自单片机信号调节多路电动推杆伸缩。采用蓝牙模块进行上下位机通讯，基于 Android Studio 开发了上位机 APP，实现了通讯参数设定、控制指令设置、机具作业信息显示（作业时长、各点位超声波检测值）、故障状态显示等功能。运用自适应卡尔曼滤波降低超声波传感器测量冠层参数误差。采用神经网络整定 PID 闭环控制算法调节电动推杆伸缩以保证各检测点位到果树距离维持在设定值。

(4) 开展田间试验测定作业臂最大定位偏差与仿形时间，结果表明：超声波传感器各点位距离果树冠层 0.6m、0.8m、1.0m 处的作业臂最大定位偏差分别为 32mm、41mm、48mm；平均仿形时间分别为 43.46s/棵、26.78s/棵、15.52s/棵，满足设计要求。以平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率和施药变异系数作为量化指标，进行了苹果树冠层仿形对靶施药控制系统作业效果验证试验。结果表明：仿形对靶施药平均雾滴密度为 72.4 个/cm²，平均雾滴沉积量为 2.03μL/cm²，药液附着率为 49.8%，施药变异系数为 26.4%。相同作业条件下，仿形对靶施药相比定距对靶平均雾滴密度、平均雾滴沉积量、药液附着率分别提升 64.2%、40%、29.7%，施药变异系数下降 42.5%，提升了药液利用率与施药均匀性。

关键词：苹果树冠层；自动仿形；摇臂式仿形机构；仿形控制系统；精准施药

Abstract

China is the world's largest apple producer, accounting for over 50% of global apple output. Xinjiang serves as a vital apple production base in China, with a total apple yield of 2.16 million metric tons in 2023. Pest and disease control is a critical aspect of orchard management. Traditional pesticide application methods often suffer from excessive pesticide use and spray drift, with a utilization rate of only 20% - 30%, leading to pollution of soil, water, air, and ecosystem damage in surrounding areas. To address these challenges, there is an urgent demand for high-precision, efficient, and automated canopy-targeted pesticide application machinery. A 9-degree-of-freedom (DOF) rocker-type orchard profiling arm and a profiling-targeted spraying control system were developed. By controlling the profiling mechanism to envelop the apple tree canopy, the system improves spraying accuracy, enhances pesticide utilization, and optimizes spray uniformity. The main research components are as follows:

(1) Based on the measured parameters of apple orchard trees, a 9-degree-of-freedom swing-arm profiling device has been designed. The device consists of 3 translational degrees of freedom and 6 rotational degrees of freedom. The profiling arm is configured as a unilateral structure, primarily comprising a main arm, upper arm, lower arm, upper forearm, lower forearm, horizontal telescopic arm, rotating mechanism, as well as electric push rods and geared motors driving each arm.

(2) The dynamic equations of the device are established based on the Lagrangian method to analyze its dynamic characteristics. A dynamic model of the device is developed using Adams, and the rationality of the design is verified by analyzing force conditions during motion. Coordinate systems are established for each joint of the profiling manipulator, followed by forward and inverse kinematic analyses. The accuracy of the kinematic algorithms is validated through Simulink simulations, providing theoretical support for control system design.

(3) The profiling control system for apple tree canopy operations integrates a microcontroller system (STM32F103ZET6) with brush-type DC linear actuators, motor drivers, ultrasonic ranging modules, HMI, and BeiDou positioning modules. A DC motor driver module serves as a slave controller to regulate actuator motions via microcontroller signals. Bluetooth enables upper-lower computer communication, with an Android Studio-developed APP enabling parameter configuration, control commands, operation data display (duration, ultrasonic values), and fault diagnostics. Adaptive Kalman filtering compensates for measurement errors caused by orchard terrain unevenness and tractor nonlinear

motion. A neural network-tuned PID closed-loop algorithm maintains preset distances between monitoring points and trees through actuator adjustments.

(4) The experiment on the maximum positioning deviation of the operating arm and contouring time measurement showed that: The maximum positioning deviations of the ultrasonic sensor at distances of 0.6m, 0.8m, and 1.0m from the apple tree canopy were 32mm, 41mm, and 48mm, respectively; The average contouring times per tree were 43.46 s/tree, 26.78 s/tree, and 15.52 s/tree, correspondingly. Using quantitative indicators including average droplet density, average droplet deposition, liquid attachment rate, and spraying variation coefficient, the operational effectiveness of the contouring target-oriented spraying control system for apple tree canopies was verified. The results demonstrated that the contouring target-oriented spraying achieved an average droplet density of 72.4 droplets/cm², average droplet deposition of 2.03 μL/cm², liquid attachment rate of 49.8%, and spraying variation coefficient of 26.4%. Under identical operating conditions, compared with fixed-distance target-oriented spraying, the contouring target-oriented spraying exhibited significant improvements: 64.2% increase in average droplet density, 40% enhancement in average droplet deposition, and 29.7% elevation in liquid attachment rate, along with a 42.5% reduction in spraying variation coefficient. These results indicate substantial improvements in both pesticide utilization efficiency and spraying uniformity.

Key words: Apple tree canopy; Automatic profiling; Rocker-arm profiling mechanism; Shape-following control system; Precision pesticide application

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 仿形装置及控制系统研究现状.....	2
1.2.1 国外研究现状.....	3
1.2.2 国内研究现状.....	4
1.3 研究目标与内容.....	6
1.3.1 研究目标.....	6
1.3.2 研究内容.....	6
1.4 技术路线.....	7
1.5 本章小结.....	8
第2章 苹果树冠层仿形装置结构设计与分析.....	9
2.1 作业环境与对象.....	9
2.1.1 果园种植模式.....	9
2.1.2 果树外形参数.....	9
2.2 仿形装置总体方案确定.....	10
2.2.1 仿形装置组成.....	10
2.2.2 仿形作业臂结构设计.....	13
2.2.3 仿形装置虚拟装配.....	18
2.3 仿形作业臂静力学分析.....	19
2.3.1 受力计算.....	19
2.4 仿形作业臂动力学分析.....	23
2.4.1 动力学数学模型的建立.....	23
2.4.2 动力学仿真分析.....	30
2.5 仿形作业臂运动学分析.....	31
2.5.1 机构坐标系的建立.....	31
2.5.2 正运动学分析.....	32

2.5.3 逆运动学分析	34
2.5.4 正、逆运动学分析 Matlab 仿真验证	34
2.6 本章小结	36
第 3 章 苹果树冠层仿形装置控制系统设计	37
3.1 控制系统总体方案设计	37
3.1.1 控制需求	37
3.1.2 硬件架构总体设计	38
3.2 控制系统硬件选型与设计	38
3.2.1 信号采集系统设计	38
3.2.2 信号处理系统设计	43
3.2.3 执行模块选型	46
3.2.4 硬件系统总述	47
3.3 控制系统软件设计	48
3.3.1 信号采集程序设计	48
3.3.2 基于自适应卡尔曼滤波的苹果树冠层外形检测算法	49
3.3.3 基于神经网络整定的自适应 PID 闭环控制算法	50
3.3.4 人机交互系统设计	54
3.4 仿形控制系统工作流程	56
3.5 本章小结	57
第 4 章 样机作业参数测定与台架试验	58
4.1 物理样机搭建	58
4.2 作业空间测定	58
4.3 作业臂定位偏差与仿形时间测定台架试验	60
4.4 本章小结	63
第 5 章 田间试验	64
5.1 作业臂最大定位偏差与仿形时间测定试验	64
5.1.1 试验准备	64
5.1.2 试验方案	64
5.1.3 试验结果与分析	64
5.2 仿形对靶施药作业效果验证试验	65
5.2.1 试验准备	65
5.2.2 试验方案	65
5.2.3 试验结果与分析	67
5.3 本章小结	69

第 6 章 结论与展望	71
6.1 结论	71
6.2 展望	72
参考文献	73
致 谢	78
作者简介	79
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表	80

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

新疆地貌上呈现“三山夹两盆”的特征，处于温带大陆性干旱气候区，降水稀少且蒸发强烈^[1]。其气候空间差异表现为：南疆平原区呈现长无霜期特征（180-220天），年平均温度维持在10℃以上；而北疆无霜期缩短至约150天，年均温度降至5.5℃水平^[2]。该区域光热资源配置特征显著：全疆年日照时数达2600-3600小时，昼夜温度波动显著，形成优质光热资源组合。这种独特的气候条件与林果作物生长需求高度契合，为林果产业提供了优越的自然基础^[3]。新疆已成为我国苹果主要生产省之一，2023年全疆苹果种植面积82千公顷，产量216万吨^[4]，且种植面积与总产量在全国占比逐年增加。

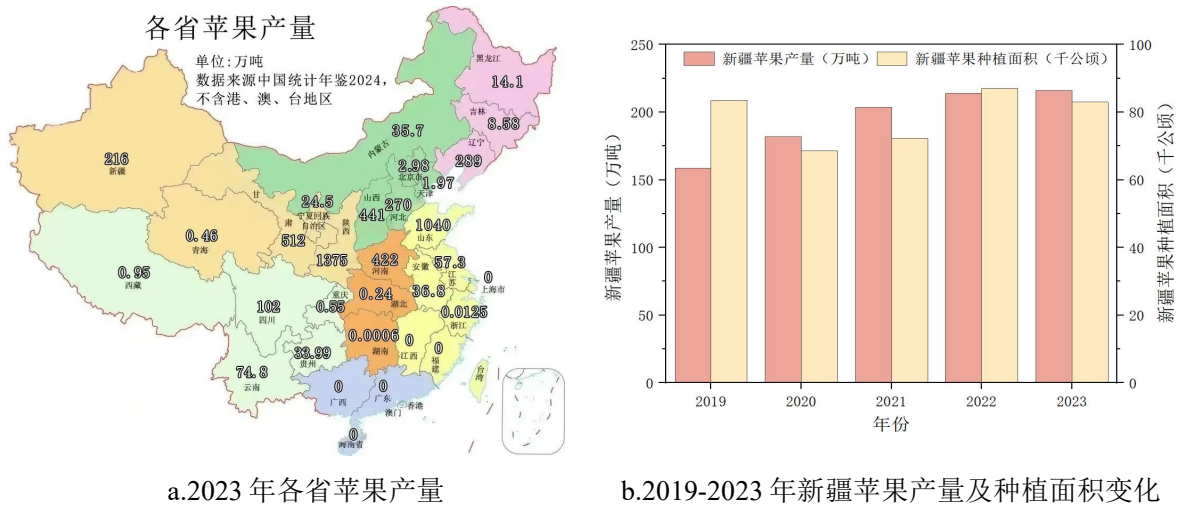


图 1-1 2019-2023 年新疆苹果种植面积及产量柱状图

Fig 1-1 Bar Chart of Apple Cultivation Area and Output in Xinjiang from 2019 to 2023

病虫害是导致果树减产和果实品质下降的主要原因之一，病虫害防治是果园生产中的重要环节^[5]。合理的施药可以确保果实在生产过程中免受病虫害的污染，从而保障食品的卫生和安全，提高苹果产量与品质，减少果农经济损失^[6-7]。部分农药不仅具有杀虫杀菌的作用，还能为果树提供营养，促进果树生长。例如，一些叶面肥和植物生长调节剂可以提高果树的抗逆性，增强果树的免疫力，使果树更加健壮。

果园生产作业中，每年需喷洒各种农药共计8~15次，其工作量占到果园主要作业环节劳动量的25%^[8]。目前苹果树施药仍以人工背负药箱手动施药的传统施药方式为主，喷头与目标物之间的距离可控度不高且精度不足，导致雾滴在果树冠层表面分

布不均匀。而冠层内部仅靠过量的喷施实现病虫害防治，农药利用率仅有 20%~30%，远低于发达国家的 50%~60%。对果园周边的土壤、水源和空气造成污染，甚至对生态系统造成破坏^[9-10]；农药的过量使用问题不仅造成生产成本的增加，也影响了农产品质量安全与生态环境安全^[11]，由此衍生的药液飘移的问题对施药工人身体健康构成了严重威胁，残留农药超标导致人员中毒事件不时见诸报端。提升苹果树冠层施药过程中药液利用率与施药均匀性十分必要。国务院办公厅印发了《国务院办公厅关于加快转变农业发展方式的意见》（国办发〔2015〕59号），文件中强调提高农业资源（包括农药和化肥）的利用效率，通过科学施肥、精准用药等方式，减少不必要的浪费和污染，实现农药减量控害，促进病虫可持续治理^[12]。农业农村部发布的《到2020年农药使用量零增长行动方案》^[13]明确提出：构建资源节约与环境友好协同的病虫害持续防控体系，全面提升科学施药技术水平。方案要求将单位面积农药施用量控制在近三年平均值以下，力争2020年前实现农药总量零增长，同时推动主要农作物农药利用效率突破40%。为了达成这一目标，大力发展绿色环保型植保机械，研制先进植保施药机械，提高果园施药作业农药利用率是有效途径；仿形喷雾技术是提升药液利用率的主要手段之一^[14]。药液喷施装置的喷雾距离是影响喷雾效果的重要技术参数，测定果树冠层结构，并实现喷雾距离自动调节，将有效提升药液利用率与施药均匀性^[15]。

果园精准施药技术是精准农业体系的重要组成部分，是解决果园传统人工施药劳动强度大、效率低、药液浪费严重和农业生态环境污染的有效途径之一^[16]。果树精准仿形技术服务于果树精准施药技术，即根据苹果树施药种类和用量，综合运用传感器技术、自动控制技术、电气设计技术等，实现针对果树冠层的靶向施药，从而改善喷雾品质，提高的药液利用率和用药经济效益，降低生产成本，减少环境污染，解决跑冒滴漏现象^[17-18]，助力果园增产稳产。因此，研究果树冠层仿形装置及控制系统具有重要意义。

本课题来自兵团科技创新骨干人才计划项目—果园多自由度作业臂的研究、兵团英才支持计划-青年项目、兵团科技合作计划项目等科研项目的相关研究任务。

1.2 仿形装置及控制系统研究现状

果树仿形喷雾技术作为精准农业领域的重要创新，其核心在于通过冠层形态感知与执行机构协同控制实现药剂精准投送^[19]。该技术体系涵盖三维形态识别、动态轨迹拟合、雾化靶向调控等关键技术模块。国外喷雾作业标准制订较为严格，对提高农药有效率要求较高，美国、欧洲、日本等国果园种植农艺非常规范，标准化程度较高，行距、株距种植时兼顾机械化作业要求，施药作业大多采用自走式高压风送喷雾机具

或隧道循环式喷雾机具。以法国、意大利等为代表的欧洲国家，果园喷雾机型较多，如传统风送式、柔性导管式、隧道循环式、风帘式、圆盘风扇仿形式、精准变量式等。近年来，果树仿形低量施药技术，循环喷雾技术，智能施药技术、无人驾驶施药技术等发展迅速，且整机装备向着多样化、系列化、多功能化方向发展。就目前而言，市面所售风送仿形喷雾机在提高农药利用率、减少农药施用量等方面较突出。

1.2.1 国外研究现状

发达国家在智能化植保装备研发方面处于领先地位。MAHMUD 等^[20]研发了一种基于 LiDAR 的分区树冠密度测量系统，用于精准施药。该系统通过 LiDAR 传感器实时扫描果树冠层，获取高分辨率三维点云数据，并划分区域分析冠层密度分布，动态调控喷雾机各喷头流量。试验表明，与传统均匀喷洒相比，该系统显著降低农药使用量，同时确保冠层覆盖均匀性，适用于果园复杂地形。

MANANDHAR 等^[21]评估了激光引导变量喷雾系统改造传统定速喷雾器的经济可行性。通过田间试验，验证激光传感技术可以实时识别作物冠层密度并调节喷雾量。成本效益分析结果显示，改造后的系统可减少 30-40% 农药使用量，节省约 25% 施药成本，且投资回收期短于两年。该系统尤其适用于中小型农场。

Llorens J^[22]等通过对比试验验证了集成多传感器技术的变量施药系统性能。该装置通过多传感器融合技术实时采集植株高度、冠幅、体积及叶面积指数等指标，构建了冠层特征参数的精准预测模型，为实现变量施药作业的形态自适应控制提供数据支持。

部分科研团队聚焦针对冠层外形动态调控优化执行机构，从而实现根据果树冠层外形变化进行自适应施药。斯洛文尼亚 Osterman 与 Tone 等^[23]构建了基于三维点云扫描的喷杆位姿解算模型，通过定位算法计算喷头最佳位置并调控液压执行装置运动。田间验证表明该变量施药系统较传统方式显著减少药液漂移与地表沉积量，有助于降低农药施用量。Hocevar 团队^[24]基于 6 自由度机械臂构建了激光引导式自适应喷雾平台，通过逆向运动学算法求解各关节运动轨迹，确保喷头组与冠层外形轮廓间维持最佳作业距离。Miranda-Fuentes 等^[25]设计基于超声测距反馈的闭环控制系统实时调节喷雾装置与果树冠层的空间位姿，结合轴流风机多维姿态调节实现靶标精准覆盖。MAGHSOUDI 等^[26]开发了一种基于超声波传感器的精准施药系统，用于优化果园的农药喷洒效率。该系统通过实时检测树冠的密度、体积和高度，动态调整喷雾量和喷头角度，实现按需施药。试验表明，与传统方法相比，该系统减少 20-30% 农药用量，同时维持有效防治效果。研究验证了超声波技术在复杂果园环境中的稳定性，为降低农业污染、推动精准农业发展提供了实用解决方案。

变量施药技术的集成应用方面，Gil 等^[27]基于 Arrow-F1000 平台融合 LiDAR 与超

声波传感技术，建立了果树冠层体积与施药量的映射模型。Durand-Wayland 公司开发的 SmartSpray 系统采用超声波阵列实时获取冠层拓扑参数，通过无线数传模块与中央处理单元形成闭环控制系统，实现喷雾幅宽与流量的动态调节。SHEN 等^[28]设计基于变量喷雾的仿形对靶施药机，施药量降幅达 47%-73%。ABBAS I^[29]等探讨了实时传感器技术（Variable-Rate Spraying, VRS）在农业变量喷雾中的关键作用及其应用进展。作者通过对不同传感器的优缺点进行比较，认为多传感器融合和智能算法的应用可提升数据可靠性及决策效率，但实际部署仍面临环境干扰、系统延迟、设备成本及规模化可行性等挑战。案例研究表明，VRS 技术可降低 20%-50% 的农药使用量，同时提高作物产量。

1.2.2 国内研究现状

我国植保机械研究始于 20 世纪 30 年代浙江省立植物病虫害防治所设立的专项实验室^[30]。初期以引进仿制国外手动喷雾器为主，60 年代后逐步进入半机械化阶段，开发出背负式手动喷雾器、机动式弥雾机等装备，但智能化水平较低。改革开放后，随着农业现代化需求增长，许多科研单位围绕果园的高效喷雾、药液沉积等技术进行了大量基础理论与新产品样机开发，取得了一系列科研成果：1983 年首台国产静电喷雾器问世；90 年代起重点突破低容量喷雾技术，推动农药利用率提升至 30% 以上；21 世纪以来，国家 863 计划、重点研发计划等专项支持加速技术革新，植保无人机、自走式变量喷雾机等智能化装备快速发展。2016 年农业农村部启动“农药零增长”行动后，精准施药技术成为研究热点，激光雷达导航、多光谱识别等新兴技术逐步应用于果园仿形喷雾、果园变量施药等领域。当前我国已形成覆盖地面、航空的多层次植保装备体系，但在机械结构设计、传感器融合、智能决策算法等方面仍需要进一步深入研究。

目前国内主流的仿形机构可分为三类：倒 U 型机构、变喷杆式机构与摇臂式机构^[31]，以下分别对三种机构的优缺点进行介绍：

倒 U 型机构采用多连杆铰接设计，其多自由度可提高果树冠层仿形精度，但该结构同样存在质量惯量较大导致的动态响应滞后问题。张建瓴等^[32]将工业机械臂结构形式引入果树喷雾中，构建了一种 9 自由度倒 U 型仿形机构，该机构由两个对称四杆机械臂组成，由转盘电动机带动绕中心轴转动，实现喷头的空间位置和姿态调整。数值仿真结果表明该装置基本上能根据果树外形产生仿形运动。霍鹏^[33]针对纺锤形果树开发了可折叠式倒 U 型喷杆，运用多体动力学仿真验证了机具稳定性，通过流场分析优化了喷雾条件参数，田间试验表明设计的仿树形喷杆施药装置能有效提高雾滴沉积覆盖率和分布均匀性，减少药液浪费和环境污染；该装置未安装自动控制系统，自动化和智能化水平具有提升空间。

变喷杆式机构通过液压-电动复合驱动实现多形态转换, 针对不同作业场景适应性更强。由于集成多自由度调节装置和传感器系统, 导致机械复杂度显著增加, 同时精密液压驱动部件易受田间粉尘侵蚀, 维护成本较固定喷杆式机构更高。张慧春等^[34]设计了一种林木喷雾机仿形机臂, 通过调整伸缩臂的角度和长度, 可实现“一”字形喷杆式喷雾、“门”字形喷雾和仿形喷雾, 适应不同作物和作业环境。张疼等^[35]研发了一种集成气流辅助系统的自走式喷雾机, 提升了雾滴沉积量、降低了雾滴飘移率, 但其样机没有实现仿形式喷雾模式的自动调节, 控制精度仍有待进一步提升。

摇臂式机构因其结构简单、质量较小的优点而备受关注, 房开拓等^[36]设计了一种多自由度对称式二级摇臂机构, 通过实时调节喷头的空间位置和姿态, 使雾流最大范围流向树冠, 实现冠层的全覆盖。试验结果表明雾滴沉积均匀性提升 46.3%, 变异系数降低 31.8%, 提高了农药利用率和施药效果。张慧春等^[37]研发的树冠仿形作业系统采用液压驱动装置动态调节仿形机构, 搭载超声波传感器实时获取冠层轮廓参数, 集成升降模块调节作业高度适应不同果树, 生成控制参数驱动机构仿形贴合果树冠层, 结合冠层表型特征反馈精准调控施药参数。李杰^[38]等立足柑橘施药, 基于摇臂式仿形喷雾机添加 3 路风机, 通过 CFD 模拟技术, 成功建立了果园风送式喷雾机雾滴运动轨迹及沉积模型, 并验证了其在 1.0m 范围内具有较好的准确性。

对果树冠层外形轮廓的实时探测是实现精准对靶仿形的前提条件, 果园喷雾机械与探测传感器相结合是实现自动仿形喷雾的技术主线^[39]。国内目前针对果树冠层的探测技术较多^[40], 主要有红外测量^[41]、超声波测量^[42-43]、视觉探测^[44-45]与激光测量^[46-47]等单一测量与组合测量技术。高斌^[48]研制了一种基于超声探测的果园对靶变量施药系统, 通过超声波传感器实时探测果树树冠体积, 结合车速、流量等信息, 利用 PWM 控制技术实现变量施药。肖珂等^[49]通过对果树树冠形状与树干位置进行探测实现环绕仿形对靶施药, 药液附着率相比于定距施药提升了 18.66%, 节约 30.25% 的药液。根据传感器探测靶标信息^[50]控制执行装置运动从而实现对果树冠层的精准仿形是实现仿形对靶施药的关键核心技术。张春龙等^[51]设计了一种果园机器人主动视觉探测系统, 主要包含多自由度云台、高清摄像头、图像处理模块及控制单元, 系统通过云台动态调整摄像头位姿, 结合深度视觉传感器获取果树三维信息, 实时识别树冠形态、果实分布及障碍物, 并基于目标定位数据规划机器人行进路径。其探测方法采用多尺度特征融合算法, 增强复杂光照下图像识别稳定性, 同步通过主动视觉反馈优化探测精度。该系统可适配果园巡检、精准喷药等场景, 实现非结构化环境中的高效目标探测与自主作业, 兼具环境适应性强、检测效率高等优势。在控制算法方面, PID、模糊控制、群体智能优化等先进算法逐步替代传统控制策略, 以提高果树冠层的探测与定位精度。

1.3 研究目标与内容

1.3.1 研究目标

以新疆常规种植果园苹果树冠层为研究对象，设计高精度仿形装置及配套控制系统，对改善传统果树喷雾作业喷头与目标物之间距离可控度不高、精度不足引起的药液利用率低、喷施均匀性差的问题具有重要意义，同时为实现果树智能、精准与高效施药作业提供技术支持。

1.3.2 研究内容

本文主要研究内容如下：

(1) 常规种植苹果园果树外形参数测量：实地进行苹果园苹果树数据采集并整理，测量的主要指标包括冠幅、树高、枝下高、行距、株距、树干直径等。

(2) 作业臂机械结构设计与分析：根据测量结果的最大值搭建 9 自由度摇臂式仿形作业装置，采用 CAXA、Solidworks 等软件设计作业臂组成部件并进行整机虚拟装配。基于拉格朗日方程建立动力学模型，揭示作业臂运动参数与驱动力矩的映射规律。将装配体导入 Adams 软件进行动力学分析，生成运动过程中各关节的受力情况；将软件生成结果与拉格朗日方程理论计算结果进行对比来验证模型正确性。由于作业臂上下对称、根据仿形作业臂几何关系建立作业臂上半部分的正运动学方程，并通过限制作业臂冗余自由度进行限制求解逆运动学方程，并通过 Simulink 搭建作业臂仿真模型，通过将电动推杆运动量与关节变量分别代入正逆运动学算法验证运动学算法的正确性。

(3) 仿形对靶施药控制系统设计：首先对控制需求进行分析，根据控制需求拟定控制方案；其次进行控制系统硬件设计与选型，通过嘉立创软件进行信号处理电路系统设计，根据控制需求进行硬件选型，搭建控制系统硬件架构并进行测试；再次编写控制算法，包括基于自适应卡尔曼滤波的闭环控制算法，基于神经网络的整定的自适应 PID 闭环控制算法；最后创制集成苹果树冠层仿形控制系统手机 APP 作为控制系统终端交互界面，系统 APP 应具备以下基本功能：①作业模式选择；②手动控制按键指令下达；③自动控制作业参数设定；④自动控制控制指令设置；⑤自动控制机具作业信息显示（作业时长、各点位超声波检测值）；⑥故障状态显示。

(4) 搭建仿形装置及控制系统，进行台架试验测定其作业精度与作业效率，进行田间作业臂最大定位偏差与仿形时间测定试验，并以雾滴沉积量、雾滴密度、药液附着率和雾滴体积中值直径作为量化指标，进行田间仿形对靶施药作业效果验证试验，验证仿形施药在药液附着率、施药均匀性上要优于定距施药。