果 树 学 报 2025，42（7）：1582-1609
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20240540

智慧化果园关键生产技术研究现状与进展

崔宏伟[1]，路晓轩[1]，杨亚青[1]，卢芯仪[1]，马 淏[1]，
姬江涛[1*]，金 鑫[1]，李秀珍[2]，赵紫梦[1]，曾宁宁[3]

（[1]河南科技大学农业装备工程学院，河南洛阳 471000；[2]河南科技大学园艺与植物保护学院，
河南洛阳 471000；[3]河南科技大学动物科技学院，河南洛阳 471000）

摘 要：随着农村人口老龄化的逐渐加剧，标准化果园智慧化生产已成为现代果园的发展方向。面向果园标准化生产模式，首先从信息感知、智能决策、精准作业、智慧管理4个方面，综述了智慧化果园生产的数字化感知、智能化决策、精准化作业、智慧化管理等四大关键技术的发展现状，在数字化感知技术中对果园生长装置的环境信息感知、对象信息感知、装备信息感知的国内外研究现状进行了对比分析；在智能化决策技术中对果园智能耕整、灌溉、疏花、施肥、施药、采摘等关键生产技术研究现状进行了分析讨论；在精准化作业技术中分别对农机自主导航作业、农机精准作业的关键技术装备进行了研究讨论。同时对果园智慧化系统集成进行了综述分析，主要包括果园巡检机器人、果园/果树管理机器人、果实采摘机器人以及智能农机多机协同作业等技术装备。最后，对国内标准化果园智慧化技术的主要发展方向给出了具体的研究思路，以期为标准化果园关键技术的发展提供参考。

关键词：果园；智慧农业；精准作业；智能农机；现代农业

中图分类号：S66 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-9980(2025)07-1582-28

Research status and progress on key technologies of intelligent orchard

CUI Hongwei[1], LU Xiaoxuan[1], YANG Yaqing[1], LU Xinyi[1], MA Hao[1], JI Jiangtao[1*], JIN Xin[1], LI Xiuzhen[2], ZHAO Zimeng[1], ZENG Ningning[3]

([1]College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China; [2]School of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China; [3]College of Animal Science and Technology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: With the aging of the rural population, standardized and intelligent orchard production has become a key development direction for modern orchards. Orchard production currently faces several challenges, including labor shortages, low mechanization levels, and inefficient resource utilization. Intelligent orchard technologies offer potential solutions to these problems by improving productivity, reducing costs, and minimizing resource waste. This study systematically reviews the four key technological areas of intelligent orchards: information perception, intelligent decision-making, precision operations, and intelligent management, and analyzes their current status, future directions, and applications in modern orchards based on recent research and developments at home and abroad. First, information perception technology forms the foundation of intelligent orchard production. By integrating various sensors, drones, and Internet of Things (IoT), orchards can achieve real-time, multidimensional monitoring of their environments, crop growth, and operational equipment. Environmental perception technologies cover factors such as climate, soil moisture, and temperature. These data are collected using tools like LiDAR, remote sensing, and soil sensors, helping orchard managers better understand the microen-

收稿日期：2024-11-14 **接受日期**：2025-04-19

基金项目：河南省科技攻关项目（242102111188）；国家自然科学基金（32401696）；“十四五”重点研发计划项目子课题（2023YFD2001105-2、2023YFD2001101-2）；河南省重点研发专项项目（241111111300）

作者简介：崔宏伟，男，副教授，工学博士，主要从事农业作物无损检测技术、农产品分级技术以及作物表型检测技术等农业信息化技术方向的研究。E-mail：chw19900405@126.com

***通信作者** Author for correspondence. E-mail：jjt0907@163.com

vironment of the orchard. Crop perception technology monitors the health, growth, and pest infestation status of trees using hyperspectral imaging, infrared technology, and other advanced sensors. This enables early interventions to prevent losses in yield or quality. Additionally, operational equipment perception technology provides real-time monitoring of the status and performance of agricultural machinery, supporting autonomous navigation and precision operations by providing crucial data for optimizing equipment use and ensuring efficient orchard management. By fusing multiple sources of information, intelligent orchards can monitor and manage their operations across the full lifecycle of the orchard, from planting to harvest. Secondly, intelligent decision-making systems are essential for achieving smart orchard production. By analyzing and processing the collected data, these systems can optimize various orchard production processes such as irrigation, fertilization, flower thinning, pesticide application, and harvesting. For example, intelligent irrigation systems analyze soil moisture levels and meteorological data to determine the best times and quantities for irrigation, ensuring efficient use of water resources. Fertilization and pesticide application systems adjust the timing and dosage based on the specific growth needs of the trees, promoting healthy growth while reducing the use of fertilizers and pesticides, thus minimizing environmental pollution. Additionally, smart harvesting systems use fruit maturity detection to schedule harvests efficiently, improving productivity while reducing fruit damage. Precision operations are a vital component of smart orchard production. Autonomous navigation technologies allow agricultural machinery to operate autonomously in the complex environments of orchards. Using LiDAR, vision-based navigation, and obstacle avoidance algorithms, machinery can complete tasks safely and efficiently. Precision operations are enhanced by real-time sensor data, which enables machinery to adjust its parameters automatically to ensure accuracy and quality. For example, precision fertilization and pesticide application systems adjust the amount applied based on the actual needs of each tree, improving resource utilization efficiency and production outcomes. In terms of system integration, intelligent orchards rely on cloud platforms to achieve unmanned and automated management. Orchard inspection robots collect real-time data on tree growth and pest status, which is uploaded to the cloud for analysis by intelligent decision-making systems. Orchard management robots carry out tasks such as fertilization, flower thinning, and pruning based on the instructions from the intelligent decision systems, executing complex operations automatically. Harvesting robots, equipped with visual recognition technology and deep learning algorithms, can assess fruit maturity and perform harvesting tasks efficiently. In multi-machine collaborative operation systems, several robots in the orchard are coordinated through cloud platforms to work together, improving overall efficiency. For example, during harvest seasons, harvesting robots and transport robots collaborate to ensure that picked fruits are swiftly transported to designated locations, reducing spoilage and enhancing workflow efficiency. Finally, this study looks forward to the future development direction of smart orchard technology and provides specific research ideas. Future smart orchard technology will place greater emphasis on multi-source information fusion, autonomous operation of agricultural machinery, and intelligent management throughout the entire process. By deeply integrating perception data from different sources, orchard managers can more accurately grasp the production dynamics of the orchard, further improving the scientificity of decision-making. The autonomous operation technology of agricultural machinery will continue to improve, achieving autonomous navigation and operation in more complex environments. The fully intelligent management system will optimize the production process, reduce operating costs, improve the overall production efficiency and fruit quality of the orchard through technologies such as big data analysis and cloud computing, in order to provide reference and guidance for the devel-

opment of key technologies in standardized orchards. In conclusion, the future of intelligent orchards lies in the continuous improvement and integration of these technologies. Through the development of more advanced sensing technologies, intelligent decision-making systems, and autonomous machinery, orchards will become more efficient, sustainable, and productive, helping farmers to manage their resources better while meeting the demands of modern agriculture. This will not only enhance orchard productivity and fruit quality but also contribute to the overall sustainability and competitiveness of the agricultural sector.

Key words: Orchard; Intelligent agriculture;Precise operation; Intelligent agricultural machinery; Modern agriculture

中国水果种植面积和产量均居世界首位，果园种植面积已达到1.280 8×10^7 hm^2，果业在中国农业农村经济发展中占有重要地位[1]。近年来，中国水果规模化生产优势明显，但与发达国家相比仍存在差距。例如目前中国果园中的施肥、除草、施药、疏花、剪枝、采收分级等农事活动主要依赖人工完成，在苹果园生产管理中，人工成本占到了总生产成本的60%以上，以美国、意大利为代表的欧美国家的果园综合机械化率超过80%，而中国目前仅为25.88%[2]，虽然部分作业环节已经实现机械化，但智能化程度相对较低[3]，且中国老龄化趋势日益加剧，未来有经验的工作人员将大幅减少。此外，果园生产面临劳动力短缺。另外，传统果园水、肥、农药投放全凭经验，管理手段粗放、效率低下，造成严重的资源浪费。种种问题表明，果园管理亟需实现由机械化向智能化的转型升级。

通过融合物联网、大数据、装备智能化等技术，可以有效解决中国传统果园生产中面临的劳动力短缺、农机作业和生产资料管理困难、生产效率低下及资源浪费等问题。这样不仅能减少人力投入、降低生产成本，还能通过精准水肥药管理实现农药和化肥的减施增效，减少环境污染，提升果园的产量和品质。韩冷等[4]在北京市平谷区初步构建了智慧梨园与智慧桃园，应用了智能信息获取系统、智能管理系统、智能作业装备系统、智能管理平台，结果表明，智慧果园生产模式可减少人工成本50%以上，节约农药用量30%~40%、肥料用量25%~35%、灌溉用水量60%~70%，综合经济效益提升32.5%。

目前中国智慧果园建设发展迅速，但大部分智慧果园项目尚未包含完整的信息管理平台和智能作业机具[5]，笔者在本研究中针对智慧化果园的系统架构、关键技术以及智慧化果园系统集成的研究现状进行了分析，总结了目前智慧果园在实际建设中存在的问题，并指出了智慧果园未来的发展方向和趋势，旨在探讨智慧果园的建设思路，以期为相关领域的研究与实践提供借鉴与参考。

1 智慧化果园系统架构

智慧化果园系统架构如图1所示，融合了数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理4大关键技术，构建了覆盖果园不同生产环节的无人化作业装备，并建立了果园智慧云管控平台。该智慧管控云平台能够解析感知到的信息，自主分配农机作业任务，调度农机完成耕作、种植、管理、收获、运输等各类作业任务，并实时监控与调控农机的作业状态。通过果园标准化基础设施建设，旨在突破信息感知、农机智能作业、智慧生产云管控等技术瓶颈，制定智慧果园建设的技术规程，从而实现果园生产全过程的智慧化和可持续运行。

2 智慧化果园关键技术

智慧果园的建设依赖于感知、决策、作业与管理四大核心环节的有机融合与高效协同，形成一个数据驱动、信息互通、智能反馈的闭环系统。感知环节通过多源传感器、无人机、机器人等终端设备对果树生长状态、环境参数和病虫害信息进行实时采集和数字化建模，为后续智能决策提供数据基础。决策环节依托大数据分析、机器学习和专家系统等技术，对采集数据进行深度处理与判断，输出作业指令与管理建议，实现针对性强、反应及时的智能决策。作业环节则根据决策结果，驱动采摘机器人、喷药机、施肥设备等智能装备进行精细化、高效率的田间作业，确保执行的准确性与一致性。在作业过程中产生的运行状态、作业质量与环境反馈信息被实时回

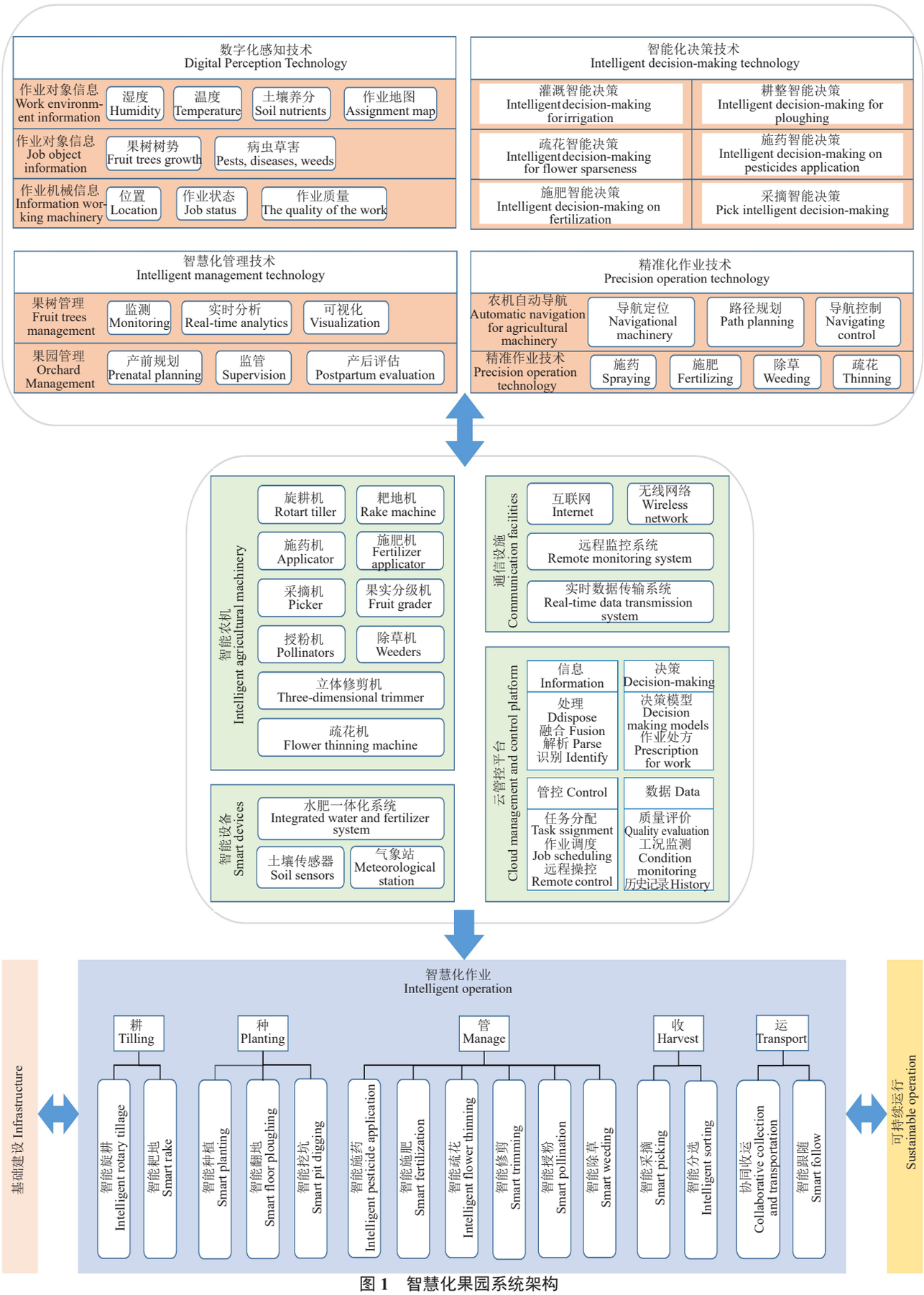


图 1　智慧化果园系统架构

Fig. 1　Intelligent orchard system architecture

传至管理平台，形成管理环节的基础数据支撑，使管理者能够动态掌握果园运行状况并优化生产策略。各环节之间信息高度互通、反馈及时、动态闭环，是智慧果园区别于传统果园管理模式的重要特征，体现了其系统化、智能化的发展方向。

2.1 数字化感知

数字化感知技术在果园管理中的应用主要体现在通过不同传感器对果园环境、果树和作业装备等信息的高精度感知3个层面（表1）。果园环境信息包括果园地貌、气候、果树位置等信息；果树信息包括果树种类、长势、病虫害以及产量等信息；作业装备信息包括作业装备位置、作业状态和作业质量等信息。

2.1.1 果园环境信息感知 果园环境信息包括果园地图和果树生长条件信息。果园地图信息包括果树位置、地块位置、地势地形、道路、房屋等地物目标特征信息，果树生长条件信息包括气候条件、土壤特性、养分含量等信息。

果园地图信息通常以数字地图的形式呈现，为农机智能化作业提供全面、精准的地理信息支持。果园数字地图一般通过激光雷达、深度相机等传感设备，结合载波相位差分技术，采集树体点云数据、可见光（RGB）图像及深度信息，并依据点云数据提取果树体积、冠层密度等关键参数[4]。同时，借助遥感技术获取果园整体的植被分布、土壤类型及地形特征等信息，进而构建包含地形地貌、果树分布与生长状态等多种要素的三维数字果园地图。冯涵等[6]采用手持式三维点云采集设备，结合即时定位与激

表1 数字化感知技术研究方法

Table 1 Research methodologies in digital sensing technologies

分类 Category	研究内容 Research content	研究方法 Methodology	性能 Performance	参考文献
果园作业环境信息感知 Perception of orchard operating environment information	三维虚拟果园构建 3D virtual orchard construction	采用SLAM-LOAM算法获取激光点云，结合Unity3D引擎实现轨迹可视化 The SLAM-LOAM algorithm was used to obtain the laser point cloud, and the trajectory was visualized by combining with the Unity3D engine	果树聚类准确率≥95.3% The accuracy rate of fruit tree clustering was ≥ 95.3%	[6]
	土壤水分的感知 Perception of soil moisture	多光谱技术反演土壤水分，融合NDVI等植被指数提升精度 Multispectral technology inverted soil moisture, and vegetation indices such as NDVI were integrated to improve accuracy	R^2为0.827，RMSE为0.787% R^2 was 0.827, and RMSE was 0.787%	[7]
	果树冠层三维重构与体积计算 Three- dimensional reconstruction and volume calculation of fruit tree canopies	毫米波雷达探测冠层结构，结合DBSCAN聚类算法分割点云计算体积 Millimeter-wave radar detection of canopy structure combined with DBSCAN clustering algorithm for segmenting point clouds to compute volume	相比传统几何法测量体积，体积计算准确率提升59.4% 59.4% more accurate volume calculations than traditional geometric volume measurements	[8]
果树信息感知 Fruit tree information perception	病虫害识别与分级 Pest and disease identification and classification	融合迁移学习与GoogLeNet模型 Fusing Migration Learning with GoogLeNet Models	识别精度达99.35%，危害程度分级精度达92.78% 99.35% identification accuracy and 92.78% hazard classification accuracy	[9]
	猕猴桃病虫害检测 Kiwifruit pest and disease detection	无人机遥感+地面传感器融合，空地多角度采集冠层叶片信息 UAV remote sensing + ground sensor fusion, air- ground multi- angle collection of canopy leaf information	检测准确率达到99.54% 99.54% detection accuracy	[10]
作业装备信息感知 Operational equipment information perception	果园机器人定位与建图方法 Orchard robot localization and map building methods	LiDAR/IMU紧耦合框架 LiDAR/IMU Tightly Coupled Framework	定位精度约0.05 m,均方根误差为0.016 1 m Positioning accuracy of about 0.05 m, root mean square error of 0.016 1 m	[11]
	果园开沟深度/宽度实时监测 Real-time monitoring of orchard furrow depth/width	LabVIEW上位机+Arduino下位机系统，集成超声波传感器 LabVIEW Upper + Arduino Lower System with Integrated Ultrasonic Sensor	深度误差≤3.7 cm（25~35 cm工况），宽度误差≤3.1 cm，数据更新频率毫秒级 Depth error ≤3.7 cm (25−35 cm working conditions), width error ≤3.1 cm, data update frequency of milliseconds	[12]

光测距技术，建立果园点云数据集，并利用Unity3D引擎构建果园三维场景，为数字果园地图的构建提供了新的实现路径。为满足果园冠层参数高精度测量的需求，Wang等[13]采用激光雷达与惯性测量单元（IMU）采集果园点云数据，结合三维同步定位与建图（SLAM）算法，实现了高精度果园环境地图的重建，其果树分割准确率达95.4%，冠高均方根误差为0.043 37，展现了较高的实用性和可靠性。这些研究成果不仅为果园数字地图构建提供了技术支撑，也为智能农机路径规划、果树个体管理与精准作业等环节奠定了坚实的数据基础，推动果园智能化管理向更加精细化、高效化方向发展。

果树生长环境信息包括一系列与果树生长、发育和产量密切相关的因素，如温度、湿度、光照、土壤含水量、营养元素含量等，这些因素对果树的健康以及果实的质量和产量都有着直接影响。其中，温度和光照是影响落叶果树休眠期与萌芽期的关键环境因子。研究表明，除了空气温度外，根域温度、光照周期及光质等因素同样对果树的生理状态具有显著调控作用。光照对果树从休眠到萌芽的过程发挥着重要作用，仅依赖空气温度来判断其生长阶段存在一定局限[14]。因此，在果树栽培管理中，应综合考虑多种环境因子的协同作用，以实现对果树生长过程的科学调控。此外，土壤养分状况也是决定果树健康生长的重要基础。Toselli等[15]提出了以土壤肥力监测为基础，结合精准农业技术开展土壤养分动态监测，可有效解决施肥量控制问题，实现施肥时间和剂量的精准调控，从而优化果树生长环境，提高养分利用效率，减少农业面源污染。

综上所述，果园作业环境信息的高精度感知，包括果园地图、气候条件以及土壤特性等信息，能够显著提升果园管理水平的时效性和准确性。这些信息的准确感知不仅有助于优化果树生长条件，也可以为果园管理智能化决策提供科学依据，为优化资源分配、提升决策准确率提供支持，提高资源利用效率，减少环境负担，推动智慧果园的可持续管理。

2.1.2　*果树信息感知*　果树信息感知是装备智能化作业、果园智慧化管理的前提和基础。研究果树表型多源信息感知与解析技术，为作业智能化决策提供技术基础，从而为果园智慧化管理提供数据支撑和决策支持。果树信息感知主要包括果树长势、病虫草害等信息。

（1）长势信息感知。果树长势信息是表征果树生长状态的重要参数，受到光、温、土壤、水、肥等诸多因素的影响，是多因素综合作用的结果。准确感知果树长势信息，判断果树生长状态，对变量施肥、精量喷灌、选择性疏花等作业具有重要意义。

当前该技术已在果树分布、树冠体积检测等方面取得了一定进展。悉尼大学机器人研究中心研发了果园表型机器人[16]，可以快速检测果树分布、树冠体积、花果密度等表型信息。Patrick等[17]基于四旋翼无人机和倾斜摄影传感器，获取果树冠层高度、冠幅和体积等蓝莓灌木形态特征，高度和宽度尺寸在系统低估校正后成像平均误差为5.82 cm，为生产者进行修剪、地块布局等管理提供了帮助。潘时佳等[7]采集猕猴桃果实膨大期的冠层多光谱图像数据，提出了一种复合视觉卷积回归神经网络（CVCR），与基于植被指数的传统反演方法相比，反演结果相关性和准确率得到一定的提升，在复杂场景下达到了良好的反演效果，为精准灌溉和水资源利用率的提高奠定了基础。为解决恶劣环境下果园果树冠层信息提取困难的问题，杨洲等[8]基于可变轴的椭球模型自适应密度聚类算法，采用毫米波雷达识别单株果树、提取冠层点云，结合Alpha-shape算法和随机抽样一致算法，实现了果树冠层三维重构与体积计算，相比几何法，体积估算准确率提高了59.4%。但现有技术仍具有局限性，如在复杂的果园环境下的测量误差较大，且对不同果树品种的适应性不强。未来的研究应着重于进一步提高在复杂果园环境下感知系统的精度和鲁棒性，同时结合数据分析和人工智能技术，进一步提升果树长势信息的综合分析能力，以实现更为精准和智能的果园管理。

（2）病虫草害信息感知。果园病虫草害是指影响果树生长和果实品质的疾病、害虫和杂草，病虫草害信息早期检测是病虫害预测与防控的重要依据。及时感知并精准控制病虫草害对维护果园的健康、保障果实品质具有重要意义。

为准确识别病虫害发生及其危害等级，万军杰等[9]融合迁移学习与GoogLeNet模型，对6种果园作物的25类病虫害进行识别与危害程度分级，识别精度达99.35%，危害程度分级精度达92.78%。病虫害的发生受光照、温度、湿度和降雨量等多种因素的影响，基于单一数据源的方法可能无法准确检测病虫

害。为解决果园病虫害数据获取不全的问题，闫云才等[10]采用空地融合方法采集多源病虫害信息，建立基于Yolo v5的病虫害检测模型，冠层叶片被害率检测准确率达到99.54%，为研究多源信息融合的病虫草害识别系统提供了技术支持。融合并解析多源信息，通过融合迁移学习和深度学习模型，构建病虫害识别和危害程度分级模型，对果园管理起到了重要作用。然而，仍需进一步优化模型在复杂果园环境下的表现，提升模型对不同果园、不同环境、不同时期病虫害的适应性，同时探索更丰富的数据源以提高检测的全面性和可靠性。

2.1.3 作业装备信息感知 作业装备信息主要包括作业装备位置、作业状态、作业质量等信息。感知作业装备信息并分析其变化，可以协助制定作业装备任务分配、智能调度、路径规划方法，也是实现果园精准化作业的重要前提。

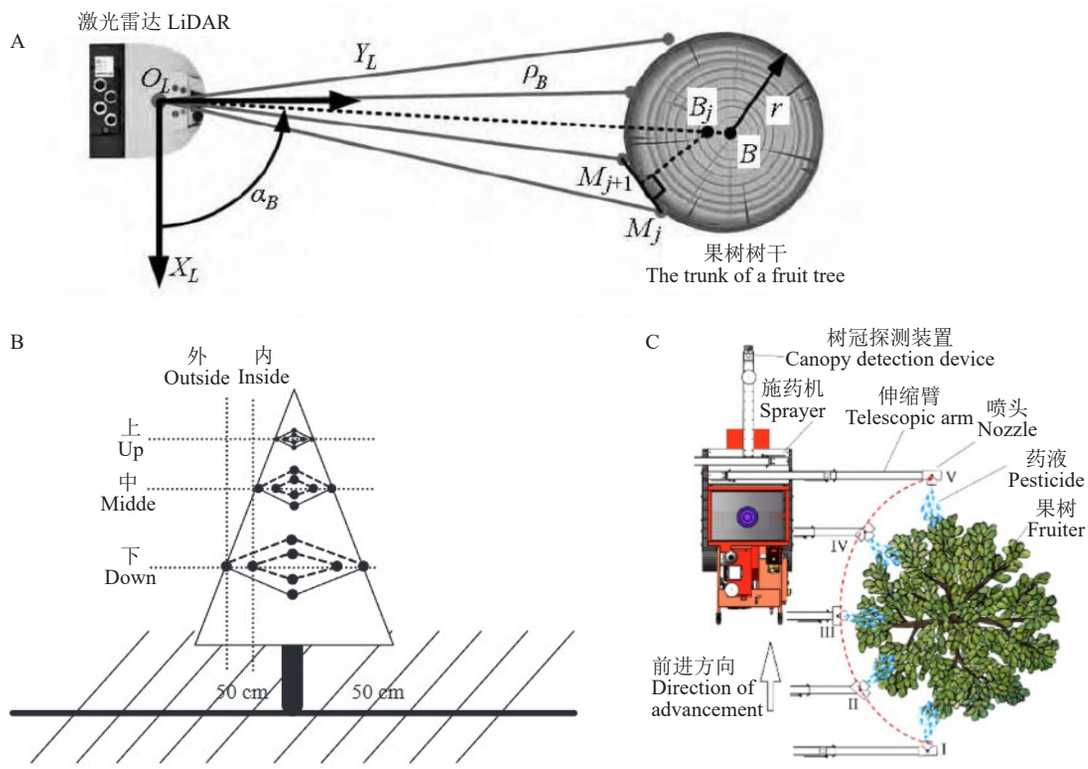
作业装备位置信息通常采用GPS、INS以及无线传感器来获取。但对于密植果园，林间卫星信号易受枝干遮蔽影响，为减少此类影响，周俊等[18]利用激光雷达和圆弧聚类获取树干中心点位置，通过坐标变化校正机器人位置与航向，实现密植果园机器人准确定位（图2-A），定位误差约0.08 m。沈跃等[11]融合GPS信号与LiDAR/IMU紧耦合框架，提出了一种全局无偏状态估计果园机器人定位与建图方法，定位精度在0.05 m左右，均方根误差达0.016 2 m。采用激光雷达与其他传感器融合的方法有效解决了卫星信号受遮挡的问题，定位误差可控制在厘米级，在提高密植果园中作业装备的定位精度方面表现出了显著优势。

作业装备状态信息指果园作业装备在特定时间点的运行状态，包括设备是否正常运行、当前作业模式（如采摘、喷洒、耕作等）、作业速度、工作时长等。这些信息可以帮助管理系统实时监控设备的工作情况，确保农机作业的连续性和高效性。徐鹏程等[19]利用CAN总线获取农机工作状态信息，通过4G模块及TCP/IP协议实现数据传输，设计出了一套用于实时监测农机工作状态的系统，可同时实现对64台农机装备的实时监测。温鑫等[20]利用STM32103主控制器进行数据处理，通过BC20无线通信模块进行数据传输，研究了一种基于OneNet开放平台的玉米中耕变量施肥机远程监测系统，实现了PC端和移动端对施肥机速度、坐标、排肥轴转速等状态参数的实时远程监测，数据传输成功率在95%以上，为果园施肥机远程监测系统的优化提供了参考。基于物联网技术，农机装备状态信息监测系统实现了高效的实时监控，有效提升了作业管理的精准度与设备运行的连续性，是当前农机作业装备状态监测的研究热点。

作业质量信息指果园作业装备完成作业任务的效果和质量，如农药喷雾量、施药均匀度、开沟深度等。作业质量信息的感知可以实时监测农机在作业过程中的表现，帮助管理人员及时调整作业参数，提升整体作业效率。张鹏九等[21]通过建立不同发育期富士苹果叶片最大持液量与药液表面张力之间的关系，以担架柱塞泵式机动喷雾机在乔化稀植苹果园和风送式自走履带喷雾机在矮砧密植苹果园的施药行为为例，建立了苹果园农药精准喷雾量计算模型，按照计算用药量施药（图2-B），较常规施药节省药液量18%以上。陈子文等[22]基于人工施药过程中喷嘴与树冠间距的动态变化，结合2D激光雷达、双环PID控制器以及FreeRTOS实时操作系统，设计了一种树冠包裹式轮廓-定向喷雾施药机（图2-C），液滴覆盖率达47.5%，与固定间距喷雾机相比，液滴沉积量和平均滴液密度分别增加了36.3%和58.3%，有效提高了精准喷雾的利用率和均匀性。周馨曌等[12]结合LabVIEW上位机人机交互系统和Arduino单片机下位机数据测量系统，研制了一款果园开沟深度宽度监测装备，实现了开沟作业过程中开沟宽度、开沟深度、作业时间等参数的实时监测，开沟深度最大误差为3.7 cm，开沟宽度最大误差为3.1 cm，为果园开沟作业质量实时监测奠定了基础。目前关于果园装备作业质量监测系统的研究相对较少，但其重要性不容忽视。高效精准的作业质量监测对提升果园智能装备作业质量，以及保障果园、果树管理的智能化水平和果树产量具有关键作用。因此，应进一步开展果园智能作业装备作业质量信息监测技术研究，融合多源传感器和人工智能技术，对作业过程进行全面、实时监测，并反馈给调控系统，从而保证作业质量，减少农资浪费，推进果园管理的数字化转型。

2.2 智慧化决策

智慧化决策是指利用人工智能、大数据等先进技术，对海量感知数据进行分析处理，自动生成农业生产与调控决策指令，并驱动智能农机完成各项生产任务，主要包括灌溉、疏花、施肥、喷药等关键环节



A. 树干中心提取原理图[18]，以激光雷达中心O_L为原点建立$X_LO_LY_L$坐标系，树干中心点B的极坐标表示为(ρ_B，α_B)，树干半径表示为r，M_j、$M_{(j+1)}$为相邻2个扫描点，B_j(ρ_{Bj}，α_B)为线段$M_jM_{(j+1)}$的中垂线与O_L点发出的α_B倾角射线的交点；B. 药液沉积分布与地面流失量示意图[21]；C. 树冠环绕式对靶喷药原理图[22]，Ⅰ~Ⅴ分别对应施药机前进过程中的喷药位置。

A. Tree Trunk Center Extraction Principle Diagram, with the lidar center O_L as the origin of the $X_LO_LY_L$ coordinate system, the polar coordinates of the trunk center point B are denoted as (ρ_B, α_B), where r represents the trunk radius, M_j, $M_{(j+1)}$ indicates two adjacent scanning points, and B_j(ρ_{Bj}, α_B) is the intersection point between the perpendicular bisector of line segment $M_jM_{(j+1)}$ and the ray emitted from O_L at an inclination angle α_B; B. Diagram of Liquid Deposition Distribution and Ground Runoff Volume; C. Diagram of canopy wrap-around profiling-to-target sprayer for orchards, positions Ⅰ-Ⅴ correspond to the spray locations during the forward movement of the sprayer.

图2　精准施药作业原理示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the principle of precision application

的智能决策。智能农机是指融合物联网、北斗导航、机器视觉等现代信息技术改造的农业装备，如植保无人机、智能施肥施药机、智能灌溉系统等。智慧决策系统通过分析土壤墒情、作物长势等数据生成作业处方图，并实时下发至智能农机执行，同时智能农机在作业过程中反馈工况与作业数据，为智慧决策系统动态优化决策提供支持，构建“感知-决策-执行-反馈”的闭环控制体系。

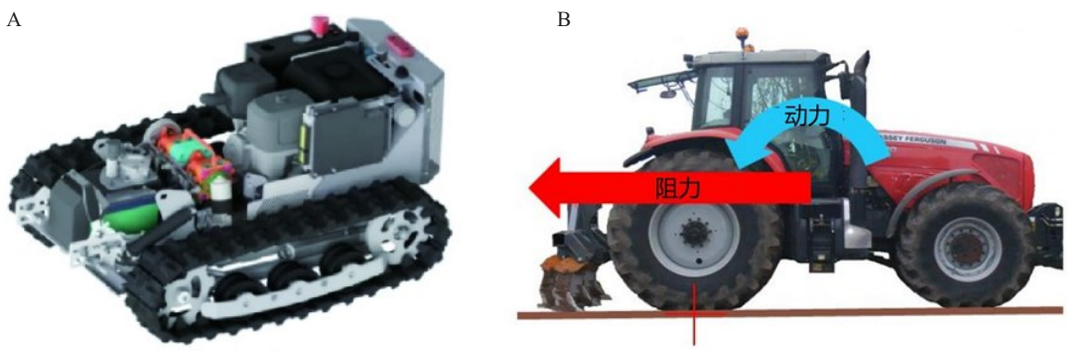
2.2.1　灌溉智慧决策　灌溉智能决策是根据气象数据、土壤水分、作物状况相关信息，综合分析作物水分需求，从而确定最佳灌溉时间、灌溉水量和最合适的灌溉方式，以满足不同作物或地块的需求，减少水资源浪费。

目前研究主要通过传感器网络和遥感技术获取农情数据，利用机器学习与人工智能技术预测果树水分需求，设计智能决策算法，给出最优灌溉方案，包括灌溉时间、水量和灌溉区域等；随后通过控制系统控制灌溉设备的开关和流量实施决策结果，同时持续监测果园土壤湿度和环境参数，实时反馈至决策系统；决策系统根据实际情况实时调整灌溉方案，保证果园灌溉的最佳状态。谢家兴等[23]利用网关节点实时接收来自传感器节点采集的果园环境信息，通过分析土壤实测含水率与预设最佳含水率的误差及变化率，设计了荔枝园智能灌溉决策系统，实现了对荔枝园的适时、适量灌溉，可以使荔枝园土壤含水率平均值控制在17.6%，与系统预设最佳含水率误差为0.6%。王金发等[24]提出了一种基于物联网的智能灌溉方法与装置，可实时采集土壤信息，并通过构建土壤标准模型对数据进行分析，进而输出区域划分结果，并依据该结果判断灌溉条件是否达成。该

系统具备土壤状态的实时监测与动态灌溉调控能力，能够有效规避降雨后出现的非必要灌溉行为，从而为植物生长提供更为科学和健康的水分管理环境。史洁等[25]通过传感器感知灌溉区域的相关信息，设计并实现了一种应用于智慧农业的灌溉机器人。该机器人将水筒固定设置于底座上方，水筒内部储存灌溉用水，其外部连接有可转动的环形套筒，套筒上配备喷嘴及第一齿圈。水筒外侧壁安装的第一驱动电机通过输出轴上的第一驱动齿轮与第一齿圈啮合，驱动环形套筒旋转，从而实现喷嘴朝向的调节，进而扩大喷灌覆盖范围，显著提升了灌溉作业的效率与灵活性。虽然已有灌溉决策系统的研究，但如何融合遥感数据、地面传感数据、气象数据等多源数据，制定科学的灌溉决策策略，根据果园不同地块、不同果树需水量，智能调控灌溉时间、灌溉水量等，仍是一个值得研究的方向。

2.2.2 耕整智慧决策 不同作物对土壤特性有不同的需求，耕整的时机、方式和程度是影响土壤结构的重要因素。土壤的湿度、养分含量、作物需求决定了耕整的深度和时间；降雨量、风速、温度等影响着实时耕整策略的优化；果园地形决定了耕整的方式和路径。在果园耕整时，根据实际情况制定合理的耕整方案，包括行间整理、除草、犁地等，有助于改善土壤结构，提升果树产量。针对果园平整设备不便对碎土产生的灰尘进行处理的问题，祝旦璞等[26]改进了一种果园犁地平整设备，结构简单便于使用，能够对碎土灰尘进行有效处理。张斌等[27]设计了一款弹尺式除草机，采用弹簧钢材料制成，在遇到障碍物时不易受损，弹尺的颤动不仅增强了除草和碎土的能力，还在松土方面取得了良好的效果。针对丘陵果园环境非结构化且复杂多变、常规的除草方式效率低等问题，赵智宇等[28]设计了一种果园除草机器人底盘系统（图3-A），作业效率达0.51~2 $hm^2 \cdot h^{-1}$，可在25°斜面上正常行走，运动控制响应及时，为不平整果园除草作业的安全性和准确性提供了保障。马若飞等[29]设计了一种基于多源信息融合的耕整深度检测系统（图3-B），系统集成了地形基准检测、北斗差分定位（BDS RTK）、多传感器融合检测等关键技术，构建了适用于复杂农田环境的高精度深度感知框架。研究提出利用自适应迭代扩展卡尔曼滤波算法对多源数据进行融合处理，有效应对当前耕整作业对深度、精度要求日益提高的挑战，实现了对耕整作业深度的高效、精准检测。

当前的果园耕整智能决策系统在提高作业效率和优化土壤管理方面表现出色，但仍存在精准度不高、设备适应性有限以及应对复杂地形能力不足等挑战。未来的发展方向应集中于开发能够适应复杂地形的自适应耕整技术，设计更加环保和节能的耕整设备，以实现更高效的果园管理并促进可持续发展。



A. 自主导航的除草机器人[28]；B. 配备耕整深度检测系统的拖拉机[29]。

A. Autonomous navigation weeding robot; B. Tractor equipped with tillage depth detection system.

图3 果园智能耕整机

Fig. 3 Orchard intelligent tillage equipment

2.2.3 疏花智慧决策 疏花是在果树开花期，根据果树花朵密度、位置等信息，去除密度较大、位置不佳花朵的果树管理措施，最适宜疏花可以达到稳产，甚至增产的目的。传统疏花方法依赖经验判断，耗时耗力，疏花智能决策利用图像识别、传感器和人工智能技术，实时监测花朵数量与分布，实时优化疏花策略，可以有效提高疏花的精度，减少人力成本。

其中，实现花朵和花苞的分类与准确监测是保证疏花机器正常工作的基本要求。夏烨等[30]针对梨

园智能化生产中的花序检测与分类问题，提出了一种基于YOLOv5s的水平棚架梨园花序识别算法Ghost-YOLOv5s-BiFPN，实现了对梨树花苞与花朵的精确识别和分类，平均精度91.3%，为后续果园智能化疏花的实现提供了技术支持。Shang等[31]提出了一种轻量级苹果花检测方法，在大大减小模型尺寸的同时，提高检测速度，便于模型的迁移和应用，模型在Jetson nano B01开发板上的检测速度为2.48 fps，证明了苹果花实时检测的可行性，为果园疏花机器人的发展提供了技术参考。开建荣等[32]提出了一种面向葡萄疏花疏果作业的智能机器人系统，该系统由葡萄架结构及数显控制面板构成，其中葡萄架上的移动车配合升降调节机构，可实现剪切机械爪作业距离的精准控制与作业时间的显著缩短。系统结合攀爬绳设计，具备执行网格式精准作业的能力，为葡萄栽培的智能化管理提供了关键性技术支撑。高昂等[33]围绕苹果花激光疏花中关键参数优化问题，设计了激光疏花试验平台，并通过正交试验法确定了最佳参数组合（激光高度20 cm、打击时间10 s、PWM占空比50%），显著提升了疏花效果。同时，提出了轻量级检测模型LT-YOLO，引入DPRViT-Block、DPRVBC2f和ELA注意力模块，增强了特征提取能力。实验结果显示，该模型准确率、召回率和mAP分别达到83.16%、82.15%和87.47%，较YOLOv8均有提升，且模型小巧、检测速度快，满足疏花作业的实时性与精度需求，为果园智能疏花技术发展提供了技术支持。杨洲等[34]研发了一种自适应疏花机及其配套疏花方法，系统集成作业载体、多段式自适应疏花装置、智能花密度识别系统、自适应控制系统与液压驱动站，具备较强的果树花识别能力与自适应作业性能。该装备显著提升了疏花作业的智能化与精准化水平，同时有效降低了劳动强度，为果园高效、自动化疏花作业提供了有力的技术支撑。

尽管当前基于图像识别和人工智能技术的疏花智能决策研究逐渐成为热点，但在模型的轻量化和实时性方面，以及复杂场景下花序识别与定位方面的研究仍不够成熟。下一步突破复杂场景下花序实时检测与定位技术，优化智能疏花策略，才能为果园疏花管理提供更全面的支持。

2.2.4　施肥智慧决策　施肥智能决策是结合传感器、遥感、大数据和人工智能技术，根据作物生长阶段、土壤养分和环境条件实时优化施肥策略。通过研究不同果树在不同生长阶段对氮、磷、钾等养分的需求，实时监测土壤和果树生长状况，根据实际情况制定科学合理的施肥方案，可以最大程度地提高果树产量，同时减少对环境的负面影响。果园当前常用施肥技术为水肥一体化技术，已日渐普及[35]，其有效性得到了越来越多果农的认可。陈平录等[36]针对丘陵果园大型机械通行困难、小型机械功率不足及功能单一的问题，研制了一种适用于25°坡地的小型电驱动立式螺旋开沟施肥机（图4-A），集开沟、施肥与覆土于一体。通过仿真建模与Box-Behnken试验优化螺旋刀结构参数，显著降低功耗，优化结果与实测误差仅为5.6%。田间试验表明，该机在开沟深度、施肥均匀性和覆土率等方面表现优异，满足丘陵果园作业需求，实现开沟施肥一体化作业。于丰华等[37]对水稻分蘖期追肥量处方图进行了深入研究，展示了其对合理施肥的重要指导作用。此外，果园

A. 果园立式螺旋开沟施肥机[36]；B. 果园自动对靶变量施肥机[38]；C. 果园自走式无人开沟施肥机[39]。

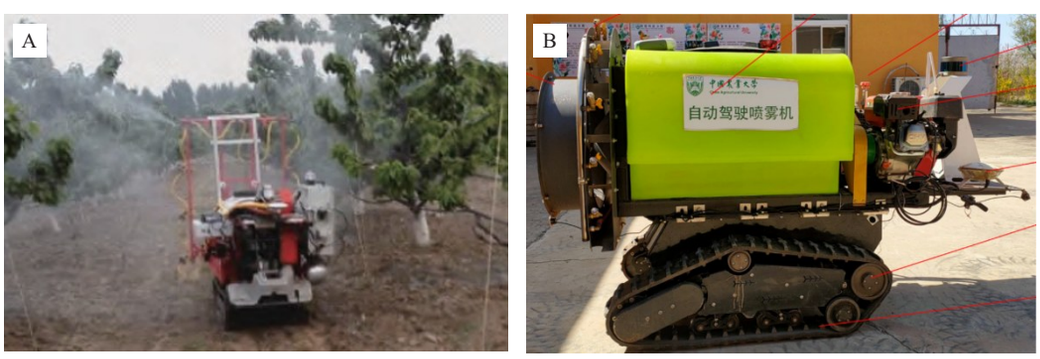
A. Vertical spiral trenching-fertilizer machine; B. Automatic target-variable fertilizer applicator; C. Self-propelled unmanned trenching-fertilizer machine.

图4　果园智能施肥机

Fig. 4　Orchard intelligent fertilization equipment

精准变量施肥装置[38]也为智慧果园的管理提供了重要技术手段，其能够根据不同果树冠层的直径大小对靶按需施肥、定量施肥，满足不同大小果树的精准变量自动施肥需求（图4-B），为果树提供量身定制的营养供给，推动了果园施肥智慧决策的发展。宋若弘等[39]针对果园施肥作业智能化水平低的问题，提出一种基于模糊控制的改进型纯追踪控制算法，并研发自走式果园开沟施肥机无人驾驶控制系统（图4-C）。该系统以Jetson Nano与STM32为控制核心，软件系统由路径规划、路径跟踪和自动作业等模块组成，实现了施肥作业全过程的智能控制。仿真与田间试验结果表明，该系统路径跟踪精度高，满足果园智能化无人施肥作业需求，为智慧施肥决策提供了技术支撑。但施肥智慧决策的研究仍然比较薄弱，与根据果园地块养分分布、果树养分胁迫情况自动决定施肥量，并调控施肥系统实现上述目标仍有距离，此外在多种类、多品种、多年期的复杂果园条件下水肥一体化系统施肥决策的智慧化仍有待进一步探索。

2.2.5 *施药智慧决策* 施药智能决策是基于病虫害监测结果，结合不同阶段果树对药剂的敏感性和需求，做出施药决策，包括是否需要施药、药剂选择、施药时机与用药量等。果园智慧施药主要包括数据采集、数据处理与决策生成、精准施药3个步骤。首先采用地面平台、低空遥感等技术手段实时采集果园多源数据，然后通过管控平台对采集的数据进行分析处理，确定果园病虫害分析情况，并利用算法生成施药方案，包括施药时间、地点、药剂种类和用量等。最后，由平台发送指令控制智能施药设备根据施药方案进行精准施药，从而实现施药的智慧决策。熊斌等[40]基于果园施药机自动导航喷药作业需求，结合施药机运动学模型与纯追踪模型，设计了一种基于北斗卫星导航系统（BDS）的施药机自动导航控制系统（图5-A），针对果园地形特点对施药机进行了导航路径规划，并在果园实地试验，直线跟踪最大误差不大于0.13 m，平均跟踪误差不大于0.03 m。刘理民等[41]研发的果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人（图5-B），采用单个3D LiDAR采集果树点云数据，结合RANSAC算法提取果树行线并生成导航中线，同时通过编码器与IMU实现位姿矫正，最终基于分区冠层检测动态控制喷头开关。试验表明，其自主导航最大横向偏差为21.8 cm，航向偏角为4.02°，较传统喷雾机减少施药量20.06%、漂移量38.68%及地面流失量51.40%。该研究创新性地将导航与对靶功能集成于单一LiDAR系统，简化硬件配置的同时显著降低农药浪费，为果园智能化装备研发提供了高性价比解决方案。董继伟等[42]针对丘陵山地果园施药需求，设计了一种履带式对靶仿形施药机，通过升降开合机构与可调阵列式超声波传感器实现施药距离和高度动态调整，解决了传统施药中雾化性能差、药液浪费及环境污染等问题。试验表明，该机位移误差率≤0.20%，时间误差率<4.79%，仿形稳定性优异；在0.5 m·s^{-1}作业速度下，对靶施药雾滴密度达78.2个·cm^{-2}，较固定施药提升20.6%覆盖率，且节药26%。该研究为果树精准变量施药提供了装备基础与方法参考，尤其适用于地形复杂的标准化果园。当前，果园施药决策系统已经取得一定的研究进展，但仍面临着果树实时监测数



A. 自动导航施药机器人[40]；B. 自主导航兼自动对靶喷雾机器人[41]。

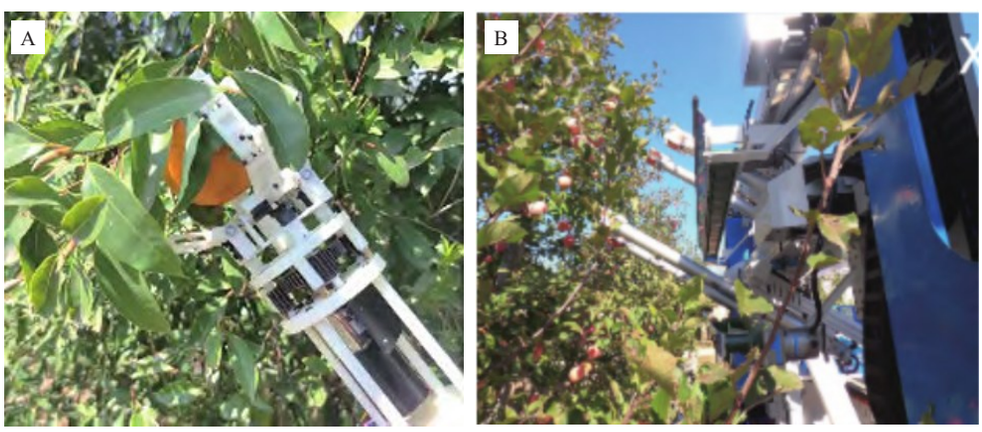
A. Autonomous navigation spraying robot; B. Autonomous navigation with target-adaptive spraying robot.

图5 果园智能施药机

Fig. 5 Orchard intelligent spraying equipment

据的获取、解析、集成难度较大、多年期和复杂环境影响施药决策的难题。因此，需进一步研究果园病虫害相关信息采集、解析与施药决策技术，探索更加智能和可持续发展的施药决策技术，以进一步提升施药决策的精准性和有效性。

2.2.6　采摘智慧决策　智能采摘旨在通过传感器、人工智能和机器人技术，自动化地完成果园中的采摘作业，提高采摘效率和质量，优化果园管理。首先是采摘点定位，采摘目标空间位姿信息缺失和目标定位精度低是影响采摘机器人采摘效果的关键因素之一。寇雷雷等[43]针对采摘机器人多目标检测影响因素多、识别准确率低等问题，提出了一种轻量化的改进型YOLOv5目标检测模型，该模型在晴天、阴天、顺光和逆光等多种光照条件下的苹果果实识别平均准确率达94.37%，平均帧率达到74.72 fps，表现出较高的检测效率与鲁棒性。毕松等[44]设计了基于颜色信息和卷积神经网络的草莓图像目标定位与分割模型，采摘定位综合误差为2.3 mm，为采摘机器人的目标定位提供了有效信息。二是末端执行器，末端执行器是水果采摘机器人的核心部件。由于目前水果采摘对象种类繁多，结构及参数固定的采摘末端执行器无法适应多场合采摘作业需求，虞浪等[45]设计了一种欠驱动关节型采摘末端执行器（图6-A），模拟人手包络采摘动作，并以柑橘为对象模拟球型果实对末端执行器进行结构设计，所设计的末端执行器针能够针对不同果径的球型果实时做出快速变形反应，适合苹果、梨等不同种类球型果实采摘作业。三是机械臂，冯青春等[46]针对鲜食苹果智能化高效采收需要，以中国矮砧密植高纺锤形果树为对象，根据树冠内果实空间分布，设计了四臂并行采摘的“采-收-运”一体式机器人系统（图6-B），以代替人工采收作业，平均采摘效率为7.12 s·果$^{-1}$，对可见果实采摘成功率为82%，为鲜果智能化采摘的探索应用提供了技术支撑。此外，基于振动原理的果实收获方法，通过控制振动参数，可以实现大规模高效采摘。尚书旗等[47]设计了一种液压控制的高酸苹果振动式采摘机，采摘损伤率为1.3%，果实摘净率为95.9%，验证了苹果大规模高效采摘的可行性。Ma等[48]通过支持向量数据描述（SVDD）和K-means聚类算法构建了一种蓝莓果实成熟度识别模型，基于高光谱图像处理技术从像素层面和外观层面对蓝莓果实进行混合识别，对蓝莓成熟果实的识别正确率达到96.1%，近成熟果实识别率为94.7%，青果识别率为91.2%。



A. 欠驱动关节型采摘机器人[45]；B. 苹果四臂采摘机器人[46]。

A. Underactuated joint-type harvesting robot; B. Four-arm apple harvesting robot.

图6　果园智能采摘机

Fig. 6　Orchard intelligent harvesting machines

果实目标识别与定位、柔性采摘末端执行器、机械臂方面的研究逐步深入，大幅提高了果园机械化采摘作业效率和质量，为果园智能化、机械化采摘的实现奠定了基础。但目前采摘机器人作业效率难以满足成熟果实采收需求，且不同产品、不同用途的果实采摘农艺要求存在差异，应根据不同果实农艺要求，针对性地设计柔性采摘机械手，同时应用先进的现代人工智能技术和控制技术全方面提高成熟果实机械化采收效率。

2.3　精准化作业

2.3.1　农机自动导航　智慧化果园精准化作业技术

主要包括农机自动导航和农机精准作业技术。农机自动导航是实现农田精准化作业的前提[49]，也是果园农机装备实现智能化作业的关键，其主要内容包括导航定位、路径提取与规划、导航控制技术[50]。表2展现了3种当前研究中典型的农机自动导航技术。

表2 农机自动导航关键技术

Table 2 Key technologies of agricultural machinery automatic navigation

方法 Methodology	性能 Performance	参考文献 Reference
扩展卡尔曼滤波的激光雷达、视觉信息IMU融合方法 Extended Kalman filtering for IMU fusion of LiDAR, visual information	定位精度的均方根误差为0.123 0，一帧激光雷达点云的定位和制图仅需75.01 ms The root-mean-square error of localization accuracy is 0.123 0, and it takes only 75.01 ms to localize and map a LiDAR point cloud in one frame	[51]
LiDAR / IMU紧耦合的果园机器人定位与建图方法 LiDAR/IMU tightly coupled orchard robot localization and map building approach	在果园的定位精度维持在0.05 m左右，均方根误差为0.0162 m The localization accuracy in the orchard was maintained at around 0.05 m with a root mean square error of 0.0162 m	[11]
一种连续双向Quick-RRT*（CBQ-RRT*）算法 A Continuous Bidirectional Quick-RRT* (CBQ-RRT*) Algorithm	CBQ-RRT*的平均路径长度和最大航向角分别减小了8.5%和21.7%，果园试验平均最大路径横向误差为0.334 m The average path length and maximum heading angle of CBQ-RRT* were reduced by 8.5% and 21.7%, respectively, and the average maximum path lateral error for the orchard trial was 0.334 m	[52]

（1）导航定位信息。果园作业机器人常用的定位方式可以分为绝对位置测量和相对位置测量两类[53]。绝对位置测量包括全球导航卫星系统（Global navigation satellite system，GNSS）、超高频射频识别技术（radio frequency identification，RFID）和信标定位等，相对位置测量技术主要包括机器视觉、激光雷达和惯性导航等。但果树密植时GNSS信号易受冠层遮挡影响导航精度；激光雷达数据量大，对算法与硬件要求高；惯性导航中的惯性测量单元（Inertial measurement unit，IMU）会随着导航时间增大累积误差；视觉传感器易受光照影响。由此可见，单一传感器导航存在或多或少的问题，因此多传感器融合导航成为导航技术研究的热点和重点。Zhang等[51]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波（EKF）的激光雷达、视觉信息和IMU融合方法，能够实现果园农机的实时定位以及果园三维彩色地图的绘制，该方法定位精度的均方根误差为0.123 0，一帧激光雷达点云的定位和制图仅需75.01 ms，在农用车辆自主导航方面具有巨大潜力。沈跃等[11]针对果园环境中GNSS定位信号易丢失和传统SLAM算法鲁棒性差的问题提出了一种基于LiDAR / IMU紧耦合的果园机器人定位与建图方法，能够实时输出准确且高频连续的位姿信息，在果园的定位精度维持在0.05 m左右，均方根误差为0.016 2 m，有效减小了系统累积误差，保证了构建地图的全局一致性。现有研究聚焦于使用多传感器融合技术解决单一传感器在果园环境中存在局限性的问题，该研究思路虽然能够提升精度，使用互补性增强鲁棒性，但硬件成本高、算法复杂度较大，且多源数据同步校准与实时性保障，在果园的密集冠层下仍需优化抗干扰能力。

（2）路径提取与规划。路径提取是运动控制的前提，也是路径规划和避障的参考要素。高效的导航路径提取可以提高作业装备复杂路面的适应能力，从而提升作业安全性。路径规划是基于果园环境地图信息和果园作业需求确定作业装备的移动路线和方式的过程，是果园导航与自动作业的关键环节之一。有效的路径规划可以提升作业效率，避免重复作业和作业遗漏。

为提高植保机器人葡萄园作业在垄行识别和路径规划中的准确性和可靠性，艾长胜等[54]使用二维激光雷达获取葡萄园垄行点云，提出了基于支持向量机（Support Vector Machine，SVM）的葡萄园路径规划算法拟合垄间中心线，中心线拟合平均角度偏差为0.72°。为了在有大量不规则障碍物的果园中高效路径规划，Ye等[52]提出了一种连续双向Quick-RRT*（CBQ-RRT*）算法，有效解决双树交界处的路径平滑问题，与Bi-RRT*对比仿真显示：CBQ-RRT*的平均路径长度和最大航向角分别减少了8.5%和21.7%，果园试验结果表明其平均最大路径横向误差为0.334 m。针对果园采摘机器人行间行走易受障碍物影响的问题，胡广锐等[55]提出了一种基于改进人工势场法的机器人行间导航路径优化方法，使

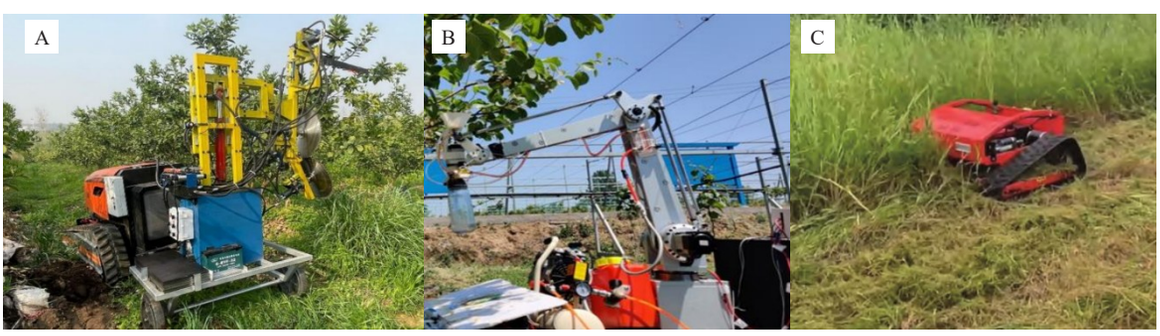
用随机采样一致性（Random Sample Consensus，RANSAC）提取初始路径后，使用改进人工势场法进行优化，避免了传统人工势场法易陷入振荡的问题，经改进后的路径将障碍物点云距导航路径的最短距离由0.156 m提高至0.863 m。路径规划算法需兼顾复杂果园场景与实时性需求，当前存在的问题主要是算法泛化能力有限、实时性与精度矛盾突出，难以实现动态障碍物处理与复杂地形下的多目标路径优化。

（3）导航控制。果园场景复杂、地表起伏波动影响农机行走路径，因此导航控制是智能农机精准作业的关键环节。研究果园复杂场景下农机自主导航控制技术对农机具实现精准作业有重要意义。

熊斌等[40]设计了基于北斗卫星导航系统（BDS）的果园施药机自动导航控制系统，在行距5 m的樱桃园中实现了路径跟踪，最大误差≤0.13 m，平均跟踪误差≤0.03 m。针对履带式车辆转向控制平滑性差、控制精度低等问题，ZHANG等[56]设计了一种基于虚拟阿克曼转向模型的状态反馈导航控制系统，并提出了一种基于极点分配的路径跟踪控制方法，果园导航试验结果表明：树行间平均跟踪误差和标准误差分别为0.051 m和0.084 m。为实现丘陵山地果园的复杂地形下果园机器人自主导航，刘杰等[57]提出了一种基于预瞄跟踪的自校正增量PID控制策略，利用递归最小二乘法实时调整PID参数。整机测试结果表明：机器人以1.2 m·s^{-1}速度行驶时，直线行驶时平均位置偏差和航向角偏差分别为0.18 m和4.2°，转弯行驶时分别为0.38 m和16.7°。导航控制需平衡跟踪精度与地形适应性，虽然当前研究中的控制策略多样化，但硬件依赖性（如BDS）和参数调整复杂度较高，难以实现非结构化地表（如泥泞、坡地）下的动态稳定性控制，以及高速作业时的实时响应能力提升。

2.3.2　*农机精准作业技术*　果园农机精准作业主要包括剪枝、施肥、施药、灌溉、除草、授粉、疏花、采收分级和运输等环节。果园传统各环节人工作业方式粗放，精细化水平不高，导致农资浪费、作业效率不高，而变量作业通过“感知-决策-执行”形成闭环，显著提高了果园农机作业精准化水平，减少了农资浪费，降低了生产成本[58]。

近年来，针对果园复杂的作业环境，研究者们构建了一系列变量作业装备（图7）。白秋薇等[38]研制了一种果园精准变量自动对靶施肥装置与控制系统，建立了排肥轮转速控制规则，能够实现对靶按需施肥，对靶施肥试验结果表明：实际施肥量与目标施肥量相对误差最大为4.83%，变异系数最大为6.96%，且均在果树冠层直径范围内完成。肖珂等[62]设计了基于冠层体积的果园自动变距精准施药系统，该系统可以在水平和垂直方向调整喷雾距离和喷施高度，与定距对靶喷雾相比，自动变距对靶喷施农药附着率提高18.66%，节约30.25%药液。基于全液压履带式遥控动力底盘，杨娇[59]研制了一款丘陵地区柑橘树修剪机，可调节柑橘树修剪高度、宽度和角度，纵向、横向极限翻倾角分别为60°、53.57°，极限滑移角分别为31°、28.34°，平均漏割率10%，平均合格率89.8%，修剪断面质量良好。李果[60]融合雌花生长阶段、状态信息和雌花位置分布信息，研发了基于视觉感知和双流式喷雾的猕猴桃精准授粉装置，实现了冠层中优势雌花精准授粉，对单朵花平均授粉时间约2 s，双流式对靶喷雾授粉区域坐果率为



A. 柑橘树修剪机[59]；B. 双流式喷雾授粉机[60]；C. 自走式果园割草机切割器[61]。

A. Citrus tree pruner; B. Dual-flow spray pollinator; C. Self-propelled orchard mower cutter.

图7　果园精准作业装备

Fig. 7　Orchard precision operation equipment

88.5%，比人工点授区域低4.0个百分点，比人工喷雾授粉区域高6.7个百分点，分别节省39%和42%的花粉。结合传统果园行距、株距较小等特性，邢刚等[61]设计了一种满足山地作业需求的自走式果园割草机切割器，平均割茬高度24.15 mm，割幅利用系数为98.96%，漏割损失率为1.54%。Khanal等[63]提出基于YOLOv5的果树早期花朵检测方法，并通过K-means识别单个花朵中心点，用于进行精确疏花和授粉。精准变量作业装置虽然节省资源、精准性高，但是在多目标协同方面仍具有一定难度，未来的发展应该聚焦于如何在复杂果园环境下（多变地形、密集冠层、动态花果分布），实现高精度感知-低延迟控制-高鲁棒执行的闭环协同，同时降低系统的复杂度与成本。

2.4 智慧化管理

智慧化管理包括果树管理、果园管理和农机管理。传统果园中果农观念滞后，管理体系不完善。随着现代农业的快速发展，智能化、智慧化的管理模式能够实现高效生产与高质量作业，智能农机装备的应用大大减轻了人工劳动强度，提高了管理效率，增强了果品的市场竞争力和果园可持续发展能力。

2.4.1 *果树管理* 果树管理是确保果园高产高质的核心环节，其通过监测果树生长状况，及时应对气候变化、水肥胁迫、病虫草害以及果树不同生育期的特殊需求，可以有效避免果树受到侵害，从而保障果园高质高产。

果树的生理指标能够反映果树的健康状况，比如氮素、叶绿素含量能够影响果树光合作用，叶片含水率和叶水势能够衡量水分供应情况和水分利用效率，叶面积指数能够反映作物长势、预测产量。在不同生育期、不同水肥胁迫和病虫害情况下，果树生理指标发生变化。因此，为实现果树生长智慧化管理，应针对果树品种建立果树生理指标反演模型、病虫害胁迫程度识别模型，对果树生长状况进行监测，根据监测结果实施作业智能决策（表3）。陈鲁威[67]基于无人机多光谱数据建立梨树冠层氮素反演模型，并绘制氮素含量分布图，实现了梨树冠层氮素含量分布与分区的可视化，为梨树精准变量施肥技术提供了支撑。陈魁等[64]研发了一种具有切割器支撑臂液压伸缩调节装置的3PJ-1型龙门葡萄剪枝机，可以实现作业幅宽和角度的无级可调。郭惠萍等[65]提出了一种基于改进MobileNetV3苹果落叶病识别模型，平均准确率达95.62%，模型体积6.29 MB，将模型部署到果园喷药装置上进行试验，结果显示：病害识别准确率达到96.7%，平均耗时为4.12 s。孙乐琳[66]构建了一种基于改进YOLOv5s的梨花识别及密度分级模型，识别准确率为91.62%，密度分级准确率为94.29%，可以实现复杂自然环境下梨花的识别和密度分级，为产量预估和机器智能疏花提供了技术支持。

表3 果树智能化管理关键技术

Table 3 Key technologies of intelligent orchard management

应用场景 Application scenario	研究方法 Methodology	意义 Significance	参考文献 Reference
葡萄园 Vineyards	3PJ-1型龙门葡萄剪枝机 3PJ-1 gantry grape pruner	提高了剪净比，优化了伸缩臂结构，抑制了震动、噪声等不利影响 Improved shear to net ratio, optimized telescopic boom structure, suppressed vibration, noise and other adverse effects	[64]
识别苹果落叶病 Recognizing apple defoliation disease	改进MobileNetV3苹果落叶病识别模型 Improvement of MobileNetV3 apple leaf drop disease recognition model	提升识别效率，可快速应对果园中突发的病害情况，及时采取措施，有效降低病害对果树的损害 Enhance the identification efficiency, can quickly respond to the sudden disease situation in the orchard, take timely measures to effectively reduce the damage of the disease on the fruit trees	[65]
识别梨花并进行密度分级 Identify and density grade pear blossoms	改进YOLOv5s的梨花识别及密度分级模型 Improvement of pear blossom recognition and density grading model for YOLOv5s	可实现复杂自然环境下梨花的识别和密度分级，为产量预估和机器智能疏花提供技术支持 It can realize the identification and density grading of pear blossoms in complex natural environments, and provide technical support for yield prediction and machine intelligent flower thinning	[66]

2.4.2 *果园管理* 果园管理主要包括产前、产中、产后三个环节。产前主要包括：苗木的选择、果园规划等，要充分考虑市场、环境等因素，挑选品质好、产量高、抗病虫害的果树品种；合理规划种植密度，充分考虑到通风、光照等，注意树种搭配，防止病菌虫害交叉感染[68]；合理规划作业道路以及灌排系统，保证

灌排方便，水源无污染。产中主要包括果园环境监控、翻耕、施肥、灌溉、病虫害防治等多种农事操作。对园地进行深翻可以提升土壤透气性，翻出地下越冬害虫，降低次年病虫害发病概率[69]；合理适量施肥，改善土壤物理和生物特性，根据果树所处时期不同来调节土壤pH值，改善土壤环境，促进果树根系的健康发展[70]；一次充分的灌水有助于避免多次补充灌溉引起的土壤板结和土温降低的问题，选择适当的灌溉方法，能够确保水分均匀分布，并最大程度减少水分浪费[71]；果树对自身的生长环境要求严苛，当其生长环境无法满足自身需求时就会出现病虫害。因此，合理选址、精准施肥、变量灌溉、合理密植，保证果树生长所需的肥力、水分和光照等条件，可以有效避免病虫害的发生；若病虫害已经发生，采取科学的化学防治方法控制病虫害，比如选择低毒性、无污染的农药，减少农药副作用的产生[72]。随着智慧农业的发展，果园管理的核心环节已逐步实现感知-决策-执行的闭环优化。表4通过典型案例展示了智能化系统在果园管理中的具体应用场景与应用成效，验证了智能化精准管理对传统果园管理中痛点的突破性缓解。

赵巍等[73]设计了一种基于5G通信技术的智慧果园灌溉系统，该系统使用多种传感器获取果园内果树生长环境数据，利用5G通信网络构架将采集的数据传送至服务器端，运用动态配水模型获得果园灌水需求，果园试验表明：该系统节水率最高达到43.16%。张旭东[74]设计了一种基于物候期识别的果园智能灌溉系统，能够实时精准地监测果园环境状况、快速准确地判断果树物候期，并根据种植策略制定科学合理的灌溉施肥决策，之后通过果园部署灌溉执行模块对果园各分区进行自动灌溉与精准施肥。产后包括果实分级、仓储、运输销售等环节。李港[75]设计了一种结构化苹果园苹果采摘与分级装箱的一体化联合采收机，对分级装箱效果进行试验，结果表明：果实分级率93.3%，装箱率100%，损伤率6.67%。张耀丽[76]基于物联网技术搭建了智慧果园云平台，能够将环境监控、病虫害监测、农机具管理等信息通过可视化屏幕呈现，方便管理人员及时准确地了解园区整体情况并制定后续应对方案。

表4　果园智能化精准管理关键系统与应用成效

Table 4　Key Systems and application outcomes of intelligent precision orchard management

应用场景 Application scenario	关键系统 Key system	应用成效 Application effectiveness	参考文献 Reference
果园灌溉管理 Orchard irrigation management	5G通信技术的智慧果园灌溉系统 Smart orchard irrigation system with 5G communication technology	节约水资源，降低果园灌溉成本，保障果树在适宜水分环境下生长 Saving water resources, reducing the cost of irrigation in the orchard, and ensuring that the fruit trees grow in a suitable water environment	[73]
果树不同物候期管理和分区管理 Management of fruit trees in different phenological periods and zoning management	物候期识别的果园智能灌溉系统 Intelligent irrigation system for orchards with climacteric recognition	依果树物候期精准施水供肥，促进果树健康生长，提高果实产量与品质，自动化操作降人工成本、提效率，推动果园智能化 Precise application of water and fertilizer according to the seasonal period of fruit trees, promote healthy growth of fruit trees, improve fruit yield and quality, automated operation to reduce labor, improve efficiency, and promote the orchard intelligence	[74]
大规模苹果园采收 Large-scale apple orchard harvesting	结构化苹果园苹果采摘与分级装箱的一体化联合采收机 Integrated combine harvester for apple picking and grading and boxing in structured apple orchards	提升采收效率，能够快速处理大量果实，损伤率仅6.67%，有效保障果实完整，维护商品价值，减少了果农经济损失 Enhanced harvesting efficiency, able to quickly handle a large number of fruits with a damage rate of only 6.67%, effectively guaranteeing the integrity of the fruits, maintaining the value of the commodity, and reducing the economic losses of the farmers	[75]

2.4.3　*农机管理*　农机管理包括农机具的作业位置、作业质量和作业工况等。作业位置是指通过定位技术实时追踪、记录农机具在果园中的具体位置，以便于合理规划作业路线，避免重复作业或发生遗漏，灵活调整作业区域，实现精准管理。作业质量是对农机具作业效果的监测和评估，主要通过各类传感器实时采集土壤耕作深度、施肥量、病虫害防治效果等关键指标，确保作业质量符合标准要求。作业工况是农机具在工作时的运行状况和性能，通过监测传动、液压等系统的工作状态以及发动机转速、油压、水温等关键参数，及时发现并排除潜在故障，确保农机具在最佳工况下运行，同时根

据作业需求和农机具性能特点，合理调整作业参数和速度，避免过载运行和无效作业，提高农机具的使用效率和寿命。为实现农机管理的全流程精细化管控，基于物联网与传感技术的实时监测系统已成为优化作业效率、保障农机安全的核心工具。如表5所示，当前研究通过LoRa通信、在线监测等关键技术，重点解决作业工况动态感知与设备状态透明化管理难题。

表5 果园农机管理系统

Table 5 Orchard agricultural machinery management system

应用场景 Application Scenario	关键系统 Key System	应用成效 Application effectiveness	参考文献 Reference
实时监测剩余电量、流量、喷药压力等作业参数 Real-time monitoring of operating parameters such as residual power, flow rate, spray pressure, etc.	基于LoRa的果园喷药机和监控系统 LoRa-based orchard sprayer and monitoring system	实现对喷药机作业工况的实时监测 Realized real-time monitoring of sprayer operating conditions	[77]
获取山地果园作业机车的使用状况等数据 Acquisition of data on the status of utilization of locomotives for mountain orchard operations, etc.	山地果园运送装备在线监测系统 Online monitoring system for mountain orchard delivery equipment	实时监测作业工况，定位、电池电量检测以及有无故障停车等信息，真实准确地监测农机工作情况 Real-time monitoring of operating conditions, positioning, battery power detection and the presence or absence of fault parking and other information, real and accurate monitoring of the work of agricultural machinery	[78]

张耀丽[76]基于物联网技术搭建了一个智慧果园云平台，具有农机状态查询、农机作业轨迹和作业面积统计等功能，云平台通过农机装备定位信息中的标识来识别农机，实现对农机位置和运行状态进行监测和管理。常峥[77]设计了一种基于LoRa的果园喷药机和监控系统，可实时监测剩余电量、流量、喷药压力等作业参数，数据异常时报警处理，实现了对喷药机作业工况的实时监测。为准确获取山地果园作业机车的使用状况等数据，郭玉姗[78]设计开发了一种山地果园运送装备在线监测系统，能够实时监测作业工况（如累计使用次数、工作时长、机器运行速率等）、定位（经纬度）、电池电量检测以及有无故障停车等信息，真实准确地监测农机工作情况。

3 智慧化果园系统集成

3.1 无人作业系统设计与装备集成

3.1.1 *果园巡检机器人* 果园巡检机器人是一种具备自主巡航、信息监测与异常识别等功能的现代果园信息自主巡检装备[79]，主要用于完成果园、果树多种信息自动采集、解析，为果园智能生产作业提供信息支撑。表6汇总了典型果园巡检机器人的功能定位与实测性能。

Bargoti等[80]开发了果实原位识别及产量估测的果园巡检机器人，自然条件下果实漏检率＜5%，估产精度达85%。罗小波等[83]基于无人机多光谱影像反演柑橘冠层叶绿素含量，反演结果评价指标R^2、MAE、RME分别为0.665、7.69 mg·m^{-2}、9.49 mg·m^{-2}，可用于柑橘生长状态监测。兰玉彬等[84]基于无人机低空柑橘果园的高光谱影像构建SVM模型对健康和感染柑橘黄龙病的果树进行分类，准确率达到94.7%，对测试集的误判率为3.36%，结果表明基于无人机高光谱遥感监测柑橘黄龙病具有可行性。苗林林[85]基于无人机高光谱影像结合堆叠集成学习算法模型，构建了基于光谱指数特征的柑橘叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）反演模型，反演精度评价指标R^2和RMSE分别是0.932和0.194。张旭[86]基于无人机多光谱影像，构建了不同生育期不同深度条件下苹果园土壤水分和有机碳反演模型，土壤水分反演模型的R^2和RMSE分别为0.911和0.003，土壤有机碳反演模型的R^2和RMSE分别为0.654和0.359。

3.1.2 *果园管理机器人* 果园管理类机器人是指能够自主完成施肥、除草、施药、剪枝、套袋、疏花、疏果等作业的智能装备，其主要技术难点在于根据果园巡检结果、管理平台决策指令、机具传感信息等多源信息融合完成精准化作业[87]。当前果园管理机器人已经能够在各作业环节实现精准化作业，表7展示了典型装备在施肥、施药、除草、疏花等场景下的功能创新与性能验证，这些系统推动果园管理从粗放式向定量化、低损化升级。

陈子文等[22]基于激光雷达和DBSCAN密度聚类提出树干动态识别与定位方法，设计了两自由度仿形机构及其控制系统，实现基于树干位置信息的

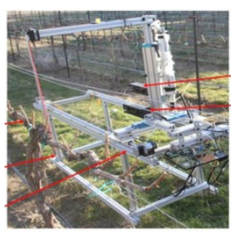
表6　果园巡检机器人

Table 6　Orchard inspection robot

装备 Outfit	功能 Functionality	性能 Performance	参考文献 Reference
	提升果实检测精度和产量估算准确性，实现苹果果实的检测与计数 Improve fruit detection accuracy and yield estimation accuracy for apple fruit detection and counting	自然条件下果实漏检率＜5%，估产精度达85% Fruit leakage rate under natural conditions <5%, yield estimation accuracy up to 85%	[80]
	提高柑橘育苗的自动化水平 Improving automation in citrus nurseries	平均定位误差为5.6 cm，最大定位误差为17.5 cm平均绝对误差为1.88 cm，最大绝对误差为7 cm，均方误差为5.93 cm^2 The average positioning error was 5.6 cm, the maximum positioning error was 17.5 cm The average absolute error was 1.88 cm, the maximum absolute error was 7 cm, and the mean square error was 5.93 cm^2	[81]
	能适应香蕉园内两种不同路径，能够为香蕉园巡检机器人提供一定支持 Adaptable to two different paths in the banana plantation, able to provide some support for banana plantation inspection robots	改进的K-means算法聚类成功率为93%，较传统方法提高了12个百分点；导航路径提取平均横向偏差为14.27 cm，平均航向偏差为4.83° The clustering success rate of the improved K-means algorithm is 93%, which is 12 percentage points higher than that of the traditional method; the average lateral deviation of navigation path extraction is 14.27 cm, and the average heading deviation is 4.83°	[82]

表7　果园管理机器人

Table 7　Orchard management robot

装备 Outfit	功能 Functionality	性能 Performance	参考文献 Reference
	有效提高药液利用率和喷药均匀性 Effectively improve the utilization rate of liquid and uniformity of spraying	雾滴沉积量和雾滴密度分别提升36.3%和58.3%，雾滴沉积量变异系数降低了60% Increased droplet deposition and droplet density by 36.3% and 58.3%, respectively, and reduced coefficient of variation of droplet deposition by 60%	[22]
	对选定绿梢进行精准修剪，完成自动输出操作，显著提高绿芽机械疏剪的性能和效率 Precise pruning of selected green tips, complete with automatic output operations, significantly improving the performance and efficiency of mechanical green shoot thinning	该集成系统在6.6 $cm\cdot s^{-1}$的警戒线轨迹上可以达到1.47 cm的$RMSE^{-1}$前进速度 This integrated system can achieve an RMSE-1 forward speed of 1.47 cm on a 6.6 $cm\cdot s^{-1}$ cordon trajectory	[88]
	通过疏花以确保合理的负载量，减少果树生长负担，提高果实商品率，增加收益 By thinning flowers to ensure a reasonable amount of load, reduce the burden of fruit tree growth, improve fruit commercialization rate, increase yield	轻量化YOLOv5-PRE苹果花序识别算法平均精度为85.56%；田间试验中定位误差小于6 cm，对靶喷药试验漏喷率小于3.33%，精准控制系统较无控制的施药量节省约25.5% The average accuracy of the lightweight YOLOv5-PRE apple inflorescence recognition algorithm is 85.56%; the positioning error in the field test is less than 6 cm, the leakage rate of the on-target spraying test is less than 3.33%, and the precise control system saves about 25.5% of the amount of application compared with the uncontrolled one	[89]

喷药装置喷头动态仿形控制。Majeed等[88]设计了葡萄园剪枝机器人，该机器人基于RGB-D视觉系统检测果树结构优化剪枝决策作业点，实现机器人自主剪枝作业。针对樱桃机器人剪枝作业需求，You等[90]提出一种樱桃枝条骨架分析算法，基于语义导引实现樱桃枝条重建，正确率＞70%，能够支撑机器人剪枝作业。针对丘陵果园环境非结构化且复杂多变、常规除草方式效率低等问题，赵智宇等[28]设计了一种果园除草机器人底盘系统，可在25°斜面上正常除草作业，除草率可达97.46%。孙丽娟[89]设计了一种苹果园化学疏花精准控制系统，基于YOLOv5改进得到的轻量化YOLOv5-PRE苹果花序识别算法平均精度为85.56%；田间试验中定位误差小于6 cm，对靶喷药试验漏喷率小于3.33%，精准控制系统较无控制的施药量节省约25.5%。

3.1.3 果园采摘机器人 传统果园中的采摘环节需要大量人力物力，果品采收作业的用工规模约占果品生产全部劳动力的40%[91]。然而，农村劳动力老龄化问题导致果园采摘人力短缺，这严重限制了现代化果业的发展。因此，研发具备自主导航、成熟果实识别与定位等功能且能够高质低损完成采摘作业的机器人，对现代化果业发展具有重要意义。针对果园采摘劳动力匮乏的现状与作业标准化的需求，果园智能化采摘机器人成为破解产业瓶颈的关键技术路径。表8展示了果园采摘机器人的典型案例，验证了机器人替代人力的技术可行性，为规模化应用奠定了基础。

表8 果园采摘机器人

Table 8 Orchard picking robot

装备 Outfit	功能 Functionality	性能 Performance	参考文献 Reference
	苹果自动采摘机器人 Automatic apple picking robot	平均单果采摘时间6.0 s，采摘成功率为84% The average single-fruit picking time was 6.0 s, and the picking success rate was 84 percent	[92]
	柑橘采摘自适应调平平台 Adaptive leveling platform for citrus picking	低光照或正常光照下，果实定位准确率82.5%，采摘成功率87.5%，平均采摘时间12.3 s•个$^{-1}$；高光照下果实定位准确率72%，采摘成功率80%，平均采摘时间12.5 s•个$^{-1}$ Under low or normal light, the fruit localization accuracy was 82.5%, the picking success rate was 87.5%, and the average picking time was 12.3 s·pc^{-1}. Under high light, the fruit localization accuracy was 72%, the picking success rate was 80%, and the average picking time was 12.5 s·pc^{-1}	[93]

Zhang等[92]设计了一种苹果自动采摘机器人，该机器人采用机器视觉定位成熟果实，利用自由度机械臂完成采摘，平均单果采摘时间6.0 s，采摘成功率为84%。针对丘陵果园垄间地面凹凸不平影响采摘作业的问题，鲍秀兰等[93]设计了一种自适应调平平台，使机械臂基座保持水平，由末端执行器完成柑橘采摘，试验结果显示：在低光照或正常光照条件下，果实定位准确率约82.5%，采摘成功率约87.5%，平均采摘时间最快12.3 s·个$^{-1}$；高光照条件下果实定位准确率约72%，采摘成功率约80%，平均采摘时间最快12.5 s·个$^{-1}$。Bloch等[94]将苹果树按照结构分为CL型（Central Leader）、Y型（Y-trallis）和TS型（Tall Spindle），提出了一种苹果采收机器人机构优化方法，并针对树结构建立了铰接式（RRR）、笛卡尔（PPP）、伸缩式（RRP）3种采收机器人机构。

3.2 智能农机多机协同作业

农机多机协同作业是智能农机装备领域一个新的研究方向，是进一步提高农机利用率、提升农机作业效率的重要手段[95]。果园生产过程中，有时需要两台农机协同作业场景，例如在果实采收中，采用单侧振摇采摘、对侧接果收集双机协同作业模式，两者需要保持精确的位置关系保证作业任务完成；有时也会需要多台农机协同作业，满足抢农时生产需求，其要求合理分配各农机作业任务，同时协调各农机间、任务间的逻辑关系[96]。智能农机多机协同作业方法与结果对比如表9所示。

表9　智能农机多机协同作业方法与结果对比

Table 9　Comparison of multi-machine collaborative operation methods and results of intelligent agricultural

分类 Category	方法 Methodology	结果 Result	参考文献 Reference
两台农机协同作业 Cooperative operation of two agricultural machinery	结合无人机与地面喷雾机，按比例分配农药，通过示踪剂评估雾滴沉积分布效果，优化协同参数 Combined with the UAV and the ground sprayer, the pesticide was distributed proportionally, and the droplet deposition distribution was evaluated by the tracer to optimize the synergistic parameters	提高上层叶片正面的雾滴覆盖率，改善农药在树冠中的垂直分布均匀性 Mprove the droplet coverage on the front of the upper leaves and improve the vertical distribution uniformity of pesticides in the canopy	[97]
	基于Node.js与Express.js开发多机器人云通信平台 Develop a multi-robot cloud communication platform based on Node.js and Express.js	实现果园无人车与无人机平台之间的协同通信 Realize the cooperative communication between the orchard unmanned vehicle and the UAV platform	[98]
多台农机协同作业 Cooperative operation of multiple agricultural machinery	通过分布式决策和仿生优化策略，动态规划作业路径与任务分工 Through distributed decision-making and bionic optimization strategy, the operation path and task division are dynamically planned	相比单机作业，显著提升集群编队作业效率 Compared with single machine operation, the efficiency of cluster formation operation is significantly improved	[99]
	提出基于顺序二次规划的多机协作任务分配与决策方法，结合有限状态机进行路径规划和交通调度 A multi-machine cooperative task allocation and decision-making method based on sequential quadratic programming is proposed, combined with finite state machine for path planning and traffic scheduling	最优方案比平均方案节省10.8%~13.2%时间 The optimal scheme saves 10.8%−13.2% time than the average scheme	[100]
	通过任务阈值设定、改良圈策略和Metropolis准则，优化多机路径分配 The multi-machine path allocation is optimized by task threshold setting, improved circle strategy and Metropolis criterion	矩形果园路径总转弯时间和作业时长分别平均减少22.89%和19.36% The total turning time and operation time of the rectangular orchard path were reduced by 22.89% and 19.36% on average, respectively	[101]

3.2.1　两台农机协同作业　两台农机协同工作可以提高作业效率、降低能源消耗、优化资源分配，这种农机协作方式也能够减少重复劳动，提升果园整体生产效率。

针对传统植保装置在杧果树冠作业效率低、沉降分布均匀性差的问题，Li等[97]设计了一种由果园履带式喷雾机与六旋翼植保UAV组成的地空协同立体植保系统，协同完成杧果果园植保作业，结果显示：与单机操作相比，杧果叶片上部树冠各部分液滴覆盖率分别提高14.7%（雾化器）和12.9%（UAV），有效增强了药液有效成分在杧果冠层的沉积分布均匀性。果园智慧管理云平台根据农机作业位置、作业性能等信息，完成农机任务分配、智能调度、自主对行等功能，从而提高农机作业质量[95]。陈成坤[98]针对果园空-地协同环境，基于Node.js与Express.js开发了多机器人云通信平台，实现了果园无人车与无人机平台之间的协同通信，试验结果显示其具有实际应用价值。

3.2.2　多台农机协同作业　传统农业生产中，通常由单一机器即可完成生产作业。但若需要抢农时生产作业时，需要多台农机在同一或不同地块间协同完成生产作业。在规模化的果园场景中，单一农机作业往往存在效率不足的问题，多机协同作业成为潜在的发展方向[98]。

面向大规模果园和紧急植保作业场景，贾宜霖[99]提出采用多旋翼植保无人机集群编队作业，并提出了基于蚁群算法的多旋翼无人机集群作业的任务分配仿真，试验结果显示：相较于单机作业，该方法提升了果园植保作业效率。但该研究仅对二维航迹规划进行了探索，对于丘陵山地地形起伏较大的果园，仍需进行三维路径规划研究。为提高植保无人机作业效率，Huang等[100]提出了一种用于多机协作四旋翼无人机覆盖路径规划的自主任务分配和决策方法，并利用多架ZY-UAV-680四旋翼无人机进行了飞行测试，仿真和实际飞行测试结果显示：最优任务分配方案分别节省了60.8 s和80.0 s，分别占平均任务时间的10.8%和13.2%，表明该方法能有效地将多架无人机合理分配到不同的区块。为提高新型苹果园内多台无人割草机协同作业的工作效率，谢金燕等[101]以总转弯时间和作业时长为综合优化目标，构建了多无人割草机

作业路径优化模型，实现了割草机任务与最优作业路径规划，试验结果显示：优化后的矩形果园路径总转弯时间和作业时长分别平均减少了22.89%和19.36%。但该研究侧重于优化作业行的总遍历顺序和每台割草机分配到的作业路径，忽略了割草机进出果园以及在地头发生冲突时的时间消耗。

4 智慧果园云管控平台

智慧果园云管控平台利用先进的信息技术和物联网技术，实现果园智能化管理，主要功能包括远程控制、信息管理和任务调度，以提高果园管理的效率和产量（图8）。为满足当前果园智能化管理需求，袁帅等[102]设计开发了基于MQTT远程控制技术的智慧果园系统，该系统具有作物生长信息监测、病虫害监测与预报、水肥一体化灌溉决策等功能，有效提升了果园的管理效率。此外，郭涛等[103]设计开发了智慧果园大数据移动管理服务平台，该平台综合应用移动GIS、AI目标检测和混合数据库技术，具有生产服务、咨询服务、果园管理、数据采集与信息可视化等功能，为数字果园和智慧果园管理提供了技术支持，具有实际应用价值。由此可见，果园管控平台的应用对提高果园管理水平、提升农机作业效率、保障果品质量具有重要意义。

智慧果园云管控平台包括信息管理、任务分配调度、远程控制三大功能。其中，信息管理分为果园基本要素、农机、任务、设备、数据和用户管理6个模块。智慧果园云管控平台采集并分析农场要素、农机、任务、设备以及果蔬各生长期的大量数据，如果树病虫害信息、农机作业路径、作业状态、作业质量、农资消耗量等多源异构数据，结合农事生产要求提供可视化界面展示当前数据及分析结果，为农事决策和病虫害防治提供支撑。任务分配调度分为农机作业任务分配和调度两部分。管理平台根据农机当前作业状态和位置，结合生产需求，对作业任务进行分配，调度农机完成相应作业，具体包括多台同种农机或不同农机作业调度，如多台除草机的调度，多台果实采收机与一台果实运输车的调度、多台果实采收机与多台运输车的调度。远程控制包括果园智能农机的远程控制。农机远程控制通过传感器实时监测农机周边环境、作业质量、作业状态等信息，通过管理平台监测农机并为其动态分配作业任务，远程控制智能农机完成作业任务。

通过这些技术的应用，智慧果园云管控平台不仅提高了果园的生产效率，还为果农提供了科学的管理工具，推动了果园管理的智能化、精细化和高效化发展。未来，随着技术的不断进步和完善，智慧果园系统将会在更大范围内推广应用，为现代农业发展做出更大贡献。

5 智慧化果园展望

5.1 多源感知信息的高效高质融合技术

信息是实现装备自主作业、平台智慧管控的基础。随着果园生产机械装备的不断更新换代，越来越多种装备取代人工进入到果园中生产作业。为促进作业装备向智能化、自动化方向的转变，需实现果园多种信息的动态感知，如果园地形、果树行位置、障碍物等信息以及果树高通量表型信息，同时需对装备作业质量、工况信息在线感知，这其中涉及多种传感器采集多种、不同格式数据。对于多源传感器获取大数据量的果园信息，只有对这些信息进行合理处理、融合、解析，才能使这些信息真正的跨作业环节的应用起来，这对促进装备的自主性、管控平台的智慧化非常重要。多传感器融合的信息感知包括果树信息感知，如激光雷达传感器可以获取果园果树长势、位置信息，而高光谱传感器可以获取果树生理生化类的表型信息，将果树长势信息、理化表型信息以及位置信息高效融合，可为靶向施药、柔性疏花、水肥变量喷施等作业环节提供精准、精确的信息决策服务。多传感器融合的信息还包括智能作业装备的作业工况信息、作业质量信息与平台管控信息的融合，三者融合后，管控平台能够实时监测作业装备作业状态、作业质量，并进行合理的作业任务调度、作业质量调整。因此，进一步开展多传感器融合的果园信息感知技术研究，能够提高作业装备的自主化、管控平台的智能化水平，从而进一步提高装备作业效率。

5.2 果园生产装备自主化作业技术

果园生产环节包括耕、种、管、收等环节，不同环节作业装备的智能化水平的提升，可以有效提高该环节作业效率。农机装备的自主化作业需集成导航避障、路径自主规划、作业质量实时感知与调控等关键技术，国内外虽已有一些关于果园变量施药、精量灌溉、立体修剪与智能采摘等环节的智能作业装备，但对于果园自主作业水平的提升仍存在不足之处，有待深入研究。如在立体修剪环节，现有树形修剪

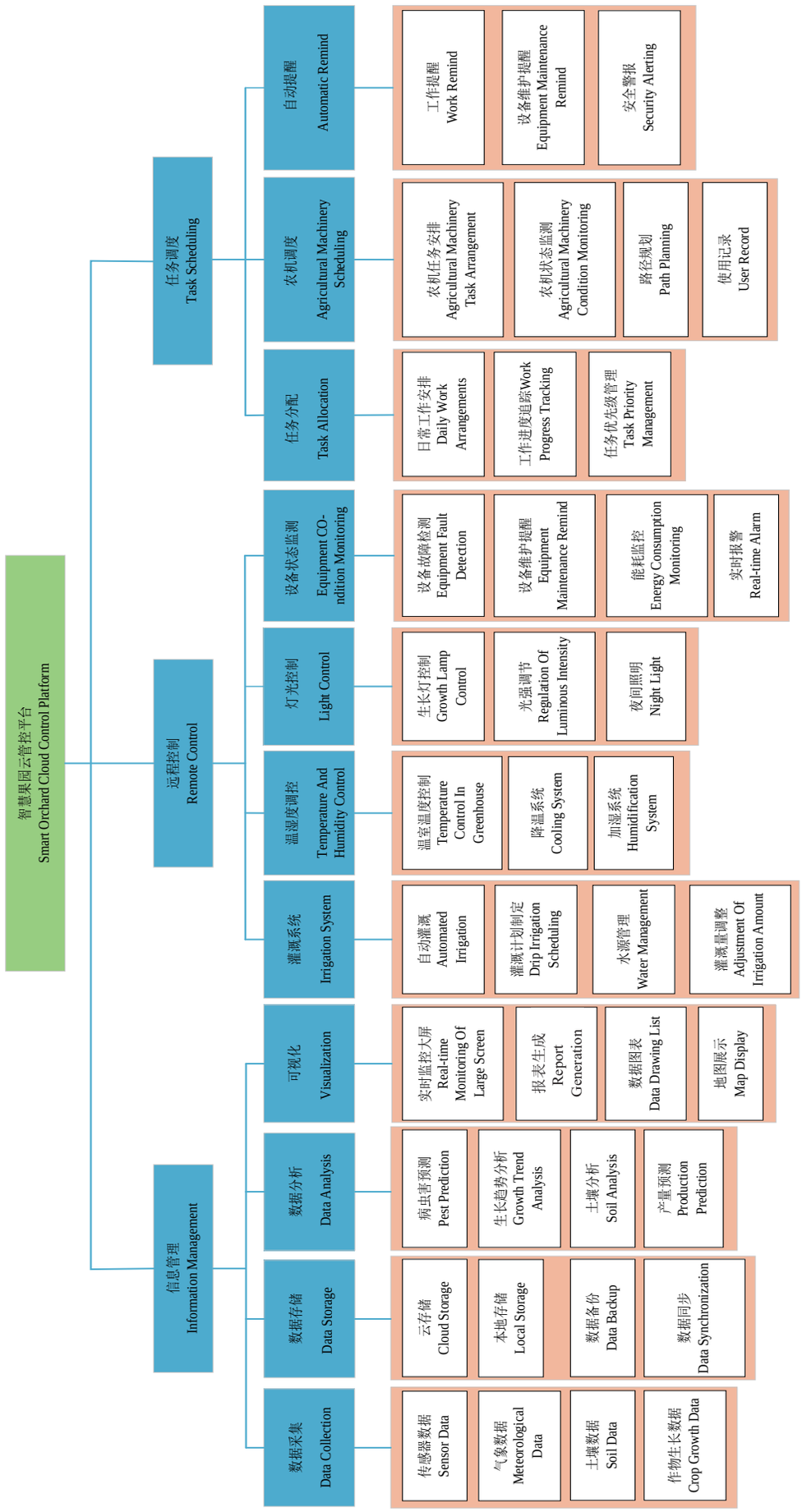


图8　智慧果园云管控平台

Fig. 8　Intelligent orchard cloud management and control platform

装备多为纺锤形立体修剪，将位于“树墙”外的枝条进行修剪，对于“树墙”内的枝条仍需辅以人工进行修改；从机械疏花环节看，现有疏花机械多通过控制疏花绳旋转进行疏花作业，而对于不同品种的果树来说，需要去除和保留的花朵存在一些差异，而这种疏花方式很难实现花朵不同的识别疏花，此外对于开花密度不同位置进行速度可控可调式疏花作业，现有技术水平也仍需进一步提高。在施药环节，根据果树发生病虫害程度进行变量调节对靶施药作业，减少施药环节对周边环境的影响，实现减药减施作业，这也一直是国内外学者研究的重点内容。另外，提高果园生产装备的自主导航、障碍物识别与避障、路径规划等作业技术水平，也是果园生产装备智能水平提高的必由之路。

5.3 果园生产全程智能化管控技术

果园智能生产云管控技术是实现果园智慧化运行的“大脑”。云管控平台将多源传感器获取的信息通过数据预处理、处理、融合、解析以及可视化等方式方法实现端-云的连接，其发展的主要功能需包括果园场景数字孪生、多源信息可视化交互、作业装备任务分配、路径规划与智能调度等。其中，果园场景数字孪生是指利用果园低空巡检机器人以及多源传感器，将果园场景动态呈现出来，为装备自主作业、果树长势监测提供技术支撑；多源信息可视化交互是指在多源传感数据获取后，对数据进行处理、融合、解析并呈现出易于理解、方便管理的信息表现形式；作业装备任务分配、路径规划和智能调度是指管控平台利用智能算法对当前作业任务、果园作业装备数量、作业面积大小以及装备位置等信息进行融合处理，对不同装备作业任务进行合理分配，并对其完成任务行走路径进行合理规划，从而减少待机行走时间，提高作业效率，若其中一台装备故障则自动调取周边装备代替其完成任务，确保作业不中断。除此之外，智能化管控技术还包括对农事、农情的精准判断与预测，这对指导果园科学安排生产作业、减少因自然灾害等因素造成的不必要损失、保障生产者经济效益、保证果园产品品质均具有重要意义。

综上所述，标准化果园生产效能提升，需全面推动果园多源信息感知与融合、生产装备自主化作业、果园生产全程智能化管控等技术的改革与提升，这对提高中国果园生产效率、保障果业产品品质、提升水果产业的国际竞争力具有重要意义。

参考文献 References：

[1] 中华人民共和国国家统计局 . 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2022.
National Bureau of Statistics of the People’s Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing：China Statistics Press，2022.

[2] 窦汉杰，陈震宇，翟长远，邹伟，宋健，冯凡，张焱龙，王秀 . 果园智能化作业装备自主导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：1-22.
DOU Hanjie，CHEN Zhenyu，ZHAI Changyuan，ZOU Wei，SONG Jian，FENG Fan，ZHANG Yanlong，WANG Xiu. Research progress on autonomous navigation technology for orchard intelligent equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(4)：1-22.

[3] 孟志军，王昊，付卫强，刘孟楠，尹彦鑫，赵春江 . 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：1-24.
MENG Zhijun，WANG Hao，FU Weiqiang，LIU Mengnan，YIN Yanxin，ZHAO Chunjiang. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(10)：1-24.

[4] 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，周战，黄康，王忠，查海涅，张国山，周国涛，马勇，伏浩，聂宏远，曾爱军，张炜 . 智慧果园构建关键技术装备及展望[J]. 智慧农业(中英文)，2022，4(3)：1-11.
HAN Leng，HE Xiongkui，WANG Changling，LIU Yajia，SONG Jianli，QI Peng，LIU Limin，LI Tian，ZHENG Yi，LIN Guihai，ZHOU Zhan，HUANG Kang，WANG Zhong，ZHA Hainie，ZHANG Guoshan，ZHOU Guotao，MA Yong，FU Hao，NIE Hongyuan，ZENG Aijun，ZHANG Wei. Key technologies and equipment for smart orchard construction and prospects[J]. Smart Agriculture，2022，4(3)：1-11.

[5] 潘明，张丽慧，黄晓财，王明，侯阳笛 . 空天地一体化智慧果园平台设计与应用[J]. 现代农业装备，2021，42(4)：43-47.
PAN Ming，ZHANG Lihui，HUANG Xiaocai，WANG Ming，HOU Yangdi. Design and application of the air-space-ground integrated intelligent orchard platform[J]. Modern Agricultural Equipment，2021，42(4)：43-47.

[6] 冯涵，张浩，王梓，江世界，刘伟洪，周凌卉，王亚雄，康峰，刘星星，郑永军 . 基于激光点云的三维虚拟果园构建方法[J]. 智慧农业(中英文)，2022，4(3)：12-23.
FENG Han，ZHANG Hao，WANG Zi，JIANG Shijie，LIU Weihong，ZHOU Linghui，WANG Yaxiong，KANG Feng，LIU Xingxing，ZHENG Yongjun. Three-dimensional virtual orchard construction method based on laser point cloud[J]. Smart Agriculture，2022，4(3)：12-23.

[7] 潘时佳，吴津乐，程梅，周敏姑，牛子杰，韩文霆 . 基于改进CNN 的猕猴桃根区土壤含水率反演方法[J]. 农业工程学报，2024，40(11)：85-91.
PAN Shijia，WU Jinle，CHENG Mei，ZHOU Mingu，NIU Zijie，HAN Wenting. Inversion method for root soil water content using improved CNN[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(11)：85-91.

[8] 杨洲，李洋，段洁利，徐兴，余家祥，申东英，袁浩天 . 基于毫米波雷达的果园单木冠层信息提取[J]. 农业工程学报，2021，37(21)：173-182.

YANG Zhou，LI Yang，DUAN Jieli，XU Xing，YU Jiaxiang，SHEN Dongying，YUAN Haotian. Extraction of the crown information of single tree in orchard based on millimeter wave radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(21)：173-182.

[9] 万军杰，祁力钧，卢中奥，周佳蕊，张豪. 基于迁移学习的GoogLeNet果园病虫害识别与分级[J]. 中国农业大学学报，2021，26(11)：209-221.
WAN Junjie，QI Lijun，LU Zhongao，ZHOU Jiarui，ZHANG Hao. Recognition and grading of diseases and pests in orchard by GoogLeNet based on Transfer Learning[J]. Journal of China Agricultural University，2021，26(11)：209-221.

[10] 闫云才，郝硕亨，高亚玲，辛迪，牛子杰. 基于空地多源信息的猕猴桃果园病虫害检测方法[J]. 农业机械学报，2023，54（增刊2）：294-300.
YAN Yuncai，HAO Shuoheng，GAO Yaling，XIN Di，NIU Zijie. Design of kiwifruit orchard disease and pest detection system based on aerial and ground multi-source information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Suppl. 2)：294-300.

[11] 沈跃，肖鑫桦，刘慧，张璇. 果园机器人LiDAR/IMU紧耦合实时定位与建图方法[J]. 农业机械学报，2023，54(11)：20-28.
SHEN Yue，XIAO Xinhua，LIU Hui，ZHANG Xuan. Real-time localization and mapping method for agricultural robot in orchards based on LiDAR/IMU tight-coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(11)：20-28.

[12] 周馨曌，坎杂，蒙贺伟，戚江涛，赵旭洋，李亚萍. 果园开沟深度宽度监测装备设计与试验[J]. 中国农机化学报，2021，42(12)：37-43.
ZHOU Xinzhao，KAN Za，MENG Hewei，QI Jiangtao，ZHAO Xuyang，LI Yaping. Design and experiment of monitoring equipment for orchard ditching depth and width[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，42(12)：37-43.

[13] WANG K，ZHOU J，ZHANG W H，ZHANG B H. Mobile LiDAR scanning system combined with canopy morphology extracting methods for tree crown parameters evaluation in orchards[J]. Sensors，2021，21(2)：339.

[14] 周慧，李晓瑞，达海莉，王银惠，张晓倩. 温度和光照对落叶果树休眠与萌芽的影响研究[J]. 宁夏农林科技，2018，59(10)：28-29.
ZHOU Hui，LI Xiaorui，DA Haili，WANG Yinhui，ZHANG Xiaoqian. Research progress of influences of temperature and light on deciduous fruit trees' dormancy and sprouting[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology，2018，59(10)：28-29.

[15] TOSELLI M，BALDI E，FERRO F，ROSSI S，CILLIS D. Smart farming tool for monitoring nutrients in soil and plants for precise fertilization[J]. Horticulturae，2023，9(9)：1011.

[16] UNDERWOOD J P，HUNG C，WHELAN B，SUKKARIEH S. Mapping almond orchard canopy volume，flowers，fruit and yield using lidar and vision sensors[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2016，130：83-96.

[17] PATRICK A，LI C Y. High throughput phenotyping of blueberry bush morphological traits using unmanned aerial systems[J]. Remote Sensing，2017，9(12)：1250.

[18] 周俊，胡晨. 密植果园作业机器人行间定位方法[J]. 农业机械学报，2015，46(11)：22-28.
ZHOU Jun，HU Chen. Inter-row localization method for agricultural robot working in close planting orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(11)：22-28.

[19] 徐鹏程，龚元明，张德俊. 基于4G通信的农机工作状态实时监测系统设计[J]. 农业装备与车辆工程，2020，58(6)：58-63.
XU Pengcheng，GONG Yuanming，ZHANG Dejun. Design of real-time monitoring system for agricultural machinery working status based on 4G communication[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering，2020，58(6)：58-63.

[20] 温鑫，王熙. 基于农机CAN总线的OneNet远程监测系统研究[J]. 中国农机化学报，2022，43(1)：116-121.
WEN Xin，WANG Xi. Research on OneNet remote monitoring system based on CAN bus of agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(1)：116-121.

[21] 张鹏九，王翔，范仁俊，刘中芳，禾丽菲，杨静，高越. 基于苹果叶片与药液界面特性的果园农药精准喷雾量计算模型的建立[J]. 农药学学报，2024，26(3)：583-593.
ZHANG Pengjiu，WANG Xiang，FAN Renjun，LIU Zhongfang，HE Lifei，YANG Jing，GAO Yue. Establishment of precise pesticide spraying calculation model for orchard based on the interfacial characteristics of apple leaves and pesticide solution[J]. Chinese Journal of Pesticide Science，2024，26(3)：583-593.

[22] 陈子文，胡宗锐，熊扬凡，王沛，余永，彭淼，杨明金. 树冠环绕式仿形对靶施药机设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(3)：23-32.
CHEN Ziwen，HU Zongrui，XIONG Yangfan，WANG Pei，YU Yong，PENG Miao，YANG Mingjin. Design and test of the canopy wrap-around profiling-to-target sprayer for orchards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(3)：23-32.

[23] 谢家兴，高鹏，莫昊凡，余国雄，胡洁，王卫星. 荔枝园智能灌溉决策系统模糊控制器设计与优化[J]. 农业机械学报，2018，49(8)：26-32.
XIE Jiaxing，GAO Peng，MO Haofan，YU Guoxiong，HU Jie，WANG Weixing. Design and optimization of intelligent irrigation decision system in *Litchi* orchard based on fuzzy controller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(8)：26-32.

[24] 王金发，刘柳杏. 基于物联网的智能灌溉装置：CN202411433893.9[P]. 2025-02-11.
WANG Jinfa，LIU Liuxing. Intelligent irrigation device based on the Internet of Things：CN202022248562.1[P]. 2025-02-11.

[25] 史洁，朱显明，张彭，仲昭宇，周宁，魏增斌，张智秋，张学峰. 一种智慧农业灌溉机器人：CN202510156391.4[P]. 2025-03-28.
SHI Jie，ZHU Xianming，ZHANG Peng，ZHONG Zhaoyu，ZHOU Ning，WEI Zengbin，ZHANG Zhiqiu，ZHANG Xuefeng. An intelligent agricultural irrigation robot：CN202510156391.4[P]. 2025-03-28.

[26] 祝旦璞，张廷茂，王林军，王兆顺，芦相英. 一种果园用犁地机：CN202022248562.1[P]. 2021-06-11.
ZHU Danpu，ZHANG Tingmao，WANG Linjun，WANG Zhaoshun，LU Xiangying. A plough for orchards CN202022248562.1[P]. 2021-06-11.

[27] 张斌，张宏文，肖宇星，汪鹏飞. 果园株间除草机的设计[J]. 农

机化研究，2018，40(1)：63-67.
ZHANG Bin，ZHANG Hongwen，XIAO Yuxing，WANG Pengfei. The design of weeding machine allowing trees among plants[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2018，40(1)：63-67.

[28] 赵智宇，朱立成，周利明，吕程序，李沐桐，董鑫. 丘陵果园除草机器人底盘系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 1)：48-57.
ZHAO Zhiyu，ZHU Licheng，ZHOU Liming，LÜ Chengxu，LI Mutong，DONG Xin. Design and experiment of chassis control system for weeding robot in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Suppl. 1)：48-57.

[29] 马若飞. 基于多源信息融合的耕整深度检测系统研究[D]. 中国农业机械化科学研究院,2024.
Ma Ruofei. Research on tillage depth detection system based on multi-source information fusion[D]. China Academy of Agricultural Mechanization, 2024.

[30] 夏烨，雷晓晖，祁雁楠，徐陶，袁全春，潘健，姜赛珂，吕晓兰. 基于改进 Ghost-YOLOv5s-BiFPN 算法检测梨树花序[J]. 智慧农业(中英文)，2022，4(3)：108-119.
XIA Ye，LEI Xiaohui，QI Yannan，XU Tao，YUAN Quanchun，PAN Jian，JIANG Saike，LÜ Xiaolan. Detection of pear inflorescence based on improved ghost-YOLOv5s-BiFPN algorithm[J]. Smart Agriculture，2022，4(3)：108-119.

[31] SHANG Y Y，XU X S，JIAO Y T，WANG Z，HUA Z X，SONG H B. Using lightweight deep learning algorithm for real-time detection of apple flowers in natural environments[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，207：107765.

[32] 开建荣，葛谦，王彩艳，张静，李彩虹，陈翔，赵丹青，孙翔宇，马婷婷，闫玥，王晓静. 一种用于葡萄疏花疏果智能机器人及使用方法：CN202411592984.7[P]. 2024-12-13.
KAI Jianrong，GE Qian，WANG Caiyan，ZHANG Jing，LI Caihong，CHEN Xiang，ZHAO Danqing，SUN Xiangyu，MA Tingting，YAN Yue，WANG Xiaojing. An intelligent robot for grape flower and fruit thinning and its usage method：CN202411592984.7[P]. 2024-12-13.

[33] 高昂，吴昆，宋月鹏，任龙龙，马伟，刘一琳. 基于 LT-YOLO 检测与机器视觉的苹果激光疏花试验台参数优化与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(2)：393-401.
GAO Ang，WU Kun，SONG Yuepeng，REN Longlong，MA Wei，LIU Yilin. Parameter optimization and testing of apple laser flower thinning test bed based on LT-YOLO inspection and machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(2)：393-401.

[34] 杨洲，丁允贺，刘柏林，段洁利，熊俊涛，李君，徐兴，蒋寅龙，袁浩天，黄广生，申东英，欧阳琳. 自适应疏花机及疏花方法：CN202110467116.6[P]. 2021-07-13.
YANG Zhou，DING Yunhe，LIU Bailin，DUAN Jieli，XIONG Juntao，LI Jun，XU Xing，JIANG Yinlong，YUAN Haotian，HUANG Guangsheng，SHEN Dongying，OUYANG Lin. Self-adaptive flower thinning machine and flower thinning method：CN202110467116.6[P]. 2021-07-13.

[35] 戴秀，王坚强，任妮，刘家玉. 智能水肥一体化管控平台的设计与实现[J]. 江苏农业科学，2021，49(18)：177-181.
DAI Xiu，WANG Jianqiang，REN Ni，LIU Jiayu. Design and realization of intelligent water and fertilizer integrated management and control platform[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2021，49(18)：177-181.

[36] 陈平录，苏江红，许静，刘木华. 丘陵果园立式螺旋开沟施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：223-233.
CHEN Pinglu，SU Jianghong，XU Jing，LIU Muhua. Design and experiment of hilly orchard vertical spiral ditching- fertilizing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(10)：223-233.

[37] 于丰华，赵丹，郭忠辉，金忠煜，郭爽，陈春玲，许童羽. 水稻分蘖期无人机高光谱影像混合像元特征分析与分解[J]. 光谱学与光谱分析，2022，42(3)：947-953.
YU Fenghua，ZHAO Dan，GUO Zhonghui，JIN Zhongyu，GUO Shuang，CHEN Chunling，XU Tongyu. Characteristic analysis and decomposition of mixed pixels from UAV hyperspectral images in rice tillering stage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2022，42(3)：947-953.

[38] 白秋薇，张信，罗红品，李光林. 设施果园自动对靶精准变量施肥控制系统[J]. 农业工程学报，2021，37(12)：28-35.
BAI Qiuwei，ZHANG Xin，LUO Hongpin，LI Guanglin. Control system for auto-targeting precision variable-rate fertilization of fruit trees in a greenhouse orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(12)：28-35.

[39] 宋若弘. 自走式果园开沟施肥机无人驾驶控制系统设计与研发[D]. 泰安：山东农业大学，2023.
SONG Ruohong. Design and development of unmanned driving control system for self-propelled orchard ditching fertilizer machine[D]. Tai'an：Shandong Agricultural University，2023.

[40] 熊斌，张俊雄，曲峰，范智棋，王大帅，李伟. 基于 BDS 的果园施药机自动导航控制系统[J]. 农业机械学报，2017，48(2)：45-50.
XIONG Bin，ZHANG Junxiong，QU Feng，FAN Zhiqi，WANG Dashuai，LI Wei. Navigation control system for orchard spraying machine based on Beidou navigation satellite system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(2)：45-50.

[41] 刘理民，何雄奎，刘伟洪，刘紫嫣，韩虎，李扬帆. 果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人[J]. 智慧农业(中英文)，2022，4(3)：63-74.
LIU Limin，HE Xiongkui，LIU Weihong，LIU Ziyan，HAN Hu，LI Yangfan. Autonomous navigation and automatic target spraying robot for orchards[J]. Smart Agriculture，2022，4(3)：63-74.

[42] 董继伟，潘良，曹中华，湛小梅，李亚丽，孙志强，刘汶树，任桂英. 履带式果园对靶仿形施药机设计与试验[J/OL]. 农机化研究，2024：1-10. (2024-12-17) https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1233.S.20241216.2030.037.html.
DONG Jiwei，PAN Liang，CAO Zhonghua，ZHAN Xiaomei，LI Yali，SUN Zhiqiang，LIU Wenshu，REN Guiying. Design and experiment of tracked orchard target alignment and profiling sprayer machine[J/OL]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2024：1-10. (2024-12-17). https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1233.S.20241216.2030.037.html.

[43] 寇雷雷，张红娜. 基于改进 YOLOv5 的苹果采摘机器人多目标识别技术研究[J]. 中国农机化学报，2023，44(11)：162-168.
KOU Leilei，ZHANG Hongna. Research on multi-target recognition technology of apple picking robot based on improved YOLOv5[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2023，

44(11)：162-168.

[44] 毕松，隗朋峻，刘仁学 . 温室高架栽培草莓空间姿态识别与采摘点定位方法[J]. 农业机械学报，2023，54(9)：53-64.
BI Song，WEI Pengjun，LIU Renxue. Spatial posture recognition and picking point location method for greenhouse raised-frame strawberry cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(9)：53-64.

[45] 虞浪，俞高红，吴浩宇，孙福兴，钱孟波 . 欠驱动关节型柑橘采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(17)：29-38.
YU Lang，YU Gaohong，WU Haoyu，SUN Fuxing，QIAN Mengbo. Design and experiment of the end-effector with underactuated articulars for citrus picking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(17)：29-38.

[46] 冯青春，赵春江，李涛，陈立平，郭鑫，谢丰，熊子聪，陈凯文，刘城，严童杰 . 苹果四臂采摘机器人系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2023，39(13)：25-33.
FENG Qingchun，ZHAO Chunjiang，LI Tao，CHEN Liping，GUO Xin，XIE Feng，XIONG Zicong，CHEN Kaiwen，LIU Cheng，YAN Tongjie. Design and test of a four-arm apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(13)：25-33.

[47] 尚书旗，李成鹏，何晓宁，王东伟，王海清，杨帅 . 高酸苹果振动式采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：115-125.
SHANG Shuqi，LI Chengpeng，HE Xiaoning，WANG Dongwei，WANG Haiqing，YANG Shuai. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(3)：115-125.

[48] MA Hao，ZHANG Kai，JIN Xin，JI Jiangtao，ZHU Xu. Identification of blueberry fruit maturity using hyperspectral images technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2020，22(2)：80-90.

[49] 冯玉兵 . 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 南方农机，2023，54(15)：173-175.
FENG Yubing. Research progress on automatic navigation technology of agricultural machinery[J]. China Southern Agricultural Machinery，2023，54(15)：173-175.

[50] 李荣萍 . 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 南方农机，2023，54(4)：165-167.
LI Rongping. Research progress on automatic navigation technology of agricultural machinery[J]. China Southern Agricultural Machinery，2023，54(4)：165-167.

[51] ZHANG Y B，SUN H，ZHANG F H，ZHANG B H，TAO S T，LI H T，QI K J，ZHANG S L，NINOMIYA S，MU Y. Real-time localization and colorful three-dimensional mapping of orchards based on multi-sensor fusion using extended Kalman filter[J]. Agronomy，2023，13(8)：2158.

[52] YE L，LI J，LI P. Improving path planning for mobile robots in complex orchard environments：The continuous bidirectional Quick-RRT* algorithm[J]. Frontiers in Plant Science，2024，15：1337638.

[53] 胡静涛，高雷，白晓平，李逃昌，刘晓光 . 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报，2015，31(10)：1-10.
HU Jingtao，GAO Lei，BAI Xiaoping，LI Taochang，LIU Xiaoguang. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2015，31(10)：1-10.

[54] 艾长胜，林洪川，武德林，冯志全 . 葡萄园植保机器人路径规划算法[J]. 农业工程学报，2018，34(13)：77-85.
AI Changsheng，LIN Hongchuan，WU Delin，FENG Zhiquan. Path planning algorithm for plant protection robots in vineyard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2018，34(13)：77-85.

[55] 胡广锐，孔微雨，齐闯，张硕，卜令昕，周建国，陈军 . 果园环境下移动采摘机器人导航路径优化[J]. 农业工程学报，2021，37(9)：175-184.
HU Guangrui，KONG Weiyu，QI Chuang，ZHANG Shuo，BU Lingxin，ZHOU Jianguo，CHEN Jun. Optimization of the navigation path for a mobile harvesting robot in orchard environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(9)：175-184.

[56] ZHANG L H，ZHANG R R，LI L L，DING C C，ZHANG D Z，CHEN L P. Research on virtual Ackerman steering model based navigation system for tracked vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，192：106615.

[57] 刘杰，付兴兰，李旭，李川红，李光林 . 丘陵山地柑橘果园机器人自主导航与精确控制系统设计与试验[J]. 西南大学学报（自然科学版），2024，46(8)：184-197.
LIU Jie，FU Xinglan，LI Xu，LI Chuanhong，LI Guanglin. Design and test of autonomous navigation and precise control system for robots used in *Citrus orchards* in hilly and mountainous area[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2024，46(8)：184-197.

[58] 刘羊，刘宇洋，陈江春，李景彬，林小卫，蔺广兆 . 标准化果园多功能作业平台关键技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024(1)：31-39.
LIU Yang，LIU Yuyang，CHEN Jiangchun，LI Jingbin，LIN Xiaowei，LIN Guangzhao. Research status and trend of key technologies of standardized orchard multi-functional operation platform[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2024(1)：31-39.

[59] 杨娇 . 丘陵地区柑橘树修剪机的设计与试验[D]. 武汉：华中农业大学，2023.
YANG Jiao. Design and experiment of citrus tree pruners in hilly areas[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2023.

[60] 李果 . 基于视觉感知和双流式喷雾的猕猴桃精准授粉装置研发[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2023.
LI Guo. Accurate pollination device of kiwifruit based on vision perception and air-liquid spray[D]. Yangling：Northwest A & F University，2023.

[61] 邢刚，王玲，刘乐，王术波 . 自走式果园割草机切割器的设计与试验[J]. 山东农业大学学报（自然科学版），2024，55(2)：244-253.
XING Gang，WANG Ling，LIU Le，WANG Shubo. Design and experiment of a self-propelled orchard grass mowing machine with cutting mechanism[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)，2024，55(2)：244-253.

[62] 肖珂，郝毅，高冠东 . 果园自动变距精准施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(10)：137-145.
XIAO Ke，HAO Yi，GAO Guandong. Design and experiment of automatic variable-distance precison spraying system in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(10)：137-145.

[63] KHANAL S R，SAPKOTA R，AHMED D，BHATTARAI U，

KARKEE M. Machine vision system for early-stage apple flowers and flower clusters detection for precision thinning and pollination[J]. IFAC-PapersOnLine，2023，56(2)：8914-8919.

[64] 陈魁，李慧，纳斯哈提，王茂博 . 3PJ-1 型龙门葡萄剪枝机的研制[J]. 中国农机化学报，2017，38(2)：28-33.
CHEN Kui，LI Hui，Nasihati，WANG Maobo. Development of 3PJ- 1 type gantry pruning machine for grapes[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2017，38(2)：28-33.

[65] 郭惠萍，曹亚州，王晨思，荣麟瑞，李怡，王霆伟，杨福增 . 基于迁移学习的苹果落叶病识别与应用[J]. 农业工程学报，2024，40(3)：184-192.
GUO Huiping，CAO Yazhou，WANG Chensi，RONG Linrui，LI Yi，WANG Tingwei，YANG Fuzeng. Recognition and application of apple defoliation disease based on transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(3)：184-192.

[66] 孙乐琳 . 基于改进 YOLOv5s 的梨花识别及密度分级模型的研究[D]. 保定：河北农业大学，2023.
SUN Lelin. Research on pear flower recognition based on improved YOLOv5s and density classification model[D]. Baoding：Hebei Agricultural University，2023.

[67] 陈鲁威 . 基于无人机多光谱遥感的梨树冠层氮素含量监测研究[D]. 镇江：江苏大学，2023.
CHEN Luwei. Research on monitoring of nitrogen content in pear canopy based on unmanned aerial vehicle multispectral remote sensing[D]. Zhenjiang：Jiangsu University，2023.

[68] 刘照银 . 果树病虫害绿色防控技术简述[J]. 中国果业信息，2024，41(4)：78-79.
LIU Zhaoyin. A brief description of green prevention and control technologies for fruit tree diseases and insect pests[J]. China Fruit News，2024，41(4)：78-79.

[69] 谢宏胜 . 龙丰苹果栽培管理技术[J]. 特种经济动植物，2024，27(5)：125-127.
XIE Hongsheng. Longfeng apple cultivation management technology[J]. Special Economic Animals and Plants，2024，27(5)：125-127.

[70] 刘永翠，孙士龙 . 果园土壤肥力管理对果树根系生长的影响[J]. 河北农机，2023(24)：84-86.
LIU Yongcui，SUN Shilong. Effects of soil fertility management in orchards on root growth of fruit trees[J]. Hebei Agricultural Machinery，2023(24)：84-86.

[71] 孟淑婷 . 苹果园土肥水管理技术要点分析[J]. 果农之友，2024(2)：47-49.
MENG Shuting. Analysis of technical points of soil，fertilizer and water management in apple orchard[J]. Fruit Growers' Friend，2024(2)：47-49.

[72] 田秀丽，廖世林 . 果树栽培技术及病虫害防治措施[J]. 南方农机，2024，55(7)：183-186.
TIAN Xiuli，LIAO Shilin. Fruit tree cultivation techniques and pest control measures[J]. China Southern Agricultural Machinery，2024，55(7)：183-186.

[73] 赵巍，黄少雄，邓镒，陶伟，胡军辉 . 基于 5G 工业通信技术的智慧果园灌溉系统设计[J]. 工业控制计算机，2024，37(5)：34-36.
ZHAO Wei，HUANG Shaoxiong，DENG Yi，TAO Wei，HU Junhui. Design of intelligent orchard irrigation system based on 5G communication technology[J]. Industrial Control Computer，2024，37(5)：34-36.

[74] 张旭东 . 基于物候期识别的果园智能灌溉系统设计与实现[D]. 泰安：山东农业大学，2022.
ZHANG Xudong. Design and implementation of orchard smart irrigation system based on phenological period recognition[D]. Taian：Shandong Agricultural University，2022.

[75] 李港 . 苹果联合采收机的分级装箱装置设计与试验研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2023.
LI Gang. Design and experimental research on the grading and packing device of apple combine harvester[D]. Yangling：Northwest A & F University，2023.

[76] 张耀丽 . 基于物联网技术的智慧果园云平台的设计开发[D]. 淄博：山东理工大学，2023.
ZHANG Yaoli. Design and development of intelligent orchard cloud platform based on Internet of Things technology[D]. Zibo：Shandong University of Technology，2023.

[77] 常峥 . 丘陵山地果园喷药机监控系统的设计与试验[D]. 武汉：华中农业大学，2022.
CHANG Zheng. Design and experiment of monitoring system for orchard sprayer used in hilly mountain[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2022.

[78] 郭玉姗 . 山地果园运送装备在线监测系统设计[D]. 广州：华南农业大学，2020.
GUO Yushan. Design of on-line monitoring system for mountain orchard transportation equipment[D]. Guangzhou：South China Agricultural University，2020.

[79] 季宇寒，李寒，张漫，王琪，贾稼，王库 . 基于激光雷达的巡检机器人导航系统研究[J]. 农业机械学报，2018，49(2)：14-21.
JI Yuhan，LI Han，ZHANG Man，WANG Qi，JIA Jia，WANG Ku. Navigation system for inspection robot based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(2)：14-21.

[80] BARGOTI S，UNDERWOOD J P. Image segmentation for fruit detection and yield estimation in apple orchards[J]. Journal of Field Robotics，2017，34(6)：1039-1060.

[81] 陈耀晖，李家一，鲍泽韩，郝国强，余勇华，李善军 . 自主导航柑橘表型巡检机器人设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(3)：49-57.
CHEN Yaohui，LI Jiayi，BAO Zehan，HAO Guoqiang，YU Yonghua，LI Shanjun. Design and experimentation of autonomous navigated citrus phenotype inspection robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(3)：49-57.

[82] 张振乾，李世超，李晨阳，曹如月，张漫，李寒，李修华 . 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法[J]. 农业工程学报，2021，37(21)：9-15.
ZHANG Zhenqian，LI Shichao，LI Chenyang，CAO Ruyue，ZHANG Man，LI Han，LI Xiuhua. Navigation path detection method for a banana orchard inspection robot based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2021，37(21)：9-15.

[83] 罗小波，谢天授，董圣贤 . 基于无人机多光谱影像的柑橘冠层叶绿素含量反演[J]. 农业机械学报，2023，54(4)：198-205.
LUO Xiaobo，XIE Tianshou，DONG Shengxian. Estimation of citrus canopy chlorophyll based on UAV multispectral images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(4)：198-205.

[84] 兰玉彬，朱梓豪，邓小玲，练碧桢，黄敬易，黄梓效，胡洁. 基于无人机高光谱遥感的柑橘黄龙病植株的监测与分类[J]. 农业工程学报，2019，35(3)：92-100.
LAN Yubin，ZHU Zihao，DENG Xiaoling，LIAN Bizhen，HUANG Jingyi，HUANG Zixiao，HU Jie. Monitoring and classification of citrus Huanglongbing based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2019，35(3)：92-100.

[85] 苗林林. 基于无人机遥感的柑橘果树叶面积指数反演研究[D]. 桂林：桂林理工大学，2023.
MIAO Linlin. Inversion of citrus fruit leaf area index based on UAV remote sensing[D]. Guilin：Guilin University of Technology，2023.

[86] 张旭. 基于无人机多光谱遥感的苹果园土壤水碳反演研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2023.
ZHANG Xu. Research on the inversion of soil moisture and organic carbon in apple orchards based on UAV multispectral remote sensing[D]. Yangling：Northwest A & F University，2023.

[87] 刘成良，贡亮，苑进，李彦明. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报，2022，53(7)：1-22.
LIU Chengliang，GONG Liang，YUAN Jin，LI Yanming. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(7)：1-22.

[88] MAJEED Y，KARKEE M，ZHANG Q，FU L S，WHITING M D. Development and performance evaluation of a machine vision system and an integrated prototype for automated green shoot thinning in vineyards[J]. Journal of Field Robotics，2021，38(6)：898-916.

[89] 孙丽娟. 苹果园化学疏花精准控制系统研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2023.
SUN Lijuan. Research on precise control system of chemical thinning in apple orchard[D]. Yangling：Northwest A & F University，2023.

[90] YOU A，GRIMM C，SILWAL A，DAVIDSON J R. Semantics-guided skeletonization of upright fruiting offshoot trees for robotic pruning[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，192：106622.

[91] 顾宝兴，姬长英，王海青，田光兆，张高阳，王玲. 智能移动水果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报，2012，43(6)：153-160.
GU Baoxing，JI Changying，WANG Haiqing，TIAN Guangzhao，ZHANG Gaoyang，WANG Ling. Design and experiment of intelligent mobile fruit picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2012，43(6)：153-160.

[92] ZHANG X，KARKEE M，ZHANG Q，WHITING M D. Computer vision-based tree trunk and branch identification and shaking points detection in Dense-Foliage canopy for automated harvesting of apples[J]. Journal of Field Robotics，2021，38(3)：476-493.

[93] 鲍秀兰，马志涛，马萧杰，黎亦书，任梦涛，李善军. 丘陵果园自然环境下柑橘采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：124-135.
BAO Xiulan，MA Zhitao，MA Xiaojie，LI Yishu，REN Mengtao，LI Shanjun. Design and experiment of citrus picking robot in hilly orchard natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(4)：124-135.

[94] BLOCH V，DEGANI A，BECHAR A. A methodology of orchard architecture design for an optimal harvesting robot[J]. Biosystems Engineering，2018，166：126-137.

[95] 王博，毛罕平，王亚娜，潘世琦. 多维度农机多机协同技术采纳影响因素与作用机制研究[J]. 农业机械学报，2023，54(1)：45-53.
WANG Bo，MAO Hanping，WANG Yana，PAN Shiqi. Influencing factors and mechanism of multi-dimensional agricultural machinery collaborative technologies adoption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(1)：45-53.

[96] 罗锡文，胡炼，何杰，张智刚，周志艳，张闻宇，廖娟，黄培奎. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报，2024，40(1)：1-16.
LUO Xiwen，HU Lian，HE Jie，ZHANG Zhigang，ZHOU Zhiyan，ZHANG Wenyu，LIAO Juan，HUANG Peikui. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2024，40(1)：1-16.

[97] LI Y F，HAN L，LIU L M，HUANG Z，WANG C L，HE X K. Design and spray performance evaluation of an air-ground cooperation stereoscopic plant protection system for mango orchards[J]. Agronomy，2023，13(8)：2007.

[98] 陈成坤. 空-地协同环境下果园信息共享平台设计与实现[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2021.
CHEN Chengkun. Design and implementation of orchard information sharing platform in the air-ground collaborative environment[D]. Yangling：Northwest A & F University，2021.

[99] 贾宜霖. 多旋翼无人机果园植保作业规划及服务系统研发[D]. 泰安：山东农业大学，2022.
JIA Yilin. Scheduling for plant protection using multiple unmanned aerial vehicles in orchard and development of service system[D]. Tai'an：Shandong Agricultural University，2022.

[100] HUANG J，LUO Y，QUAN Q，WANG B，XUE X H，ZHANG Y M. An autonomous task assignment and decision-making method for coverage path planning of multiple pesticide spraying UAVs[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2023，212：108128.

[101] 谢金燕，刘丽星，杨欣，王潇洒，王旭，刘树腾. 苹果园内无人割草机多机协同作业路径优化算法[J]. 华南农业大学学报，2024，45(4)：578-587.
XIE Jinyan，LIU Lixing，YANG Xin，WANG Xiaosa，WANG Xu，LIU Shuteng. A path optimization algorithm for cooperative operation of multiple unmanned mowers in apple orchard[J]. Journal of South China Agricultural University，2024，45(4)：578-587.

[102] 袁帅，宗立波，熊慧君，张鹏，邓箴. 一种智慧果园系统的设计与实现[J]. 农业工程，2019，9(4)：20-25.
YUAN Shuai，ZONG Libo，XIONG Huijun，ZHANG Peng，DENG Zhen. Design and implementation of a kind of intelligent orchard system[J]. Agricultural Engineering，2019，9(4)：20-25.

[103] 郭涛，李宗南，何泽涛，黄平，王思. 智慧果园移动管理服务平台设计与实现[J]. 智慧农业导刊，2023，3(11)：5-8.
GUO Tao，LI Zongnan，HE Zetao，HUANG Ping，WANG Si. Design and implementation of mobile management and service platform for smart orchard[J]. Journal of Smart Agriculture，2023，3(11)：5-8.