DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.04.005

苹果园生产管理智能机械化技术与装备研究进展与展望

李建平[1,2]，李绍波[1]，杨欣[1,2]，张阔[1]，谢金燕[1]，
刘树腾[1]，姜尊豪[1]，张訢[1]，王朋[1]

（1. 河北农业大学机电工程学院，河北保定，071001；
2. 河北省智慧农业装备技术创新中心，河北保定，071001）

摘要：苹果园生产管理面临着劳动力成本上升和人口老龄化的双重挑战，为提高作业效率、降低生产成本、提升果品质量，机械化、智能化技术在苹果园生产管理中的应用愈来愈重要。研究综述宽行密植和间伐提干改造园宜机化作业栽培模式立地条件下苹果园生产管理中智能机械化技术的研究进展；阐述分析果园割草、施药、花果管理、果实采收运输、果树枝条处理等关键环节的机械化技术与装备、智能化技术与装备研究进展，发现现阶段尽管灌溉和施肥等环节机械化程度较高，修剪、疏花、疏果、套袋取袋、采摘等环节仍依赖人工，机械化程度低；且智能技术如无人机、物联网在果园管理中的应用尚不广泛，精准农业和自动化控制等方面有待加强；现有技术独立发展，缺少有效集成，影响生产效率和果品质量提升；技术集成度不高与数据采集与分析能力不足等问题。针对现阶段智慧果园建设的技术模式，需要研发适应不同立地条件的果园机械装备，创建全程机械化示范基地；重点研发关键生产环节的机械化智能化技术，推广易操控的智能机械；利用多源信息感知设备，实现果园环境信息的数字化感知；进行智能决策和精准作业，提高作业效率和质量，通过智慧果园运维系统实现任务分配与调度、作业控制与监测的需求，为构建苹果园生产全程机械化典型应用场景提供技术支撑。

关键词：苹果园；宜机化作业；智能化；割草；施药；采收运
中图分类号：S220 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217（2024）04-0066-18

李建平，李绍波，杨欣，张阔，谢金燕，刘树腾，姜尊豪，张訢，王朋. 苹果园生产管理智能机械化技术与装备研究进展与展望[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(4)：66－83
LI Jianping, LI Shaobo, YANG Xin, ZHANG Kuo, XIE Jinyan, LIU Shuteng, JIANG Zunhao, ZHANG Zhu, WANG Peng. Research progress on intelligent mechanization technology and equipment for apple orchard production management [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 66－83

0 引言

中国是世界上重要的苹果生产国和消费国，2022年苹果产量约为47 572 kt，苹果产量占全球总产量的14%[1]。目前，我国苹果产业呈现向优势区域并趋于集中化和规模化发展态势，然而随着劳动力成本的上升和人口老龄化的加剧，对果园生产管理智能机械化水平提出了更高的要求。轻简机械化智能技术与装备的研发应用，有利于提高果园生产作业的机械化、自动化和智能化水平，以应对劳动力短缺和提升生产效率的需求，有助于降低生产成本、提升果品质量，为果园的可持续发展提供技术支持。

新建苹果园采用宽行密植或传统果园经间伐提干改造的栽培模式，为果园机械应用提供了宜机化作业空间条件，同时良好的通风、光照条件有助于提高果实品质[2-3]。随着社会经济的发展、产业结构调整的推进，农村青壮年劳动力外出务工或转向非农业行业务工，致使果园务工人员年龄较大，且劳动力成本呈上升趋势[4-5]。宜机化的果园立地条件和果园用工成本的上升促进了机械设备在果园生产中的广泛应用，众多学者在果园草体刈割、高效施药、果实采收、枝条处理等方面开展了机械化、智能化技术研发与集成，为构建苹果园生产全程机械化典型应用场景提供了重要技术支撑。

收稿日期：2024-05-08 修回日期：2024-06-28
基金项目：河北省现代农业产业技术体系建设专项资金项目(HBCT2024150202)；国家现代农业产业技术体系建设专项项目(CARS-27)
第一作者：李建平，男，1978年生，河北平山人，硕士，教授；研究方向为果园生产管理机械化及智能装备。E-mail：ljpnd327@126.com

1　苹果园生产机械化技术与装备技术

苹果园生产管理采用机械化、智能化是现代果业发展的重要方向，分析果园割草、施药、花果管理、果实采收运、果树枝条处理等果园生产用工密集且劳动强度大环节的生产机械化技术与装备，明析现有果园生产机械化技术与装备，为构建全程机械化技术模式提供支撑，为苹果产业可持续发展提供动力。

1.1　果园割草机械化技术与装备

果园生草对改善果园环境具有积极作用，生草可以改善土壤肥力和土壤结构，提高土壤的稳定性[6]。为更好发挥生草优势，果园生草覆盖技术与机械割草技术相结合，实现草体刈割粉碎还田，其经济效益远高于清耕[7]，其工作原理如图 1 所示。

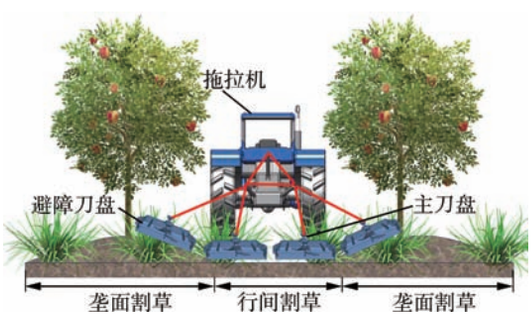


图 1　果园割草机械工作原理

Figure 1　Orchard mowing machinery working principle

通过与拖拉机配套的割草机、乘坐式割草机、智能割草机等机具对果树行间草体进行刈割粉碎，学者对割草机结构、切割粉碎原理与技术、割草作业性能等方面进行了研究。果树行间草体刈割粉碎采用行间割草机[8]，为适应起垄铺园艺地布栽培模式下果园垄面割草作业要求，设计了垄面割草机[9]；为适应不铺园艺地布果树株间割草作业要求，利用避障圆盘机构[10]实现了株间避障割草；利用铰接转向[11]方法提高了割草机在丘陵山地行走的稳定性；基于运动学仿真优化了切割刀盘结构参数[12]；分析了刀片最佳几何参数[13]，利用激光熔覆[14]、等离子堆焊[15]试验了刀片的使用寿命，经表面强化后的刀片寿命明显增加。利用多层甩刀[16]、单层甩刀[17]、直刀[18]分析了割草机碎草性能，碎草效果良好，割茬整齐率在 93%～100%；利用割草机腔壳内气流辅助技术[19]研究草体在腔内流动状况，分析草体被切割粉碎效果[20]。通过改进机具自身性能[21]、利用图像识别技术[22]研究了割草机目标识别、障碍物检测，实现割草机的自动控制，进而提高割草机的工作效率。果园生草技术提升土壤肥力和稳定性，与机械割草结合，提高经济效益。研究包括割草机设计、性能优化、自动控制，以提高作业效率和割草质量。

1.2　果树施药机械化技术与装备

苹果园每年约喷施 8～15 次农药用于防治果园病虫害，其防治工作量约占果树全年管理总工作量的 30%[23]，国内典型的果园施药机械如图 2 所示。针对果树冠层大、枝叶密等特点，国内外研究人员为提高喷雾机雾滴沉积量，减少雾滴飘移量，对气流辅助喷雾技术、循环喷雾技术、仿形喷雾技术、静电喷雾技术以及喷雾机结构进行了研究。为提升雾滴的穿透性，利用辅助气流喷雾技术设计了多风扇风送喷雾机[24]、塔型风送式喷雾机[25]、多通道风送式喷雾机[26]和离心加农炮喷雾机[27]，辅助气流能够将雾滴 2 次雾化并促使雾滴运动至果树冠层内膛。为降低雾滴的飘移量，利用循环喷雾技术设计了"Π"型喷雾机，将未沉积在叶片的药液回收再利用，试验表明"Π"型喷雾机可提高农药回收率 44.0%[28]；研究人员将辅助气流喷雾技术与循环喷雾技术相结合，设计了环流式循环风送喷雾机[29]、隧道式风速喷雾机[30]。为提升雾滴的沉积均匀性，利用仿形喷雾技术设计了组合圆盘式喷雾机[31]、果园仿形喷雾机[32]与多关节树木仿形喷雾机[33]。为提升雾滴在叶片的附着性，结合辅助气流喷雾技术与静电喷雾技术设计了果园风送式静电喷雾机[34]、双气流辅助静电喷雾机[35]、气力雾化风送静电弥雾机[36]，有效减少雾滴的横向飘移。为减少雾滴的飘移量，学者改进了喷雾机结构，优化了气流分配方案，利用多气流协同式喷雾机[37]与伞形风场式防飘装置[38]，能够适配不同环境风速，提高果园植保施药效果。现阶段研究人员通过气流辅助、循环、仿形和静电喷雾技术，改进喷雾机结构，提高雾滴沉积量和均匀性，减少飘移，优化施药效果[39]。



图 2　果园施药机械与装备

Figure 2　Orchard spraying machinery and equipment

1.3 果树花果管理机械化技术与装备

果树中高冠层的疏花疏果套袋采摘等作业需要借助果园辅助作业平台来实现,解决借助扶梯或简易平台频繁更换作业工位、安全风险大等问题。受国内苹果园立地条件限制,果园辅助作业平台多采用自走式结构,具备行走、装载运输、升降、自动调平等功能[40]。学者针对作业平台升降结构设计、作业性能等方面开展工作。果园辅助作业平台升降机构以剪叉式为主[41],利用ADAMS[42-43]、Workbench[44]等仿真分析剪叉式结构的稳定性与承重能力;通过分析果树冠层、果实分布与作业平台空间结构协调关系,建立可达工作空间模型,利用遗传算法得到平台最优结构参数[45](图3)。通过对平台不同状态进行力学分析、建立力矩平衡的数学模型分析了作业平台在纵向上坡、纵向下坡和横停坡面3种作业状态的稳定性,结果表明果园辅助作业平台能够通过的最大坡度角为30°[46];利用多体动力学模型和伪损伤保留编辑法,将载荷谱进行多方面对比得到辅助作业平台最小寿命历程和年限[47];建立人—采摘平台的振动模型,进行不同路况和车况下的低速振动试验,得到果园辅助作业平台振动频率集中在0~16 Hz,其固有频率能够避开了人体的敏感区域[48],降低振动对人体身心健康的影响。果树高冠层作业借助自走式果园辅助作业平台,解决安全风险和频繁更换工位问题。研究包括剪叉式升降机构设计、仿真分析、力学稳定性、寿命预测和振动频率优化,以提高作业效率和安全性。

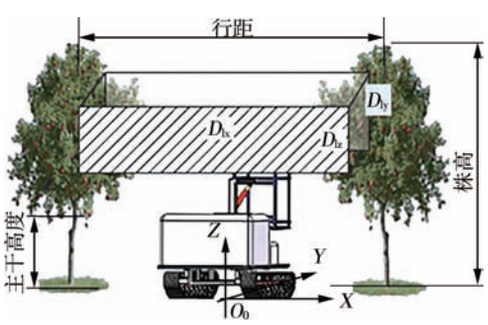


图3 基于工作空间的果园作业平台

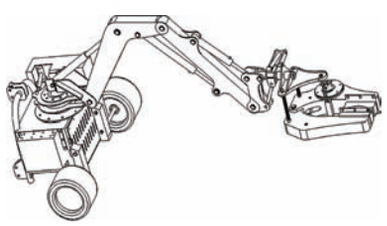
Figure 3 Workspace-based platform for orchard operations

1.4 果实采收运机械化技术与装备

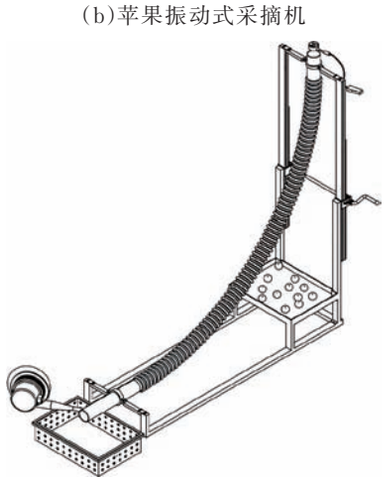
果实采收运是果园生产中的重要生产环节,涉及采摘、收集和运输等工序[49],良好的果实采收运机械化技术对减轻果实磕碰损伤、提高果实转运效率、降低果筐搬运强度有重要意义。苹果机械化采收包括采用采摘兜辅助工具和振动捡拾等,果实(筐)通过三轮运输车实现从田间到仓储库的转运,学者们对苹果采收辅助工具、苹果振动采收和运输过程中苹果的减损等方面进行了研究(图4)。对于鲜食苹果采收,利用偏心式圆盘刀片[50]、圆锯刀片[51]切割果柄,利用气吸式[52]、恒力柔顺[53]末端执行器摘取枝干上的苹果,使苹果沿缓冲下落通道落入水果采摘收集装置中,完成苹果的采收作业;利用管道气力输送装置[54]辅助来采收苹果,通过正交试验对进风装置结构参数进行优化并得到其最优组合参数。试验表明采收辅助工具使采摘苹果成功率达85%~95%,单果采摘时间为3~8 s,且苹果损伤程度很小。



(a)苹果四臂采摘机器人



(b)苹果振动式采摘机



(c)管道气力输送装置

图4 果实采收运机械

Figure 4 Fruit harvesting and transportation machinery

对于加工苹果采收,通过建立果实—树枝单摆动力学模型[55]、苹果树二级树枝振动力学模型[56-57]分析果实脱落条件,利用ANSYS软件对苹果树模型进行有限元仿真分析,确定振动采摘机最优工作参数和苹果树不同位置树枝最佳的振动参数组合,试验表明苹果振动采收的摘净率达94%~96%,满足加工苹果高

效采收的要求。果园的水泥路面、砂砾道路等不同路面状况会导致运输车果箱内的苹果出现磕碰损伤，利用ADAMS和EDEM联合仿真技术[58]，对苹果运输车运输过程进行仿真，优化悬架机构，提升运输车减振性能；利用苹果运输振动模拟试验台[59]，对苹果箱的包装结构参数进行响应面优化分析并得到苹果箱最优包装结构组合，为运输过程的苹果减损提供技术支撑。果园果实采收运机械化技术对减轻损伤、提高效率、降低劳动强度至关重要。研究包括采摘辅助工具、振动采收、运输减损等方面，通过优化工具和运输车结构，提高采收成功率和运输安全性，满足鲜食和加工苹果的高效采收需求。

1.5　果树枝条处理机械化技术与装备

果树枝条修剪对于维持果树树形、调理果树冠层分布、提高水果品质和产量具有重要的作用[60]，如图5所示。

学者利用Hyper Mesh及ANSYS/LS-DYNA等仿真分析软件探寻锯切参数对苹果树枝条修剪时的锯切力影响，确定了修剪的最佳锯切参数[61]，设计了双边齐式修剪机[62]；通过对刀架、刀片进行了应力分析、变形分析[63]，确保所选材料和结构满足修剪的性能要求，修剪合格率达到了92.8%。通过高速旋转锯片与定刀配合切断树枝，修剪臂根据果树修剪要求调节修剪宽度和高度[64]，实现对果树新梢修剪作业。采用Box-Benhnken中心组合试验方法对切割试验台参数进行研究，通过建立多元数学回归模型得出最优切割速度为150 mm/min、动刀契角为30°[65]。设计了往复式切割试验台，以苹果枝条峰值切割力为目标值，通过试验探究最优切割参数组合为平均切割速度0.4 m/s、切割间隙1.5 mm、刀具滑切角20°[66]。

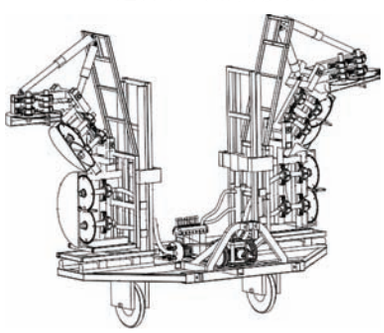
滚刀式果树枝条粉碎机[67]的滚刀与定刀的剪切作用将枝条破碎[68]。在锤爪和固定刀片的双重作用下使枝条在粉碎腔中粉碎，通过移动式过滤网排出机器[69]。两片动刀片在粉碎筒上以中心轴呈180°[70]对称布置，以滑切的方式对枝条进行粉碎处理。为提高枝条粉碎效率，设计了具有分类设置粉碎模式和枝条切割长度可调的履带式枝条粉碎机，转子产生高速气流随刀片旋转[71]，枝条在气流中加速并被反复冲击提高了粉碎效果。果树修剪对树形、产量和品质至关重要。研究通过仿真分析确定最佳锯切参数，设计修剪机提高修剪效率和合格率。滚刀式枝条粉碎机通过剪切和锤爪作用提高粉碎效率，履带式粉碎机通过高速气流和可调切割长度优化了粉碎效果。



(a)现代苹果园高效修剪机械



(b)双边齐切式柑橘修剪机



(c)自走式双边桑树修剪机

图5　果树枝条处理机械

Figure 5　Fruit tree branch processing machinery

2　苹果园生产智能化技术

苹果园生产智能化技术是智慧果园建设的重要内容，通过集成信息技术、物联网技术、自动化控制技术实现对苹果园环境的实时监控、精准管理和智能决策，有助于解决果园劳动力短缺痛点，并提升苹果产业整体竞争力。

2.1　果园智能割草技术

智能割草机(或割草机器人)是一种结合了人工智能、机器视觉和自动化技术的割草机械，工作原理如图6所示。近年来自动导航技术、路径规划技术、自主避障技术等技术逐渐应用于果园割草机，提升了果园割草机的智能化、信息化。利用全球卫星导航系统、北斗导航系统、惯性导航系统、机器视觉导航系统进行智能割草机的定位测姿，利用图像识别[72]提取作业边界信息，利用PID控制方法[73]进行位姿监控，利用预瞄准的纯路径追踪算法[74]、两级深度神经网络路径跟踪算法[75]等路径追踪算法实现割草机轨迹追踪，并利用卡

尔曼滤波[76]提高追踪精度。

智能割草机的路径规划主要分为全局路径规划和局部路径规划,学者们对算法优化进行了众多研究[77]。基于改进的粒子群优化算法[78]、改进的A*算法和DFS算法[79]、混合算法[80]实现智能割草机作业全程路径规划,降低割草机器人油耗22.51%、非工作距离3.26%。局部路径规划是在环境信息未知情况下进行动态规划,注重路径的实时性和安全性,割草作业时需要考虑避障。利用车载传感器,如激光雷达[81-82]、机器视觉[83]获取路况及障碍物信息后,通过改进蚁群算法[84]、人工势场法[85-86]进行避障决策,实现割草机实时避障,降低果园地形对割草机作业的影响。智能割草机融合了人工智能和自动化技术,通过自动导航、路径规划和自主避障技术提高果园割草效率和智能化水平。利用全球卫星导航、图像识别、PID控制和路径追踪算法实现精准割草,同时通过算法优化和传感器信息进行动态避障,降低了油耗和非工作距离。

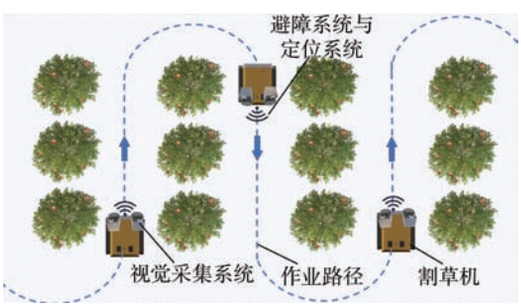


图6 智能割草机工作原理

Figure 6 Intelligent lawnmower working principle

2.2 果园智能施药技术

变量喷雾技术作为果园喷雾机实现精确施药的重要技术,是通过传感器获取果树病虫害面积、植株密度等农艺信息,结合实时获取施药设备位置、施药量、喷雾压力等施药机械参数信息,经信息融合处理后根据防治病虫害需求实现对果树的精确施药[87-89],有效缓解农药过量使用、降低喷洒过程中雾滴飘移、提高农药防控效率[90]。

通过研究风送喷雾机气流与树冠、环境气流相互作用,预测果树冠层内气流衰减趋势[91],为设计合理的气流强度提供依据。应用三维超声波风速计动态评估轴流风机产生的气流,实时调整喷雾角度和风送辅助气流的强度与角度[92]。利用激光传感器和超声波传感器测量果树冠层的叶片数量,并根据树冠的一致性控制施药量,确保对不同大小和密度的冠层进行均匀施药,并减少雾滴飘移[93]。应用变量喷雾机实时连续地调节气流速度和喷雾压力,减少了飘移量(图7)[94-95]。

在施药雾滴效果检测方面,通过对粘连雾滴的识别和分割技术研究[96],解决了粘连雾滴识别精度不高、分割效果较差等难点;基于ImagePy的水敏纸图像预处理和雾滴参数测量方法提高了药液雾滴的检测精度[97]。应用雾滴边缘光学成像方法[98]发明了便携式雾滴沉积和分布检测装置,可实现田间喷雾现场可重复采样和在线自动数字化作业。变量喷雾技术通过传感器获取农艺信息和施药机械参数,实现果树精确施药,提高防控效率,减少农药过量使用和雾滴飘移。研究风送喷雾机气流与树冠相互作用,动态评估并调整喷雾角度和风送强度。利用激光和超声波传感器测量树冠,控制施药量,实现均匀施药。开发便携式检测装置,提高了雾滴沉积和分布的检测精度。

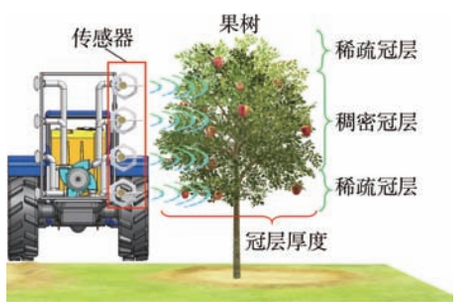


图7 智能施药技术工作原理

Figure 7 Principle of intelligent application technology

2.3 果树花果管理智能化技术

果树花果管理用的果园辅助作业平台智能化主要体现在作业台面自动调平、自动控制等方面(图8)。采用双轴倾角传感器检测平台倾斜角度,通过位置式PID控制电动液压站电机和电动推杆,实现辅助作业平台作业台面调平[99];采用PID双闭环控制策略,基于单片机搭建板球控制调平系统,利用电磁阀开关控制液压油缸实现调平[100],保证果园辅助作业平台处于高空时的静态稳定性;利用融合卡尔曼滤波的模糊PID控制电磁阀驱动油缸实现自动调平[101],提高果园辅助作业平台调平的控制效果;借助位移传感器和角度传感器,通过模糊PID控制系统进行二次调平,提高果园辅助作业平台调平精度[102];使用PI控制,通过双轴倾角传感器检测倾角,借助液压缸比例控制来实现果园辅助作业平台调平[103],实现20°以内坡度果园辅助作业平台的安全稳定作业要求。

基于改进A-Star算法与支持向量机回归融合的果园路径拟合与导航方法,实现果园辅助作业平台对果园环境自主导航的要求,通过收集果园辅助作业平台的行进速度、转弯半径和果园点云数据,计算转弯曲率半径、预测最优理论速度,为果园辅助作业平台自主导航提供决策参考[104];基于LD3322主控芯片的语音控制实现工作平台伸缩,利用北斗卫星导航系统获取果

园辅助作业平台位置数据、利用斯坦利算法实现了路径跟踪控制的自动导航系统[105]；提高了果园辅助作业平台的适用性；应用多工位采收平台的完全协同控制系统，通过输入果树未采摘区域果实分布模型、结合多工位作业平台工人采摘效率，对工人的采摘位置进行实时调整，动态优化平台运行速度，使苹果采收速度提高了9.5%[106]。果园辅助作业平台智能化体现在自动调平和控制，通过传感器和PID控制策略实现静态稳定性和调平精度。采用改进算法和导航技术实现自主导航，提高适用性。应用协同控制系统优化采收效率，提升了作业平台的自动化和智能化水平。



图8　果树花果管理作业平台

Figure 8　Fruit tree flower and fruit management platform

2.4　果实采收运智能化技术

苹果智能化采收是果实收获的发展趋势。为有效减少苹果采收环节的机械损伤，学者对苹果的准确定位、机械臂、末端执行器控制等方面进行了研究。采用机器人采摘实现鲜食苹果的采收[107]，苹果采收机器人由行走平台、视觉系统、控制系统、机械臂和末端执行器等组成[108]，利用视觉系统对苹果进行识别和定位(图9)，将苹果三维坐标信息反馈给控制系统，机械臂带动末端执行器实现对苹果的分离，完成对苹果的采收作业[109]。

采用末端执行器联接机械臂搭配机器视觉的形式实现改良果树树形的苹果采收；为适应自然环境下果实识别准确性差的问题，对苹果识别、定位技术进行研究[110]，利用Faster R-CNN、YOLO等卷积神经网络提高苹果识别[111]、定位精度[112]；为适应鲜食苹果低损采摘的要求，设计了二指扭转末端执行器[113]可通过扭断果梗实现苹果采摘，避免与果实直接接触造成损伤；设计了四臂并行采摘的“采—收—运”一体式机器人可实现四臂协同采摘作业[114]，提高了采摘效率。

利用运动方程[115]、Matlab运动仿真[116]研究了采摘机器人末端执行器和机械臂的采摘成功率、采摘损伤率等作业性能。利用真空式末端执行器[117]、指夹式末端执行器[118]分析苹果采摘性能，采摘成功率分别为78%和80.17%；设计了结构化果园苹果收获机器人[119]，基于有限元法分析了柔性三指FRE结构的末端执行器的抓握能力并评估其对果实损伤的可能性，基于人手动作捕捉数据和采摘动作优化仿真试验提出两种采摘路径，使基于MoveIt的机械臂路径规划可以实现苹果采摘的预期目标。苹果智能化采收技术通过机器人采摘系统减少损伤，包括视觉识别、定位、机械臂和末端执行器控制。利用卷积神经网络提高识别精度，设计特殊末端执行器适应低损采摘，并通过仿真优化机械臂路径规划，提高了采摘效率和成功率。



图9　复杂背景下机器人采摘苹果定位

Figure 9　Robotic apple picking localization in complex contexts

2.5　果树枝条处理智能化技术

通过视觉识别、图像处理等技术实现枝条位置识别、构造虚拟果树模型以便寻找枝条最优修剪方式，其工作原理如图10所示。通过对苹果树图像信息的加工处理设计了一种机器识别系统，可适用于高纺锤形苹果树的自动修剪[120]。基于Unity3D果树交互虚拟修剪技术，模拟果树枝条修剪，利用修剪规范的准则判断虚拟修剪是否合适[121]，进而指导实际的果树修剪；通过构建苹果树模型和苹果树修剪反应模型，设计了三维交互式修剪仿真，解决了修剪耗费时间和精力的问题[122]。通过优化模型和机器人的工作轨迹[123]，使机器人的手臂准确到达枝条修剪点，实现枝条精准修剪。

通过RGB-D相机搭建的视觉系统形成果树信息库，利用DeepLabV3+深度学习模型的分割方式解决了复杂树形结构修剪枝难以识别的问题[124]。通过提高过渡曲线两端切矢约束的条件、对参数域内节点进行精插补，增加空间路径的平滑性，实现灌木机器人对复杂造型的光顺轨迹规划[125]。基于改进Mask R-CNN模型的番茄侧枝修剪点的识别方法，通过MobileNetv3-Large来降低模型复杂度和提升运行速度[126]，添加ECA注意力机制提升模型精度，结合相邻掩膜约束条件提升了修剪点的准确率。以ResNet1O

1+FPN 为主干特征提取网络的 MaskR-CNN 模型[127],通过主干特征提取网络和分割性能的对比试验其拟合与泛化能力出众能够克服各类自然种植背景因素,分割目标边缘完整。利用视觉识别和图像处理技术,开发了适用于苹果树自动修剪的机器识别系统,通过虚拟修剪技术指导实际修剪。构建果树模型和修剪反应模型,实现三维交互式修剪仿真,优化机器人工作轨迹,提高了修剪效率。

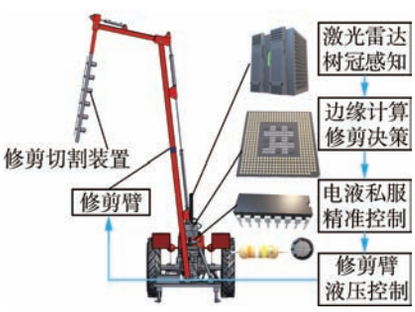


图 10 果树枝条修剪机工作原理

Figure 10 Fruit tree branch pruner working principle

2.6 果园灌溉智能化技术

灌溉对果树生长发育具有重要意义。随着水肥一体化技术在果园的广泛应用,模糊控制理论[128]、物联网技术[129]等提升了灌溉技术的智能化水平。采用模糊 PID 技术设计智能灌溉系统[130],减少了系统响应时间;利用 PID-LPF 控制算法可提高传统模糊控制智能灌溉系统的作业性能[131],利用 SOA 算法优化 PID 参数提高水泵运行平稳性[132];设计物联网技术与模糊控制技术相结合的灌溉系统[133-134],以决策因素预测灌溉量和灌溉时机的智能灌溉系统[135];为提高水资源利用率并且降低灌溉系统能源消耗,通过 STM32F103 芯片和 ST7540 相结合方式设计了果园灌溉系统以期提高果实产量[136];采用 Zigbee 和 GPRS 技术设计了可远程采集果园环境、控制电磁阀开关的果园智能灌溉系统[137-138];基于物联网技术及人工智能技术设计具有专家系统参与的智能灌溉系统,可提高灌溉系统智能化水平[139]。

基于神经网络进行需水量及土壤墒情模型的预测[140],采用思维进化算法优化传统神经网络模型提高预测模型准确性[141-142];利用改进遗传算法和模拟退火算法相结合的预测模型[143]实现动态预测;通过 PSO 进行 ELM 模型的优化以便提高 ELM 预测模型的精度[144-145];NDPSO-BP 模型[146-147]、Attention 机制[148-149]的 LSTM 模型均是预测精度较高、数据拟合效果较好的预测模型。智能灌溉系统采用模糊 PID、PID-LPF 算法优化控制性能,结合 STM32F103 芯片提高产量,并利用 Zigbee、GPRS 实现远程控制,专家系统提升智能化与灌溉精度和水资源利用率[150-152]。

3 存在的问题与差距

苹果园生产管理智能机械化技术与装备虽然在提高生产效率、降低劳动强度、提升果品质量等方面发挥了重要作用,但与现代农业发展的需求相比,仍存在一些问题和差距。

机械化水平不均衡:苹果园的机械化生产在不同环节发展不均衡。一些环节如灌溉、施肥等已经实现了较高程度的机械化,而修剪、疏花与疏果、套袋取袋、采摘等环节仍主要依赖人工,机械化程度较低。尽管一些先进的智能技术如无人机、物联网等已经开始在果园管理中应用,但整体而言,智能化技术在苹果园生产中的应用还不够广泛,特别是在精准农业、自动化控制等方面。

技术集成度不高:现有的智能机械化技术往往独立发展,缺乏有效的集成应用。这导致果园管理的各个环节之间缺乏协同,影响了整体生产效率和果品质量的提升。不同地区的果园条件差异较大,如地形、气候、土壤等,现有的智能机械化技术与装备可能无法适应所有果园的特定需求,需要进一步的定制化和本地化改进。智能机械化技术依赖于大量精确的数据支持,但目前果园内的数据采集、处理和分析能力还有待提升,特别是在大数据、云计算等技术的应用方面。

解决这些问题需要科研机构、企业和果农等多方面的共同努力。科研机构和企业需要加强技术研发,提高技术的集成度和适应性,降低应用成本;果农需要加强技术培训,提高对智能机械化技术的认识和应用能力。同时,还需要加强技术与农艺的结合,推动智能机械化技术与农业生产的深度融合,以实现苹果园生产管理的现代化和可持续发展。

4 苹果园生产管理智能化趋势

苹果园生产管理的轻简智能化技术是现代农业发展的关键方向,旨在提高作业效率、降低劳动强度、减少成本,并提升果品质量。以下是对苹果园生产机械轻简智能化技术研发与集成的展望。

1)政策推动与立地条件适应性:随着政策的引导,林果业向山区发展,需要研发适应梯改坡或坡改梯立地条件的果园机械装备,以满足不同地形条件下的作业需求;创建果园机械装备研产推用的生产全程机械化典型应用示范基地,为技术的推广和应用提供实践平台。

2)关键环节机械化智能化技术:重点研发割草、施药、花果管理、果实采收运等关键生产环节的机械化智

能化技术，研制推广智能割草机、枝条修剪机器人、智能精准喷药系统、智能灌溉系统、果实采摘机械手、物料智能运输车等可靠易操控智能机械，以实现生产过程的自动化和智能化。

3）智能机械设备研制与推广：开发智能割草机、枝条修剪机器人、智能精准喷药系统、智能灌溉系统、果实采摘机械手、物料智能运输车等设备，这些设备需可靠、易操控，以适应不同规模果园的需求，为创建果园机械装备研产推用的生产全程机械化典型应用示范基地奠定基础。

4）智慧果园关键技术研发：利用地面机载仪器、无人机、遥感卫星等信息感知设备获取果园气象信息、土壤信息、树体长势信息、病虫害信息以及果园机械的作业位置、作业工况和性能参数信息，实现果园环境信息的数字化感知，为智能决策提供数据支持。

5）智能决策与精准作业实施：根据果园草体长势、树体生长物候期等信息，进行智能决策，并实施精准作业，提高作业的效率和质量。将信息感知设备所获取信息、机具作业信息及反馈信息均存储于智慧果园运维系统，实现果园生产的任务分配与调度、机具作业控制与状态监测、显示，为智慧果园建设与实施提供重要技术支撑。

参 考 文 献

[1] 国家统计局．中国统计年鉴(2023)[EB/OL]．https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2023/indexch.htm，2023－12－10.

[2] 张秀美，王宏，刘志，等．‘岳帅’苹果不同负载量光照分布与果实品质的关系[J]．果树学报，2017，34(11)：1408－1414.
ZHANG Xiumei，WANG Hong，LIU Zhi，et al. Relationships between distribution of relative light intensity and quality in ‘Yueshuai’ apple with different fruit loads [J]. Journal of Fruit Science，2017，34(11)：1408－1414.

[3] 童盼盼，张亚若，汤蕾，等．光照和温度条件对富士苹果糖心形成的影响[J]．西北农业学报，2020，29(4)：579－586.
TONG Panpan，ZHANG Yaruo，TANG Lei，et al. Effects of light and temperature on sugar core formation of fuji apple [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica，2020，29(4)：579－586.

[4] 乔志霞，霍学喜．农业劳动力老龄化对土地利用效率的影响[J]．华南农业大学学报(社会科学版)，2017，16(5)：61－73.
QIAO Zhixia，HUO Xuexi. Impact of agricultural labor aging on farmland use efficiency [J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)，2017，16(5)：61－73.

[5] 张聪颖，畅倩，霍学喜．适度规模经营能够降低农产品生产成本吗——基于陕西661个苹果户的实证检验[J]．农业技术经济，2018(10)：26－35.
ZHANG Congyin，CHANG Qian，HUO Xuexi. Can the moderate-scale management really reduce the production costs of agricultural products? —An empirical analysis based on 661 Shaanxi Apple farmers [J]. Agricultural Technology and Economics，2018(10)：26－35.

[6] REN J，LI F，YIN C. Orchard grass safeguards sustainable development of fruit industry in China [J]. Journal of Cleaner Production，2023，382：135291.

[7] XIANG Y，LI Y，LIU Y，et al. Factors shaping soil organic carbon stocks in grass covered orchards across China：A meta-analysis [J]. Science of the Total Environment，2022，807：150632.

[8] 王志强，张敬国，刘凤之，等．果园行间碎草机的研制与试验[J]．中国农机化学报，2017，38(9)：36－39.
WANG Zhiqiang，ZHANG Jinguo，LIU Fengzhi，et al. Development and experiment of inter-row mower in orchard [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2017，38(9)：36－39.

[9] 李雪军，王鹏飞，杨欣，等．果园垄面割草机设计与试验[J]．中国农机化学报，2019，40(5)：47－52.
LI Xuejun，WANG Pengfei，YANG Xin，et al. Design and test of orchard offset traction type lawn mower [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40(5)：47－52.

[10] 沈启扬，雷晓晖，马拯胞，等．F.US-UFO型果园避障割草机试验研究[J]．中国农机化学报，2021，42(10)：65－71，77.
SHEN Qiyang，LEI Xiaohui，MA Zhenbao，et al. Design and experiment of operation platform for characteristic forest and fruit industry [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，42(10)：65－71，77.

[11] 杨天，赵武云，辛尚龙，等．铰接转向果园割草机的设计与试验[J]．中国农业大学学报，2022，27(5)：61－72.
YANG Tian，ZHAO Wuyun，XIN Shanglong，et al. Design and test of articulated steering orchard mower [J]. Journal of China Agricultural University，2022，27(5)：61－72.

[12] 李雪军，王鹏飞，丁顺荣，等．基于虚拟正交试验果园垄面割草机侧刀盘切割性能分析[J]．中国农业科技导报，2020，22(9)：113－121.
LI Xuejun，WANG Pengfei，DING Shunrong，et al. Cutting performance of side cutter head of orchard mower based on virtual orthogonal test [J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2020，22(9)：113－121.

[13] 王鹏飞，刘俊峰，程小龙，等．乘坐式果园割草机割刀使用性能研究[J]．农机化研究，2015，37(8)：181－

183, 188.
WANG Pengfei, LIU junfeng, CHENG Xiaolong, et al. A study on the performance of riding orchard mower cutting knives [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 181－183, 188.

[14] 叶鹏云. 割草机刀片激光表面强化的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
YE Pengyun. Laser surface hardening mower blade [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.

[15] 张校珩. 果园割草机刀片等离子堆焊层组织和耐磨研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
ZHANG Jiaoheng. Study on the organisation and wear resistance of plasma cladding layers on orchard mower blades [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.

[16] 刘学串, 钟波, 闵令强, 等. 9GS-2.0割草机的设计及试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 79－84.
LIU Xuechuan, ZHONG Bo, MING Linqiang, et al. Design and test of 9GS-2.0 field mower [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41 (3): 79－84.

[17] 马攀宇, 李善军, 赵纯清, 等. 柑橘园仿形割草机切割器的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(6): 156－162.
MA Panyu, LI Shanjun, ZHAO Chunqing, et al. Design and test of the orange garden profile mower cutter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38 (6): 156－162.

[18] 傅美贞, 田军伟, 陈德俊, 等. 小型旋转式割草机研究设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 116－119, 130.
FU Meizhen, TIAN Junwei, CHEN Dejun, et al. Design of a small rotary mower [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 116－119, 130.

[19] WU B, ZUO T, LI Z, et al. Numerical simulation and optimization of the airflow field of a forage drum mower [J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 5910.

[20] 任兴涛, 唐灵飞, 仲建军. 小型多功能旋转割刀式割草机设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(10): 99－103.
REN Xingtao, TANG Lingfei, ZHONG Jianjun. Desian of small multi-function rotary cutter mower [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42 (10): 99－103.

[21] 袁社锋. 计算机图像智能识别下的割草机器人设计研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(11): 136－139.
YUAN Shefeng. Research on design of mowing robot based on computer image intelligent recognition [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46 (11): 136－139.

[22] 王新彦, 易政洋. 基于改进YOLOv5的割草机器人工作环境障碍物检测方法研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(3): 171－176.
WANG Xinyan, YI Zhengyang. Research on obstacle detection method of mowing robot working environment based on improved YOLOv5 [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 171－176.

[23] 刘雪美, 刘兴华, 崔慧媛, 等. 作物冠层雾滴沉积研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 1－20.
LIU Xuemei, LIU Xinghua, CUI Huiyuan, et al. Research progress and trend analysis of crop canopy droplet deposition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 1－20.

[24] NUYTTENS D, BAETENS K, DE SCHAMPHELEIRE M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics [J]. Biosystems engineering, 2007, 97(3): 333－345.

[25] XUN L, CAMPOS J, SALAS B, et al. Advanced spraying systems to improve pesticide saving and reduce spray drift for apple orchards [J]. Precision Agriculture, 2023: 1－21.

[26] 邱威, 缪佳佳, 李小龙, 等. 果园多通道定向风送雾化装置设计与试验[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(3): 547－555.
QIU Wei, MIAO Jiajia, LI Xiaolong, et al. Design and experiment of multi-channel directional atomizer for orchard sprayer [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(3): 547－555.

[27] RANTA O, MARIAN O, MUNTEAN M V, et al. Quality analysis of some spray parameters when performing treatments in vineyards in order to reduce environment pollution [J]. Sustainability, 2021, 13(14): 7780.

[28] DORUCHOWSKI G, HOLOWNICKI R. Environmentally friendly spray techniques for tree crops [J]. Crop Protection, 2000, 19: 617－622.

[29] 邱威, 孙浩, 孙玉慧, 等. 低矮果园环流式循环风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 18－25.
QIU Wei, SUN Hao, SUN Yuhui, et al. Design and test of circulating air-assisted sprayer for dwarfed orchard [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(6): 18－25.

[30] ADE G, MOLARI G, RONDELLI V. Vineyard evaluation of a recycling tunnel sprayer [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(6): 2105－2112.

[31] 周良富, 傅锡敏, 丁为民, 等. 组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 64－71.
ZHOU Liangfu, FU Ximin, DING Weimin, et al. Design and experiment of combined disc air-assisted orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society of

Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 64－71.

[32] 房开拓, 周良富, 尤丽华. 果园仿形风送喷雾机构设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 68－74, 83.
FANG Kaituo, ZHOU Liangfu, YOU Lihua, et al. Design and evaluation of orchard profiling pneumatic sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(3): 68－74, 83.

[33] 遇宝俊. 多关节树木仿形喷雾机及其关键部件研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
YU Baojun. Research on multi-joint tree profiling sprayer and its key components [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.

[34] 李建平, 茹煜, 倪佳胜, 等. 梯形果园风送静电喷雾机仿真分析及试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 45－51.
LI Jianping, RU Yi, NI Jiasheng, et al. Simulation analysis and experiment of trapezoidal orchard air delivery electrostatic spray machine [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(1): 45－51.

[35] 周良富, 张玲, 薛新宇 ,等. 3WQ-400型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 45－53.
ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Design and experiment of 3WQ-400 double air-assisted electrostatic orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 45－53.

[36] 王志强, 郝志强, 刘凤之, 等. 气力雾化风送式果园静电弥雾机的研制与试验[J]. 果树学报, 2017, 34(9): 1161－1169.
WANG Zhiqiang, HAO Zhiqiang, LIU Fengzhi, et al. Design and experiment of an air-atomized, air-assisted and electrostatic orchard sprayer [J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(9): 1161－1169.

[37] 樊桂菊, 牛成强, 张震明, 等. 多气流协同式果园V形防飘喷雾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 138－147.
FAN Guiju, NIU Chengqiang, ZHANG Zhenming, et al. Design and experiment of V-shaped orchard anti-drift spray device with multi-airflow cooperation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 138－147.

[38] FAN G, WANG S, BAI P, et al. Research on droplets deposition characteristics of anti-drift spray device with multi-airflow synergy based on CFD simulation [J]. Applied Sciences 2022, 12: 7082.

[39] 李建平, 李绍波, 于少猛, 等. 伞形风场式防飘喷雾装置沉积特性研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 80－91, 151.
LI Jianping, LI Shaobo, YU Shao, et al. Deposition characteristics of umbrella wind field type anti-drift spray device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 80－91, 151.

[40] 刘羊, 刘宇洋, 陈江春, 等. 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, 5(1): 31－39.
LIU Yang, LIU Yuyang, CHEN Jiangchun, et al. Research status and trend of key technologies of standardized orchard multi-functional operation platform [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 31－39.

[41] 杨涛, 孙付春, 黄波, 等. 果园作业平台关键技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 152－159.
YANG Tao, SUN Fuchun, HUANG Bo, et al. Research progress on key technologies of orchard operating platform [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 152－159.

[42] 李正超, 唐乐为, 吴明亮, 等. 偏移剪叉式油茶果收集装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 62－71.
LI Zhengchao, TANG Lewei, WU Mingliang, et al. Design and test of the fruit collecting device of camellia oleifera with anqular scissor mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3): 62－71.

[43] 崔志超, 管春松, 陈永生, 等. 温室用小型多功能电动履带式作业平台设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 48－57.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, CHEN Yongsheng, et al. Design of small multi-functional electric crawler platform for greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 48－57.

[44] 畅博彦, 闫圣杰, 梁栋, 等. 具有变泊松运动特性的剪叉式折展机构运动学分析[J]. 工程设计学报, 2024, 31(1): 20－30.
CHANG Boyan, YAN Shengjie, LIANG Dong, et al. Kinematics analysis of scissor deployable mechanism with variable Poisson motion characteristics [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2024, 31(1): 20－30.

[45] 樊桂菊, 李钊, 毛文华, 等. 基于工作空间的果园作业平台结构参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 34－42, 265.
FAN Guiju, LI Zhao, MAO Wenhua, et al. Structure parameter optimization and experiment of orchard platform based on workspace [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 34－42, 265.

[46] 刘伟起, 刘洪杰, 史璐, 等. 履带式果园作业平台结构稳定性分析与研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(4): 42－47.

LIU Weiqi, LIU Hongjie, SHI Lu, et al. Analysis and research on structural stability of tracked orchard operation platform [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(4): 42－47.

[47] 刘佳奇, 邱绪云, 高琦, 等. 果园作业平台车架耐久性研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 160－168.
LIU Jiaqi, QIU Xuyun, GAO Qi, et al. Research on durability of platform frame for orchard operation [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 160－168.

[48] 王丙龙, 郝欢欢, 聂森, 等. 果园采摘平台振动性能试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 213－216.
WANG Binglong, HAO Huanhuan, NIE Sen, et al. Vibration performance test of orchard picking platform [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 213－216.

[49] 冯青春, 赵春江, 李涛, 等. 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, et al. Design and test of a four-arm apple harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(13): 25－33.

[50] 张阳, 黄俊华, 石富磊, 等. 背负式苹果采收一体机的设计与试验[J]. 制造业自动化, 2020, 42(2): 102－106.
ZHNAG Yang, HUANG Junhua, SHI Fulei, et al. Design and experimental of backpacked apple harvester [J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(2): 102－106.

[51] 李彦晶, 罗钿, 冯宇龙, 等. 基于切割的便携式苹果采摘装置的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2): 51－54, 96.
LI Yanjing, LUO Dian, FENG Yulong, et al. Design and experiment of a cutting-based portable apple picker [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 51－54, 96.

[52] 邓小雷, 罗忠祎, 庞景权, 等. 仿生无损吸取式苹果采摘装置的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 100－108.
DENG Xiaolei, LUO Zhongyi, PANG Jingquan, et al. Design and experiment of bionic nondestructive handheld suction apple picker [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(10): 100－108.

[53] 苗玉彬, 郑家丰. 苹果采摘机器人末端执行器恒力柔顺机构研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 19－25.
MIAO Yubing, ZHANG Jiafeng. Development of compliant constant-force mechanism for end effector of apple picking robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 19－25.

[54] 陈春皓, 张建路, 李建平, 等. 苹果采摘管道气力输送进风装置参数优化[J]. 果树学报, 2022, 39(7): 1308－1322.
CHEN Chunhao, ZHANG Jianlu, LI Jianping, et al. Parameter optimization of pneumatic conveying air inlet device in apple picking pipeline [J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(7): 1308－1322.

[55] 尚书旗, 李成鹏, 何晓宁, 等. 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, 168.
SHANG Shuqi, LI Chengpeng, HE Xiaoning, et al. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 115－125, 168.

[56] 杨欣, 姜尊豪, 李建平, 等. 摇枝式加工型苹果采摘振动参数仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 27(3): 1－13.
YANG Xin, JIANG Zunhao, LI Jianping, et al. Simulation optimization and experiment of vibration parameters of apple picking by shaking branch processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 27(3): 1－13.

[57] 刘晓雯, 郭彩玲. 基于振动采摘的苹果树枝干动力学特性[J]. 林业工程学报, 2021, 6(3): 120－126.
LIU Xiaowen, GUO Cailing. Study on dynamic characteristics of apple tree branches based on vibration picking [J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 120－126.

[58] 戚得众, 郭林, 阮晓松, 等. 果园运输车减振降损性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9775－9781.
QI Dezhong, GUO Lin, RUAN Xiaosong, et al. Vibration reduction and loss reduction performance of orchard transport trolley [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9775－9781.

[59] 王佳, 李绍波, 陈春皓, 等. 果箱包装结构对苹果损伤特性的影响[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(1): 48－54.
WANG Jia, LI Shaobo, CHEN Chunhao, et al. Effects of packing structure of fruit box on damage characteristics of apples [J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(1): 48－54.

[60] 李传友, 张莉, 刘京蕊, 等. 不同果园枝条修剪量及资源化利用分析[J]. 中国果树, 2022(4): 80－83.
LI Chuanyou, ZHANG Li, LIU Jingrui, et al. Analysis on pruning amount and resource utilization of branches in different orchards [J]. China Fruits, 2022(4): 80－83.

[61] 王治樵. 现代苹果园高效修剪机械的设计与研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
WANG Zhijiao. Design and research of efficient pruning machinery for modern apple orchards [D]. Tai′an: Shandong Agricultural University, 2023.

[62] 常钧翔, 张衍林, 李善军, 等. 双边齐切式柑橘修剪机设

计[J]. 华中农业大学学报，2019，38(3)：104－111.
CHANG Junxiang，ZHANG Yanlin，LI Shanjun，et al. Design of citrus trimmer with bilateral and neat trim [J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2019，38(3)：104－111.

[63] 公彦晨. 丘陵果园单轨自走式枝条粉碎机研制与试验[D]. 泰安：山东农业大学，2023
GONG Yanchen. Development and test of single-track self-propelled branch crusher for hilly orchards [D]. Tai′an：Shandong Agricultural University，2023

[64] 刘健，邓永进，王川，等. 自走式双边桑树修剪机设计与试验[J]. 农机化研究，2021，43(6)：105－110，120.
LIU Jian，DENG Yongjin，WANG Chuan，et al. Design and test of a self-propelled bilateral mulberry pruner [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2021，43(6)：105－110，120.

[65] 丁素明，薛新宇，蔡晨，等. 梨树枝条切割装置刀片参数优化与试验[J]. 农业工程学报，2015，31(S2)：75－82.
DING Suming，XUE Xinyu，CAI Chen，et al. Optimization and experiment of blade parameter for pear branches cutting device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2015，31(S2)：75－82.

[66] 康峰，仝思源，张汉石，等. 苹果枝条往复式切割剪枝参数分析与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(16)：9－16.
KANG Feng，TONG Siyuan，ZHANG Hanshi，et al. Analysis and experiments of reciprocating cutting parameters for apple tree branches [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2020，36(16)：9－16.

[67] 张佳喜，刘旋峰，牛长河，等. 新型滚刀式棉秸秆粉碎回收机的研制[J]. 农机化研究，2012，34(1)：95－98.
ZHANG Jiaxi，LIU Xuanfeng，NIU Changhe，et al. Design of cotton stalk of crushing and reclaiming machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2012，34(1)：95－98.

[68] 李宁. 滚刀式果园枝条粉碎装置的设计与研究[D]. 石河子：石河子大学，2022.
LI Ning. The design and research of the cutter-type orchard branch crushing device [D]. Shihezi：Shihezi University，2022.

[69] 李辉. 现代果园枝条粉碎机捡拾喂入机理及装置研究[D]. 保定：河北农业大学，2021.
LI Hui. Research on picking-up and feeding mechanism and device of modern orchard branches smasher [D]. Baoding：Hebei Agricultural University，2021.

[70] 王涛，柳国光，楼婷婷，等. 丘陵山区果树枝条粉碎机的研制与试验[J]. 中国农机化学报，2019，40(3)：88－94.
WANG Tao，LIU Guoguang，LOU Tingting，et al. Development and test of fruit tree branches grinder in hilly area [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40(3)：88－94.

[71] 万先起，蒋辉霞，徐一，等. 履带式枝条粉碎机研究[J]. 现代农业科技，2022(22)：137－140.
WAN Xianqi，JIANG Huixia，XU Yi，et al. Research on tracked branch shredders [J]. Modern Agricultural Science and Technology，2022(22)：137－140.

[72] 张隆梅，刘岗微，齐彦栋，等. 农业机械无人驾驶系统关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2022，3(1)：27－36.
ZHANG Longmei，LIU Gangwei，QI Yandong，et al. Research progress on key technologies of agricultural machinery unmanned driving system [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English)，2022，3(1)：27－36.

[73] 崔鑫宇，崔冰波，马振，等. 几何路径跟踪组合算法及其农业机械自动导航应用[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(3)：24－31.
CUI Xinyu，CUI Bingbo，MA Zhen，et al. Integration of geometric-based path tracking controller and its application in agricultural machinery automatic navigation [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2023，4(3)：24－31.

[74] 张磊，刘义亭，陈光明，等. 基于超声波传感器的巡检机器人导航纠偏研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2022，3(2)：64－70.
ZHANG Lei，LIU Yiting，CHEN Guangming，et al. Research on navigation and rectification of inspection robot based on ultrasonic sensor [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2022，3(2)：64－70.

[75] 钱震杰，金诚谦，刘政，等. 无人农场中的智能控制技术应用现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(3)：1－13.
QIAN Zhenjie，JIN Chengqian，LIU Zheng，et al. Development status and trends of intelligent control technology in unmanned farms [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2023，4(3)：1－13.

[76] 赵永春，张庆，尤泳，等. 基于虚拟雷达和两级神经网络的割草机路径跟踪算法[J]. 农业机械学报，2023，54(4)：222－232，267.
ZHAO Yongchun，ZHANG Qing，YOU Yong，et al. Path Tracking algorithm for mower based on virtual radar and two-level neural Network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(4)：222－232，267.

[77] 白刚. 卡尔曼滤波在割草机器人路径追踪优化中应用[J]. 农机化研究，2021，43(6)：47－51.
BAI Gang. The application of Kalman filtering in path

tracking optimization for mowing robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43 (6): 47－51.

[78] 谢金燕, 刘丽星, 杨欣, 等. 改进粒子群优化算法的果园割草机作业路径规划[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 182－191.
XIE Jingyan, LIU Lixing, YANG Xin, et al. Orchard lawn mower operation path planning based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(11): 182－191.

[79] 王新彦, 冠杰, 张凯, 等. 基于改进A*算法和DFS算法的割草机器人遍历路径规划[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(2): 142－147.
WANG Xinyan, GUAN Jie, ZHANG Kai, et al. Traversal path planning of lawn mower robot based on improved A* algorithm and DFS algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44 (2): 142－147.

[80] 陈镜宇, 郭志军, 尹亚昆. 基于混合算法的智能割草机全遍历路径规划及其系统设计[J]. 计算机科学, 2021, 48(S1): 633－637.
CHEN Jingyu, GUO Zhijun, YI Yakun, et al. Full traversal path planning and system design of intelligent lawn mower based on hybrid algorithm [J]. Computer Science, 2021, 48(S1): 633－637.

[81] 史璐, 刘洪杰, 刘伟起, 等. 基于激光雷达的果园割草机避障方法研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(2): 62－66.
SHI Lu, LIU Hongjie, LIU Weiqi, et al. Research on obstacle avoidance method of orchard mower based on lidar [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 62－66.

[82] 王新彦, 张凯, 盛冠杰, 等. 基于单线激光雷达的割草机器人建图方法研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 51－56.
WANG Xinyan, ZHANG Kai, SHENG Guanjie, et al. Research on the mapping method of a mowing robot based on single-line LiDAR [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 51－56.

[83] 冯吉. 基于机器视觉和激光雷达的割草机前方障碍物检测[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
FENG Ji. Obstacle detection in front of mower based on machine vision and lidar [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.

[84] 孙伟, 李文俊. 割草机器人路径规划研究——基于改进蚁群算法和计算机视觉[J]. 农机化研究, 2022, 44(1): 146－150.
SUN Wei, LI Wenjun. Research on path planning of mowing robot based on improved ant colony algorithm and computer vision [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1): 146－150.

[85] 訾涛. 割草机器人路径规划的研究——基于机器视觉和人工势场算法[J]. 农机化研究, 2021, 43(7): 202－206.
ZI Tao. Research on path planning of mowing robot based on machine vision and artificial potential field algorithm [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(7): 202－206.

[86] ZHANG W, WANG S, WANG T, et al. Research on the local path planning of an orchard mowing robot based on an elliptic repulsion scope boundary constraint potential field method [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1184352.

[87] SONG Y, SUN H, LI M, et al. Technology application of smart spray in agriculture: A review [J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2015, 21(3): 319－333.

[88] 陈泽鸿, 陈建泽, 宋淑然, 等. 果园悬挂式柔性对靶喷雾装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 11－20.
CHEN Zehong, CHEN Jianze, SONG Shuran, et al. Development and experiments of the hanging flexible targeted spray device for orchards [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 11－20.

[89] 王亚雄, 康峰, 李文彬. 林木精准对靶施药技术现状及趋势[J]. 广东农业科学, 2013, 40(23): 83－87.
WANG Yaxiong, KANG Feng, LI Wenbin. Status and trend of forest precise targeted spray technique [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(23): 83－87.

[90] GU C, WANG X, WANG X, et al. Research progress on variable-rate spraying technology in orchards [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2020, 36(6): 927－942.

[91] DORUCHOWSKI G, SWIECHOWSKI W, GODYN A, et al. Automatically controlled sprayer to implement spray drift reducing application strategies in orchards [J]. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 2011, 19: 175－182.

[92] HONG S W, ZHAO L, ZHU H. CFD simulation of airflow inside tree canopies discharged from air-assisted sprayers [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 121－132.

[93] LI Q, XUE Y. Total leaf area estimation based on the total grid area measured using mobile laser scanning [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107503.

[94] HOŁOWNICKI R, DORUCHOWSKI G, ŚWIECHOWSKI W, et al. Variable air assistance system for orchard sprayers; concept, design and preliminary testing [J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 134－149.

[95] DOU H, ZHAI C, CHEN L, et al. Comparison of orchard target-oriented spraying systems using photoelectric

or ultrasonic sensors [J]. Agriculture, 2021, 11(8): 753.

[96] 张志. 基于机器视觉的雾滴沉积特性检测系统设计及关键技术研究[D]. 郑州：河南农业大学, 2021.
ZHNAG Zhi. Design and key technology research on detection system of droplet deposition characteristics based on machine vision [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.

[97] 亢洁, 刘港, 郭国法. 基于ImagePy的水敏纸图像预处理及液滴参数测量[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5405－5414.
KANG Jie, LIU Gang, GUO Guofa. Image preprocessing and droplet parameter measurement of water-sensitive paper based on ImagePy [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5405－5414.

[98] LIU J, YU S, LIU X, et al. A novel optical shadow edge imaging method based fast in-situ measuring portable device for droplet deposition [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108632.

[99] 金生, 蒋蘋, 杨俊朗, 等. 货箱自适应调平果园作业平台设计与试验[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 714－724.
JING Sheng, JIANG Pin, YANG Junlang, et al. Design and testing of adaptive levelling orchard working platform for cargo box [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(3): 714－724.

[100] 刘丽星, 刘洪杰, 裴晓康, 等. 果园作业平台静态防倾翻控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2022, 44(8): 92－96.
LIU Lixing, LIU Hongjie, PEI Xiaokang, et al. Design of static anti-tipping control system for orchard operation platform [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8): 92－96.

[101] 樊桂菊, 王永振, 张晓辉, 等. 果园升降平台自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 38－46.
FAN Guiju, WANG Yongzhen, ZHANG Xiaohui, et al. Design and experiment of automatic leveling control system for orchards lifting platform [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 38－46.

[102] 王永振, 樊桂菊, 宋月鹏, 等. 果园升降平台自动调平控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 96－101.
WANG Yongzhen, FAN Guiju, SONG Yuepeng, et al. Design of automatic leveling control system for orchard lifting platform [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 96－101.

[103] 杨径, 陆华忠, 李君, 等. 果园升降平台调平机构建模与仿真[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 111－116.
YANG Jin, LU Huazhong, LI Jun, et al. Modeling and simulation of orchard self-leveling mechanism [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 111－116.

[104] WANG M, XU J, ZHANG J, et al. An autonomous navigation method for orchard rows based on a combination of an improved A-star algorithm and SVR [J]. Precision Agriculture, 2024: 1－25.

[105] HUANG S, PAN K, WANG S, et al. Design and test of an automatic navigation fruit-picking platform [J]. Agriculture, 2023, 13(4): 882.

[106] FEI Z, VOUGIOUKAS S G. Co-robotic harvest-aid platforms: Real-time control of picker lift heights to maximize harvesting efficiency [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105894.

[107] 马瑞峻, 陈瑜, 张小花, 等. 苹果机械化采收发展历程、模式及其技术现状[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 301－306, 329.
MA Ruijun, CHEN Yu, ZHANG Xiaohua, et al. Development process, mode and technology status of apple mechanized harvesting [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 301－306, 329.

[108] 陈青, 殷程凯, 郭自良, 等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 1－15.
CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(4): 1－15.

[109] JIA W, ZHANG Y, LIAN J, et al. Apple harvesting robot under information technology: A review [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(3): 1729881420925310.

[110] 白振伟, 严富威, 袁培海, 等. 基于嵌入式机器视觉智能果实分拣机器人设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(3): 61－70.
BAI Zhenwei, YAN Fuwei, YUAN Peihai, et al. Design and experiment of fruit sorting robot based on embedded machine vision [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 61－70.

[111] 赵德安, 吴任迪, 刘晓洋, 等. 基于YOLO深度卷积神经网络的复杂背景下机器人采摘苹果定位[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 164－173.
ZHAO De'an, WU Rendi, LIU Xiaoyang, et al. Apple positioning based on YOLO deep convolutional neural network for picking robot in complex background [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

Engineering, 2019, 35(3): 164－173.

[112] 赵辉, 乔艳军, 王红君, 等. 基于改进YOLOv3的果园复杂环境下苹果果实识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 127－135.
ZHAO Hui, QIAO Yanjun, WANG Hongjun, et al. Apple fruit recognition in complex orchard environment based on improved YOLOv3 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(16): 127－135.

[113] BULANON D M, KATAOKA T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples [J]. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal, 2010, 12(1): 203－210

[114] 熊子聪. 苹果四臂采摘机器人执行部件设计与试验[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
XIONG Zicong. Design and test of actuator components for apple four-arm picking robot [D]. Nanning: Guangxi University, 2023.

[115] 苗玉彬, 郑家丰. 苹果采摘机器人末端执行器恒力柔顺机构研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 19－25.
MIAO Yubin, ZHENG Jiafeng. Development of compliant constant-force mechanism for end effector of apple picking robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 19－25.

[116] 李国利, 姬长英, 顾宝兴, 等. 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 14－21, 29.
LI Guoli, JI Changying, GU Baoxing, et al. Kinematics analysis and experiment of apple harvesting robot manipulator with multiple end-effectors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 14－21, 29.

[117] HU G, CHEN C, CHEN J, et al. Simplified 4-DOF manipulator for rapid robotic apple harvesting [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107177.

[118] BU L, CHEN C, HU G, et al. Design and evaluation of a robotic apple harvester using optimized picking patterns [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107092.

[119] 卜令昕. 结构化果园苹果收获机器人关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
BU Lingxin. Research on key technology of apple harvesting robot in structured orchard [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2021.

[120] KARKEE M, ADHIKARI B, AMATYA S, et al. Identification of pruning branches in tall spindle apple trees for automated pruning [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 103: 127－135

[121] 吕萌萌, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于Unity 3D果树交互虚拟修剪技术及其实现[J]. 农机化研究, 2015, 37(4): 7－11, 35.
LÜ Mengmeng, GUO Xinyu, LU Shenglian, et al. Virtual interactive pruning operation on fruit tree based on unity 3D [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4): 7－11, 35.

[122] 杨丽丽, 陈甲风, 谢锐, 等. 单株幼龄苹果树修剪仿真研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 41－44.
YANG Lili, CHEN Jiafeng, XIE Rui, et al. Simulation research for individual young apple tree pruning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(S1): 41－44.

[123] BOTTERILL T, PAULIN S, GREEN R, et al. A robot system for pruning grape vines [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1100－1122.

[124] 马保建, 鄢金山, 王乐, 等. 基于语义分割的矮化密植枣树修剪枝识别与骨架提取[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 313－319, 442.
MA Baojian, YAN Jinshan, WANG Le, et al. Method for detection and skeleton of pruning branch of juiube tree based on semantic sea mentation for dormant pruning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 313－319, 442.

[125] 古劲, 吴泰羽, 李传军, 等. 基于改进三次B样条的灌木修剪运动轨迹光顺算法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(S1): 89－97.
GU Jin, WU Taiyu, LI Chuanjun, et al. Trajectory fairing algorithm for shrub pruning based on improved cubic B-spline [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(S1): 89－97.

[126] 梁喜凤, 章鑫宇, 王永维. 基于改进Mask R-CNN的番茄侧枝修剪点识别方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 112－121.
LIANG Xifeng, ZHANG Xinyu, WANG Yongwei. Recognition method for the pruning points of tomato lateral branches using improved Mask R-CNN [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23): 112－121.

[127] 董娅兰, 胡国玉, 刘广, 等. 基于Mask R-CNN模型的葡萄藤关键结构分割方法[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 207－214, 337.
DONG Yalan, HU Guoyu, LIU Guang, et al. Segmentation method for grapevine critical structure based on Mask R-CNN model [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2): 207－214, 337.

[128] 张明岳, 李丽敏, 温宗周, 等. 基于改进Elman神经网络和模糊控制的智能灌溉算法设计[J]. 国外电子测量技

术，2021，40(11)：155－160.
ZHANG Mingyue，LI Liming，WEN Zongzhou，et al. Design of intelligent irrigation algorithm based on improved Elman neural network and fuzzy control [J]. Foreign Electronic Measurement Technology，2021，40(11)：155－160.

[129] 李雪．基于物联网的果园智能灌溉系统研究与设计[D]．延安：延安大学，2023.
LI Xue. Research and Design of Smart lrrigation System for Orchards Based on Internet of Things [D]. Yan′an：Yan′an University，2023.

[130] 刘洪静，李黎，高金辉．基于模糊PID控制的节水灌溉智能控制系统设计[J]．节水灌溉，2020，294(2)：88－91，95.
LIU Hongjing，LI Li，GAO Jinhui. Design of water-saving irrigation intelligent control system based on Fuzzy-PID control [J]. Water Saving Irrigation，2020，294(2)：88－91，95.

[131] 王兴旺，郑汉垣，张中华．基于WSN的仓桥水晶梨节水灌溉控制系统设计与应用[J]．江苏农业科学，2022，50(1)：175－181.
WANG Xingwang，ZHENG Handan，ZHANG Zhonghua. Design and application of water saving irrigation control system for Cangqiao crystal pear based on WSN [J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2022，50(1)：175－181.

[132] 许景辉，王雷，谭小强，等．基于SOA优化PID控制参数的智能灌溉控制策略研究[J]．农业机械学报，2020，51(4)：261－267.
XU Jinghui，WANG Lei，TAN Xiaoqiang，et al. Application of PID control based on SOA optimization in intelligent irrigation system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：261－267.

[133] BENYEZZA H，BOUHEDDA M，REBOUH S. Zoning irrigation smart system based on fuzzy control technology and IoT for water and energy saving [J]. Sensors，2021，302(10)：12701.

[134] 胡长增，申晨，冯栋栋，等．基于物联网的温室智能化灌溉系统[J]．河北农业大学学报，2021，44(4)：103－108.
HU Zhangzeng，SHEN Chen，FENG Dongdong，et al. Intelligent greenhouse irrigation system based on the Internet of Things [J]. Journal of Hebei Agricultural University，2021，44(4)：103－108.

[135] 王玺，王芸芸，孙慧英，等．基于物联网的果园智能灌溉系统设计[J]．农业网络信息，2016(9)：61－63.
WANG Xi，WANG Yunyun，SUN Huiying，et al. Design of orchard precise irrigation control system based on Internet of Things [J]. Agriculture Network Information，2016(9)：61－63.

[136] 陈伟森，俞龙，孙道宗．果园节水灌溉控制系统设计与试验[J]．节水灌溉，2018(1)：73－77.
CHEN Weisen，YU Long，SUN Daozong. Design and experiment of a water saving irrigation control system in orchard [J]. Water Saving Irrigation，2018(1)：73－77.

[137] 聂鹏程，钱程，覃锐苗，等．天空地一体化信息感知与融合技术发展现状与趋势[J]．智能化农业装备学报(中英文)，2023，4(2)：1－11.
NIE Pengcheng，QIAN Cheng，QIN Ruimiao，et al. Development status and trends of space-air-ground integrated information sensing and fusion technology [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization，2023，4(2)：1－11.

[138] 万锦铨．常宁市果园智能灌溉控制系统的开发与研究[D]．长沙：中南林业科技大学，2019.
WAN Jinquan. Development and research of intelligent irrigation control system in orchard of Changning city [D]. Changsha：Central South Forestry University of Science and Technology，2019.

[139] 杨伟志．基于物联网及人工智能的柑橘灌溉专家系统[D]．广州：华南农业大学，2023.
YANG Weizhi. Citrus irrigation expert system based on internet of things and artificial intelligence [D]. Guangzhou：South China Agricultural University，2023.

[140] SIDHU R K，KUMAR R，RANA P S. Long short-term memory neural network-based multi-level model for smart irrigation [J]. Modern Physics Letters B，2020，34(36)：2050418.

[141] KUMAR D，ADAMOWSKI J，SURESH R，et al. Estimating evapotranspiration using an extreme learning machine model：case study in north Bihar，India [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering，2016，142(9)：04016032.

[142] 邓皓．基于思维进化Elman神经网络的核桃果实膨大期需水预测研究[D]．邯郸：河北工程大学，2020.
DENG Hao. Study on water demand prediction of walnut fruit during swelling period based on elman neural network of mind evolutionary Algorithm [D]. Handan：Hebei University of Engineering，2020.

[143] 赵晓东．基于GASA-SVR的园区短期需水预测方法[D]．邯郸：河北工程大学，2019.
ZHAO Xiaodong. Short-term water demand forecasting method based on GASA-SVR [D]. Handan：Hebei University of Engineering，2019.

[144] 尹起．机器学习预测参考作物蒸散量在智能灌溉系统中的应用研究[D]．乌鲁木齐：新疆大学，2021.
YI Qi. Machine learning prediction of reference crop

evapotranspiration in an intelligent irrigation system. [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.

[145] Al-Mukhtar, Mustafa. Modelling the root zone soil moisture using artificial neural networks, a case study [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(15): 1124.

[146] 任亚飞. 基于BP神经网络和物联网的作物需水量计算模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
REN Yafei. Research on crop water demand calculation model based on BP neural network and Internet of Things [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.

[147] 王慧, 李靖瑄, 刘小妮, 等. 基于气象因子的土壤含水量模拟研究[J]. 水利规划与设计, 2022(11): 37－45.
WANG Hui, LI Jinxuan, LIU Xiaoni, et al. Simulation study of soil water content based on meteorological factors [J]. Water Resources Planning and Design, 2022, (11): 37－45.

[148] 刘慧敏. 基于LSTM的果园灌溉预测与控制算法设计与实现[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021.
LIU Huiming. Design and implementation of LSTM-based irrigation prediction and control algorithm for orchards [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2021.

[149] PARK S H, LEE B Y, KIM M J, et al. Development of a soil moisture prediction model based on recurrent neural network Long Short-Term Memory (RNN-LSTM) in soybean cultivation [J]. Sensors, 2023, 23(4): 1976.

[150] 韩冷, 何雄奎, 王昌陵, 等. 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, et al. Key technologies and equipment for smart orchard construction and prospects [J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 1－11.

[151] 段罗佳, 杨福增, 闫彬, 等. 苹果生产智能底盘与除草及收获装备技术研究进展[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 24－41.
DUAN Luojia, YANG Fuzeng, YAN Bin, et al. Research progress of apple production intelligent chassis and weeding and harvesting equipment technology [J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 24－41.

[152] 郭江鹏, 王鹏飞, 李昕昊, 等. 果园多风道喷雾机送风系统设计优化与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 75－85.
GUO Jiangpeng, WANG Pengfei, LI Xinhao, et al. Design optimization and test of air supply system for multi-duct sprayer [J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 75－85.

Research progress on intelligent mechanization technology and equipment for apple orchard production management

LI Jianping[1, 2], LI Shaobo[1], YANG Xin[1, 2], ZHANG Kuo[1], XIE Jinyan[1], LIU Shuteng[1], JIANG Zunhao[1], ZHANG Zhu[1], WANG Peng[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding* 071001, *China*; 2. *Technology Innovation Center of Intelligent Agricultural Equipment, Hebei Provincial, Baoding* 071001, *China*)

Abstract: Apple orchard production management is faced with the double challenge of rising labor costs and population aging. In order to improve operational efficiency, reduce production costs and improve fruit quality, the application of mechanization and intelligent technology in apple orchard production management is becoming more and more important. This paper summarizes the research progress of intelligent mechanization technology in apple orchard production and management under the conditions of wide rows and dense planting and inter-logging and stemming cultivation mode; and the research progress of mechanization technology and equipment and intelligent technology and equipment in key links such as orchard mowing, herbicide application, flower and fruit management, fruit harvest and transportation, and fruit tree branch processing is analyzed. it is found that although the mechanization degree of irrigation and fertilization is relatively high at this stage, pruning, flower thinning, fruit thinning, bagging, picking and other links still rely on manual labor and have a low degree of mechanization; and the application of intelligent technologies such as drones and the Internet of Things in orchard management is not yet widespread, and precision agriculture and automated control need to be strengthened; the existing

technologies develop independently and lack effective integration, which affects the improvement of production efficiency and fruit quality; the technology integration is not high and the data collection and analysis capabilities are insufficient. For the current stage of intelligent orchard construction technology model, we need to research and develop orchard machinery and equipment adapted to different terrain conditions, and create a demonstration base for the whole process of mechanization; focus on research and development of mechanized intelligent technology for key production links, and promote easy-to-manipulate intelligent machinery; use multi-source information sensing equipment to realize the digital perception of orchard environmental information; carry out intelligent decision-making and precise operation to improve operational efficiency and quality, and realize mission tasks through the intelligent orchard operation and maintenance system. Intelligent orchard operation and maintenance system realizes the demand for task allocation and scheduling, operation control and monitoring, and provides technical support for building typical application scenarios of mechanization of the whole apple orchard production.

Keywords: apple orchards; mechanized operations; intelligence; mowing; application; harvesting and transportation