doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.016

农业机器人底盘运动控制技术现状与发展趋势

夏先飞[1,2]　孙艺滋[1,3]　王　伟[3]　王申莹[1,2]　宫庆硕[1,2]　吕俊潼[1,2]

(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.农业农村部现代农业装备重点实验室,南京 210014;
3.沈阳农业大学工程学院,沈阳 110866)

摘要:农业机器人底盘是实现农业装备智能化作业的基础载体,其运动控制能力直接影响机器人在非结构化环境下作业稳定性与可靠性。本文从底盘机械构型、核心控制技术以及典型场景适配策略 3 个方面,对国内外农业机器人底盘运动控制研究现状进行了系统梳理。分析了轮式、履带式及腿足式底盘的结构特点与运动机理,对比了不同构型在作业效率与地形通过性方面的优势与局限。重点阐述了感知技术、路径规划、驱动控制、路径跟踪及姿态控制等关键技术研究进展,指出当前控制算法正逐步从基于理想几何模型运动学跟随,向适应复杂环境扰动的动力学控制转变。同时,针对大田高速作业、设施狭窄空间及丘陵大坡度 3 种典型工况,归纳了不同环境约束下差异化控制策略与解决方案。最后,提出了现有技术在模型失配、算力限制及通用性等方面的不足,并对数字孪生仿真、边缘计算轻量化及多源感知融合等方向进行了展望,可为农业机器人相关研究提供参考。

关键词:农业机器人底盘;运动控制;路径规划;驱动控制;路径跟踪;姿态控制

中图分类号:S222.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)18-0174-12　　**OSID**:

Current Status and Development Trends of Agricultural Robot Chassis Motion Control Technology

Xia Xianfei[1,2]　Sun Yizi[1,3]　Wang Wei[3]　Wang Shenying[1,2]　Gong Qingshuo[1,2]　Lü Juntong[1,2]

(1. *Nanjing Institute of Agricultural Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affair*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*
3. *College of Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*)

Abstract: The agricultural robot chassis serves as the fundamental platform for achieving intelligent agricultural operations. Its motion control capability is critical to the operational stability and reliability of robots in unstructured environments. It systematically reviewed the research status of motion control for agricultural robot chassis from three dimensions: mechanical configurations, core control technologies, and adaptation strategies for typical scenarios. Firstly, the structural characteristics and motion mechanisms of wheeled, tracked, and legged chassis were analyzed, comparing the advantages and limitations of different configurations in terms of operational efficiency and terrain trafficability. Secondly, the research progress of key technologies, including perception technology, path planning, drive control, path tracking, and attitude control was elaborated. It was pointed out that current control algorithms were gradually shifting from kinematic following based on ideal geometric models to dynamic control capable of adapting to complex environmental disturbances. Simultaneously, aiming at three typical working conditions, i.e., high-speed field operations, narrow spaces in facilities, and large slopes in hilly areas, the differentiated control strategies and solutions under different environmental constraints were summarized. Finally, the deficiencies of existing technologies in terms of model mismatch, computing power limitations, and versatility were summarized. Future development trends were prospected from the directions of digital twin simulation, lightweight edge computing, and multi-source perception fusion, aiming to provide a reference for related research.

Key words: agricultural robot chassis; motion control; path planning; drive control; path tracking; attitude control

收稿日期:2026-03-05　修回日期:2026-04-24

基金项目:南京市重大科技专项(前沿技术)项目(202512115)、苏州中农院华东农业科技中心科技创新项目(ECS-KY-N-2025006)、中国农业科学院科技创新工程基础科学研究中心项目(CAAS-BRC-SAE-2025-02)和中国农业科学院科技创新工程项目

作者简介:夏先飞(1987—),男,研究员,主要从事收获机械化及农业机器人研究,E-mail:xiaxianfei@caas.cn

0　引言

随着农业现代化、智能化和无人化进程的持续推进，农业生产对高效率、低人工依赖和高作业一致性的装备需求日益增强。农业机器人因具备自主感知、决策与执行能力，已成为提升农业生产效率和作业精度的重要技术载体[1]。然而农业机器人长期处于地形起伏、土壤参数时变、作物遮挡、光照波动以及高湿高尘等非结构化环境中，其稳定行驶、精准导航与安全作业面临更为复杂的环境约束与动态扰动[2]。

底盘作为农业机器人基础承载平台和运动执行单元，不仅承担整机支撑、动力传递与作业机构搭载功能，还直接决定机器人在垄沟、水田、丘陵坡地及设施农业等场景中通过性、稳定性、机动性与作业可靠性。近年来，相关研究已由早期以机械通过性提升为核心的构型设计，逐步演进为“构型设计-环境感知-决策规划-驱动执行”一体化优化[3]。尽管现有综述多从整机系统、单一作业类型或局部功能模块出发进行总结，但针对“底盘运动控制”这一核心主线的系统梳理仍相对不足，尤其缺乏对不同构型技术演进、方法局限及场景适配关系的综合分析。

从工程应用与学术研究角度看，农业机器人底盘运动控制仍面临若干共性科学问题：①弱 GNSS、强遮挡及恶劣作业环境易引发视觉退化、点云稀疏与 IMU 漂移，复杂环境下多源感知时空配准、置信评估与失效切换仍待突破。②现有路径规划多侧重几何可达性，对底盘动力学、土壤滑移及执行器响应考虑不足，导致“规划可行”与“实际执行”易产生脱节。③在松软或大坡度地形下，土壤力学关键参数与底盘滑移、姿态变化存在强耦合，相关的在线辨识与控制补偿研究仍显不足。④电气架构向分布式驱动演进中，总线带宽、节点同步误差与控制抖动为多执行器协同带来了新的瓶颈。

基于此，本文围绕农业机器人底盘运动控制技术，构建“机械构型特性-关键控制技术-典型场景适配”综述框架。对轮式、履带式及腿足/复合式底盘结构特点、运动机理、技术演进、适用场景及发展局限进行分类分析；围绕感知技术、路径规划、驱动控制、路径跟踪与姿态控制等核心环节，系统总结其研究进展、代表方法、场景适配性及尚未解决的关键问题；结合大田高速重载、设施弱 GNSS 狭窄空间以及丘陵大坡度非连续地形等典型工况，归纳农业机器人底盘运动控制差异化策略，并从数字孪生、多模态感知融合、轻量化边缘计算和模块化重构等方向提出展望。

1　农业机器人底盘技术概况

1.1　农业机器人底盘总体分类

农业机器人作业环境具有明显的非结构化特征，主要涉及大田、设施园艺及丘陵山地等典型场景。受地面松软、地形起伏及作业空间受限等因素影响，不同底盘在通过性、稳定性和机动性方面存在显著差异。根据结构形式与地面接触方式的不同，农业机器人底盘通常分为轮式、履带式及腿足/复合式 3 类。轮式底盘效率高、结构简单，履带式底盘通过性强、接地比压低，腿足及复合式底盘则在非连续地形中具有较强适应潜力。因此，底盘选型本质上是作业效率、环境适应性和控制复杂度之间的综合权衡。农业机器人底盘运动控制技术体系如图 1 所示。

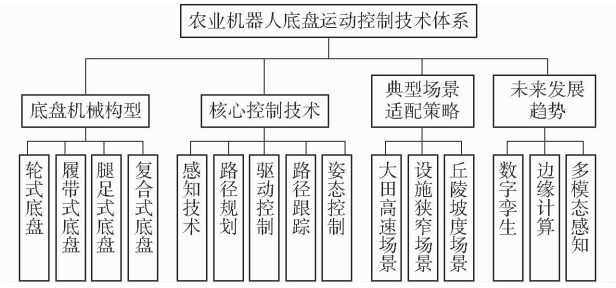


图 1　农业机器人底盘运动控制技术分类

Fig. 1　Classification of motion control technology for agricultural robot chassis

1.2　农业机器人底盘国内外现状

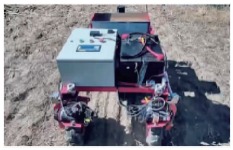
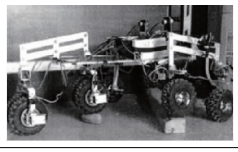
近年来，农业机器人底盘研究已由单纯强调机械结构设计，逐步转向构型设计、动力学建模与运动控制协同优化。从技术脉络看，底盘平台大致经历了“单一构型机械化平台-面向特定场景的机电液一体化平台-可重构与多执行器协同的智能底盘”3 个阶段。总体来看，国外研究起步较早，更强调底盘模块化和系统集成；国内研究则更注重设施农业、丘陵山地等复杂场景适应性开发。对当前农业机器人底盘主要构型结构特征、演进方向、局限性及典型适配场景进行了归纳，如表 1 所示。

1.2.1　轮式农业机器人底盘

轮式底盘凭借结构紧凑、制造成本较低、传动效率高和维护方便等优势，仍是当前农业机器人应用最广泛的底盘类型。根据转向方式和驱动布局的不同，轮式底盘主要包括阿克曼转向、差速转向和全向转向等形式，在大田运输、温室巡检和果园行间作业等场景中具有速度快、控制相对成熟和平台扩展性较好的特点，因此在工程应用中占据主导地位。当前，轮式底盘研究主要集中高机动构型设计和复杂环境下精准控制 2 个方面。针对设施农业和果园

表 1 农业机器人底盘发展现状

Tab. 1 Current status of agricultural robot chassis

结构类型	具体类型	结构特点	技术特点	存在问题	示例图
轮式底盘	三轮底盘	主要为 2 个驱动轮和 1 个从动轮，或 1 个驱动轮和 2 个从动轮	驱动轮与从动轮的动力分配需匹配重心位置，部分型号通过算法补偿单侧驱动的转向偏差	重心设计要求高，转向时易因重心偏移侧翻；负载能力弱	
	四轮底盘	采用转向梯形机构，前轮转向、后轮随动，转弯时内外轮轨迹符合阿克曼原理	转向梯形参数需匹配作业速度，转向角与车速联动控制以减少轮胎磨损	最小转弯半径大，窄空间，活性差；转向梯形易因震动变形	
	四轮独立驱动底盘	4 个车轮均可独立控制转向角度，支持横向移动、小半径转弯	多转向电机通过协同控制算法实现角度同步，配备转向角传感器实时校准	转向电机数量多，故障风险高；多电机协同控制逻辑复杂	
履带式底盘	履带底盘	刚性一体化框架，履带架与底盘主架，刚性连接；轮系配置加强型支重轮、锻打导轨及导向轮，支重轮增装刮泥板减少阻力	采用轮履折腰转向传动系，前箱与变速箱通过销轴铰接，配合上下十字轴万向节实现灵活转向；重负荷工况下通过单边动力耦合技术分配动力至单侧履带，提升脱困能力	地形适应性差，对土壤压实率较高	
腿足式底盘	四足式底盘	腿部为 4 ~ 5 自由度，仿生犬肢体结构；采用“躯干 + 四肢”模块化设计，腿部可折叠收纳；足部带压力传感器，检测接地状态	基于倒立摆模型的动态平衡算法，结合 IMU 传感器实时调整关节角度；采用 PID + 模糊控制融合策略，步态周期可动态优化	结构复杂度高于轮式，能耗较高	
	六足式底盘	腿部为 3 ~ 4 自由度，仿生昆虫结构；6 条腿对称分布，支持“三角步态”稳定行走；足部为多齿结构，增强松软地面抓地力	基于运动学正逆解的步态规划，通过激光雷达构建地形三维地图；集成强化学习算法，实现复杂地形步态自适应调整	腿部关节易磨损，维护成本高，行走速度慢	

狭窄空间对小转弯半径和横向机动能力的要求，许航彬等[4]提出模块化轮式全向移动底盘，通过优化轮组布局与运动学解算提高了窄域环境下灵活性；张京等[5]设计了四轮独立转向驱动控制系统，实现了车轮任意角度转向和较高精度的协同控制。针对复杂农田中轨迹跟踪问题，Raikwar 等[6]从基于模型转向控制角度开展研究，表明轮式底盘结合合理导航策略和控制算法后，能够在果园等场景中实现较好的跟踪性能。

但与此同时，轮式底盘局限性也较为明显。因轮胎与土壤接触面积较小，在松软、泥泞或大坡度地形作业时，易出现附着系数下降、驱动力不足和滑移加剧，进而影响行驶稳定与作业精度。技术演进上，底盘已由传统阿克曼转向发展为四轮独立驱动/转向和全向轮系，场景适配力显著提升，但多执行器协同、传感器标定一致性及窄域转向精度仍制约其工程化应用。总体而言，轮式底盘更适于地形平缓、速度要求较高的场景，未来需进一步提升复杂环境适应能力与协同控制精度。

1.2.2 履带式农业机器人底盘

履带式底盘具有接地面积大、接地比压低、附着性能好和越障能力强等特点，在水田、丘陵山地和湿软地面环境中具有明显优势，是应对复杂农田地形的重要构型之一。相较于轮式底盘，履带底盘能够更好地分散整机载荷，降低土壤压实和沉陷风险，因此在重载、低速和复杂地形作业中更具应用潜力。现有研究主要围绕结构轻量化、场景适配设计和主动姿态控制展开。蔡羽晨等[7]面向丘陵山地环境开展了小型履带式动力底盘设计与试验，结果表明通过优化重心布局和履带结构参数可有效提升坡地通过性和作业稳定性；相关研究还通过对履带宽度、底盘尺寸和驱动布局进行定制化设计，使履带底盘兼顾复杂地形通过性与作业空间适配能力。在姿态控制方面，Hu 等[8]通过自适应调平系统改善了履

带底盘在坡地和起伏地面上的姿态稳定性，说明将主动调平机构与闭环控制策略相结合，是提升履带底盘复杂地形作业稳定性的有效途径。

履带底盘虽通过性突出，但转向依赖滑转，导致能耗高、阻力大及高速响应滞后；且结构偏重，制约了轻量化与长时精细作业。近年正向轻量化、低滑转与主动调平一体化演进，坡地与水田适配性显著增强，但能耗控制、低损伤转向与复杂地形感知仍是难点。总体而言，履带底盘更适于湿软、大坡度和多障碍环境，未来重点在于降耗、提升转向灵活性及主动稳定控制能力。

1.2.3　腿足式农业机器人底盘

腿足式底盘通过离散接触行走，在跨越沟壑及极端地形时具备天然优势；轮腿复合底盘则旨在融合轮式的高效与腿足的高通过性。这类构型虽机械复杂，但在解决农业“最后一公里”非结构化作业难题中潜力巨大。针对纯腿足机器人稳定性差与能耗高的问题，研究多聚焦于仿生结构设计与自适应步态规划。例如，宫丽男等[9]研制的仿甲虫六足机器人通过优化三角步态有效抑制了机身起伏；Zhang 等[10]提出融合多传感器的地形自适应步态算法，使机器人在坡度 17° 内稳定行走，跨障能耗降低 14.4%，充分验证了对复杂地形适应力。

为打破单一构型在速度与通过性之间的性能桎梏，轮-腿复合结构通过“轮行求快、腿步越障”的方式实现了机动性提升。Pan 等[11]借鉴蝗虫后腿运动机理，开发了集成气液联动机构的仿生轮腿式底盘，并配套设计了全向自动调平系统。结果表明，该底盘在大范围离地间隙调整中响应迅速，平均调平时间仅 1.2 s，且俯仰与侧倾误差均控制在 1.2° 以内，较好地兼顾了坡地环境中机动性与姿态稳定性。

总体而言，腿足式及复合式底盘通过引入仿生学原理和多模态切换机制，已在理论层面突破了传统底盘地形适应极限。其技术发展正由早期步态验证与样机演示，逐步走向轮腿切换、姿态调平和地形感知协同控制。然而，这类底盘仍普遍存在结构复杂、控制难度大、能耗较高和工程化成本高等问题，尤其在连续作业可靠性与维护便利性方面距离规模化应用尚有一定距离。

综上所述，不同类型农业机器人底盘在结构机理与环境适应性上差异显著。轮式底盘结构简单、能耗低，是大田与设施农业的主流，但在软湿或大坡度地面易打滑下陷；履带式底盘接地比压低，在水田和丘陵中通过性强，但转向能耗高、响应滞后；腿足及轮腿复合底盘跨越复杂地形潜力大，但受限于结构复杂与高成本，尚未大规模工程化。

发展趋势上，底盘研发正由单纯追求机械通过性转向“构型设计与运动控制协同优化”。底盘选型需结合作物、地形与控制目标综合权衡：轮式适于高速规则场景，履带式胜任软湿坡地，腿足式面向高机动特殊工况。由于各类底盘在运动学约束与驱动机制上本质不同，导航规划与驱动控制方法亦存在差异。

2　农业机器人底盘运动控制关键技术

农业机器人底盘运动控制是集多源感知、智能决策与精准执行于一体的复杂闭环系统工程。控制性能不仅取决于算法理论深度，更受制于非结构化农田、底盘动力学及作业负载时变性的多重耦合影响。

与结构化场景下工业移动机器人不同，农业机器人面临更严苛的物理约束：GNSS 信号频繁遮挡导致定位跳变，土壤力学参数离散导致运动模型难辨识，以及地-轮间的强非线性相互作用使得传统确定性控制理论难以直接适用。因此，立足工程应用视角，从感知、路径规划、驱动控制、路径跟踪及姿态控制 5 个维度，系统剖析构建高鲁棒性农业机器人底盘运动控制关键技术。

2.1　感知技术

精准的运动状态感知是农业机器人底盘实现闭环控制与稳定作业的前提。依靠 GNSS、惯性测量单元（IMU）、轮速里程计以及激光/视觉传感器，实时解算底盘位置、航向姿态及速度等关键状态量。

不同传感器在农业场景中表现出显著差异。RTK－GNSS 在开阔大田具备厘米级绝对定位优势，但在果园树冠遮挡或温室设施等环境下，易受多路径干扰甚至短时失锁。相比之下，轮速里程计与 IMU 短时相对定位能力较好，但受松软地面打滑及车身剧烈颠簸影响，累积误差易随时间快速发散，难以长期维持可信度。

为突破单一传感器局限，工程上普遍采用多源异构信息融合策略，结合 GNSS 的绝对位置与 IMU/里程计的高频动态特性。而农田高湿高尘、冠层周期遮挡及底盘振动诱发的轴系微偏转，会持续破坏标定稳定性；同时，传统滤波框架多基于刚性路面假设，难以刻画复杂的非线性滑移特征。因此，在保证实时性的前提下，引入滑移观测、传感质量评估、自适应模型修正与失效切换机制，构建深耦合的融合感知架构，仍是底盘感知研究的重要方向。

2.1.1　基于导航卫星系统的导航定位技术

基于 GNSS 的定位技术是目前农业机器人实现绝对定位的核心手段。通过多星座融合与实时动态

差分(RTK)技术,在开阔大田场景中已能稳定提供厘米级定位精度,并实现了规模化应用。然而,在设施农业、果园树冠遮挡及高山峡谷等半封闭或强遮挡环境中,卫星信号易发生多路径效应或中断,导致定位精度骤降甚至失效,难以满足全天候、高可靠性作业需求。

针对设施农业内部信号严重衰减问题,引入惯性导航(INS)进行组合定位已成为主流思路。徐纪洋[12]设计了基于北斗导航的无人驾驶系统,通过将RTK 高精度定位与惯性导航及多传感器融合算法相结合,有效补偿了棚内信号盲区的状态估计,定位误差仅为 ±2.5 cm。姜毅[13]针对西瓜棚巡检场景,利用卡尔曼滤波融合 RTK 与 IMU 数据,并结合预瞄点搜索算法,将直线导航的航向误差控制在0.08°,在一定程度上缓解了单一卫星信号不可靠的问题。

在果园行间作业场景中,研究更侧重于通过优化运动控制算法弥补定位信号波动。熊斌等[14]开发了基于北斗卫星导航系统(BDS)的果园施药机自动导航系统,通过构建整机运动学模型与纯追踪算法,并引入转向角闭环 PID 控制,实现了低速工况下较高精度的直线跟踪。但试验结果也表明,随着作业速度提升或信号遮挡加剧,系统动态误差会明显增大。总体来看,GNSS 技术提供了不可替代的绝对位置基准,但在非视距环境下脆弱性仍是制约其在精细农业中广泛应用的主要瓶颈。

2.1.2 基于激光雷达的导航定位技术

激光雷达凭借主动探测、抗光照干扰及高分辨率成像等特性,已成为农业机器人在温室、果园等弱GNSS 环境下实现自主定位与地图构建(SLAM)的核心传感器。与视觉方案相比,激光雷达可直接获取环境深度信息,能够有效减弱光照变化对感知的影响,但在狭窄空间盲区消除和高速运动畸变校正方面仍面临挑战。

针对设施农业中单一雷达视域受限及特征缺失的问题,多雷达融合成为提升系统鲁棒性的有效途径。侯加林等[15]针对温室运输机器人感知盲区,设计了前后双激光雷达融合的导航系统,通过扩展感知范围并结合栅格地图匹配,将路径跟踪横向误差控制在 13 cm 以内;Jiang 等[16]进一步提出融合 3D与 2D 激光雷达信息的 SLAM 方案,利用异构点云数据互补性优化位姿估计模型,在降低硬件算力需求的同时,实现了较高精度导航。

在非结构化农田建图与定位算法优化方面,重点在于抑制长距离运动的累积误差及环境动态干扰。研究表明,基于激光 SLAM 的导航框架可有效保障直线与大曲率路径的定位精度,而基于 LOAM 的方案能显著抑制农田巡检中点云失真与里程计漂移。然而,在高湿高尘、叶片抖动和狭窄行间视域下,激光雷达同样面临回波衰减、局部特征退化和动态误匹配等挑战,其场景适配性并非绝对优于视觉方案。总体而言,激光雷达提供了不依赖卫星定位的高可靠导航能力,但在复杂植被噪声、高速畸变、窗口污染和成本控制方面仍存明显限制。

2.1.3 基于多传感器融合的导航定位

鉴于农业环境高度非结构化且动态变化明显,单一视觉或雷达传感器易因光照波动、特征缺失等因素导致感知信息中断。多传感器融合技术通过在数据层或特征层对异构信息进行协同处理,有效弥补单一传感器感知短板,显著提升导航系统信息完整性与鲁棒性,已成为突破复杂农田环境导航瓶颈的重要手段。

针对底盘定位精度提升问题,惯性导航与里程计融合仍是研究主流。Yoon 等[17]提出了一种低成本鲁棒定位系统,旨在解决传统轮式里程计受路面条件影响较大的问题,试验结果表明其定位性能较传统方案有明显提升。此外,为增强底盘对三维环境的感知与避障能力,视觉与激光雷达的深层融合正成为新的发展趋势。肖正邦[18]提出激光雷达与深度相机联合标定的导航方法,通过构建高程图算法实现三维环境建模。然而,多传感器融合系统性能不仅取决于算法设计,还受制于时间同步精度、安装外参稳定性、传感器清洁状态和嵌入式算力预算。总体而言,多传感器融合为农业机器人底盘提供了更鲁棒的环境感知与定位能力,但工程应用仍面临高精度时间同步、空间标定、数据冗余和系统复杂度增加等问题。不同导航定位技术适用场景及优缺点对比如表 2 所示。

表 2 导航定位技术

Tab. 2 Navigation positioning technology

类型	适用场景	优点	缺点
基于 GNSS 的导航定位技术	大田开阔环境、室外无遮挡区域	提供绝对位置,是所有农业地图和作业路径的基准	在果园、丘陵山区或遮挡区域,信号可能丢失
基于激光雷达的导航定位技术	温室、果园、GNSS 信号拒止环境	毫米波雷达穿透性强,不受雨、雾、灰尘、光照、大棚等影响,可靠性极高	毫米波雷达无法识别物体类型,需与视觉融合
基于多传感器融合的导航定位技术	全天候复杂非结构化环境、高精度作业场景	融合 GNSS、IMU、视、雷达数据,以弥补单一传感器造成的数据缺失	需解决传感器时间同步、空间标定、数据关联等复杂工程问题

2.2　路径规划

路径规划是连接农艺任务需求与底盘运动控制的决策枢纽，核心目标是在满足作物行距、地块边界及地形起伏等约束前提下，生成 1 条可被底盘稳定执行的无碰撞轨迹。随着农业机器人应用场景由规则地块向复杂农田扩展，路径规划研究也由单纯几何路径搜索，逐步转向融合底盘运动学、动力学约束及环境扰动因素的可行性规划，以提高规划结果在实际作业中的可执行性。

2.2.1　图搜索类算法

图搜索类算法通过将农田环境离散化为栅格或拓扑网络，并利用遍历策略求解全局最优路径，是目前应用较为成熟的规划方法。典型算法包括 Dijkstra 算法、A* 算法和 D* 算法。Dijkstra 算法擅长求解确定性环境下多节点最短路径，常用于大尺度农田作业调度与跨区转移规划。

A* 算法通过引入启发式函数提升搜索效率，是果园和设施农业路径规划中常用方法。针对传统 A* 路径折线多、跟踪难的问题，张万枝等[19]采用低阶贝塞尔曲线对路径进行平滑处理，改善了曲率连续性。D* 算法具备在未知环境中增量式重规划的能力，适用于动态障碍条件下局部路径修正，陈靖等[20]验证了 D* 在履带式底盘上应用效果。总体来看，图搜索类算法原理清晰、实现成熟，适合全局规划，但在高分辨率地图下计算与存储开销较大，实时性仍受限制。

2.2.2　采样类算法

采样类算法通过在高维状态空间中随机采样构建连通图，能够在复杂约束下较好地兼顾规划效率与路径可行性，主要代表为 PRM 和 RRT 类算法。相较图搜索类方法，采样类算法更适用于温室、果园等非结构化且存在狭窄通道的复杂场景。围绕 RRT 及其改进算法，研究重点主要集中在收敛速度、路径平滑性和非完整约束适应性等方面。

崔永杰等[21]针对猕猴桃采摘机器人开展改进 RRT 算法研究，提高了复杂果园环境中的全局路径规划能力。面向果园机器人特殊的非完整运动约束，Hu 等[22]提出 HPS－RRT* 算法，通过混合采样与多目标优化同步兼顾路径长度和曲率约束，使生成路径更符合底盘最小转弯半径要求。总体而言，采样类算法在复杂环境中路径可行性和灵活性方面具有优势，但随机性较强，仍存在收敛稳定性不足、路径质量波动较大等问题。

2.2.3　群优化算法

群优化算法模拟生物群体协作行为，擅长求解多约束、多目标的复杂路径优化问题，典型代表包括遗传算法、粒子群算法和蚁群算法等。遗传算法常用于丘陵地块遍历和全覆盖路径规划，周龙港等[23]通过融合 Floyd 算法与改进遗传策略，优化了丘陵地区农田遍历路径的全局代价。粒子群算法具有参数简单、收敛较快的特点，但易陷入局部最优。

总体来看，群优化算法在静态全局规划和多目标优化中具有较强优势，尤其适用于大田全覆盖作业、丘陵地块遍历等强调整体代价优化的场景；但在动态障碍频繁出现、环境信息持续更新的场景下，其迭代求解速度和在线重规划能力仍显不足。后续需进一步将群优化算法与滚动时域局部规划、场景先验和底盘动力学约束结合，提升在动态环境中的工程适用性。

2.3　驱动控制

底盘驱动控制位于运动控制体系的执行层，核心任务是在负载时变与地面扰动条件下，将上层规划输出的速度与转向指令转化为各驱动单元的精确响应。与工业场景不同，农业底盘在作业中常受土壤力学参数变化和作业负载波动的共同影响，驱动系统表现出明显的非线性与时变特性。同时，底层电气架构也正由集中式控制器向分布式驱动器演进，控制指令需要在 CAN、RS485 或 EtherCAT 等总线中完成周期性交互，这使总线带宽、节点同步误差和通信时延直接影响速度分配、电子差速和多执行器协同精度。因此，当前研究已由传统单纯调速逐步转向面向整车协同的速度分配、滑移抑制、参数补偿与通信约束协同设计。

2.3.1　阿克曼转向控制

阿克曼转向凭借结构稳固、轮胎磨损较小等优势，是大田高速重载作业的主流方案。针对传统阿克曼模型在松软地面存在侧偏和滑移的问题，研究重点主要集中在运动学模型修正与转向协调控制。Qiu 等[24]提出扩展阿克曼转向策略，通过优化虚拟转向中心和车轮线速度分配，提高了四轮驱动平台的协调性；宫金良等[25]引入多级模糊控制器，将障碍感知与转向控制相结合，改善了传统控制下轨迹锯齿化的问题。总体来看，阿克曼转向控制适用于高速、规则场景，但在狭窄空间和复杂地形中机动性仍受结构约束。

2.3.2　差速转向控制

差速转向通过调节左右驱动单元转速差实现转向，具有结构简单和零半径转弯优势，适用于温室和果园行间作业。其关键问题在于左右轮附着条件差异易引发跑偏和滑移，因此滑移抑制与电子差速控制成为研究重点。陈凤等[26]设计了电子差速与自适应防滑协同策略，通过实时辨识路面附着系数并

结合滑模控制,提高了设施移动平台的抗干扰能力。总体而言,差速转向结构紧凑、机动性强,但在复杂地形中滑移与稳定性问题仍需进一步解决。

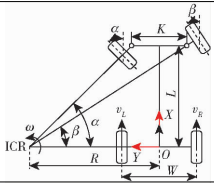
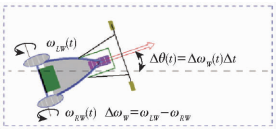
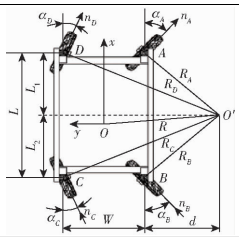
2.3.3 全向转向控制

全向转向通过四轮独立驱动/转向或特殊轮系实现平面内任意方向运动,是解决狭窄空间精细作业的重要方案。相关研究主要围绕独立转向单元的协同控制和多自由度运动学解算展开。娄鹏等[27]设计了基于四舵轮底盘的模块化巡检机器人,实现了横向平移和原地自旋等运动功能,为轮式全向底盘的底层控制提供了参考。在多足平台全向运动控制方面,Yue 等[28]提出结合全向步态重规划与自适应 PID 的控制策略,提高了六足机器人在复杂地形中全向机动能力和姿态响应性能。

总体而言,阿克曼、差速及全向转向模式在工作原理、运动特性和适用场景等方面各具特点,对比如表 3 所示。其中,阿克曼转向适用于大田高速作业,差速转向适用于设施与中小型平台,全向转向则更适合狭窄区域精细作业。技术演进上,驱动控制已由单一运动学分配转向“运动学-动力学-电气架构”协同优化,需兼顾通信时延、执行器一致性、滑移补偿与故障降级。因此,未来研究仍需围绕复杂农田的协同控制、底层总线架构与构型适配进一步深化。

表 3 驱动转向原理

Tab. 3 Driving steering principle

类型	核心特点	适用场景	优点	缺点	原理图
阿克曼转向	前轮集成转向驱动机构,后轮为随动驱动;通过转向梯形控制内外轮转向角差,驱动系统同步匹配前后轮转速	大型植保机、宽幅播种机器人	行驶平稳,轮胎磨损少;适配高速作业	最小转弯半径大,狭窄空间灵活性差	
差速转向	无独立转向机构,左右轮分别由独立驱动单元控制;通过调整左右轮转速差实现转向,驱动与转向一体化	中小型除草机器人、果园巡检机器人、温室作业机器人	结构简单,成本低;转向响应速度快	转向精度低,易打滑;复杂地形稳定性差	
全向转向	多轮均配备独立驱动与转向单元;驱动系统控制轮速,转向系统控制轮体偏转角度,协同实现横向移动、原地旋转等全向运动	温室窄垄采摘机器人、大棚移栽机器人、果园作业机器人	灵活度极高,无需转弯空间;适配狭窄区域精准作业	结构复杂,多单元协同控制难度大;维修成本高	

2.4 路径跟踪

路径跟踪控制是底盘运动控制体系的执行终端,核心任务是在地面附着系数变化和滑移干扰条件下,通过生成合适的速度与转向指令,使农业机器人底盘稳定逼近期望轨迹。实际作业中,基于理想运动学模型的控制器往往难以应对长距离运行中的累积误差与非线性扰动,因此当前研究正由单一几何跟踪逐步转向结合动力学补偿的鲁棒控制与多算法融合。

2.4.1 经典控制及其改进策略

PID 控制因结构简单、可靠性高,仍是底层执行机构中应用最广泛的控制方法,但在非线性系统中通常需要结合智能优化算法进行参数整定。姚颖飞等[29]设计了模糊 PID 控制器,通过实时整定控制参数,缩短了高速玉米精量播种机电机的调节时间。总体来看,经典控制方法实现简单、工程适用性强,但在强非线性和复杂扰动条件下,鲁棒性仍有提升空间。

2.4.2 自适应与智能控制算法

面对农田作业中速度波动、大曲率路径及滑移扰动引起的模型失配,自适应与智能控制方法被广泛用于提高路径跟踪精度。马悦琦等[30]提出基于模糊推理的 LQR 权重矩阵自适应调整方法,实现了插秧机变速曲线跟踪性能的提升。总体而言,这类方法在复杂环境中表现出较好的自适应性,但算法设计、参数整定和工程实现难度相对较高。

2.4.3 模型预测控制

模型预测控制(MPC)凭借处理多变量约束和滚动优化的能力,已成为高精度路径跟踪的重要方法。赵润茂等[31]构建了基于误差补偿的改进型 MPC 控制器,通过显式补偿滑移引起的速度偏差,提高了履带式除草机的路径跟踪性能。总体来看,MPC 在复杂轨迹和强约束条件下具有明显优势,但对计算资源和模型精度要求较高。

综上所述，不同路径跟踪算法在控制机理、适用场景及性能特点等方面呈明显差异，对比如表 4 所示。PID 及其改进方法适合算力受限、模型相对简单的常规作业场景，自适应与智能控制方法更强调复杂环境下参数调节能力，而 MPC 则在高精度、多约束路径跟踪中表现突出。当前技术演进的核心趋势，是将滑移估计、执行器约束、地形扰动和计算资源预算一并纳入控制器设计。然而，农业场景下模型失配强、负载变化快、边缘算力有限，仍使高精度方法在工程落地中面临实时性和鲁棒性双重挑战。

表 4　路径跟踪控制算法

Tab.4　Path tracking control algorithm

类型	适用场景	优点	缺点
PID 控制	温室窄域、固定轨迹作业	易实现、成本低，抗干扰能力强	复杂地形参数整定难，动态响应一般
模糊控制	果园行间、非结构化农田	无需精确模型，适配地形波动	规则库设计复杂，极端工况精度下降
模型预测	丘陵坡地、复杂轨迹作业	多约束适配性强，路径精度高	计算量大，依赖精准动力学模型
视线法（LOS）制导控制	大田开阔地、直线和缓曲线作业	原理简单、实时性好，计算量小，对硬件要求低，适配连续开阔场景	对路径曲率变化适应性差，大曲率路径易超调，需配合避障算法使用

2.5　姿态控制

姿态控制是农业机器人底盘在丘陵、垄沟及起伏地形中维持机身平稳和作业精度的关键环节，本质是通过实时获取俯仰、横滚和偏航等姿态信息，利用主动悬挂、调平机构或差速驱动等执行单元进行动态补偿，以抑制地形激励引起的车身晃动和侧翻风险。相较于平地移动平台，农业机器人在非结构化地形中更容易受到坡度变化、附着条件波动和载荷偏移等因素影响，因此姿态控制已成为提升底盘安全性和稳定性的重要技术支撑。

针对大坡度地形下防侧翻需求，基于主动悬挂或调平机构的闭环控制是当前研究的主要方向。刘凤霞等[32]面向丘陵山区玉米收获场景，设计了液压式主动车身姿态调整系统，通过构建整机侧倾动力学模型，实现了车身自适应调平并显著提高了整机稳定性；刘国海等[33]则针对高地隙喷雾机姿态控制问题，提出了基于滑模自抗扰的控制方法，增强了同步转向工况下姿态稳定能力。总体来看，主动调平策略能够直接改善坡地作业安全性，但控制效果仍受执行机构行程、响应速度及整机结构参数约束。

为应对复杂非线性扰动条件下姿态跟踪问题，滑模控制、强化学习等先进方法逐渐被引入姿态控制领域。Sun 等[34]提出模糊自适应递归终端滑模控制策略，通过动态调节滑模增益削弱了传统滑模控制中抖振现象，提高了全向移动底盘的姿态跟踪精度；李希明等[35]则将改进 TD3 算法用于山地无人底盘姿态控制，提升了复杂地形下平稳性与自适应能力。总体而言，姿态控制技术正由传统调平控制向鲁棒化、智能化方向发展，但在极端工况下模型精度、实时性和执行器约束处理方面仍有待进一步提升。

本节围绕农业机器人底盘运动控制中的感知、路径规划、驱动控制、路径跟踪和姿态控制等关键技术进行了系统分析。总体来看，底盘控制正由基于理想模型的单一控制方法，逐步转向面向复杂农田环境的多源感知融合、规划控制协同和鲁棒智能控制。尽管相关研究已在定位精度、轨迹跟踪和复杂地形稳定性等方面取得明显进展，但在极端环境感知退化机理、软土参数在线辨识、通信受限下多执行器协同以及复杂工况下姿态安全控制等方面仍存在不足。因此，脱离具体作业场景讨论控制策略的适用性具有局限性，后续仍需结合典型农业场景开展针对性分析与优化。

3　典型工况下农业机器人底盘运动控制策略

在前述底盘控制原理的基础上，农业机器人在工程落地中需进一步面对作业对象多样、地表条件时变及空间约束严苛的现实挑战。不同的农业场景决定了底盘运动控制的“优先级”差异：大田作业追求高速与直线性，设施作业强调精准与无碰撞，而丘陵作业则以防翻和通过性为绝对红线。因此，本节将控制算法与具体作业工况解耦，重点分析在“高速重载与松软地面”、“弱 GNSS 与狭窄空间”及“大坡度与非连续地形”3 种典型场景下差异化控制策略与解决方案。

3.1　高速重载与松软地面工况

大田场景是农业机器人规模化作业的主要场景，具有作业距离长、负载大且车速较快的特征。在此工况下，地面不平引起的高频振动会干扰视觉感知，而松软土壤导致沉陷滑移会削弱底盘稳定性。因此，该场景运动控制主要聚焦“视觉感知抗扰”与“底盘-土壤力学适配”2 方面。

针对高速行驶中颠簸导致导航特征提取不稳定的问题，稳像与导航线检测成为研究重点。例如，王杰等[36]基于改进 Harris 角点与自适应卡尔曼滤波有效抑制了田间图像抖动；张伟荣等[37]基于农业机

器人本体传感信号开展旱田平作与垄作类型识别，为不同田间作业状态下底盘控制策略切换提供了依据；Fu 等[38]面向水田提出轻量化轨迹生成方法，在保证实时性的同时提升了横向跟踪效果。这表明，视觉感知的稳定性直接影响底盘路径跟踪与作业精度。

此外，松软土壤对牵引力与承载力的影响亦是制约底盘稳定的关键因素。该工况下控制精度不仅受滑移率影响，更与土壤剪切变形、内聚力、内摩擦角及沉陷指数等参数密切相关。苏淼等[39]开发的轮履切换式底盘有效兼顾了轮式高速与履带低接地比压的优势。然而，现有方法多依赖经验补偿或离线标定，对软土参数的在线反演与控制闭环耦合不足，导致“模型失配”长期存在。总体而言，大田工况下底盘控制需同时兼顾感知鲁棒性、牵引性能、土壤适应性与行驶稳定性。旱田与水田环境下典型农业机器人底盘如图 2 所示。



(a) 旱田作业 (b) 水田作业

图 2 机器人底盘不同田间作业

Fig. 2 Agricultural robot chassis for various field operations

3.2 弱 GNSS 与狭窄空间工况

弱 GNSS 与狭窄空间工况多见于温室与高密度果园。因卫星信号被遮挡、通道狭窄、障碍密集及光照波动，底盘控制须由绝对定位转向相对定位与多源感知融合，对小转弯半径、横向机动与精准避障要求更高。此外，高湿粉尘、雾滴附着及枝叶刮碰易引发视觉模糊、雷达回波退化与外参漂移，致使感知系统更易短时失效。

针对多点作业易陷入局部最优与路径死锁的问题，启发式全局优化仍是重要手段。王红君等[40]提出并行蚁群算法，通过自适应种群调整与安全距离约束，实现了多目标点的无冲突路径生成；同时，底盘设计正趋向紧凑化与高机动，以适配窄域环境的频繁转弯与贴行需求。

在精细植保与巡检中，底盘还需为作业装置提供稳定平台。Li 等[41]设计的自适应履带机器人，利用底盘主动适应地面起伏，提升了视觉对靶与喷施效果。面对信号丢失的“盲跑”风险，Feng 等[42]构建了基于 RBPF－SLAM 的导航框架，紧耦合 LiDAR 点云与里程计，提高了温室定位与航向稳定性，证实多源异构 SLAM 已成为弱 GNSS 环境下重要技术路线。

总体而言，该工况下控制核心在于摆脱对单一绝对定位的依赖，构建融合相对定位、局部规划与高机动构型的综合体系。现有研究虽在多源 SLAM、窄域规划与紧凑底盘上取得进展，但在光照剧变、枝叶遮挡及动态障碍下，系统的感知鲁棒性、在线重定位及失效后安全降级控制仍待进一步提升。

3.3 大坡度与非连续地形工况

大坡度与非连续地形主要存在于丘陵山地、梯田果园和沟壑地块。此类场景下，底盘不仅要保持路径跟踪精度，还必须避免侧翻、打滑和局部失稳。相比平原大田，坡地环境下重心偏移、轮地附着变化和载荷扰动更加突出，姿态控制与构型适配成为决定底盘安全性的关键因素。

针对坡地姿态失稳，基于主动调平机构的闭环控制是研究重点。黄薛凯等[43]研制的电动除草底盘，通过电动推杆调高机构结合模糊 PID 控制，提升了坡面的稳定性与轨迹跟踪能力。在梯田果园等狭窄地头，转向机动与防滑同样关键。赵智宇[44]开发双重转向运动系统，引入自抗扰算法补偿滑移扰动，增强了小转弯半径下轨迹控制能力。

面对沟壑、台阶等非连续地形，轮腿复合与仿生构型优势独特。此类平台通过姿态优化、离地间隙调节与多执行器协同，有助于提升山地机动性与稳定性。然而，此类平台常面临冗余执行器与欠驱动耦合问题，越障时状态切换、姿态突变及驱动力再分配显著增加了控制复杂度。

综上所述，该工况下控制核心在于兼顾构型安全、姿态稳定与越障能力。现有研究在主动调平、防滑转向与复合底盘设计上已取得进展，但仍面临地形扰动难预测、复杂机构控制代价高及可靠性不足等问题。未来应进一步结合具体山地场景，强化地形感知、姿态预测、轮/履-地相互作用建模及多执行器协同控制研究。综合大田、设施农业和丘陵山地等典型作业环境，不同场景下农业机器人底盘适配形式、设计特点及关键技术如表 5 所示。

立足于工程落地视角，深入探讨了农业机器人底盘在 3 种典型工况下差异化控制策略。分析表明，农业机器人运动控制已不再是单一维度的算法迭代，而是一个“环境约束重塑控制架构”的系统性适应过程。

在大田高速重载工况，控制的核心矛盾是“作业效率与地面扰动”。为了在高速行驶中维持稳态，技术演进体现为：视觉系统通过电子稳像对抗高频振动，底盘结构通过牵引力控制和软土参数补偿

表 5　不同作业场景适配底盘

Tab. 5　Scenario-adapted agricultural robot chassis

作业场景	适配底盘	设计特点	关键技术	适配作物
大田	全类型	高速稳定行驶、低土壤压实、大作业幅宽	RTK－GNSS 定位、PID 速度控制、多电机同步驱动	小麦、玉米、油菜等大田作物
设施农业	全向轮式	小转弯半径、横向平移、窄域适配	视觉导航、多轮独立控制	番茄、黄瓜、生菜等设施蔬菜
丘陵山地	履带式、轮履混合式	高地形通过性、抗打滑、爬坡能力	仿生履带设计、IMU 姿态校准	茶叶、山地苹果、核桃等丘陵作物

适配土壤力学特性；在弱 GNSS 与狭窄空间工况，核心矛盾转变为“定位连续性与空间机动性”，这迫使控制系统必须从依赖外部基准向依赖本体感知转型，并推动底盘构型向差速化、全向化和紧凑化发展；在大坡度与非连续地形工况，核心矛盾升级为“构型安全与通过能力”，防侧翻主动调平与多执行器协同越障逐渐超越单纯路径跟踪，成为保障作业安全的首要前提。

综上所述，并没有一种“万能”的底盘或控制算法能够同时覆盖所有农业场景。农业机器人底盘形态与控制策略正呈现出高度的场景专有化特征，但这种“专机专用”模式也带来了研发成本高、通用性差和维护复杂度高的弊端。因此，通过模块化设计、可重构底盘和自适应控制算法，使单一平台具备跨场景的“多模态切换能力”，将是未来农业机器人突破工程化瓶颈的关键方向。

4　总结与展望

4.1　总结

机械构型决定了运动性能物理边界。轮式底盘结构简单、传动效率高，适用于大田与设施，但在软湿地面易打滑沉陷；履带式底盘接地比压低，更适合水田和坡地，但存在转向能耗高和响应滞后等不足；腿足及轮腿复合底盘在非连续地形中机动潜力大，但结构复杂、成本高，尚待进一步发展。从趋势上看，底盘平台正向模块化、可重构和多执行器协同方向演进。

控制技术正由基于理想模型的运动学控制，逐步向兼顾环境扰动、滑移效应和动力学约束的综合控制演进。感知层，多源融合是提升弱 GNSS 和复杂地形定位可靠性的主流；决策层，路径规划正由纯几何寻优转向结合动力学与场景约束的可执行规划；执行层，则更加重视参数时变、非线性扰动及多执行器协同问题。

场景差异决定了控制策略专用化特征。大田工况强调高速稳定与抗扰，设施狭窄空间强调相对定位与精准避障，丘陵山地则更关注主动调平和防滑防翻。目前仍有 4 大关键问题亟待解决：极端环境下感知退化与失效切换、软土-底盘耦合参数的在线辨识、通信受限下分布式驱动协同，以及跨场景的构型与控制通用性不足。表明，未来发展方向不是追求单一通用算法，而是面向典型场景构建差异化、模块化和协同化的控制体系。

4.2　展望

尽管农业机器人底盘运动控制已取得较大进展，面对复杂农田环境与无人化需求，未来仍需围绕“可感、可算、可控、可重构”持续突破：

（1）面向复杂地形与软土的高精度建模与数字孪生。需深化轮/履-地相互作用、坡地姿态及滑移机理建模，将剪切变形、内聚力与沉陷指数等参数纳入在线辨识与补偿闭环。同时，借助数字孪生构建“仿真-硬件在环-实测”验证平台，实现参数反演与策略预估，降低上田试错成本。

（2）面向极端环境的多模态感知与轻量化边缘智能。针对弱 GNSS、高湿粉尘及光照剧变场景，需提升视觉、激光与惯导等多源融合的鲁棒性，重点攻克传感器污染检测、外参漂移与失效诊断。架构上，可部署“前端轻量化-估计深融合-后端安全降级”的边缘系统，以兼顾实时性、低功耗与低成本。

（3）面向多场景的模块化底盘与协同控制。底盘正由单一构型向模块化、可重构与多执行器协同演进，依靠统一接口与分层架构实现跨场景快速适配。其中，需重点关注分布式驱动与车载总线的协同设计，明确任务划分、通信预算与故障冗余，并探索基于 CAN/EtherCAT 等架构的高可靠协同控制，全面提升底盘的通用性与工程应用价值。

参　考　文　献

[1]　苗中华，朱子煜，张伟，等. 具身智能农业机器人关键技术与发展趋势[J]. 农业机械学报，2025，56(9)：212－239.
Miao Zhonghua，Zhu Ziyu，Zhang Wei，et al. Key technologies and development trends of embodied intelligent agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(9)：212－239.（in Chinese）

[2]　夏先飞，贾磊，张硕，等. 果蔬采摘机器人研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报，2026，42(2)：14－28.
Xia Xianfei，Jia Lei，Zhang Shuo，et al. Current research status and development trends of fruit and vegetable harvesting robots[J]. Transactions of the CSAE，2026，42(2)：14－28.（in Chinese）

[3] 梁明旭, 袁昌荣, 夏先飞, 等. 机器人技术在蔬菜生产领域的应用现状及发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(4): 50 - 63.
Liang Mingxu, Yuan Changrong, Xia Xianfei, et al. Application status and development trend of robot technology in vegetable production[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(4): 50 - 63. (in Chinese)

[4] 许航彬, 王钢明, 朱家辉, 等. 模块化轮式全向移动机器人底盘的设计[J]. 机械制造, 2024, 62(7): 28 - 36.
Xu Hangbin, Wang Gangming, Zhu Jiahui, et al. Design of a modular wheeled omnidirectional mobile robot chassis[J]. Machinery Manufacturing, 2024, 62(7): 28 - 36. (in Chinese)

[5] 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 63 - 70.
Zhang Jing, Chen Du, Wang Shumao, et al. Design and experiment of four-wheel independent steering and driving control system for agricultural wheeled robots[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 63 - 70. (in Chinese)

[6] Raikwar S, Fehrmann J, Herlitzius T. Navigation and control development for a four-wheel-steered mobile orchard robot using model-based design[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107410.

[7] 蔡羽晨, 高巧明, 罗悦洋, 等. 丘陵山地小型履带式动力底盘设计与试验[J]. 广西科技大学学报, 2024, 35(4): 15 - 24.
Cai Yuchen, Gao Qiaoming, Luo Yueyang, et al. Design and experiment of a small tracked power chassis for hilly and mountainous areas[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2024, 35(4): 15 - 24. (in Chinese)

[8] Hu J, Pan J, Dai B, et al. Development of an attitude adjustment crawler chassis for combine harvester and experiment of adaptive leveling system[J]. Agronomy, 2022, 12(3): 717.

[9] 宫丽男, 庞在祥. 基于 ADAMS 的六足仿生机器人结构设计及运动仿真[J]. 机械传动, 2018, 42(3): 49 - 53.
Gong Li'nan, Pang Zaixiang. Structural design and motion simulation of hexapod bionic robot based on ADAMS[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(3): 49 - 53. (in Chinese)

[10] Zhang Z H, He W L, Wu F, et al. Development of a bionic hexapod robot with adaptive gait and clearance for enhanced agricultural field scouting[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2024, 11: 1426269.

[11] Pan K, Zhang Q, Wang Z, et al. Method for the posture control of bionic mechanical wheel-legged vehicles in hilly and mountainous areas[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(5): 151 - 162.

[12] 徐纪洋. 基于北斗导航无人驾驶的氢能源驱动多功能四驱四转设施农业机器人底盘设计与实现[J]. 农业开发与装备, 2025(7): 49 - 51.
Xu Jiyang. Unmanned driving based on Beidou navigation: design and implementation of a hydrogen energy driven multifunctional four-wheel drive and four-wheel steering protected agricultural robot chassis[J]. Agricultural Development and Equipment, 2025(7): 49 - 51. (in Chinese)

[13] 姜毅. 西瓜棚巡检机器人自动导航关键技术研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2024.

[14] 熊斌, 张俊雄, 曲峰, 等. 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, et al. Automatic navigation control system for orchard spraying machines based on BDS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 45 - 50. (in Chinese)

[15] 侯加林, 蒲文洋, 李天华, 等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 80 - 88.
Hou Jialin, Pu Wenyang, Li Tianhua, et al. Development of navigation system for greenhouse transport robots based on dual LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 80 - 88. (in Chinese)

[16] Jiang S, Wang S, Yi Z, et al. Autonomous navigation system of greenhouse mobile robot based on 3D Lidar and 2D Lidar SLAM[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 815218.

[17] Yoon J H, Kim S K. RLRL: robust low-cost robot localization on diverse road surfaces via wheel encoder[J]. Measurement, 2025, 256(Part C): 118276.

[18] 肖正邦. 基于传感器融合的农业机器人定位导航[J]. 南方农机, 2022, 53(23): 78 - 80.
Xiao Zhengbang. Localization and navigation of agricultural robots based on sensor fusion [J]. Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(23): 78 - 80. (in Chinese)

[19] 张万枝, 赵威, 李玉华, 等. 基于改进 A* 算法 + LM - BZS 算法的农业机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 81 - 92.
Zhang Wanzhi, Zhao Wei, Li Yuhua, et al. Path planning of agricultural robots based on improved A* algorithm + LM - BZS algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 81 - 92. (in Chinese)

[20] 陈靖, 辜丽川, 李倩倩, 等. 基于 D* 算法的农用履带机器人路径规划研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 31 - 37.
Chen Jing, Gu Lichuan, Li Qianqian, et al. Research on path planning of agricultural tracked robots based on D* algorithm[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 39(1): 31 - 37. (in Chinese)

[21] 崔永杰, 王寅初, 何智, 等. 基于改进 RRT 算法的猕猴桃采摘机器人全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 151 - 158.
Cui Yongjie, Wang Yinchun, He Zhi, et al. Global path planning of kiwifruit harvesting robots based on improved RRT algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 151 - 158. (in Chinese)

[22] Hu M, Huang Q, Cai J, et al. HPS－RRT*: an improved path planning algorithm for a nonholonomic orchard robot in unstructured environments[J]. Agronomy, 2025, 15(3): 712.

[23] 周龙港, 刘婷, 卢劲竹. 基于 Floyd 和改进遗传算法的丘陵地区农田遍历路径规划[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(4):45－57.
Zhou Longgang, Liu Ting, Lu Jinzhu. Farmland traversal path planning in hilly areas based on Floyd and improved genetic algorithm[J]. Journal of Smart Agriculture, 2023, 5(4): 45－57. (in Chinese)

[24] Qiu Q, Fan Z Q, Meng Z J, et al. Extended Ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 40－50.

[25] 宫金良, 马全坤, 张彦斐. 阿克曼转向农业机器人的多级模糊控制避障[J]. 农机化研究, 2021, 43(4): 196－201.
Gong Jinliang, Ma Quankun, Zhang Yanfei. Multi-level fuzzy control obstacle avoidance for Ackermann steering agricultural robots[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 196－201. (in Chinese)

[26] 陈凤, 丁俊杰, 罗志涛, 等. 设施园艺移动平台分布式驱动自适应防滑控制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 85－96.
Chen Feng, Ding Junjie, Luo Zhitao, et al. Adaptive anti-slip control of distributed drive for protected horticulture mobile platform[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(10): 85－96. (in Chinese)

[27] 娄鹏, 王磊. 全向式四舵轮农业巡检机器人的设计与实现[J]. 电子技术, 2025, 54(5): 138－139.
Lou Peng, Wang Lei. Design and implementation of an omni-directional four-steering-wheel agricultural inspection robot[J]. Electronic Technology, 2025, 54(5): 138－139. (in Chinese)

[28] Yue M, Jiang X, Zhang L, et al. Research on omnidirectional gait switching and attitude control in hexapod robots[J]. Biomimetics, 2024, 9(12): 729.

[29] 姚颖飞, 陈学庚, 纪超, 等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 12－21.
Yao Yingfei, Chen Xuegeng, Ji Chao, et al. Design and experiment of single-unit driver for precision corn seeder based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 12－21. (in Chinese)

[30] 马悦琦, 迟瑞娟, 赵彦涛, 等. 基于模糊控制的插秧机 LQR 曲线路径跟踪控制器优化方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 1－8, 102.
Ma Yueqi, Chi Ruijuan, Zhao Yantao, et al. Optimization method of LQR curved path tracking controller for transplanters based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 1－8, 102. (in Chinese)

[31] 赵润茂, 丁帅奇, 何杰, 等. 履带式除草机路径跟踪误差补偿改进型 MPC 控制方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 326－334, 354.
Zhao Runmao, Ding Shuaiqi, He Jie, et al. Improved MPC control method for path tracking error compensation of tracked weeders[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 326－334, 354. (in Chinese)

[32] 刘凤霞, 逄焕晓, 翟国强, 等. 丘陵山区单行玉米收获机自适应姿态调整系统研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(9): 67－73, 82.
Liu Fengxia, Pang Huanxiao, Zhai Guoqiang, et al. Research on adaptive attitude adjustment system of single-row corn harvester in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(9): 67－73, 82. (in Chinese)

[33] 刘国海, 李持衡, 沈跃, 等. 基于滑模自抗扰的同步转向高地隙喷雾机姿态控制[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 180－189, 300.
Liu Guohai, Li Chiheng, Shen Yue, et al. Attitude control of synchronized steering high-clearance sprayer based on sliding mode active disturbance rejection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 180－189, 300. (in Chinese)

[34] Sun Z, Hu S J, Xie H, et al. Fuzzy adaptive recursive terminal sliding mode control for an agricultural omnidirectional mobile robot[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 105: 108529.

[35] 李希明, 刘业通, 彭世康, 等. 基于改进 TD3 的山地无人作业底盘姿态控制方法[J]. 现代制造工程, 2025(5): 1－11.
Li Ximing, Liu Yetong, Peng Shikang, et al. Attitude control method for mountain unmanned operation chassis based on improved TD3[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2025(5): 1－11. (in Chinese)

[36] 王杰, 经俊森, 陈正伟, 等. 基于 Harris 和卡尔曼滤波的农业机器人田间稳像算法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 30－36, 53.
Wang Jie, Jing Junsen, Chen Zhengwei, et al. Field image stabilization algorithm for agricultural robots based on Harris and Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 30－36, 53. (in Chinese)

[37] 张伟荣, 陈学庚, 齐江涛, 等. 基于农业机器人本体传感信号的旱田平作与垄作类型识别方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 164－174.
Zhang Weirong, Chen Xuegeng, Qi Jiangtao, et al. Recognition method of dryland flat planting and ridge planting types based on agricultural robot ontology sensing signals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 164－174. (in Chinese)

(下转第 298 页)

46(4): 753 - 766.
Xie Liu, Yang Fangqin, Sun Jianwei, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of cultivated land use efficiency in Karst mountainous areas[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(4): 753 - 766. (in Chinese)

[39] 曾予心, 苏建兰, 李伟, 等. 云南碳汇造林投入产出效率分区优化对策[J]. 西部林业科学, 2025, 54(3): 146 - 153.
Zeng Yuxin, Su Jianlan, Li Wei, et al. Input-output efficiency of carbon sequestration in Yunnan mountainous areas[J]. Journal of West China Forestry Science, 2025, 54(3): 146 - 153. (in Chinese)

[40] 王丽双, 傅新红, 蒋浩, 等. 农业新质生产力测度、区域差异及耦合协调研究[J]. 农林经济管理学报, 2025, 24(1): 55 - 64.
Wang Lishuang, Fu Xinhong, Jiang Hao, et al. Development level measurement, regional differences and coupling coordination of agricultural new quality productivity[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2025, 24(1): 55 - 64. (in Chinese)

[41] 党昱裙, 李超, 谢臻, 等. 耕地上山撂荒成因及空间优化路径探究:以江西省万年县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(12): 2756 - 2767.
Dang Yuyan, Li Chao, Xie Zhen, et al. Research on the reasons for farmland uphill abandoned and the path for space optimization under the system of requisition-compensation balance: a case study of Wannian County in Jiangxi Province, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(12): 2756 - 2767. (in Chinese)

(上接第 185 页)

[38] Fu D B, Chen Z Y, Yao Z Q, et al. Vision-based trajectory generation and tracking algorithm for maneuvering of a paddy field robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109368.

[39] 苏淼, 郧亚泽, 姚霞, 等. 轮履切换式作物表型信息感知机器人底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 39 - 48.
Su Miao, Yun Yaze, Yao Xia, et al. Design and experiment of wheel-track switchable robot chassis for crop phenotyping information perception[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 39 - 48. (in Chinese)

[40] 王红君, 付勇, 岳有军, 等. 基于并行蚁群算法的设施温室机器人多点路径规划的研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 237 - 241.
Wang Hongjun, Fu Yong, Yue Youjun, et al. Research on multi-point path planning of protected greenhouse robots based on parallel ant colony algorithm[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(17): 237 - 241. (in Chinese)

[41] Li D S, Gao F, Li Z M, et al. Design of a leaf-bottom pest control robot with adaptive chassis and adjustable selective nozzle[J]. Agriculture, 2024, 14(8): 1341.

[42] Feng X, Liang W J, Chen H Z, et al. Autonomous localization and navigation for agricultural robots in greenhouse[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 131: 2039 - 2053.

[43] 黄薛凯, 施印炎, 汪小旦, 等. 丘陵山地果园纯电驱动除草机器人研制[J]. 农业工程学报, 2025, 41(18): 28 - 41.
Huang Xuekai, Shi Yinyan, Wang Xiaochan, et al. Development of pure electric drive weeding robot for hilly and mountainous orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(18): 28 - 41. (in Chinese)

[44] 赵智宇. 农业机器人底盘双重转向运动控制系统设计与试验[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2023.