

分类号: S23  
学号: 20232109037

密级: 公开  
单位代码: 10759

# 石河子大学 硕士学位论文



## 面向高架草莓的温室移动机器人平台设计与实现

学位申请人	王德锋
指导教师	坎杂教授 熊亚研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子  
2026年5月

分类号: S23  
学号: 20232109037

密级: 公开  
单位代码: 10759

# 石河子大学 硕士学位论文



## 面向高架草莓的温室移动机器人平台设计与实现

学位申请人	王德锋
指导教师	坎杂 教授 熊亚 研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子  
2026年 5 月

**Design and Implementation of a Mobile Robotic Platform for  
Elevated Strawberry Greenhouses**

A Dissertation Submitted to  
**Shihezi University**  
In Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
**Master of Engineering**

By

**Wang De-feng**  
**(Agricultural Machinery and Equipment Engineering)**

Dissertation Supervisor: Prof.Kan Za

May,2026

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

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

研究生签名：王德锋

时间：2026年5月21日

## 使用授权声明

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

研究生签名：王德锋

时间：2026年5月21日

导师签名：坎杂

时间：2026年5月22日

## 摘要

针对高架草莓温室通道狭窄、端头空间受限及低附着地表易滑移等问题，本文设计并实现了一种四轮独立驱动四轮独立转向移动机器人平台。该平台采用单边独立垂直减震结构，集成横移、原地旋转和双阿克曼三种运动模式，可满足温室狭窄空间作业对机动性、稳定性与环境适应性的要求。本文主要内容与结论如下：

(1) 开展了高架草莓温室作业环境与需求分析，对典型高架草莓种植场景进行了农艺调研，明确了移动平台在模块化、小型化、多运动模式、稳定停靠、限速急停及易维护等方面的功能要求。在此基础上，完成了四轮独立驱动独立转向、单边独立垂直减震移动平台的总体设计与机电系统集成，构建了由上位控制、分布式执行、多传感器辅助及电源管理组成的机电一体化架构，为平台在狭窄空间及低附着地表条件下的稳定运行与灵活作业提供了基础。

(2) 完成了运动学建模、结构仿真与ROS控制系统开发。建立了平台在横移、原地旋转及双阿克曼模式下的运动学模型，并完成了基于ROS的运动控制系统开发。结构仿真结果表明，车架在单轮5000N静载工况下最大等效应力为 $1.199 \times 10^2 \text{MPa}$ 、最大位移为0.05 mm、安全系数约为2.2，满足强度与刚度要求；整车1~6阶固有频率为13.776~150.13Hz，低频共振风险较小；关键旋转底座优化后形变量由0.1mm降至0.005mm。双阿克曼转弯仿真表明，平台在15°、20°和25°转角下均能稳定转弯，且稳态速度随转角增大由约1.05m/s降至0.90m/s和0.75~0.80m/s。

(3) 提出了基于双阿克曼无滑移参考模型的滑移风险判别方法。构造风险滑移判别指标 $\eta$ 。结果表明：这三种影响因素中对滑移影响最大的是湿润覆膜路况，速度等级因素次之，转向角强度因素相对较弱；在湿润覆膜、速度0.6m/s、转弯角度25°组合工况下，移动平台滑移已经进入滑移高风险区，而干燥水泥路况下大多数工况处于低风险区。该方法可实现在线计算，为温室低附着地面条件下的平台安全运行判别提供依据。

(4) 样机试制与试验。样机功能测试结果表明：平台能够稳定实现直线行驶、横向移动和原地旋转等典型运动形式。通信链路稳定，转向模式切换准确，轮组转向协调，未出现明显结构干涉与失稳现象。双阿克曼工况下，实测轮速及IMU测量参数总体与理论分析一致。表明所设计平台具有良好的机动性、运动协调性与环境适应能力，能够满足高架草莓温室复杂作业场景下对移动底盘的应用需求。

**关键词：**温室高架草莓；四轮独立驱动独立转向；单边独立垂直减震；ROS控制；滑移风险判别

## Abstract

To address the problems of narrow aisles, limited headland space, and easy slip on low-adhesion ground in elevated strawberry greenhouses, a four-wheel independent drive and four-wheel independent steering mobile robot platform was designed and implemented in this study. The platform adopts a unilateral independent vertical suspension structure and integrates three motion modes, namely lateral translation, in-place steering, and double-Ackermann steering, so as to meet the requirements of maneuverability, stability, and environmental adaptability for greenhouse operations in confined spaces. The main contents and conclusions of this study are as follows:

(1) An analysis of the operational environment and application requirements of elevated strawberry greenhouses was conducted. Agronomic investigations were carried out for typical elevated strawberry cultivation scenarios, and the functional requirements of the mobile platform were clarified in terms of modularity, miniaturization, multiple motion modes, stable docking, speed limiting with emergency stop, and ease of maintenance. On this basis, the overall design and electromechanical integration of a mobile platform with four-wheel independent drive, four-wheel independent steering, and single-side independent vertical shock absorption were completed. An electromechanical architecture consisting of upper-level control, distributed actuation, multi-sensor assistance, and power management was established, providing a foundation for the stable operation and flexible maneuvering of the platform in narrow spaces and on low-adhesion ground surfaces.

(2) Kinematic modeling, structural simulation, and ROS-based control system development were completed. Kinematic models of the platform under lateral translation, in-place rotation, and double-Ackermann steering modes were established, and a ROS-based motion control system was developed. Structural simulation results showed that, under a single-wheel static load of 5000 N, the maximum equivalent stress of the frame was  $1.199 \times 10^2$  MPa, the maximum displacement was 0.05 mm, and the safety factor was approximately 2.2, indicating that the strength and stiffness requirements were satisfied. The first six natural frequencies of the vehicle ranged from 13.776 to 150.13 Hz, suggesting a low risk of low-frequency resonance. After optimization, the deformation of the key rotating base was reduced from 0.1 mm to 0.005 mm. Double-Ackermann turning simulations demonstrated that the platform could achieve stable turning at steering angles of 15°, 20°, and 25°, while the steady-state velocity decreased from approximately 1.05 m/s to 0.90 m/s and 0.75–0.80 m/s as the steering angle increased.

(3) A slip risk identification method based on a no-slip reference model for double-Ackermann steering was proposed. A slip risk indicator,  $\eta$ , was constructed for risk assessment. The results showed that, among the three influencing factors considered, the wet plastic-film-covered road condition had the greatest effect on slip, followed by the speed level, while the steering angle intensity had a relatively weaker influence. Under the combined condition of wet plastic film, a speed of 0.6 m/s, and a steering angle of  $25^\circ$ , the mobile platform entered a high slip-risk region, whereas under dry cement road conditions, most operating conditions remained within the low-risk region. This method enables online calculation and provides a basis for safe operation assessment of the platform under low-adhesion greenhouse ground conditions.

(4) Prototype fabrication and experimental validation were carried out. Functional tests of the prototype showed that the platform could stably achieve typical motion modes, including straight-line travel, lateral movement, and in-place rotation. The communication link remained stable, the switching of steering modes was accurate, wheel steering coordination was satisfactory, and no obvious structural interference or instability was observed. Under double-Ackermann conditions, the measured wheel speeds and IMU parameters were generally consistent with the theoretical analysis. These results indicate that the designed platform has good maneuverability, motion coordination, and environmental adaptability, and is capable of meeting the application requirements of mobile chassis systems in the complex operating scenarios of elevated strawberry greenhouses.

**Key words:** Elevated strawberry greenhouse; Four-wheel independent drive and four-wheel independent steering; Unilateral independent vertical suspension; ROS control; Slip risk assessment

# 目录

摘要 .....	II
Abstract .....	III
主要符号表 .....	VII
第1章 绪论 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 温室移动平台研究现状 .....	2
1.2.2 转向机构研究现状 .....	4
1.2.3 低附着地面移动平台滑移表征与风险评估研究现状 .....	6
1.3 研究内容、方法及技术路线 .....	7
1.3.1 研究内容 .....	8
1.3.2 研究方法 .....	8
1.3.3 技术路线 .....	10
1.4 本章小结 .....	10
第2章 移动机器人平台总体方案设计 .....	12
2.1 温室高架草莓作业环境分析 .....	12
2.1.1 温室高架草莓种植农艺调研 .....	12
2.1.2 功能与性能要求 .....	13
2.2 机器人移动平台硬件架构设计 .....	14
2.2.1 整体架构设计 .....	14
2.2.2 主要硬件设备选型 .....	15
2.3 移动平台软件架构设计 .....	20
2.3.1 ROS系统简介 .....	20
2.3.2 基于ROS移动平台控制系统设计 .....	21
2.4 移动平台机电系统总体方案设计 .....	25
2.5 本章小结 .....	27
第3章 移动机器人平台关键零部件设计与仿真分析 .....	28
3.1 关键零部件设计 .....	28
3.1.1 车架设计 .....	28

3.1.2 行驶转向机构设计 .....	31
3.2 机器人动力学模型构建 .....	34
3.2.1 运动学建模 .....	34
3.2.2 整车动力学模型构建 .....	37
3.3 仿真环境搭建与结果分析 .....	39
3.3.1 仿真环境搭建 .....	39
3.3.2 仿真结果与分析 .....	40
3.4 本章小结 .....	41
第4章 温室高架草莓移动机器人平台试验研究 .....	42
4.1 样机试制 .....	42
4.2 试验方案设计 .....	43
4.2.1 试验目的 .....	43
4.2.2 试验材料与设备 .....	43
4.2.3 试验评价指标与影响因素 .....	44
4.3 移动平台性能测试 .....	45
4.3.1 静态模式切换测试 .....	45
4.3.2 动态性能测试 .....	46
4.4 基于双阿克曼模式的滑移风险判别方法研究与试验验证 .....	48
4.4.1 滑移风险指标建立 .....	49
4.4.2 滑移风险规律试验 .....	50
4.4.3 不同路况下的滑移风险热力图分析 .....	53
4.4.4 不同因素下 $\eta$ 分布特征分析 .....	55
4.4.5 滑移风险阈值边界分析 .....	57
4.4.6 阈值地图建立与安全行驶策略分析 .....	58
4.5 本章小结 .....	60
第5章 结论与展望 .....	62
5.1 研究结论 .....	62
5.2 研究展望 .....	62
参考文献 .....	64
致谢 .....	70
作者简介 .....	71

## 主要符号表

缩写	英文全称	中文全称
4WID-4WIS	Four-Wheel Independent Drive – Four-Wheel Independent Steering	四轮独立驱动—四轮独立转向
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	联合国粮食及农业组织
ROS	Robot Operating System	机器人操作系统
AGV	Automated Guided Vehicle	自动导引车
IMU	Inertial Measurement Unit	惯性测量单元
CAN	Controller Area Network	控制器局域网
GPIO	General-Purpose Input/Output	通用输入/输出接口
USB	Universal Serial Bus	通用串行总线
NPN	Negative–Positive–Negative	集电极开路下拉型
PNP	Positive–Negative–Positive	集电极开路上拉型
ICR	Instantaneous Center of Rotation	瞬时转动中心

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

草莓营养价值较高，其果实富含维生素、有机酸、矿物质及多酚类活性成分，如花青素、鞣花酸等，因而兼具较高的食用品质、商品价值和一定的保健开发潜力<sup>[1-3]</sup>。联合国粮食及农业组织（FAO）数据显示，2023年全球草莓产量已超过1000万吨，中国草莓产量约占全球总产量的40%，居世界首位，表明草莓已成为我国重要的设施园艺作物之一<sup>[3]</sup>。在设施草莓生产方式方面，日本在草莓促成栽培、周年化生产以及台架栽培系统等方面开展研究较早，形成了较成熟的设施化生产技术体系<sup>[4-5]</sup>。高架栽培通过将草莓生产空间抬升至适宜作业高度，可改善采摘作业姿态、提高空间利用效率，并便于肥水精准管理和设施环境调控；近年来，该模式也已在我国设施草莓生产中逐步推广应用<sup>[6]</sup>。当前我国草莓采摘方式仍以人工为主，采摘环节存在劳动强度大、耗时长、成本高等问题，且随着农业劳动力转移和老龄化加剧，传统人工采摘模式的瓶颈日益凸显<sup>[6-7]</sup>。因此，为减轻劳动强度、降低用工依赖并提升设施草莓生产智能化水平，开展草莓采摘机器人研究已成为果蔬采收装备发展的重要方向<sup>[7]</sup>。目前，国内已围绕温室和高架草莓采摘开展了较多探索，在成熟果识别、果梗分割、柔性夹持抓取及整机自主采摘试验等关键环节取得了阶段性进展，为面向高架草莓设施环境的采摘机器人研发奠定了技术基础<sup>[8-9]</sup>。图1-1为草莓收获人工与机械化作业对比图。



(a)人工采摘



(b)机械化采摘

图1-1 草莓收获作业图

Fig.1-1 Strawberry harvesting operation

移动平台是农业机器人的承载与机动单元，其结构设计、运动控制与导航性能直接影响机器人在复杂农业环境中的稳定行走、路径跟踪精度及作业适应性；同时，围绕平台模块化、标准接口和多场景复用能力开展设计，也是推动农业机器人装备通用化与功

能扩展的重要方向<sup>[11,13]</sup>。设施温室内高架栽培草莓作业空间受限，平台在行间、端头与作业区之间往往需要频繁进行换行、转向和姿态调整，对底盘的小转弯半径、横向通过能力以及路径跟踪稳定性提出了更高要求<sup>[8-10]</sup>。4WID-4WIS底盘通过为各轮组分别配置独立驱动单元和独立转向单元，使车轮驱动力调节与转向角控制能够相对解耦，从而提升平台对复杂工况的适应能力和运动灵活性<sup>[14]</sup>。

各轮组转向角由电机独立控制，并可结合轮速分配实现多种运动模式。横移模式下，各轮组保持近似同向转角，平台可沿横向或斜向平移，适用于换行、贴行靠近作物等场景；原地旋转模式下，各轮组按照零半径转向要求协调设定转角与轮速，可在狭小空间内快速完成姿态调整；双阿克曼模式下，前后轮组按协调转向关系工作，有利于减小轮胎侧滑、降低转向阻力并提升曲线行驶稳定性。与传统单一转向方案相比，独立驱动—独立转向与多运动模式相结合，使移动平台能够针对不同作业场景进行机动策略切换：在端头区域利用原地旋转提高姿态整理效率，在直线行间采用阿克曼类转向兼顾稳定性与通过效率，在换行或贴边作业时切换横移模式以减少多余转弯动作和对作物、地面的扰动<sup>[15-16]</sup>。

由此可见，草莓高架栽培已成为设施生产的重要模式，而其空间受限、机动要求高的环境特征，对移动平台的运动性能提出了更高要求。四轮独立驱动独立转向（4WID-4WIS）底盘通过集成横移、原地旋转与双阿克曼等多运动模式，可在不同作业场景下实现高机动与低扰动作业；进一步结合路径跟踪控制策略优化，有望提升复杂温室环境下的作业精度、稳定性与作业效率，具有较好的应用前景。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 温室移动平台研究现状

欧美和日本等国家较早开展农业机器人及其移动平台相关研究。其中，农业车辆自动导引技术的探索可追溯到20世纪20年代；而面向设施农业环境的移动作业平台与采摘机器人研究，则主要在20世纪80—90年代逐步发展起来<sup>[17-18]</sup>。相较而言，我国相关研究起步稍晚，但近年来在设施园艺机器人底盘、导航控制与专用作业平台等方面发展较快，已进入快速推进阶段。

在设施农业果蔬采摘移动平台研究方面，日本长期处于较活跃地位，韩国近年来也在温室移动机器人与多机器人协同作业方面持续推进<sup>[19]</sup>。日本学者<sup>[18,20]</sup>较早围绕番茄、黄瓜、葡萄和草莓等园艺作物开展采摘机器人研究，形成了包含机械臂、末端执行器、视觉传感器和移动装置在内的较完整技术体系。例如，Monta<sup>[20]</sup>等较早提出了番茄采摘机器人方案，系统集成了视觉传感、机械臂、末端执行器与行走装置，是日本早期果蔬

采摘机器人研究的代表性工作之一，如图1-2所示。随后，Hayashi<sup>[21-22]</sup>等围绕高架草莓采摘开展了移动作业平台研究，提出了可搭载采摘机器人，平台能够在温室中沿作业路径行进并进入相邻作业行，为高架草莓设施中的移动采摘作业提供了平台支撑。

在温室受限空间适应性方面，相关研究还发展出轨道式、管道导向式以及可在地面与导轨与供热管之间切换运行的平台形式。已有研究指出，一类多功能温室机器人既可在地面轮式行走，也可沿温室供热管道运行，从而提升了平台在设施内部狭窄环境中的通过性与作业适应性<sup>[23]</sup>，如图1-3所示。此外，Yaguchi<sup>[24]</sup>等研制的自走式番茄采摘机器人采用电动轮式底盘，并结合旋转摘取机构开展实地采摘验证，体现了紧凑型轮式平台在设施番茄采摘中的应用潜力。韩国相关研究则更多关注温室环境下的无人移动平台设计与多机器人协同作业。Baek 等提出了基于 ROS 的农业无人移动机器人平台设计方法，用于温室场景中的平台运行与控制，如图1-4所示；Choi<sup>[25-26]</sup>等则从作业效率角度分析了智能温室中异构机器人协同采收与运输的应用潜力。



图1-2 日本番茄采摘平台  
Fig.1-2 Eggplants harvesting platform, Japan



图1-3 日本温室多功能平台  
Fig.1-3 Greenhouse multifunctional platform, Japan



图1-4 韩国温室多功能平台  
Fig.1-4 Greenhouse multifunctional platform, Korea

欧美国家在农业机器人移动平台方面的研究较为活跃，尤其在轮式自主作业平台、温室多功能移动平台以及田间轻型智能平台等方面形成了较多代表性成果<sup>[27-30]</sup>。西班牙阿尔梅里亚大学的 Sánchez-Hermosilla 围绕温室作业需求设计了自主多功能移动平台，可用于喷雾等设施作业任务。该类平台面向温室狭窄通道环境开展了导航、底盘与作业系统集成设计，具有较好的设施环境适应性，如图1-5所示。美国伊利诺伊大学 Kayacan<sup>[28]</sup> 2018 年开发了轻型轮式田间机器人 TerraSentia，如图1-6所示。该平台结构紧凑，可在玉米等行作物冠层下沿行间自主通行，主要面向高通量表型获取、行间导航与作物信息感知等任务，体现了小型轮式智能平台在精准农业中的应用潜力。荷兰瓦赫宁根大学 Arad<sup>[29]</sup>于2020年开发了甜椒采收机器人 SWEEPER。该系统集成机械臂、视觉感知与移动推车，移动底盘可在温室混凝土地面和供热管道环境中运行，并通过升降机构将作业单元提升至采摘区域，从而满足温室甜椒立体作业需求。此外，丹麦 AgroIntelli 公司<sup>[30-31]</sup>研发的农业机器人 ROBOTTI 属于自主式农机具运载平台，如图1-7所示，可挂接常规农具完成播种、除草、喷施等多种田间作业，体现了欧美商业化农业机器人平台在模块化、柔性化和连续作业能力方面的发展趋势。不过该平台主要面向露地行作农

业场景，整机尺寸较大，与温室狭窄环境下的小型高机动平台在应用定位上有所不同。



图1-5 多功能移动平台  
Fig.1-5 Multifunctional mobile platform



图1-6 美国移动机器人平台  
Fig.1-6 TerraSentia, robotic mobile platform



图1-7 丹麦农业机器人  
Fig.1-7 Agricultural robots Denmark

中国在设施温室中移动机器人平台研究领域起步较晚<sup>[32-33]</sup>，但也取得了较多的研究成果。从2007年开始，江苏大学<sup>[33,35]</sup>围绕移动式番茄采摘平台技术开展持续性的研究。中国农业大学研制成功温室黄瓜采摘移动平台，行走机构采用电驱动履带。国家农业智能装备工程技术研究中心<sup>[34]</sup>搭建开发自动采摘机器人，采用轮式结构进行移动，如图1-8所示。

此外，国内也开展了面向草莓采摘的移动平台与机械臂集成研究，采用移动平台搭载机械臂、CCD相机等作业单元的技术路线已见报道，为设施草莓采摘机器人的平台化研究提供了基础<sup>[10-11,32]</sup>。华南农业大学张铁民<sup>[36]</sup>于2014年研制农业运输轮式移动小车，采用四轮毂电机作为行走和动力，如图1-9所示。青岛理工大学林海波设计了一种轮式移动小麦精播平台，四个转轴可独立旋转，如图1-10所示。山东农业大学李天华<sup>[37]</sup>于2024年设计一款连栋温室喷雾机器人，通用移动底盘由两台直流电机提供动力，另有4个万向轮辅助支撑地面行走<sup>[38-39]</sup>。



图1-8 高架草莓采摘机器人  
Fig.1-8 Elevated strawberry automatic picking robot



图1-9 农业运输轮式移动小车  
Fig.1-9 Transport wheeled mobile trolleys



图1-10 轮式小麦精播机器人  
Fig.1-10 wheat precision seeding robot

## 1.2.2 转向机构研究现状

移动平台主要的转向类型有：机械传动转向、电动助力转向、液压助力转向、电控液压组合助力转向以及线控转向<sup>[40-43]</sup>。移动平台轮系结构方面，国内外研究集中在履带式和轮式两种方式；其中履带式绝大多数为双带，也有关于多履带轮系布置的研究<sup>[44-45]</sup>；轮式平台大多为四轮或者六轮，轮胎大多采用普通橡胶轮胎或者麦克纳姆轮和原地旋转轮<sup>[45]</sup>。转弯方式上，带式多为两侧差速转向，轮式则存在铰接式转向、差速转向和车轮

转向等多种形式。国外较早开展了农业底盘原地转向机构的研究<sup>[46-47]</sup>。



图1-11 澳大利亚农业管理机械  
Fig.1-11 Agricultural Management Machinery, Australia



图1-12 德国除草机器人平台  
Fig.1-12 Weeding robot platform, German

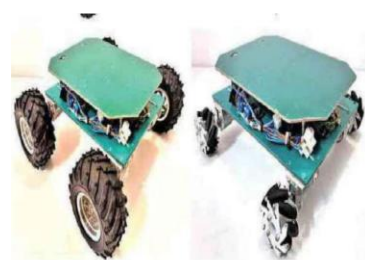


图1-13 轮胎可重构机器人  
Fig.1-13 Tire reconfigurable robot, Romania

20世纪以来,美国等国家较早开展了四轮驱动、四轮转向及多模式转向农业车辆研究,并在喷雾机、果园搬运机器人及田间自主平台等装备上不断发展完善<sup>[48]</sup>。华盛顿州立大学设计了一种果箱管理机器人,具有四轮独立转向功能,且具有四种转向策略:阿克曼转向、主动前后转向、横行转向和旋转转向<sup>[49]</sup>。近年来,商用自走式喷雾机也逐步采用全轮转向或多模式转向设计,以减小转弯半径并提升地头机动性。澳大利亚昆士兰科技大学设计了一种新型的农业作物和杂草管理机械,其采用两个驱动轮和两个转向轮架构底盘;转向轮可绕轴心任意角度旋转进行转向,如图1-11所示。德国 Bosch 公司和 Amazone 公司<sup>[50-51]</sup>共同开发除草机器人平台 BoniRob,采用轮-腿式结构,四个驱动轮可绕轴旋转进行不同转向状态的变换如图1-12所示。罗马尼亚锡比乌大学<sup>[52-53]</sup>设计了一种轮胎可重构的四轮驱动自主移动机器人,驱动轮可以在常规轮胎和麦克纳母轮之间切换,如图1-13所示。

我国对底盘原地转向结构也开展了相应的研究。南京航空航天大学的张杰和何小明<sup>[54]</sup>设计一种能够原地转向的电动汽车,使用四个转向步进电机带动四个蜗轮蜗杆减速器进而使四个车轮偏转指定角度,由此可实现整车原地转向。南京农业大学王友权<sup>[55-57]</sup>等设计了一款具有全方位转向功能的农用机器人,可实现四轮阿克曼转向、差速转向和后轮差速运动前轮转向,如图1-14所示。宋树杰及高华对此底盘进行了进一步研究,提出基于阿克曼转向原理的前轮转向结构和控制策略以及斜行、横行及原地转向运动姿势控制。西北农林科技大学的郭康权<sup>[58]</sup>团队对柔性底盘的转向运动模型进行了研究,设计了一种可独立偏转任意车轮轴的柔性底盘,如图1-15所示。安徽农业大学刘路<sup>[59]</sup>等设计一款小型烟草植保机,能够满足指定转向要求。江苏大学的沈跃<sup>[60]</sup>等设计了一种四轮电驱动电动底盘,通过控制四个轮胎电机来调节转向桥与车架的夹角,实现平台转向。如图1-16所示。重庆市农科院潘良<sup>[61]</sup>等研制了小型遥控通用轮式电动底盘,左右两侧车轮由链条连接各组成一组,利用差速转向方式进行转向。



图1-14 全方位转动农业机器人  
Fig.1-14 Rotate agricultural robots in all directions



图1-15 柔性底盘  
Fig.1-15 Flexible chassis

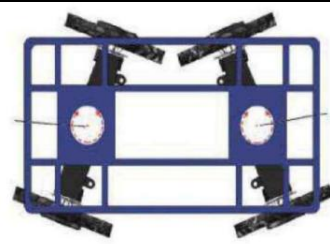


图1-16 自转向电动底盘  
Fig.1-16 Self-steering electric chassis

由此可见，目前研究的原地转向轮式平台存在转向控制复杂，原地轮胎滑移转向破坏地面土壤物理结构形成转向凹坑，影响移动平台的行进导航精度和作业精度；麦克纳姆轮或原地旋转轮结构复杂且存在较小运动部件，异物容易进入内部卡滞而无法正常运行，不适用于普通日光温室等问题。

### 1.2.3 低附着地面移动平台滑移表征与风险评估研究现状

轮式移动平台在低附着地面行驶与转向过程中，轮地接触界面的纵向牵引与横向导向需求会同时增加。当路面附着能力不足、表面湿滑或局部条件不均匀时，平台容易出现驱动滑转、侧向偏移和横摆响应异常等现象，进而导致轨迹跟踪误差增大、停靠精度下降以及运动稳定性减弱。对于温室作业机器人而言，这一问题更加突出。温室内部常存在覆膜、湿润地表和局部附着系数变化等工况，轮式平台在转弯、调头和对位过程中更容易产生轮滑。已有研究表明，温室移动机器人在作业环境中通常需要融合里程计、IMU、激光雷达等多源信息以提高定位鲁棒性，这从侧面说明了轮滑及其引起的里程计误差已成为影响温室机器人稳定运行的重要因素。从现有文献来看，国内外关于移动平台滑移相关问题的研究主要集中在以下三个方面。

第一类研究<sup>[62-63]</sup>聚焦于温室与农业移动机器人定位导航精度提升。这类研究通常将编码器、IMU、激光雷达、UWB或视觉信息进行融合，以削弱轮滑对里程计累计误差的影响。Jiang<sup>[62]</sup>等针对温室移动机器人构建了基于激光雷达SLAM的自主导航系统，在定位过程中融合了里程计与IMU信息，实现了温室环境下的建图与导航。Cheng<sup>[63]</sup>等进一步提出了基于多传感器融合的温室移动机器人定位导航系统，以提升复杂温室条件下的位置估计精度与鲁棒性。在温室场景下，轮式平台确实面临因轮滑、地面不平整或局部附着变化导致的姿态与位置误差问题。此类工作为温室机器人导航提供了重要基础，但研究重点主要在于定位修正和导航鲁棒性提升，对滑移程度本身的量化表征、风险边界划分及安全运行区间描述涉及较少。

第二类研究<sup>[64-67]</sup>聚焦于轮式移动机器人滑移检测与状态估计。Nourizadeh<sup>[64]</sup>等提出了仅利用IMU和轮速编码器的原位滑移估计方法，强调在缺少先验地表信息条件下，依