

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.14.017

温室移栽机电驱移动平台控制系统设计与试验

金鑫^{1,2} 李少凡¹ 李明勇^{1,2} 解晓琳^{1,2} 赵国庆¹ 陈凯康^{3,4}

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003; 2. 龙门实验室农机装备产业研究院, 洛阳 471000;

3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 4. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对全自动移栽机在日光温室作业面临的环境复杂、自主行走能力不足及轨迹跟踪精度较低等问题, 本文提出一种轮边电机驱动的履带式电驱移动平台架构, 构建了多自由度运动学模型, 提出了一种结合模糊控制的变时域 MPC 策略, 并设计了相应的 TC-MPC 控制器, 在 Matlab/Simulink 仿真环境中完成 U 形轨迹仿真试验并进行了温室试验验证。U 形轨迹仿真试验结果表明, 电驱移动平台以 3 种不同速度 0.6、0.8、1 m/s 进行轨迹跟踪时, TC-MPC 控制器横向最大绝对误差分别为 2.55、3.12、3.71 cm, MPC 控制器横向最大绝对误差分别为 2.80、3.73、4.51 cm; 温室场景中 U 形轨迹试验结果表明, TC-MPC 控制器在速度 0.6、0.8、1 m/s 下横向平均绝对误差分别为 0.82、1.12、1.28 cm, 相较于 MPC 控制器降低 21.15%、17.04% 和 15.23%, 轨迹跟踪效果明显提升, 研究结果可为温室移栽机电驱移动平台轨迹跟踪控制提供参考。

关键词: 温室移栽机; 控制系统; 轨迹跟踪; 模型预测控制

中图分类号: S223 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0185-10 **OSID:** 

Design and Experiment of Control System for Electric-driven Mobile Platform of Greenhouse Transplanter

Jin Xin^{1,2} Li Shaofan¹ Li Mingyong^{1,2} Xie Xiaolin^{1,2} Zhao Guoqing¹ Chen Kaikang^{3,4}

(1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. Agricultural Equipment Industry Research Institute, Longmen Laboratory, Luoyang 471000, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

4. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex environment, insufficient autonomous walking ability and low trajectory tracking accuracy faced by fully automatic transplanter in facility greenhouse operation, a tracked electric-driven mobile platform architecture driven by wheel-side motors was proposed, a multi-degree-of-freedom kinematics model was constructed, a variable time-domain MPC strategy combining with fuzzy control was put forward, and the corresponding TC-MPC controller was designed, the U-shaped trajectory simulation test was completed in Matlab/Simulink simulation environment and verified by greenhouse test. The results of the U-shaped trajectory simulation test showed that when the electric drive mobile platform was tracking the trajectory at three different speeds of 0.6 m/s, 0.8 m/s and 1 m/s, the transverse maximum absolute errors of the TC-MPC controller were 2.55 cm, 3.12 cm and 3.71 cm, respectively, and the transverse maximum absolute errors under the MPC controller were 2.80 cm, 3.73 cm and 4.51 cm, respectively. The U-shaped trajectory test in the greenhouse scene showed that the lateral mean absolute errors of the TC-MPC controller at speeds of 0.6 m/s, 0.8 m/s and 1 m/s were 0.82 cm, 1.12 cm and 1.28 cm, respectively, which were reduced by 21.15%, 17.04% and 15.23% compared with that of the MPC controller. The trajectory tracking effect was significantly improved. The research result can provide a reference for the trajectory tracking control research of greenhouse transplanting electric-driven mobile platform.

Key words: greenhouse transplanter; control system; trajectory tracking; model predictive control

收稿日期: 2025-04-25 修回日期: 2025-05-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000603)、河南省高校科技创新团队项目(23IRTSTHN015)和河南省科技攻关项目(242102110346)

作者简介: 金鑫(1986—),男,教授,博士,主要从事种苗高速栽插装备与农机状态检测技术研究,E-mail: jx.771@163.com

通信作者: 李明勇(1993—),男,讲师,博士,主要从事蔬菜机械化生产和设施智能化种植等研究,E-mail: mingyonglee@163.com

0 引言

日光温室凭借显著的保温节能特性,已成为我国蔬菜周年化生产的重要设施^[1-2]。在蔬菜生产体系中,育苗移栽作为关键环节,其机械化与智能化技术研发已成为现代设施农业研究的核心方向^[3-5]。电驱移动平台作为温室移栽装备的关键组成部分^[6],当前存在轨迹跟踪精度低、自主导航能力欠缺以及人工操作误差大等技术瓶颈^[7-10],制约了作业效率与质量的同步提升,因此开展基于智能控制算法的电驱移动平台轨迹跟踪研究具有重要的理论价值与实践意义。

轨迹跟踪控制技术是实现温室移栽电驱移动平台智能化的关键技术之一^[11-14],较高的轨迹跟踪精度能保证温室移栽电驱移动平台行驶稳定性及移栽作业质量。然而,温室具有复杂的半结构化环境,相较于大田空间尺度宽阔的环境,温室作业空间封闭狭窄^[15],电驱移动平台需体积小、灵活及作业机具高度集成化^[16-17]。此外,温室中信号较弱,仅依赖于卫星导航无法满足电驱移动平台的轨迹跟踪控制精度需求。

国内外已开展温室电驱移动平台的相关研究。针对温室作业空间受限、环境复杂的特点,Chen等^[18]提出了一种分布式移动平台方案,采用轮毂电机作为驱动执行部件,提高了电驱移动平台作业的灵活性与稳定性;崔志超等^[19]提出一种履带式电驱移动平台,通过理论计算和仿真分析等研究了电驱移动平台关键部件及参数,并开发了一套具备遥控和本地控制的双操作模式控制系统。针对电驱移动平台轨迹跟踪控制精度不足的问题,Yan等^[20]提出一种基于改进纯追踪算法的鲁棒轨迹跟踪方法,通过在线粒子群优化对模型预测控制(MPC)增益进行动态调整,保证了MPC控制在复杂环境中的有效性及合理性;Hu等^[21]基于双履带式电驱移动平台提出基于纯追踪的轨迹跟踪控制方法,通过圆弧相似理论进行轨迹曲率确定与分割,并基于最优算法实现了不同曲率段的轨迹跟踪。针对温室大棚中机器人导航研究,Liu等^[22]设计了一种基于激光SLAM的温室机器人自主导航系统,利用雷达进行环境监测,使用粒子滤波绘制环境地图,结合自适应蒙特卡罗定位(AMCL)算法进行定位,试验结果表明系统能够满足作业精度要求。肖茂华等^[23]提出一种基于蜣螂(DBO)优化BP神经网络PID控制算法,采用DBO优化BP神经网络权值,提高BP神经网络的自学习速率,实现对温室自主电动平台行走速度的精准控制,并与多种控制算法对比,试验结果

表明所设计控制算法控制稳定性和精度表现更优,满足速度控制需求。但上述研究并未综合考虑温室特殊环境下电驱移动平台的轨迹跟踪问题,且在导航研究中激光SLAM等技术成本较高,并不直接应用于电驱移动平台控制,因此,不能直接用于温室移栽电驱移动平台的轨迹跟踪控制。

基于以上研究,本文提出一种履带式温室移栽机电驱移动平台,并对控制系统进行设计;结合温室作业精度需求和电驱移动平台运动特点,设计TC-MPC控制器,并通过仿真和实地试验验证控制器的有效性与实用性。

1 温室移栽机电驱移动平台

温室移栽机电驱移动平台采用四轮独立驱动转向,伺服电机作为驱动执行部件,锂电池作为动力源,保证温室移栽机电驱移动平台正常行走、转向及移栽装置正常移栽作业。温室移栽控制系统包括电池管理系统(BMS)、行走作业系统、定位与姿态获取系统和人机交互系统,架构如图1所示。

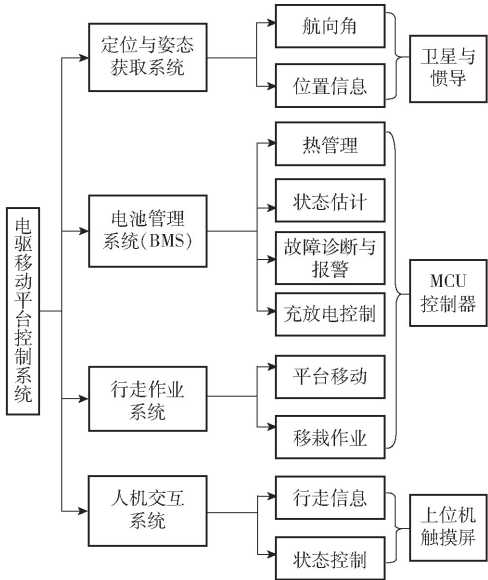


Fig. 1 Electric drive control system frame for greenhouse transplanter

1.1 电驱移动平台结构与工作原理

图2为温室移栽机整体结构,包括电驱移动平台、电源、MCU控制器、电机驱动器等。温室移栽机长×宽×高为1 500 mm×1 300 mm×1 450 mm;单条履带接地长度为150 mm,履带宽度为150 mm;设定行驶速度为0~1 m/s。为适应温室复杂作业环境,电驱移动平台采用轮边驱动形式,减少复杂的机械器件间传动,提高传动效率和空间利用率。针对温室场景中传统电驱移动平台通过性不足、灵活性差的问题,电驱移动平台采用分布式履带

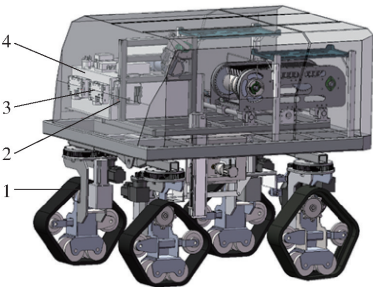


图 2 温室移栽机结构

Fig. 2 Greenhouse transplanter structure

1. 电驱移动平台 2. MCU 控制器 3. 电机驱动器 4. 电源

形式,既具备履带轮接地比压小、稳定性高^[24-25]的优点,又兼顾四轮驱动移动平台的灵活性、环境适应性^[26-27]。

履带轮作为温室移栽电驱移动平台的行走装置,包括履带、主动轮、张紧轮、承重轮、主动齿轮等,如图 3 所示。直线行走过程中,轮边驱动电机直接带动主动轮旋转,主动轮通过与履带间的啮合实现电驱移动平台的正常行驶;转向过程中,转向电机驱动主动齿轮旋转,主动齿轮带动从动齿轮旋转,由于从动齿轮与履带轮固定在一起,从而带动履带轮旋转,完成转向。

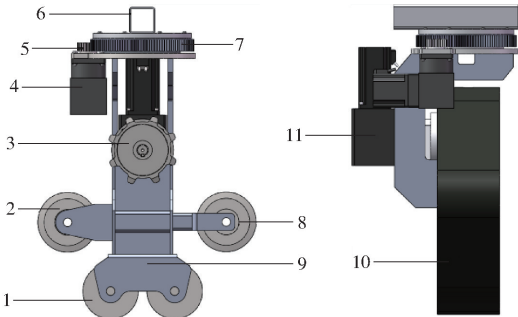


图 3 电驱移动平台行走装置结构

Fig. 3 Structure of electric-driven mobile platform walking device

1. 承重轮 2. 导向轮 3. 主动轮 4. 转向电机 5. 主动齿轮
6. 套管 7. 从动齿轮 8. 张紧轮 9. 支架 10. 橡胶履带
11. 轮边驱动电机

1.2 电驱移动平台控制系统硬件设计

电驱移动平台控制系统作业流程为:①打开电源,确保动力电池正常运行。②GNSS 和 INS 实时获取电驱移动平台位置与速度信息,同时结合预设轨迹得到对应时刻的横向偏差和航向偏差。③MCU 控制器对实时信息进行接收、处理,并通过 CAN 总线进行直线或转向指令发送,电机控制器收到指令后进行转向电机或轮边驱动电机控制。④电驱移动平台完成轨迹跟踪。控制系统结构与功能如图 4 所示。

根据上述控制原理进行控制电驱移动平台系统

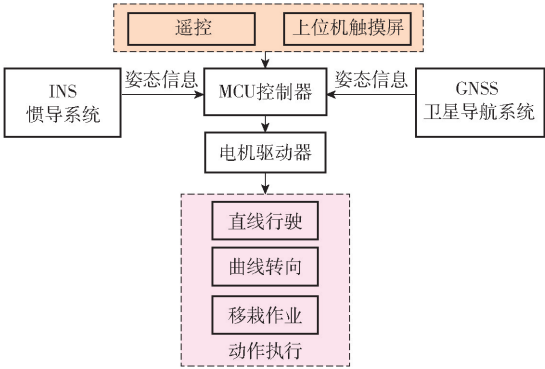


图 4 控制系统结构与功能

Fig. 4 Structure and function of control system

设计,由 GNSS 接收器、遥控器、R12DS 接收机、MCU 控制器、电机驱动器、上位机显示屏等组成,如图 5 所示。为清晰表示各个组件,图中并未加装外壳。其中 GNSS 上方无金属遮挡,实时接收并解码北斗卫星导航系统定位信号;MCU 控制器是控制系统的核心,主要用于电驱移动平台姿态信息处理及指令传达,保证轨迹跟踪控制精度;上位机触摸屏是人机交互系统的关键,具有实时轨迹显示、预定轨迹设置、实时信息展示等功能;遥控是电驱移动平台的另一种控制方式,人工通过遥控器进行电驱移动平台远程控制,实现在未指定轨迹下正常行驶;电机驱动器用于实现电力转换,从而精准控制各个伺服电机运行状态,保障电驱移动平台正常作业。

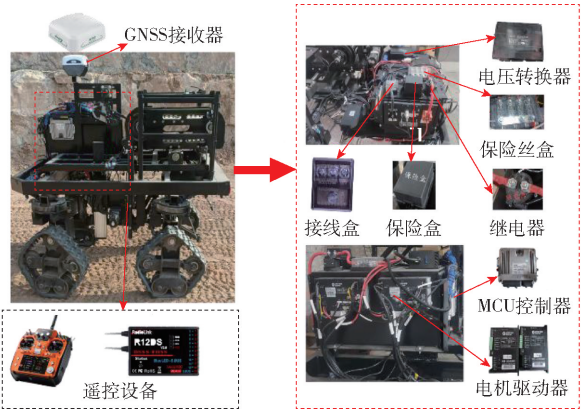


图 5 控制系统硬件组成

Fig. 5 Hardware composition of control system

2 轨迹跟踪控制算法设计

在温室移栽作业中,电驱移动平台按照预设轨迹以恒定速度行驶,同时,移栽设备执行送苗、取苗和栽苗动作,并与电驱移动平台协同满足种植农艺需求。电驱移动平台控制系统主要完成轨迹跟踪和作业装置控制。本节主要对轨迹跟踪部分的控制方法进行分析,图 6 为轨迹跟踪示意图。

2.1 运动学模型

温室移栽电驱移动平台在正常作业行走过程,

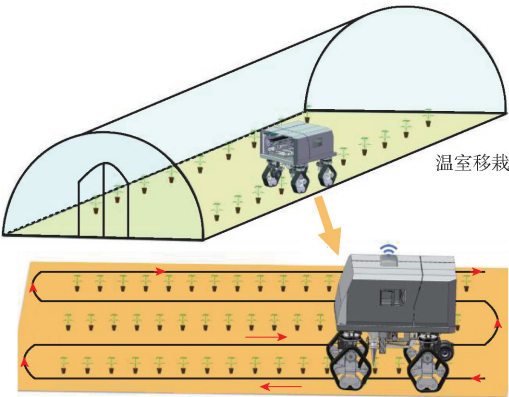


图 6 轨迹跟踪示意图

Fig. 6 Trajectory tracking diagram

行驶速度稳定且较为缓慢,可以忽略在直线行驶和曲线转向中履带轮侧滑对轨迹跟踪的干扰。综合考虑模型复杂度与精度及作业中实时性控制需求,对电驱移动平台进行简化运动学建模,如图 7 所示。

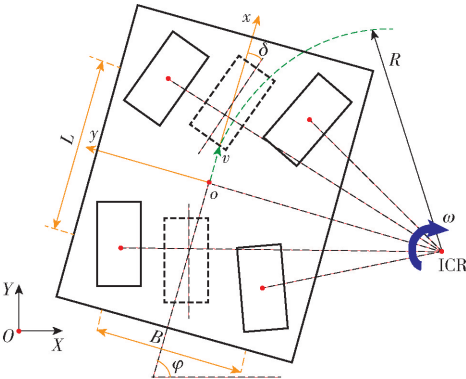


图 7 电驱移动平台运动学模型简图

Fig. 7 Schematic of electric-driven mobile platform kinematic model

XOY 为绝对坐标系, xoy 为以电驱移动平台质心为坐标原点的相对坐标系, L 为前后轮轴距, B 为左右轮轮距。ICR 为瞬时转向中心, R 为瞬时转向半径, x 为前进方向, v 为前进速度, φ 为航向角, δ 为前轮中心虚拟转向角, 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 \\ \sin\varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $X、Y$ ——横向和纵向坐标
由图 7 可得

$$\omega = \frac{2 \tan \delta}{L} v \tag{2}$$

从而建立底盘运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \\ \frac{2 \tan \delta}{L} \end{bmatrix} v \tag{3}$$

底盘运动学模型为非线性模型, 可将模型简

化为

$$\begin{cases} \dot{\Omega} = f(\Omega, u) \\ u = [v \quad \delta]^T \\ \Omega = [X \quad Y \quad \varphi]^T \end{cases} \tag{4}$$

式中 u ——控制量 Ω ——状态量

2.2 控制算法设计

温室移栽机电驱移动平台轨迹跟踪控制目标是降低实际轨迹与预设轨迹间的横向误差与航向角误差, 保证电驱移动平台的作业精度, 满足温室蔬菜移栽农艺要求。

电驱移动平台控制系统是非线性横纵向耦合控制系统, 常见控制方法控制精度不足, 而模型预测控制 (MPC) 具有预测性能、约束处理、反馈校正等多种优势, 能够很好地处理复杂系统控制问题, 特别是在底盘复杂控制系统中具有广泛应用^[28-30]。但在实际控制中, MPC 预测时域为固定数值, 面对不同转向曲率时, 无法进行自适应调节预测时域长度, 使得 MPC 预测时域与系统变化不匹配, 降低控制精度。

相较于常规底盘结构化作业环境, 温室移栽机电驱移动平台作业工况复杂, 且需与种植农艺要求相匹配, 对控制精度需求更加严格。鉴于此, 提出一种结合模糊控制的模型预测控制 (MPC) 策略, 针对所设计电驱移动平台运动特点展开 TC-MPC 控制器设计。

2.2.1 模型预测控制

模型预测控制 (MPC) 是一种较为先进的反馈控制策略, 基本原理是基于被控对象数字模型, 根据当前状态量、控制量和约束条件进行系统未来输出量和状态量预测, 并通过不断滚动求解下一时刻控制变量的解。模型预测控制分为预测模型、滚动优化、反馈控制 3 部分, 在轨迹跟踪控制中, 根据误差变化反馈进行实时滚动优化控制, 实现较好的控制效果^[31-33]。图 8 为模型预测控制原理图。

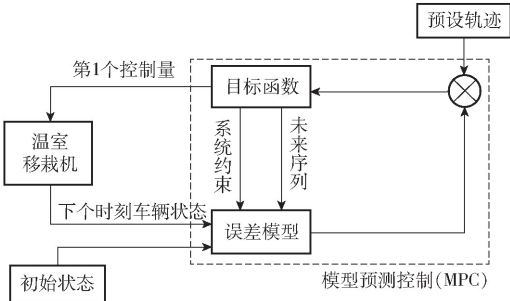


图 8 模型预测控制原理图

Fig. 8 MPC schematic

根据模型预测控制原理, 结合文中所提电驱移动平台运动学模型, 设计了 TC-MPC 控制器; 以前

轮中心虚拟转向角 δ 和行驶速度 v 作为控制输入,根据 GNSS/INS 实时获取底盘位姿信息并将实际状态信息反馈至 MCU 控制器, MPC 控制根据预设轨迹与实际位置间的误差信息结合运动学模型实时滚动优化并预测下一时刻控制量,将第 1 个最优控制量输出到电驱移动平台中对其运动状态进行控制,在电驱移动平台轨迹跟踪顺利进行的基础上,满足轨迹跟踪精度需求。

2.2.2 TC-MPC 控制器设计

在预设轨迹中,每个点都满足非线性运动学状态方程

$$\dot{\Omega}_r = f(\Omega_r, u_r) \quad (5)$$

式中 u_r ——预设控制量

Ω_r ——预设状态量

非线性模型的控制难以满足电驱移动平台实时性要求,需对运动学模型进行线性化处理以满足温室移栽作业中的快速实时性要求。采用离散化运动学模型方式达到线性化目的,故在参考点对式(5)进行泰勒级数展开,并忽略高阶项,得

$$\dot{\Omega} = f(\Omega_r, u_r) + \frac{\partial f(\Omega, u)}{\partial \Omega} \bigg|_{\Omega=\Omega_r} + \frac{\partial f(\Omega, u)}{\partial u} \bigg|_{u=u_r} (\Omega - \Omega_r + u - u_r) \quad (6)$$

将式(6)、(5)相减可得

$$\tilde{\Omega} = \dot{\Omega} - \dot{\Omega}_r = C_1(\Omega - \Omega_r) + C_2(u - u_r) \quad (7)$$

其中

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_r \sin \varphi_r \\ 0 & 0 & v_r \cos \varphi_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_r & 0 \\ \sin \varphi_r & 0 \\ \frac{2 \tan \delta}{L} & \frac{2 v_r}{L \cos \delta_r^2} \end{bmatrix}$$

式中 C_1 ——状态量偏差 C_2 ——控制量偏差

v_r ——预设速度 φ_r ——预设横摆角

对式(7)采用前向欧拉法进行处理,将连续化和离散化模型结合,从而得到线性化误差模型

$$\tilde{\Omega}(k+1) = A_k \tilde{\Omega}(k) + B_k \tilde{u}(k) \quad (8)$$

其中

$$A_k = I + TC_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T v_r \sin \varphi_r \\ 0 & 1 & T v_r \cos \varphi_r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_k = TC_2 = \begin{bmatrix} T \cos \varphi_r & 0 \\ T \sin \varphi_r & 0 \\ \frac{2 \tan \delta}{L} T & \frac{2 v_r}{L \cos \delta_r^2} T \end{bmatrix}$$

式中 T ——采样时间 I ——单位矩阵

线性化误差模型可以通过调节控制输入实现轨迹跟踪的目的。然而直接对控制输入进行优化缺乏对单独采样周期内控制输入增量的有效约束,易出现控制输入突变问题。因此,引入控制输入增量模型,通过对控制输入增量施加合理有效的约束,确保控制输入变化的平顺性,进而对式(8)进行转换得

$$x(k) = [\tilde{\Omega}(k) \quad \tilde{u}(k-1)]^T \quad (9)$$

$$\begin{cases} x(k+1) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}\Delta u(k) \\ \eta(k+1) = \tilde{C}x(k+1) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{其中 } \tilde{A} = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ O_{2 \times 3} & I_2 \end{bmatrix} \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_k \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} I_3 \\ O_{3 \times 2} \end{bmatrix}^T$$

$$\Delta u = u(k) - u(k-1)$$

式中 $\eta(k+1)$ ——各时刻状态量(输出量)

O ——零矩阵

假设预测时域为 N_p , 控制时域为 N_c , 则可推导出得到预测模型表达式为

$$Y(k) = Dx(k) + M\Delta U(k) \quad (11)$$

其中

$$Y(k) = [\eta(k+1) \quad \eta(k+2) \quad \cdots \quad \eta(k+N_p)]^T$$

$$D = [\tilde{C}\tilde{A} \quad \tilde{C}\tilde{A}^2 \quad \cdots \quad \tilde{C}\tilde{A}^{N_p}]^T$$

$$\Delta U = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u(k+N_c)]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{B} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{B} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_c-1}\tilde{B} & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-1}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-2}\tilde{B} & \cdots & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-N_c-1}\tilde{B} \end{bmatrix}$$

2.2.3 目标函数与约束控制

为实现跟踪准确性、横向稳定性及行驶平滑性等多目标优化控制,构造目标函数为

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|Y(k+i|t) - Y_r(k+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U(k+i|t)\|_R^2 + \tau\sigma^2 \quad (12)$$

式中 $J(\cdot)$ ——目标函数

Q, R ——输出量、控制增量权重矩阵

τ ——权重系数 σ ——松弛因子

等号右侧第1项为误差项,表示电驱移动平台的轨迹跟踪能力;第2项为控制增量,表示控制平稳性;第3项为引入项,防止解不存在现象发生,保证控制过程的连续性。

为达到实时性控制目的,对目标函数进行二次规划(QP)形式转换,得

$$\boldsymbol{J}(k)=\frac{1}{2}\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{f}_T\boldsymbol{x}$$

(13)

其中

$$\boldsymbol{x}=[\Delta\boldsymbol{U}\quad\sigma]$$
$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{M}+\boldsymbol{R}&0\\0&\tau\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{f}_T=[2\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{M}\quad0]$$

式中 $\boldsymbol{E}$ ——当前时刻系统状态量

在电驱移动平台控制中,结合温室特殊场景需求对控制输入及控制输入增量进行约束,即

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{u}_{\min}(k+i)\leq\Delta\boldsymbol{u}(k+i)\leq\Delta\boldsymbol{u}_{\max}(k+i)\\ \boldsymbol{u}_{\min}(k+i)\leq\boldsymbol{u}(k+i)\leq\boldsymbol{u}_{\max}(k+i)\end{cases}$$

(14)

在 MPC 控制中,通过目标函数求解得控制时域中系统的最优控制增量序列,因此将式(14)中控制输入约束转换为控制输入增量约束,得

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{U}_{\min}\leq\Delta\boldsymbol{U}\leq\Delta\boldsymbol{U}_{\max}\\ \boldsymbol{U}_{\min}\leq\boldsymbol{U}(k)+\boldsymbol{J}\Delta\boldsymbol{U}(k)\leq\boldsymbol{U}_{\max}\end{cases}$$

(15)

其中

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}1&0&\cdots&0\\1&1&\cdots&0\\\vdots&\vdots&&0\\1&1&\cdots&1\end{bmatrix}\otimes\boldsymbol{I}_2$$

式中 $\otimes$ ——克罗内克积算法符号

在每个控制周期中,采用内点法对 QP 问题求解得此时刻控制时域内最优控制序列,即

$$\Delta\boldsymbol{U}^*(k)=$$
$$[\Delta\boldsymbol{u}^*(k)\quad\Delta\boldsymbol{u}^*(k+1)\quad\cdots\quad\Delta\boldsymbol{u}^*(k+N_c-1)]$$

(16)

将式(16)第 1 项作为控制输入的实际控制增量输出到系统,得

$$\boldsymbol{u}(k)=\boldsymbol{u}(k-1)+\Delta\boldsymbol{u}(k)$$

(17)

在下一时刻,根据系统反馈得到新位姿信息进行下一时刻的控制优化求解,实现对预设轨迹的跟踪控制。

2.2.4 变时域模块设计

在 MPC 算法中,预测时域 N_p 作为控制性能主要影响因素,通过动态调整以提高算法的轨迹跟踪控制精度。

在温室移栽作业中,底盘以恒速进行轨迹跟踪作业,故可将底盘纵向运动状态视为稳态。因此,考虑底盘横向运动控制提出一种结合模糊控制的 MPC 策略。将预设轨迹曲率及其曲率变化率作为模糊输入,预测时域作为模糊输出,实现对固定预测时域的动态调整,提高轨迹跟踪精度。根据专家经验和文献[34–35]制定模糊规则。表 1 中,曲率 ρ 模糊域设置为 $[0,0.22]$;曲率变化率 $\Delta\rho$ 模糊域设

置为 $[-0.32,0.32]$;输入量化等级 NB、NM、H、PM、PB 表示小、中、大、稍大、极大,其中曲率语言变量数值范围为 $\{0,0.055,0.11,0.165,0.22\}$,曲率变化率语言变量数值范围为 $\{-0.32,-0.16,0,0.16,0.32\}$;输出量化等级 NB、NM、NS、H、PS、PM、PB 表示极短、短、稍短、中、稍长、长、极长,语言变量数值范围为 $\{0,0.2,0.325,0.5,0.675,0.8,1\}$ 。

表 1 模糊规则

Tab.1 Fuzzy rule

$\Delta\rho$	ρ				
	NB	NM	H	PM	PB
NB	NB	NM	PS	PM	PM
NM	NM	NS	PS	PM	PB
H	NS	H	PM	PM	PB
PM	H	PS	PB	PB	PB
PB	PS	PM	PB	PB	PB

得到模糊输出量后,为提高模糊推理结果的精确性,选择重心法进行去模糊化处理;此过程可得到模糊控制输入与输出的响应曲面,如图 9 所示。在得到精确的预测时域 N_p 后,通过将预测时域与曲率变化率结合对控制时域 N_c 的适当调节,提高轨迹跟踪精度。控制时域 N_c 表达式为

$$N_c=\text{round}(\Gamma N_p(1+k_1\Delta\rho))$$

(18)

式中 Γ ——预测时域权重因子,取 0~0.5

k_1 ——曲率变化率系数,取 0~1

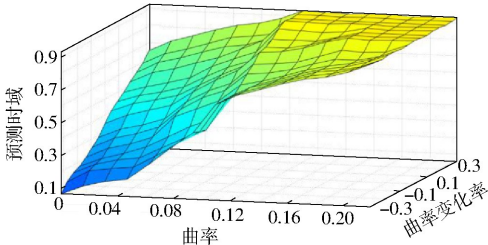


图 9 输入与输出响应曲面

Fig.9 Input and output response surface

3 仿真试验

为验证所提 TC-MPC 控制器实用性,在进行实车试验前,基于 Matlab/Simulink R2023a 搭建轨迹跟踪控制仿真模型,在直线轨迹和曲线轨迹下开展仿真验证。采用 MPC 控制器作为对比,通过同等工况下的控制效果验证 TC-MPC 控制器优越性。仿真试验中,MPC 控制器和 TC-MPC 控制器采样时间 T 为 0.01 s,预测时域 N_p 为 15,控制时域 N_c 为 2。

U 形曲线轨迹跟踪仿真中,设温室移栽电驱移动平台起始姿态为 $[0\text{ m},0\text{ m},0^\circ]$,图 10 为不同速度下曲线轨迹仿真结果。

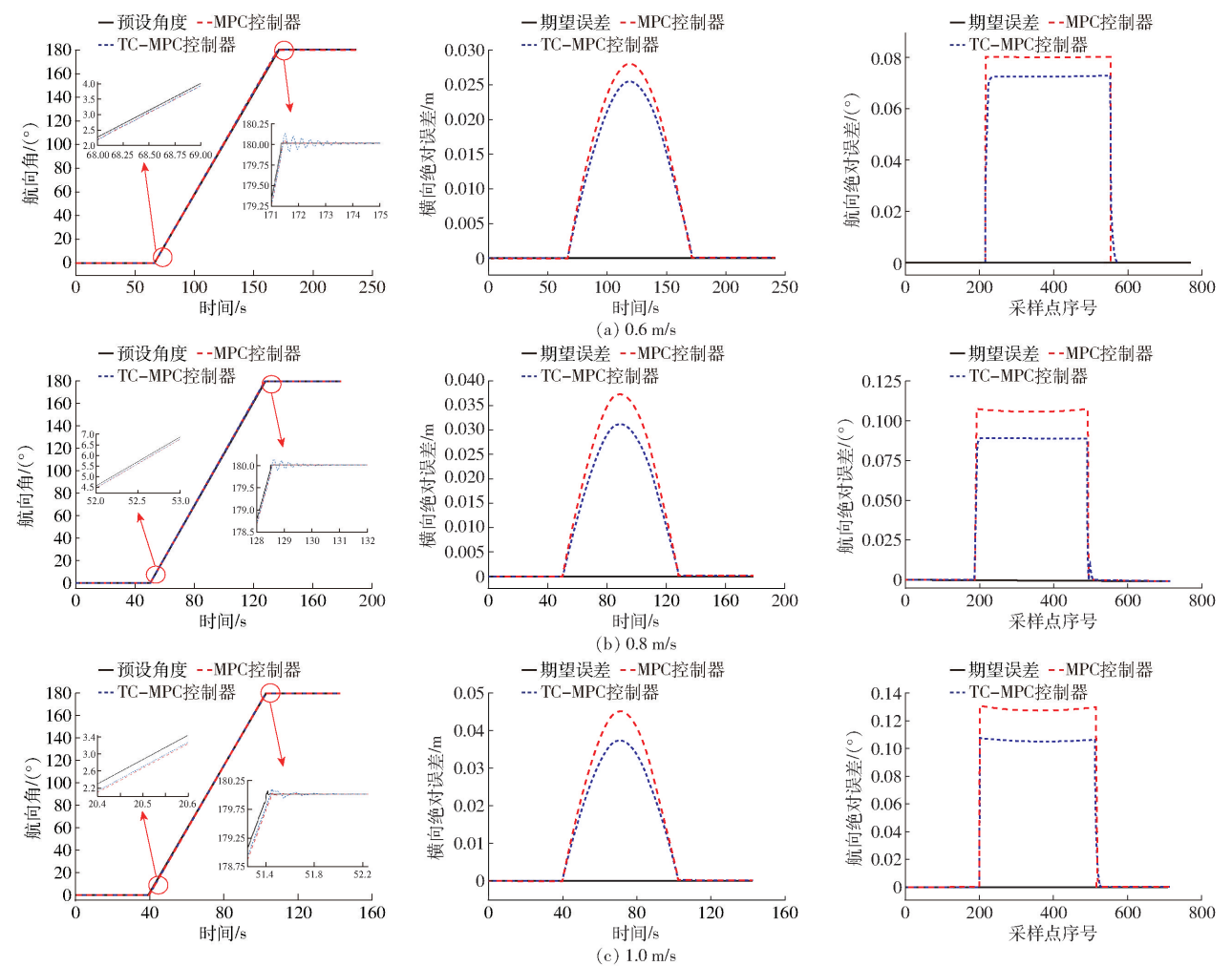


图 10 不同作业速度下曲线轨迹仿真试验结果

Fig. 10 Simulation test results of curves trajectories at different operating speeds

图 10 揭示了 2 种控制器下航向角随时间的变化趋势:在初始直线阶段 2 种控制器控制效果均能达到很好的跟踪精度;首次直线段与曲线段过渡过程,2 种控制器均出现不同程度的航向误差,但所设计控制器控制精度优于 MPC 控制器。曲线段向直线段过渡中,TC - MPC 控制器转向角变化波动比 MPC 控制器大,这是由于加入模糊控制后在轨迹曲率变化处会自动调节预测时域,出现了较小的预测时域范围,从而导致波动较大,且出现了一定的超调。但整个航向角变化图中展示了所设计控制器在轨迹跟踪中的优势。

由图 10 可知,在不同速度下直线阶段的横向绝对误差和航向绝对误差均接近于 0,2 种控制器在该阶段具有良好的控制效果。在曲线阶段,不同速度下 TC - MPC 控制器的 2 种误差比 MPC 控制器小,体现了其良好的控制效果。在曲线段向直线段的过渡阶段,TC - MPC 控制器下航向误差收敛速度较慢,且在速度为 1 m/s 时,出现了抖动现象,这是由于所设计控制器对轨迹的曲率较为敏感,在动态调节预测时域过程出现了过度调节现象。

由图 10 可知,采用 TC - MPC 控制器,在速度为 0.6、0.8、1 m/s 时,横向绝对误差最大值分别为 2.55、3.12、3.71 cm,横向误差标准差分别为 0.72、0.88、1.05 cm;航向绝对误差最大值分别为 0.07°、0.09°、0.11°。采用 MPC 控制器在 3 种不同速度下横向绝对误差最大值为 2.8、3.73、4.51 cm,横向误差标准差为 1.05、1.4、1.7 cm;航向绝对误差最大值为 0.08°、0.11°、0.13°。综合对比分析表明,TC - MPC 控制器轨迹跟踪控制性能整体上优于 MPC 控制器,能够提高温室移栽作业质量。

表 2 为 TC - MPC 控制器在最大速度 1 m/s 时误差,其中平均横向绝对误差为 1.05 cm,相较于 MPC 控制器(1.27 cm)降低 17.32%;平均航向绝对误差为 0.05°,较 MPC 控制器(0.06°)降低 16.67%。横向误差和航向误差数据表明,所设计的 TC - MPC 控制器明显优于 MPC 控制器。

综上所述,在 U 形曲线轨迹跟踪仿真试验中,所设计 TC - MPC 控制器相较于 MPC 控制器在横向误差控制、轨迹平滑度及稳定性等方面具有较为明显的优势。不同速度下仿真试验结果也表明,

表 2 1 m/s 时不同控制器下误差

Tab.2 Error under different controllers at 1 m/s

参数	TC-MPC 控制器		MPC 控制器	
	横向绝对	航向绝对	横向绝对	航向绝对
	误差/cm	误差/(°)	误差/cm	误差/(°)
最大值	3.71	0.11	4.51	0.13
平均值	1.05	0.05	1.27	0.06
标准差	1.39	0.05	1.70	0.06
均方根误差	1.75	0.07	2.12	0.09

TC-MPC 控制器具有多速度适应性和鲁棒性。

4 实地试验

为验证所设计控制系统的试验效果,在河南省洛阳市燕家沟村温室大棚进行温室移栽机电驱移动平台实地试验,如图 11 所示。在轨迹跟踪试验中,U 形路径为常用轨迹形式,因此在温室大棚中同样采用 U 形路径进行轨迹跟踪试验。采用联适 R70GNSS 接收机及其配套装置获取电驱移动平台位姿信息。试验时预先获取温室边界位置。根据温室辣椒苗行距为 0.25~0.3 m 的农艺要求,确定 1 条转向半径为 1.5 m 的 U 形路径,并作为预设轨迹。温室试验方法及步骤如下:①使用遥控装置将温室移栽机电驱移动平台移动至预设轨迹起始点,保证电驱移动平台位姿与预设位姿保持一致。②设置 3 种不同行驶速度 0.6、0.8、1 m/s,分别在温室环境下进行轨迹跟踪试验,保证在每次试验中速度是唯一参数变量。③对试验结果进行整理与统计分析,验证所设计控制器的有效性。



图 11 试验场景

Fig. 11 Test scenario

图 12 为不同速度下 U 形路径轨迹跟踪试验结果。由图 12 可知,当速度为 0.6、0.8、1.0 m/s 时,2 种控制器均能实现轨迹跟踪,且 TC-MPC 控制器轨迹跟踪精度更高。在直线段与曲线段过渡时 TC-MPC 控制器下的曲线更加贴合目标轨迹;MPC 控制器下航向误差始终大于 TC-MPC 控制器,表明 TC-MPC 控制器实用性优于 MPC 控制器,且在轨迹跟

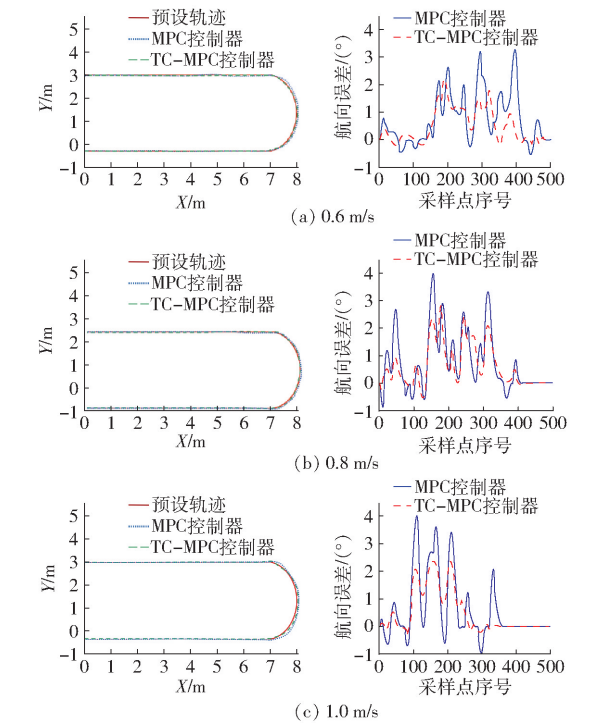


图 12 不同速度和控制器下试验结果

Fig. 12 Test results at different speeds and controllers

踪过程跟踪曲线抖动剧烈程度小,更加平滑。

表 3 为 2 种控制器不同速度下横向误差。由表 3 可知,3 种速度下 TC-MPC 控制器横向平均绝对误差分别为 0.82、1.12、1.28 cm;MPC 控制器横向平均绝对误差分别为 1.04、1.35、1.51 cm,平均绝对误差降低 21.15%、17.04%、15.23%,表明 TC-MPC 控制器具有更加优秀的横向控制性能。此外,3 种速度下横向最大绝对误差分别降低 34.16%、27.6%、14.09%,进一步表明 TC-MPC 控制器良好的控制效果。横向误差标准差作为轨迹跟踪平顺性的量化指标,不同速度下,TC-MPC 控制器标准差降低 22.83%、17.32% 和 16.85%,表明 TC-MPC 控制器轨迹跟踪平顺性优于 MPC 控制器,具有更好的横向控制稳定性。

表 3 不同控制器下横向误差统计

Tab.3 Statistics of lateral errors under different controllers

参数	TC-MPC 控制器			MPC 控制器		
	0.6 m/s	0.8 m/s	1.0 m/s	0.6 m/s	0.8 m/s	1.0 m/s
	cm					
最大绝对误差	2.12	3.41	4.57	3.22	4.71	5.32
平均绝对误差	0.82	1.12	1.28	1.04	1.35	1.51
标准差	0.71	1.05	1.53	0.92	1.27	1.84

5 结论

(1)根据温室复杂作业环境,提出一种适用于温室特殊作业场景的四轮独立驱动履带式温

室移栽机电驱移动平台,分析了驱动结构,并对控制系统硬件设备结构和原理进行了设计与分析,为电驱移动平台自主作业提供硬件基础和物质支撑。

(2)针对温室移栽机电驱移动平台非线性横纵向耦合复杂模型,分析了模型预测控制(MPC)优点,基于运动学模型设计了适用于温室移栽电驱移动平台的TC-MPC控制器,并结合Matlab仿真模型进行了仿真试验。曲线轨迹仿真试验表明,所设计TC-MPC控制器在不同速度下均具有良好的控制效果;当速度为1 m/s时,TC-MPC控制器最大

横向误差为3.71 mm,相较于MPC控制器降低17.74%,平均绝对航向误差降低16.67%。

(3)以行驶速度0.6、0.8、1 m/s进行了温室轨迹跟踪实地试验,随着行驶速度提升,TC-MPC控制器控制精度略有下降。在速度1 m/s下,所设计控制器绝对横向误差标准差为1.53 cm,比MPC控制器降低16.85%,体现了所设计控制器轨迹跟踪控制的稳定性与跟踪曲线的平顺性。试验结果验证了所设计TC-MPC控制器的有效性与实用性,表明其能有效提高温室环境下底盘的轨迹跟踪精度。

参 考 文 献

[1] 赵喆,李兴,王健,等. 新型连栋日光能温室小气候初探[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(5):88-98.
Zhao Zhe, Li Xing, Wang Jian, et al. Preliminary study on microclimate of new multi-span solar energy greenhouse[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2020, 48(5): 88-98. (in Chinese)

[2] 李建明. 我国蔬菜设施结构现状、问题与建议[J]. 中国蔬菜, 2023(11): 1-8.
Li Jianming. Current situation, problems and suggestions for China's protected vegetable structures[J]. China Vegetables, 2024(11): 1-8. (in Chinese)

[3] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 1-20.
Yu GaoHong, Wang Lei, Sun Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1-20. (in Chinese)

[4] 杨先超,马月虹. 设施内蔬菜机械化育苗移栽的现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2022, 44(7): 8-13.
Yang Xianchao, Ma Yuehong. Current situation and development trend of vegetable mechanized seedling transplanting in facilities[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 8-13. (in Chinese)

[5] 田志伟,马伟,杨其长,等. 温室穴盘苗机械研究现状及问题分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 22-38.
Tian Zhiwei, Ma Wei, Yang Qichang, et al. Research status and problem analysis of plug seedling transplanter in greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 22-38. (in Chinese)

[6] 李翔宇,周伟,宋树杰,等. 温室作业用柔性底盘试验样机的设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 41-50.
Li Yining, Zhou Wei, Song Shujie, et al. Design of experimental prototype of flexible chassis used in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 41-50. (in Chinese)

[7] 宁广秀,张永,王健,等. 温室用纯电动牵引底盘结构设计及性能仿真研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(4): 253-259.
Ning Guangxiu, Zhang Yong, Wang Jian, et al. Structure design and performance simulation of battery electric traction chassis for greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(4): 253-259. (in Chinese)

[8] 王楠,刘振华,孙自文. 钵苗移栽机电动底盘及驱动系统设计研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 259-263.
Wang Nan, Liu Zhenhua, Sun Ziwen. Design and study of the electric chassis and drive SystTC on the seedling transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(12): 259-263. (in Chinese)

[9] 施国英,倪志永,张观山,等. Venlo型温室机器人通用底盘设计与稳定性分析[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(3): 160-167,181.
Shi Guoying, Ni Zhiyong, Zhang Guanshan, et al. Design and stability analysis of general-purpose chassis for Venlo greenhouse robots[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(3): 160-167,181. (in Chinese)

[10] Su L, Liu R, Liu K, et al. Greenhouse tomato picking robot chassis[J]. Agriculture, 2023, 13(3): 532.

[11] Li C, Xiang S, Ye K, et al. Design and experiment of an independent leg-type chassis vehicle attitude adjustment system[J]. Agriculture, 2024, 14(9):1548.

[12] 李睿,项昌乐,王超,等. 自动驾驶履带车辆鲁棒自适应轨迹跟踪控制方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1128-1137.
Li Rui, Xiang Changle, Wang Chao, et al. Robust adaptive trajectory tracking control approach for autonomous tracked vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(6): 1128-1137. (in Chinese)

[13] 王洪亮,范硕,皮大伟,等. 考虑姿态稳定性的智能客车轨迹跟踪控制研究[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(8): 780-791.
Wang Hongliang, Fan Shuo, Pi Dawei, et al. Intelligent bus trajectory tracking control for body attitude stability[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(8): 780-791. (in Chinese)

[14] Hu C, Wang R, Yan F, et al. Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions of Vehicular Technology, 2015,65(6):4033-4043.

[15] 王元杰,刘永成,杨福增,等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 23-29.
Wang Yuanjie, Liu Yongcheng, Yang Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22):23-29. (in Chinese)

[16] 谢晓东,张秀花,袁永伟. 基于连杆控制机构的自走式大棚小型农用底盘的研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 92-97.
Xie Xiaodong, Zhang Xiuhua, Yuan Yongwei. Design and simulation of placing tray device for vegetable plug[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 92-97. (in Chinese)

[17] 王海楠, 弋景刚. 棚室电动履带式旋耕起垄一体作业机的设计研究[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(6): 116 – 125. Wang Hainan, Yi Jinggang. Design and research of a shed electric tracked rotary cultivation and integral working machine[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2020, 43(6): 116 – 125. (in Chinese)

[18] Chen F, Ding J, Luo Z, et al. A novel robust model predictive controller for improving the steering stability of electric drive mobile platform considering the effect of both yaw motion and rototiller lifting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109846.

[19] 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 CSAE, 2019, 35(9): 48 – 57. (in Chinese)

[20] Yan J, Zhang W, Liu Y, et al. Autonomous trajectory tracking control method for an agricultural robotic vehicle[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(1): 215 – 224.

[21] Hu C, Ru Y, Li X, et al. Path tracking control for brake-steering tracked vehicles based on an improved pure pursuit algorithm[J]. BiosystTCs Engineering, 2024, 242: 1 – 15.

[22] Liu K, Yu J, Huang Z, et al. Autonomous navigation system for greenhouse tomato picking robots based on laser SLAM[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 100: 208 – 219.

[23] 肖茂华, 陈泰, 庄晓华, 等. 基于蛱螂优化 BP – PID 的温室自主跟随平台行走速度控制研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 83 – 91, 154. Xiao Maohua, Chen Tai, Zhuang Xiaohua, et al. Velocity control for autonomous following platform walking speed based on DBO optimized BP – PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 83 – 91, 154. (in Chinese)

[24] 孙景彬, 曾令坤, 应婧, 等. 农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 202 – 220. Sun Jingbin, Zeng Lingkun, Ying Jing, et al. Research status and prospect of key technologies of agricultural track chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 202 – 220. (in Chinese)

[25] 陈子文, 熊扬凡, 胡宗锐, 等. 基于虚拟探照灯的离合制动履带底盘寻径跟踪[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 10 – 19. Chen Ziwen, Xiong Yangfan, Hu Zongrui, et al. Path finding and tracking of clutch brake track chassis based on virtual searchlight[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(12): 10 – 19. (in Chinese)

[26] 吴建洋, 王震坡, 张雷, 等. 四轮轮毂电机驱动电动汽车纵侧向稳定性协调控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(4): 163 – 172. Wu Jianyang, Wang Zhenpo, Zhang Lei, et al. Coordination stability control strategy for four-wheel-independent-actuated electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(4): 163 – 172. (in Chinese)

[27] 张雷, 王子浩, 孙逢春, 等. 四轮轮毂电机驱动智能电动汽车转向失效容错控制研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 141 – 152. Zhang Lei, Wang Zihao, Sun Fengchun, et al. Fault-tolerant control for intelligent four-wheel-independently-actuated electric vehicles under complete steer-by-wire system failure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 141 – 152. (in Chinese)

[28] 关龙新, 顾祖飞, 张超, 等. 考虑系统复杂扰动的智能车模型预测路径跟踪控制[J]. 汽车工程, 2022, 44(12): 1844 – 1855, 1876. Guan Longxin, Gu Zufei, Zhang Chao, et al. Model predictive path following control of intelligent vehicles considering system complex disturbances[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(12): 1844 – 1855, 1876. (in Chinese)

[29] 郝天琪, 王伟达, 杨超, 等. 面向分体式飞行汽车自主对接的自动驾驶底盘运动规划方法研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10): 235 – 244. Qie Tianqi, Wang Weida, Yang Chao, et al. Motion planning method of autonomous driving chassis for autonomous docking of the split-type flying vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(10): 235 – 244. (in Chinese)

[30] 李文锋, 张强, 钟志航, 等. 考虑耦合特性的港口 AGV 横纵向分层控制[J]. 机械工程学报, 2025, 61(14): 383 – 396. Li Wenfeng, Zhang Qiang, Zhong Zhihang, et al. Lateral and longitudinal hierarchical control of port AGV considering coupling characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(14): 383 – 396. (in Chinese)

[31] 李臣旭, 江浩斌, 洪阳珂. 基于改进 MPC 与 RBF – MPC 的智能车轨迹跟踪控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(5): 1290 – 1301. Li Chenxu, Jiang Haobin, Hong Yangke. Intelligent vehicle track tracking control based on improved MPC and RBF – MPC[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2024, 54(5): 1290 – 1301. (in Chinese)

[32] 赵树恩, 王盛, 冷姚. 智能汽车轨迹跟踪多目标显式模型预测控制[J]. 汽车工程, 2024, 46(5): 784 – 794, 815. Zhao Shuen, Wang Sheng, Leng Yao. Multi-objective explicit model predictive control for intelligent vehicle trajectory tracking[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(5): 784 – 794, 815. (in Chinese)

[33] 姚建均, 张宜坤, 柯运, 等. 基于模型预测控制的机器人姿态控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(19): 88 – 100. Yao Jianjun, Zhang Yikun, Ke Yun, et al. Research on robot attitude control strategy based on model predictive control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(19): 88 – 100. (in Chinese)

[34] 胡珉珉, 魏新华, 王爱臣, 等. 基于自适应 MPC 的拖拉机路径跟踪控制方法[J]. 农机化研究, 2024, 46(6): 227 – 233. Hu Minmin, Wei Xinhua, Wang Aichen, et al. Path tracking control method of tractor based on adaptive model prediction control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(6): 227 – 233. (in Chinese)

[35] 张志鹏. 基于模型预测控制的底盘车轨迹跟踪研究[D]. 济南: 山东大学, 2024. Zhang Zhipeng. Research on chassis vehicle trajectory tracking based on model predictive control[D]. Ji'nan: Shandong University, 2024. (in Chinese)