

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2026.03.024

于冲, 朱建宇, 杜娟, 等. 丘陵山地通用电动履带底盘研制与试验[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(3): 177-184

Yu Chong, Zhu Jianyu, Du Juan, et al. Development and testing of a universal electric tracked chassis for hilly and mountainous areas [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(3): 177-184

丘陵山地通用电动履带底盘研制与试验^{*}

于冲¹, 朱建宇¹, 杜娟^{1,2}, 张学宁^{1,2}, 印祥^{1,2}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博, 255000;

2. 山东省大田作物智慧农业技术与智能农机装备重点实验室, 山东淄博, 255000)

摘要: 针对丘陵山地作物植保、采收和运输等现实需求, 结合玉米、烟草的种植模式和田间作业特点, 研制双电机独立驱动的丘陵山地通用电动履带底盘, 该底盘主要由行走底盘和行走控制系统构成。在整机结构设计方面, 对底盘结构形式、尺寸、履带式行走机构和驱动电机进行设计选型。在行走控制方面, 基于差速转向运动学模型和操控器件的信号输出特性, 提出驱动电机目标转速解算方法, 精准实现操控人员的驾驶意图。针对直行控制工况, 采用交叉耦合控制策略建立双侧通道反馈机制, 通过动态优化目标转速指令, 结合单通道 PID 算法实现电机转速的精确跟踪。试验结果表明, 丘陵山地通用电动履带底盘高速行驶时的速度控制误差小于 0.02 m/s; 通过坡度为 20° 的试验平台时, 底盘俯仰和倾斜角度变化均在 ±1° 之内; 在 0.2 m/s、0.3 m/s 和 0.4 m/s 的行驶速度下, 直线行驶偏移率分别为 2.21%、2.56% 和 3.03%, 满足丘陵山区田间作业需求。

关键词: 丘陵山地; 通用电动履带底盘; 结构设计; 行走底盘; 行走控制系统

中图分类号: S225 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2026) 03-0177-08

Development and testing of a universal electric tracked chassis for hilly and mountainous areas

Yu Chong¹, Zhu Jianyu¹, Du Juan^{1,2}, Zhang Xuening^{1,2}, Yin Xiang^{1,2}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo, 255000, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Smart Agriculture Technology and Intelligent Agricultural Machinery Equipment for Field Crops, Zibo, 255000, China)

Abstract: To address the practical demands for crop protection, harvesting and transportation in hilly and mountainous areas, and in combination with the planting patterns and field operation characteristics of corn and tobacco, a dual-motor independently driven universal electric tracked chassis for hilly and mountainous areas was developed. This chassis primarily consists of a driving chassis and a driving control system. In terms of the overall machine structure design, the chassis structure form, dimensions, tracked driving mechanism and drive motors are designed and selected. Regarding the driving control, based on the differential steering kinematic model and the signal output characteristics of the control components, a method for calculating the target rotational speed of the drive motor is proposed, thereby accurately realizing the operator's driving intentions. For the straight-line control condition, a cross-coupling control strategy is implemented to create a dual-channel feedback mechanism. This approach dynamically optimizes the target rotational speed commands while incorporating a single-channel PID algorithm for accurate motor speed tracking. The experimental results show that the speed control error is less than 0.02 m/s when the general electric tracked chassis operates at high-speed in hilly and mountainous areas, when passing through a slope of 20°, the pitch and tilt angle variations of the chassis are kept within ±1°, at driving speeds of 0.2 m/s, 0.3 m/s, and 0.4 m/s, the straight-line travel deviation rates are 2.21%, 2.56%, and 3.03%, respectively, meeting the operational requirements for hilly and mountainous regions.

收稿日期: 2025 年 5 月 19 日 修回日期: 2025 年 9 月 28 日

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32171910); 中国烟草总公司烟草农机研发与应用领域“揭榜挂帅”项目(110202301008)

第一作者: 于冲, 男, 1999 年生, 山东菏泽人, 硕士研究生; 研究方向为智能农机装备。E-mail: yc1820012112@163.com

通讯作者: 杜娟, 女, 1985 年生, 山西运城人, 博士, 副教授; 研究方向为农业装备智能控制。E-mail: dujuan0427@163.com

Keywords: hilly and mountainous areas; universal electric tracked chassis; structural design; driving chassis; driving control system

0 引言

丘陵山地地区占我国国土面积的 33% 以上,是农业生产和林业资源开发的重要区域^[1]。然而,由于地形复杂、地块分散、坡度陡峭以及道路崎岖不平缺陷,传统农业机械和运输设备在这一地区的应用受到极大限制^[2, 3],导致该地区农业机械化进程缓慢,严重制约了农业生产效率和资源利用率^[4]。

目前,研究人员针对丘陵山区农业生产环节设计了多种类型的整地、植保和采收机械^[5, 6]。根据底盘结构不同可分为轮式和履带式两种。轮式底盘具有高机动性、经济性和高传动效率等特点,在平原及缓坡区域占据主导地位^[7, 8]。针对轮式底盘的地形适应性不足问题,贾新乐等^[9]设计了自平衡三点调平系统,采用设定点不动调平策略,有效解决了轮式底盘在丘陵地区作业不稳定和安全性低的问题。齐文超等^[10]为提高拖拉机在丘陵山区作业的安全性,设计由姿态调整机构、液压驱动系统和控制系统构成的姿态主动调整系统,提出基于双闭环 PID 算法的调平控制算法,试验表明该系统响应效率高,误差低,满足作业需求。相较于轮式底盘,履带式底盘通过增大接地面积、降低接地比压,有效解决了轮式机械在湿软、陡坡或崎岖地形中产生的陷车和土壤压实问题,能更好适应丘陵山区的需求^[11, 12]。基于履带式底盘,相关研发人员设计出适用于丘陵山区耕种、管理、采收和运输的机械^[13-15]。李善军等^[16]结合丘陵山地果园农艺需求,设计了一款全液压可变幅遥控履带动力底盘,通过搭载开沟、除草等部件实现果园管理。万星宇等^[17]设计了一种全液压驱动的履带式自走式油菜收割机,并对切割关键部件进行设计分析,实现了油菜植株的中间条铺和茬上晾晒。

履带底盘的驱动方式主要有机械式、液压式和电力式^[18, 19]。机械式驱动方式使发动机的动力经减速器后输出至履带驱动轮,具有传动效率高、牵引能力强和稳定性好等特点^[20]。液压驱动方式采用液压马达带动驱动轮转动,具有轻量化、布置方便和功率密度高等优点。电力驱动方式具有结构简单、噪声低和操控灵活等特点,目前得到广泛应用^[21, 22]。

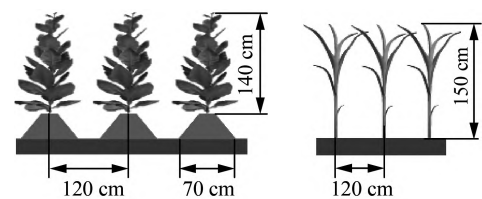
本研究针对丘陵山区作物采收、运输和植保等作业需求,设计双侧电机独立驱动的丘陵山区通用电动底盘,提出基于转速控制的操控信号解析方法和直行控制方法,精准实现操控人员的驾驶意图。通过行驶速度稳定性、爬坡试验,验证底盘系统的可靠性与地形

适应能力,以期为丘陵农业机械化提供技术方案。

1 整机结构和工作原理

1.1 设计需求

针对丘陵山区复杂的地形特征及高秆作物植保与收获需求,以玉米和烟草两种典型作物的标准化种植模式作为设计参考,开发一款丘陵山地通用电动履带底盘。我国烟草种植采用单行高垄模式,行距为 110~120 cm,垄高为 25~30 cm,垄底宽度为 70 cm,成熟烟株高度可达 140 cm,如图 1(a)所示;玉米种植以 60 cm 等行距或 40 cm×80 cm 的窄宽行模式为主,喇叭口期作为关键植保时期,植株高度可达 150 cm,如图 1(b)所示。



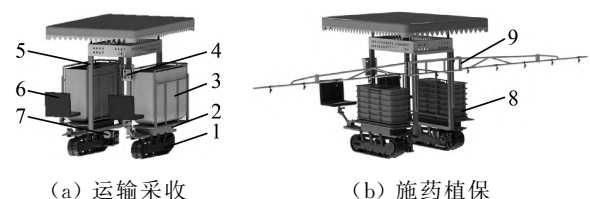
(a) 烟草种植农艺 (b) 玉米种植农艺

图 1 高秆作物种植农艺

Fig. 1 Tall crop plant agronomy

1.2 结构设计及工作原理

丘陵山区通用电动底盘主要由操控面板、行走控制器、收集筐、电气箱、履带式驱动机构和龙门式车架构成,如图 2 所示。基于烟叶、玉米的种植参数和生物特性,车架采用龙门架式结构,最小离地间隙为 180 cm,履带轨距为 110 cm,整机宽度不超过 120 cm。履带式驱动机构对称布置于车架立柱底部以驱动底盘行走。电气箱顶部设置承载平台用于物料运输,两侧立柱配置快拆式挂载接口,可实现收集筐的灵活拆卸。当用于田间植保作业时,通过快拆锁扣可便捷安装药箱和高度可调喷杆,实现运输和植保功能的切换。其主要技术参数如表 1 所示。



(a) 运输采收 (b) 施药植保

图 2 丘陵山地通用电动履带底盘

Fig. 2 Universal electric tracked chassis for hilly and mountainous areas

1. 履带式驱动机构 2. 电气箱 3. 收集筐 4. 操控面板 5. 龙门式车架
6. 升降座椅 7. 驱动电机 8. 药箱 9. 喷杆

表1 丘陵山地通用电动履带底盘主要参数

Tab. 1 Main parameters of universal electric tracked chassis for hilly and mountainous areas

参数	数值
整机重量/kg	400
承载重量/kg	600
电机额定功率/kW	1.2
整机尺寸(长×宽×高) (cm×cm×cm)	250×115×200
离地间隙/cm	180
履带轨距/cm	110
最大行驶速度/(km·h ⁻¹)	4
最大爬坡角度/(°)	20

2 关键部件设计

2.1 履带选型

履带驱动机构具有牵引力大、接地比压小、爬坡越障性能好和转弯灵活等优点,可有效适应泥泞、陡峭和崎岖的田间工况。该机构主要由橡胶履带、驱动轮、支重轮、张紧装置、涡轮蜗杆减速器和驱动电机构成,如图3所示。



图3 履带式驱动机构

Fig. 3 Tracked drive mechanism

1. 支重轮 2. 张紧机构 3. 驱动轮 4. 驱动电机
5. 涡轮蜗杆减速电机 6. 橡胶履带

履带节距是影响底盘行驶稳定性、机动性和承载能力的重要参数,履带节距 t_0 计算如式(1)所示。

$$t_0 = (17.5 \sim 23) \sqrt[4]{m} \quad (1)$$

式中: m ——底盘总重量,kg。

丘陵山地通用电动履带底盘的工作场景多为松软或泥泞土地,履带宽度选择需满足接地比压要求,履带宽度 b 计算如式(2)所示。

$$b = (0.9 \sim 1.1) \times 209 \times \sqrt[3]{m \times 10^{-3}} \quad (2)$$

履带接地长度设计应综合考虑接地比压和转向性能。当履带接地长度和履带轨距比值大于1.7时,会造成转向阻力过大,导致底盘转向困难;若比值小于1,则需要频繁转向以保持底盘直线行驶,加速履带磨损,履带接地长度计算如式(3)所示。

$$\begin{cases} L_0 = (1.25 \sim 1.5) \sqrt[3]{m \times 10^{-3}} \\ \frac{L_0}{B} = 1.2 \sim 1.4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_0 ——履带接地长度,cm;

B ——履带轨距,cm。

丘陵山地通用电动履带底盘总重量为800 kg,根据田间通过性要求,确定履带轨距为110 cm,最终选择宽度为23 cm,接地长度为276 cm,节距为72 mm的V2型橡胶履带。

2.2 驱动电机选型

丘陵山地电动通用底盘的行驶状态主要包括平地直行、爬坡和转向三种,所选用的驱动电机须满足不同工况下的功率及行驶速度要求。由于坡道运行时所受阻力最大,因此将爬坡时所克服的阻力大小作为驱动电机计算标准,爬坡时所受阻力 F_p 计算如式(4)所示。

$$F_p = mgf + mgs\alpha_{pmax} + \mu mg\cos\alpha_{pmax} + \lambda ma \quad (4)$$

式中: f ——运行阻力系数,取0.12;

α_{pmax} ——最大爬坡角度,(°);

μ ——摩擦力系数,取0.03;

λ ——惯性阻力系数,取1.2;

a ——行驶加速度,m/s²。

则运行过程中所消耗的功率

$$P = \frac{SF_p v_{max}}{3600\eta} \quad (5)$$

式中: S ——安全系数,取1.5;

v_{max} ——最高行驶速度,km/h;

η ——传动机构效率,取0.85。

驱动电机需满足爬坡作业的功率需求和最高行驶速度需求,驱动电机转速 n 计算如式(6)所示。

$$n = \frac{30iv_{max}}{\pi R} \quad (6)$$

式中: i ——涡轮蜗杆减速器传动比,取40。

计算可得,满足爬坡条件的单侧电机最小功率为1.75 kW,最高转速为2 965 r/min,额定扭矩应大于8.9 N·m。因此,选择YGX27-29的直流无刷电机,该电机的额定功率为1.8 kW,额定转速为3 200 r/min,具体参数如表2所示。

表2 驱动电机参数

Tab. 2 Drive motor parameter

参数	数值
额定电压/V	48
额定功率/kW	1.8
额定扭矩/(N·m)	9.8
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 200
额定电流/A	37.5
峰值扭矩/(N·m)	11.5

3 丘陵山地通用电动履带底盘控制系统设计

3.1 控制系统构成

丘陵山地通用电动履带底盘行走控制系统由操控

终端和行走控制器构成,如图 4 所示。其中,操控终端主要由霍尔摇杆、旋转电位器和信息处理模块构成。霍尔摇杆和旋转电位器信号分别输出至信号处理模块。行走控制器主要由行走控制模块、电机驱动器和转速传感器构成,行走控制模块输出高低电平信号和模拟信号至电机驱动器,控制驱动电机旋转方向和转速。

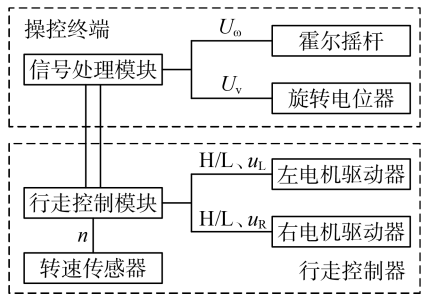


图 4 丘陵山地通用电动履带底盘控制系统

Fig. 4 Control system of universal electric tracked chassis for hilly and mountainous areas

在行驶过程中,信号处理模块将操控信号读取并解析为丘陵山地通用底盘的目标行走速度和目标横摆角速度,经 CAN 总线发送至行走控制模块。目标输入经行走控制算法计算两侧驱动电机的目标转速,通过电机驱动器调节电机转速,并接收实际转速的反馈,以实现前进、后退、加减速和转向等动作的控制。

3.2 整机电气线路设计

电气线束是丘陵山地通用电动履带底盘的重要组成部分,主要起电源分配和信号传输作用。蓄电池通过电气线束为驱动电机、照明系统和控制单元等设备供电。在信号传输方面,电气线束连接传感器、控制单元和执行部件,实现信息实时交互和控制指令收发,确保各部件协同工作。电气线束集成电磁开关、连接件、保险和变压模块等器件,电气原理如图 5 所示。

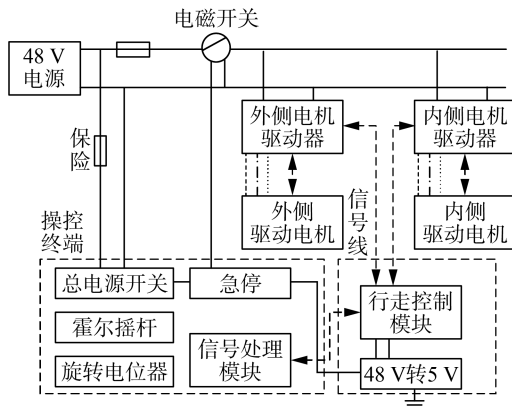


图 5 整机电气原理图

Fig. 5 Electrical schematic diagram of the entire machine

电磁开关安装在主电路上,其通断状态由控制面板上的急停按钮控制,可在紧急情况下快速切断电源。行走控制器供电线路独立于主电磁开关,确保系统紧

急停机后仍可重启。

3.3 行走控制方法

3.3.1 操控信号解析方法

研究基于转速调节制定行走控制策略,行走控制算法将旋转电位器开度和转向摇杆摆动角度解析为丘陵山地通用电动履带底盘的目标车速和目标横摆角速度,目标信号输入经行走控制策略计算得到两侧驱动电机的目标转速 n_1^* 和 n_2^* 。

为实现操控信号的精确解析,建立丘陵山地通用电动履带底盘的理论运动学模型,如图 6 所示。由此可得转向过程中底盘几何中心速度与两侧履带速度的关系,如式(7)所示。

$$\begin{cases} v_1 = v_c - \frac{B}{2}\omega \\ v_2 = v_c + \frac{B}{2}\omega \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_c ——中心点速度, m/s;

v_1 ——内侧履带线速度, m/s;

v_2 ——外侧履带线速度, m/s;

ω ——横摆角速度, rad/s。

理论转向半径

$$R = \frac{B(v_1 + v_2)}{2(v_1 - v_2)} \quad (8)$$

当机具前进时 v_c 为正,后退时 v_c 为负,左转时 ω 为正,右转时 ω 为负。

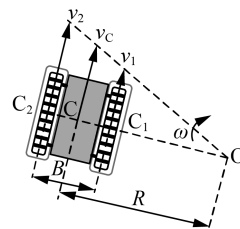


图 6 丘陵山地通用电动履带底盘运动学模型

Fig. 6 Kinematic model of universal electric tracked chassis for hilly and mountainous areas

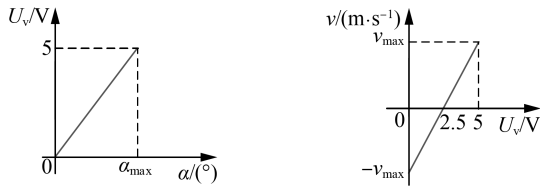
行走过程中,旋转电位器输出速度信号 U_v ,控制丘陵山地通用电动履带底盘行走速度和行进方向。其旋转角度与模拟信号 U_v 呈正比例关系,如图 7(a)所示。为简化控制方法,定义底盘行驶速度和旋转电位器模拟信号 U_v 成线性关系,如图 7(b)所示。

由图 7 可得旋转电位器输出模拟信号 U_v 和其旋转角度 α 的关系;车速和模拟信号 U_v 的关系如式(9)所示。

$$\begin{cases} U_v = \frac{5\alpha}{\alpha_{\max}} \\ v = \frac{2v_{\max}}{5} \times U_v - v_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中： α ——旋转电位器角度，(°)；

α_{\max} ——旋转电位器最大角度，(°)。

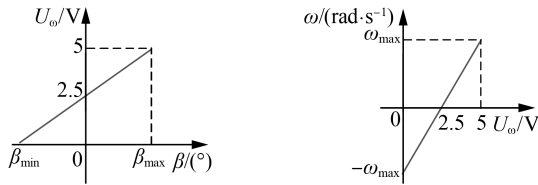


(a) 旋转电位器信号输出特性 (b) 车速和 U_v 特性曲线

图 7 行驶速度解析

Fig. 7 Driving speed analysis

霍尔摇杆 X 轴输出模拟信号 U_ω ，控制丘陵山地通用电动履带底盘转向。霍尔摇杆摆动角度和模拟信号 U_ω 的关系如图 8(a) 所示。为简化控制方法，定义底盘横摆角速度和霍尔摇杆模拟信号 U_ω 成线性关系，如图 8(b) 所示。



(a) 霍尔摇杆输出特性 (b) 横摆角速度和 U_ω 特性曲线

图 8 横摆角速度解析

Fig. 8 Yaw rate velocity analysis

由图 8 可得，霍尔摇杆输出的模拟信号 U_ω 和其摆动角度 β 的关系；横摆角速度和模拟信号 U_ω 的关系如式(10)所示。

$$\begin{cases} U_\omega = \frac{5\beta}{\beta_{\max} - \beta_{\min}} + 2.5 \\ \omega = \frac{2\omega_{\max}}{5} \times U_\omega - \omega_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中： β_{\max} ——霍尔摇杆最大摆动角度，(°)；

β_{\min} ——霍尔摇杆最小摆动角度，(°)；

ω_{\max} ——最大横摆角速度，rad/s。

利用上述两个解析函数，可以将驾驶员的操控信号解析为目标车速和目标横摆角速度。行走控制模块的处理过程是基于数字信号进行的，本研究利用 PIC18F258 微处理器内置的 10 位 AD 采样通道，将 0~5 V 操控模拟信号转化为 0~1 023 的数字信号。定义 U_v 和 U_ω 经数模转换后的数字信号为 E_v 和 E_ω ，转化后数字信号在对电机转速和横摆角速度解析过程中应满足上述定义的操控方式需求，因此将数字信号限制在 0~5，计算见式(11)。

$$\begin{cases} D_v = \frac{5E_v}{1\ 023} \\ D_\omega = \frac{5E_\omega}{1\ 023} \end{cases} \quad (11)$$

式中： D_v ——期望速度数字信号；

D_ω ——横摆角速度数字信号。

行走控制模块根据读取的目标速度和目标横摆角速度信号实时计算左右驱动电机的目标转速，由运动学模型可得驱动电机目标转速，如式(12)所示。

$$\begin{cases} n_1^* = \frac{30i}{\pi r} \left(\frac{2c}{5} U_v - \frac{Bd}{5} U_\omega - v_{\max} + \frac{B\omega_{\max}}{2} \right) \\ n_2^* = \frac{30i}{\pi r} \left(\frac{2c}{5} U_v + \frac{Bd}{5} U_\omega - v_{\max} - \frac{B\omega_{\max}}{2} \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中： n_1^* ——内侧驱动电机目标转速，r/min；

n_2^* ——外侧驱动电机目标转速，r/min；

v_{\max} ——最高行驶速度。

信号解析控制算法将驾驶员的操控信号解析为内外侧驱动电机的目标转速 n_1^* 和 n_2^* ，行走控制模块根据目标转速生成电机控制信号并发送至电机驱动器，以实现电机状态控制。

3.3.2 直线行走控制方法

丘陵山地通用电动履带底盘两侧驱动电机之间无机械结构连接，在直行过程中，地面状况会导致两侧履带受力存在差异，造成两侧驱动电机转速不同步的情况，从而导致跑偏。本文基于交叉耦合同步控制策略实现直线行走控制，如图 9 所示。该策略融合双通道误差补偿机制和单电机 PID 闭环控制；双侧通道之间采用交叉耦合控制策略，动态调节目标转速指令；在单侧通道中，采用 PID 控制算法实现电机转速精准跟踪。

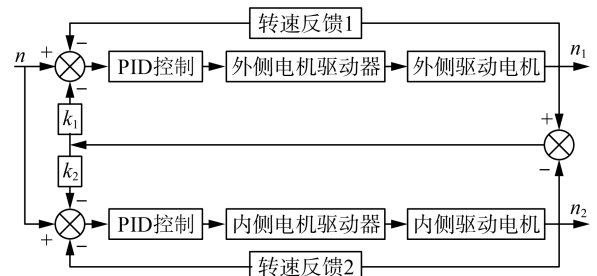


图 9 交叉耦合控制方法

Fig. 9 Cross-coupling control method

直行工况下输入两侧通道的目标转速理论上为 $n_1^* = n_2^* = n^*$ ，但当两侧履带受到干扰导致转速不一致时，需采用交叉耦合算法对输入两侧通道的目标转速进行微调，进而控制两侧履带行驶速度相同。工作原理是，转速传感器将两侧驱动电机的实际转速反馈并做差，将速度差乘相应的系数反馈至行走控制模块，可得输入两侧通道目标转速，如式(13)所示。

$$\begin{cases} n_1^* = n^* - k_1(n_1 - n_2) \\ n_2^* = n^* - k_2(n_1 - n_2) \end{cases} \quad (13)$$

式中： k_1 ——内侧驱动电机的误差补偿系数；

k_2 ——外侧驱动电机的误差补偿系数。

在电机转速输出过程中,以目标转速、实际转速作为 PID 控制算法的输入量,计算出目标转速和实际转速之间的偏差 e ,并对偏差进行运算,得到驱动电机转速信号控制增量 Δu ,以精确控制转速,控制原理图如图 10 所示。可得内、外侧驱动电机的目标转速和实际转速的误差值(e_1, e_2),如式(14)所示。

$$\begin{cases} e_1 = n^* - k_1(n_1 - n_2) - n_1 \\ e_2 = n^* - k_2(n_1 - n_2) - n_2 \end{cases} \quad (14)$$

以外侧通道为例,采用增量式 PID 算法计算驱动电机转速控制信号增量 $\Delta u(t)$,如式(15)所示。

$$\Delta u(t) = K_p [e(t) - e(t-1)] + K_i e(t) + K_d [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (15)$$

式中: K_p, K_i, K_d ——比例系数、积分系数和微分系数;

$e(t), e(t-1), e(t-2)$ ——第 $t, t-1, t-2$ 采样时的转速差。

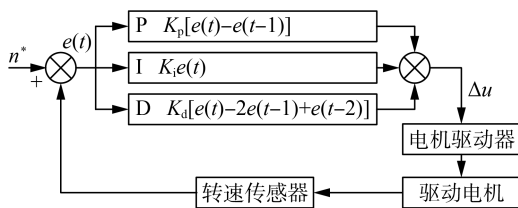


图 10 驱动电机转速控制原理

Fig. 10 Driving motor speed control principle

4 试验结果与分析

4.1 行驶速度稳定性试验

行驶速度稳定性是评价丘陵山地通用电动履带底盘行走控制系统和动力系统性能的重要指标。研究选用 TGSS MK3V 雷达进行速度检测,该雷达基于多普勒效应,通过分析地面反射微波信号的频移量实现非接触式测速。雷达安装于车架立柱支腿上,离地高度为 1 m,标准安装角度与水平面成 37° ,如图 11 所示。

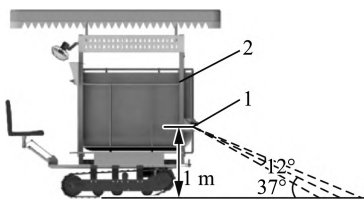


图 11 速度稳定性试验

Fig. 11 Speed stability test

1. TGSS MK3V 雷达 2. 车架左前侧支腿

试验选取 30 m 平整测试路段,设置起止标记线。测试开始前,将丘陵山地通用电动履带底盘停放至起点处,操纵机器匀速行驶至终点。分别测试丘陵山地通用电动履带底盘在低速、中速和高速模式下的行驶稳定性。试验过程中,采用测速雷达实时采集速度数

据,采样频率设置为 20 Hz,并通过串口将数据保存至笔记本电脑。

行驶速度试验结果如图 12 所示,可知丘陵山地通用电动履带底盘在高速、中速和低速模式下的行驶速度分别为 0.52 m/s、0.35 m/s 和 0.2 m/s。行驶过程中,地面状况会导致行驶速度发生微小波动,随着行驶速度的提升,速度波动程度呈现增大趋势,表明高速工况下外界扰动敏感性增强。高速行驶时的速度控制误差在 0.02 m/s 之内,表明所设计的行走控制算法能较好实现电机转速的稳定输出,满足田间行驶需求。

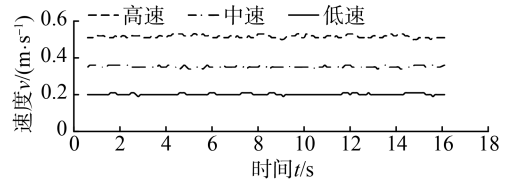


图 12 行驶速度试验结果

Fig. 12 Driving speed test results

4.2 爬坡试验

为测试底盘在转场及进出田地时上下坡的稳定性,选取倾斜角度为 20° 的斜坡作为试验平台,进行上下坡和坡道转弯稳定性测试,试验场景如图 13 所示。



图 13 爬坡试验

Fig. 13 Climbing test

试验过程中,控制机器低速上坡,行驶至坡道中间后进行转向下坡,完成坡道转弯测试。测试前在车架上安装倾角传感器,以检测底盘实时姿态,其中俯仰角信号采样频率为 20 Hz。

爬坡试验结果如图 14 所示,攀爬阶段底盘俯仰角波动范围为 $+19.8^\circ \sim +20.3^\circ$,未出现滑移或倾覆现象。坡道转向过程中,倾斜角度变化范围在 $\pm 1^\circ$,属于正常转向表现,满足转场、田间装载运输和上下坡稳定性需求。

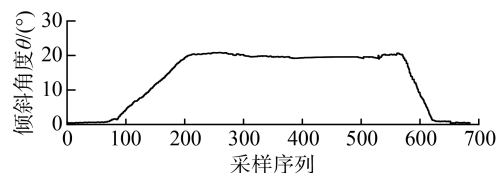


图 14 爬坡试验结果

Fig. 14 Climbing test results

4.3 直线行驶偏移率试验

为评价直线行驶控制算法的操控性能,试验采用

对照试验法对比分析丘陵山地通用电动履带底盘在有、无直线行驶控制策略下的偏移特性。

在试验场地标定 20 m 的测试区间，标记起始线和终止线，测试前将丘陵山地通用电动履带底盘停放至起始线处，调整车体外沿与基准线重合，如图 15 所示。控制其向前行驶至终止线，途中不进行方向调整。停车后测量车体外沿距基准线的垂直距离 ΔS 。分别测试 0.2 m/s、0.3 m/s 和 0.4 m/s 速度下的直线行驶偏移率，每种速度下重复 2 次试验。



图 15 直线行驶偏移率试验
Fig. 15 Straight-line offset test

直线行驶偏移率

$$p = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\% \quad (16)$$

式中： ΔS ——偏移量，cm；

S_0 ——测试区间长度，cm。

由表 3 可知，在无直线控制策略的条件下，丘陵山地通用电动履带底盘分别以 0.2 m/s、0.3 m/s 和 0.4 m/s 速度直线行驶时，偏移率分别为 2.66%、3.14% 和 3.87%。采用交叉耦合控制算法后，对应偏移率分别降低至 2.21%、2.56% 和 3.03%。随着行驶速度的提高，偏移率逐渐增加，表明底盘在高速行驶状态下更易受到外界因素的干扰。在相同速度条件下，采用交叉耦合控制算法的底盘的偏移率更低，表明本研究的直线行驶控制算法具有较好的控制效果。

表 3 直线行驶偏移率试验结果
Tab. 3 Results of straight-line offset rate

控制策略	行驶速度 / (m · s ⁻¹)	偏移量 / mm	平均偏移量 / mm	平均偏移率 / %
无	0.2	528	532	2.66
		536		
	0.3	622	628	3.14
		635		
	0.4	785	773	3.87
		762		
交叉耦合控制	0.2	433	443	2.21
		454		
	0.3	522	512	2.56
		502		
	0.4	612	606	3.03
		600		

5 结论

针对丘陵山地农业作物植保、采收和运输等问题，以烟草、玉米的种植模式和通过性需求为依据，设计丘陵山地电动通用底盘，对底盘结构、履带式行走机构和驱动电机进行设计选型。

1) 提出基于转速控制的行走控制方法，基于差速转向运动学模型和操控器件信号输出特性，提出操控信号解析方法，将操控信号解析为两侧驱动电机的目标转速，实现丘陵山地通用电动履带底盘的加减速、直行和转向控制。针对直行工况，采用交叉耦合控制策略建立两侧通道的反馈，动态调节目标转速指令，单侧通道采用 PID 控制算法实现电机转速精准跟踪，提高直线行驶精度。

2) 田间试验结果表明，丘陵山地电动通用底盘高速行驶时的速度控制误差在 0.02 m/s 内，坡道转弯时，车体倾斜角度变化范围在 $\pm 1^\circ$ ，具有较好的稳定性。以 0.2 m/s、0.3 m/s 和 0.4 m/s 速度直线行驶时，直线行驶偏移率分别为 2.21%、2.56% 和 3.03%，随着速度的提升直线偏移率增大，但满足标准需求。

参 考 文 献

[1] 黄雪涛, 谢虎, 李加坤, 等. 履带式农业装备黏土土壤通过性研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(6): 114-119.
Huang Xuetao, Xie Hu, Li Jiakun, et al. Study on clay loam transmissibility of crawler agricultural equipment [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 114-119.

[2] 杨帆, 滕利, 孙宜田, 等. 农业机械底盘智能化发展现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 138-147.
Yang Fan, Teng Li, Sun Yitian, et al. Development status and prospect of intelligent chassis of agricultural machinery [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 138-147.

[3] Sun C, Tan S. Design and test of the key components for a combing-type tobacco harvester [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(1): 145-153.

[4] 曾俊豪, 高巧明, 赵鹏飞, 等. 丘陵山地遥控履带割草机设计与性能试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 49-55, 194.
Zeng Junhao, Gao Qiaoming, Zhao Pengfei, et al. Design and performance test of remote control tracked mower in hilly and mountainous areas [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5): 49-55, 194.

[5] 鲁磊, 李丽, 卢世博, 等. 丘陵山地桑叶采收机转运装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(3): 133-139.
Lu Lei, Li Li, Lu Shibo, et al. Design and experimentation

- of the transport mechanism for mulberry leaf harvesting machine in hilly terrain [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(3): 133-139.
- [6] 柯超, 谢守勇, 邓成志, 等. 丘陵山地移栽机自动调平系统设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(8): 17-26.
Ke Chao, Xie Shouyong, Deng Chengzhi, et al. Design and test of automatic leveling system for transplanter in hilly and mountainous areas [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(8): 17-26.
- [7] 瞿济伟, 李鸿基, 张瑞宏, 等. 农业轮式机器人底盘转向运动控制及试验[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(5): 140-147.
Qu Jiwei, Li Hongji, Zhang Ruihong, et al. Research on steering motion control and experiments of agricultural wheeled robot chassis [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(5): 140-147.
- [8] 徐陶, 吕晓兰, 祁雁楠, 等. 我国果园风送式喷雾装备与技术研究进展[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(7): 69-77.
Xu Tao, Lü Xiaolan, Qi Yannan, et al. Research status on equipment and technology of orchard air-assisted sprayer in China [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(7): 69-77.
- [9] 贾新乐, 石舟, 李锐, 等. 丘陵山区小型农机底盘自动调平系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(S1): 108-115.
- [10] 齐文超, 李彦明, 陶建峰, 等. 丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 381-388.
- [11] 李锦新, 武涛, 刘庆庭, 等. 履带式甘蔗收割机坡道行驶稳定性分析与仿真[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(6): 127-134.
Li Jinxin, Wu Tao, Liu Qingting, et al. Running stability analysis and simulation of track-type sugarcane harvester on slopes [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(6): 127-134.
- [12] 吉旭, 唐勇, 林蜀云, 等. 山地履带自走式辣椒收获机底盘动力学仿真与试验[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(7): 72-80.
Ji Xu, Tang Yong, Lin Shuyun, et al. Dynamic simulation and test of the tracked chassis of the mountainous self-propelled pepper harvester [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(7): 72-80.
- [13] 齐兴源, 林蜀云, 刘春波, 等. 电动遥控茶园管理机设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(1): 259-265.
Qi Xingyuan, Lin Shuyun, Liu Chunbo, et al. Design and experiment of electric remote control tea garden management machine [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(1): 259-265.
- [14] 卢鑫羽, 龚艳, 陈晓, 等. 电动履带式立式喷杆喷雾机设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(8): 83-91.
Lu Xinyu, Gong Yan, Chen Xiao, et al. Design and experiment of electric crawler vertical boom sprayer [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(8): 83-91.
- [15] 朱建锡, 边晓东, 费焱, 等. 设施农业履带电动作业平台设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(2): 173-179.
Zhu Jianxi, Bian Xiaodong, Fei Yan, et al. Design and experiment of electric crawler platform for facility agriculture [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(2): 173-179.
- [16] 李善军, 陈辉龙, 彭际博, 等. 丘陵山地果园全液压遥控式履带动力底盘设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 119-127.
- [17] 万星宇, 舒彩霞, 廖庆喜, 等. 高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 109-121.
- [18] 向旺, 孙玉华, 王鹏, 等. 丘陵山区小型玉米收获机单行去穗机构设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(1): 28-34.
Xiang Wang, Sun Yuhua, Wang Peng, et al. Design and experiment of single-row ear harvesting mechanism for small-scale corn harvester in hilly mountainous areas [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(1): 28-34.
- [19] 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.
- [20] 熊永森, 斯剑勇, 谢小兵, 等. 农用履带行走装置研制[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(12): 87-91.
Xiong Yongsen, Si Jianyong, Xie Xiaobing, et al. Development of agricultural crawler walking device [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(12): 87-91.
- [21] 柯超, 谢守勇, 邓成志, 等. 丘陵山地移栽机自动调平系统设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(8): 17-26.
Ke Chao, Xie Shouyong, Deng Chengzhi, et al. Design and test of automatic leveling system for transplanter in hilly and mountainous areas [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(8): 17-26.
- [22] 王洪昌, 陈龙, 李正博, 等. 履带浮筒式挖藕机滑橇支承装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(10): 44-54.
Wang Hongchang, Chen Long, Li Zhengbo, et al. Design and test of the skateboard support device for crawler float-type lotus root excavator [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(10): 44-54.