

棉花打顶机履带行走系统设计与试验

韩长杰^{1,2} 李超¹ 徐阳¹ 仇世龙¹ 罗燕¹ 尤佳¹ 毛罕平¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农机装备工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为解决棉花打顶作业过程中,打顶装置晃动严重、对行稳定性差等问题,根据新疆地区机采棉田种植模式,设计了一款基于北斗导航的棉花打顶机履带行走系统,确定了底盘整机和关键部件的设计结构和参数。以STM32F103为主控器,搭载基于实时动态差分的北斗卫星导航系统,实现自动导航控制;建立履带底盘运动学模型确定预瞄点,得到定位点与目标路径的曲率偏差,同时引入底盘几何中心行驶速度为控制器输入量,提出一种自调节的双输入模糊PID控制算法,实现底盘的作业路径自动追踪。以打顶期棉田为作业对象,分别开展性能试验和作业试验,结果表明:底盘田间自主导航作业时,最大绝对偏差不超过39 mm,标准差不超过18.5 mm,平均绝对偏差为15.3 mm;工作过程中所搭载的打顶装置平均航向角偏转角为0.38°,平均横滚角偏转角为0.33°,平均俯仰角偏转角为0.26°。自走式履带底盘行驶稳定性强、对行精准、跟踪误差小,可适用于棉花打顶行走作业。

关键词: 棉花打顶机; 北斗导航系统; 双电机履带底盘; 模糊PID控制; 路径追踪

中图分类号: S224.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0121-09

OSID:



Design and Experiment of Crawler Walking System of Cotton Topping Machine

HAN Changjie^{1,2} LI Chao¹ XU Yang¹ QIU Shilong¹ LUO Yan¹ YOU Jia¹ MAO Hanping¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering and Technology Research Center, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to solve the problems of severe shaking and poor stability of the topping device in the process of cotton topping operation, according to the planting mode of machine-picked cotton field in Xinjiang region, the mechanically-picked cotton field was selected as the research object, a crawler walking system of cotton topping machine based on Beidou navigation was designed, and the design structure and parameters of the chassis and key components were determined. STM32F103 was used as the main controller, equipped with a real-time dynamic difference Beidou navigation system to realize automatic navigation control, and the kinematic model of the tracked chassis was established to determine the preview point, and the curvature deviation between the positioning point and the target path was obtained, at the same time, the speed of the chassis geometric center was introduced as the input of the controller, and a self-adjusting double-input fuzzy PID control algorithm was proposed to realize the automatic tracking of the operating path of the chassis. The results showed that the maximum absolute deviation was not more than 39 mm, and the standard deviation was not more than 18.5 mm, the average absolute deviation was 15.3 mm. The average heading angle deflection angle, the average roll angle deflection angle and the average pitch angle of the topping device were 0.38°, 0.33° and 0.26°, respectively. The self-propelled crawler chassis had strong driving stability, accurate alignment and small tracking error, and can be applied to cotton topping walking operation.

Key words: cotton topping machine; Beidou navigation system; dual-motor crawler chassis; fuzzy PID control; path tracking

收稿日期: 2024-12-04 修回日期: 2025-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002401)、新疆维吾尔自治区天山创新团队项目(2021D14010)和农业农村部火花计划项目(13230369)

作者简介: 韩长杰(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与智能农业装备研究,E-mail: hej_627@163.com

0 引言

棉花是我国主要经济作物之一,在我国经济作物种植中占有十分重要的地位^[1]。棉花打顶是抑制顶端优势、提高产量、减轻机械化收获难度的重要环节^[2-4]。机械打顶能降低人工成本,防止环境污染,但由于打顶时期棉花枝叶杂乱、田面湿软且凹凸不平,极大影响打顶装置作业效果^[5]。因此,设计一款适用于棉花打顶的自走式行走底盘对于提高棉花打顶装置的作业效率和作业质量具有重要意义。

国外对棉花打顶机的研究起步较早,但因机械打顶研发周期长、成本高,导致现阶段欧美国家暂缓了对机械打顶相关装备的研究。国内学者主要集中于打顶装置研究,行走底盘大都采用轮式或拖拉机悬挂方式,针对专用底盘的研究成果较少。周桂鹏^[6]设计了一款四轮高地隙自走式通用底盘,通过液压控制系统带动四轮驱动,该高地隙通用底盘不仅可以用于不同高度的5行棉株同时打顶,还可挂接弥雾、电动喷雾等装置完成棉田植保作业。刘正波等^[7]开展了棉花打顶机器人高地隙移动平台机构优化设计,并通过运动学仿真对平台进行了稳定性分析,验证了设计合理性及可靠性。韩长杰团队^[8-10]设计了基于双圆盘和仿生机械手的棉花打顶装置,行走底盘采用拖拉机前悬挂方式,试验结果表明,棉花平均打顶率分别为78.22%和78.67%,实现了全程自动化作业。以上棉花打顶作业采用的行走底盘,工作过程中装置晃动严重、人工对行稳定性差,极大影响打顶装置的作业效率;履带底盘以其高稳定性的优点逐渐在农业生产领域广泛运用。

近年来,随着导航技术的迅速发展,针对履带底盘搭载车辆自主导航系统,国内外学者开展了大量研究^[11-13]。HUANG等^[14]在履带式机器人平台上基于目标点前视距离信息设计了PI路径跟踪控制器,实现路径自动追踪。TAKAI等^[15]使用RTK-GPS和IMU作为导航传感器,基于洋马CT801型履带式拖拉机搭建导航平台,履带式拖拉机基于角速度具有不同转向行为,自动追踪试验结果表明,该机能适应多种路径导航控制。丁幼春等^[16]针对油菜播种机履带底盘设计了一种基于免疫PID的运动控制器,通过横向模糊控制和纵向PID定速控制方式实现信息采集平台田间路径追踪,其路径追踪最大偏差不超过15.2 cm。王伟康等^[17]针对自主设计的水稻收获履带底盘,设计了自动导航模糊控制器,实现作业路径自动跟踪,田间试验结果表明平均横向偏差为5.0 cm。目前,针对履带底盘精度高且可适应速度变化的导航控制器研究成果较少,与棉花打

顶作业的自主导航控制要求仍有差距,需进一步展开深入研究。

针对新疆地区机采棉田的生长特性,以提高对行稳定性、保证打顶装置平稳作业为目标,本文设计一种适用于棉花打顶作业的履带行走系统,搭载北斗导航控制系统,制作样机,并通过试验验证设计合理性。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

棉花打顶履带底盘结构如图1所示,主要由履带行走模块、动力驱动模块、中控模块、机架、导航控制模块组成。导航控制模块由RTK-GNSS接收机天线、姿态传感器和T100型显示器组成;履带行走模块由驱动轮、支撑轮、张紧轮和橡胶履带组成;机架上方搭载棉花打顶执行装置。

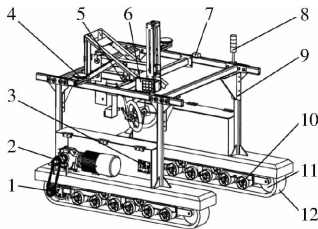


图1 棉花打顶履带底盘结构示意图

Fig.1 Cotton top track chassis structure diagram

1. 驱动轮 2. 动力驱动模块 3. 中控模块 4. RTK-GNSS接收机天线 5. 棉花打顶执行装置 6. T100型显示器 7. 姿态传感器 8. 警报灯 9. 机架 10. 支撑轮 11. 张紧轮 12. 橡胶履带

1.2 工作原理

自走式履带底盘动力驱动模块、导航控制模块、中控模块由4块6-QW-90型蓄电池提供动力。工作前,对棉田进行路径规划,确定工作路径,并导入导航控制模块。工作时,导航控制模块实时获取底盘位置和姿态信息,记录并计算底盘沿导航线行驶修正所需的曲率偏差;中控模块实时接收曲率信息,记录并决策出两侧驱动电机转速,下发至电机控制器,实现底盘沿作业路径自动追踪;两侧履带驱动轮分别安装测速传感器,监测底盘实际速度,并实时向中控模块反馈,中控模块接收反馈信息,结合设计的导航控制算法,调节电机输出转速,实现对底盘行驶速度的精确调控。

1.3 设计参数

根据棉花在打顶时期的生长特性,履带底盘主要设计参数如表1所示。

2 关键部件设计与选型

2.1 行走底盘设计

棉花打顶作业需行走底盘保持稳定运动状态,

表 1 履带底盘设计参数

Tab.1 Track chassis design parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 970×1 990×1 350
整机满载质量/kg	1 000
轨距/mm	1 520
履带接地长度/mm	1 800
接近角/(°)	35
离去角/(°)	30
最大爬坡角/(°)	25
最高行驶速度/(km·h ⁻¹)	4
作业行数/行	4
导航 RTK 精度/mm	10
导航 GNSS 横滚角/俯仰角精度/(°)	0.4
导航 GNSS 航向角精度/(°)	0.5

注:接近角指整机满载静止时,前轮切线与地面间夹角;离去角指后轮切线与地面间夹角。

选择稳定性和牵引附着性较好的履带式行走底盘,并对其主要结构参数进行设计选型。

2.1.1 轨距、接近角与离地间隙

针对新疆地区机采棉目前广泛采用的“宽早优”种植模式,即行距 X 为 660 mm + 100 mm,株距 Y 为 100 mm^[18]。设计底盘的 2 条履带沿宽行行驶,跨 4 行作业,为确保底盘作业的灵活性,确定底盘轨距 H 为 1 520 mm(图 2); L 为履带接地长度,mm; b 为履带宽度,mm。

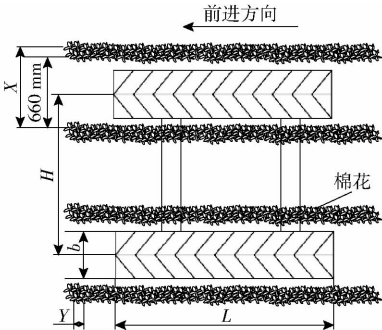


图 2 底盘作业示意图

Fig.2 Chassis operation sketch map

履带底盘接近角与离去角直接影响整机的通过性以及驱动轮与履带的平稳啮合^[19],综合设计要求,确定底盘接近角为 35°,离去角为 30°。

经过前期调研,打顶时期棉花顶尖高度为 600 ~ 1 000 mm,根据打顶装置高度调节需要范围,确定履带底盘采用高地隙结构,最小离地间隙取 1 300 mm。

2.1.2 履带设计

履带接地长度 L 与轨距 H 比值对履带底盘的行驶性能有着重要影响。根据确定的轨距 H 尺寸,参照《拖拉机设计手册(上册)》^[20],履带接地长度 L 计算公式为

$$L = (1.15 \sim 1.39) H \tag{1}$$

履带宽度 b 计算公式为

$$b = (0.18 \sim 0.24) L \tag{2}$$

根据式(1)、(2),参考现有履带规格^[21],选定橡胶履带,接地长度取 1 800 mm,宽度取 180 mm。

2.2 驱动电机选型

履带底盘正常行驶需克服各种阻力,对驱动电机展开选型设计,应保证电机输出功率大于完成工作所需要的最大功率。

2.2.1 直线行驶功率计算

履带底盘在平直路面行驶时的受力简图如图 3 所示, F_t 为驱动电机牵引力, G 为底盘满载时整机重力, F_f 为履带与地面的滚动阻力, F_z 为内摩擦阻力, F_α 为惯性阻力, F_n 为地面对底盘的支持力。

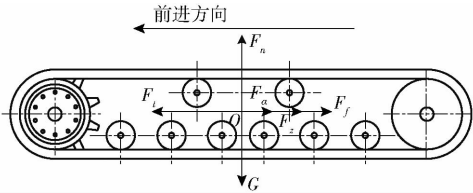


图 3 履带直线行驶时受力简图

Fig.3 Track straight line driving force diagram

根据图 3,可得牵引力 F_t 表达式为

$$F_t = F_f + F_z + F_\alpha \tag{3}$$

参照经验公式^[22-24],底盘行进过程中所受阻力表达式为

$$\begin{cases} F_f = fG \\ F_z = f_z G \\ F_\alpha = f_\alpha G \end{cases} \tag{4}$$

式中 f ——滚动摩擦因数,取 0.12

f_z ——内摩擦阻力系数,取 0.06

f_α ——惯性阻力系数,取 0.02

联立式(3)、(4),得单侧履带所需最大牵引力 F_t 为 2 000 N,则驱动轮转矩 T 和转速 n 计算公式为

$$\begin{cases} T = F_t r \\ \omega = \frac{v}{r} \\ n = \frac{\omega}{2\pi} \end{cases} \tag{5}$$

式中 r ——驱动轮半径,m

v ——底盘满载最大作业速度,m/s

ω ——底盘满载最大作业角速度,rad/s

由式(5)得底盘单侧电机所需输出功率 P_m 为

$$P_m = \frac{KTn \frac{\pi}{30}}{\eta} \tag{6}$$

式中 K ——电机安全系数,取 1.3

η ——传动效率,取 0.95

根据设计要求,履带底盘满载时整机质量取 1 000 kg,驱动轮半径 r 取 0.175 m,底盘满载作业最大速度 v 取 4 km/h。根据式(6),可得单侧电机所需最大输出功率 $P_m=3\,007.79\text{ W}$ 。

2.2.2 坡道行驶功率计算

履带底盘行驶过程中爬坡作业时最大爬坡角 α 取 25° ,底盘在斜坡上爬坡行驶时,受力分析如图 4 所示。

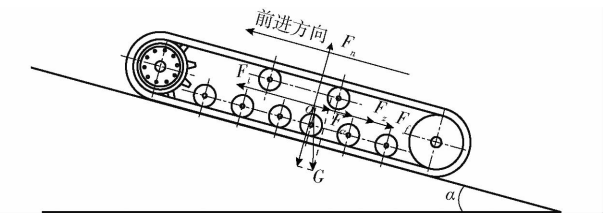


图 4 履带爬坡行驶时受力示意图

Fig.4 Schematic of forces acting on track during climbing

由图 4 可得牵引力公式为

$$F_t = F_f + F_z + F_\alpha + G\sin\alpha \tag{7}$$

根据设计要求,联立式(4)、(5)并代入式(6)、(7),得单侧履带所需最大牵引力为 2 420 N,要实现最大速度满载爬坡,单侧驱动电机所需最大输出功率 $P_m=3\,639.43\text{ W}$ 。

2.2.3 转向功率计算

履带底盘左右履带可以不同速度、方向差速运动实现转向动作。根据经验可得,底盘原地转向所需功率最大^[25],故只对底盘原地转向功率进行估算,所需牵引力为

$$F_t = F_f + F_z + F_\alpha + F_{fz} \tag{8}$$

式中 F_{fz} ——单侧履带转向阻力,N

履带底盘原地转向时,转弯半径 $R=H/2$ 。则履带所需转向阻力为

$$F_{fz} = \frac{1}{2}Gf + \frac{M_z}{H} \tag{9}$$

其中

$$M_z = \frac{1}{6}G\mu L \tag{10}$$

式中 M_z ——履带旋转力矩,N·m

μ ——履带与地面摩擦因数,取 0.7

由式(9)可得,履带底盘实现原地转向所需最小牵引力为 2 738.16 N;根据式(5)、(6),要实现最大速度满载转向,单侧驱动电机所需功率 $P_m=3\,912.01\text{ W}$ 。

2.2.4 电机型号确定

根据上述底盘行驶功率的理论计算结果,结合底盘作业环境、效率及经济性,选用 OKD100-48V3.7-3000 型三相直流无刷电机配合蜗轮蜗杆减速器使用,基本参数如表 2 所示。

表 2 驱动电机参数

Tab.2 Drive motor parameters

参数	数值
额定功率/W	3 700
额定电压/V	48
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
空载转速/(r·min ⁻¹)	3 200
额定电流/A	90
额定扭矩/(N·m)	12
减速比	80

3 自动驾驶控制系统设计

3.1 导航控制系统结构设计

电动履带底盘自动驾驶控制系统硬件结构如图 5 所示,主要由导航控制模块、中控模块、电机驱动模块和遥控模块 4 部分组成。

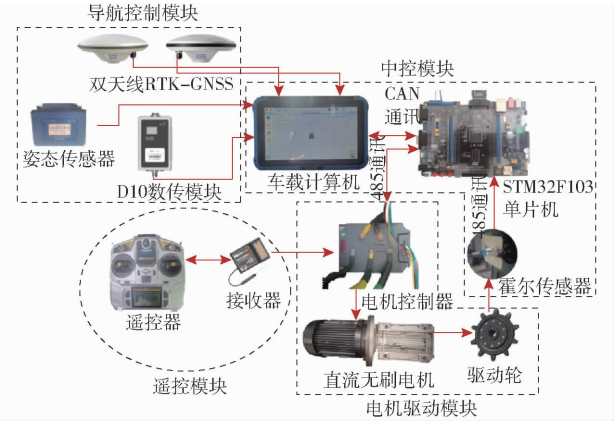


图 5 自动驾驶系统硬件构成图

Fig.5 Hardware diagram of automatic navigation system

导航控制模块选用 AF302 型北斗导航自动驾驶系统,采用高精度 RTK-GNSS 定位测向接收机,搭配有载波相位差分技术,支持双天线定位测向解算;实时获取底盘姿态和位置信息,并根据规划路径得到定位点与预瞄点的曲率偏差。中控模块选定 STM32F103 单片机,与导航模块通过 CAN 总线联网通讯,接收并处理下发的曲率信息,建立双电机履带底盘运动学模型,设计一种基于曲率偏差的模糊控制器,并通过 RS485 串口通讯与电机控制器实现数据传输,决策并实时下发转速命令。同时两侧驱动轮安装霍尔传感器实时监测两侧履带驱动轮转速,并反馈至中控模块进行 PID 算法调节,以保持两侧电机目标转速恒定。电机控制器接收下发的转速命令,对两侧驱动电机转速进行调控,实现履带底盘前进、后退、转向等操作,完成作业路径自动跟踪。遥控模块通过遥控器与接收机信号对频(Microzone7 型遥控器和 MC8RE 型接收机),实时下发不同脉冲

宽度的 PPM 信号至电机驱动器,实现对两侧驱动电机转速调控,也以此实现遥控和自走导航 2 种控制方式的模式切换,导航系统控制流程图如图 6 所示。

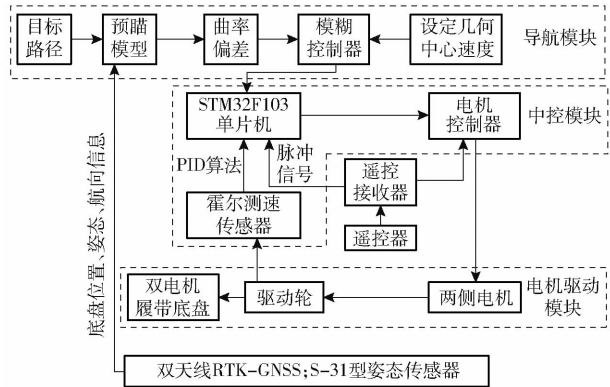


图 6 导航系统控制流程图

Fig. 6 Control circuit diagram of navigation control system

3.2 双电机履带底盘运动学模型

双电机履带底盘作业时近似于做平面运动,建立定参考系 XOY ,并在坐标系中建立双电机履带底盘运动模型,如图 7 所示,底盘左右驱动轮中心点即底盘几何中心点为 $O_c(x, y)$; ω 为底盘几何中心绕形心的角速度, rad/s ; θ 为转向角, $(^\circ)$; S_L 和 S_R 分别为左右两侧履带工作行程, m ; v_l 和 v_r 分别为左右两侧履带速度, m/s 。此时履带底盘位姿信息可用矢量 $\mathbf{P} = [x \ y \ \varphi]^T$ 表示^[26]。

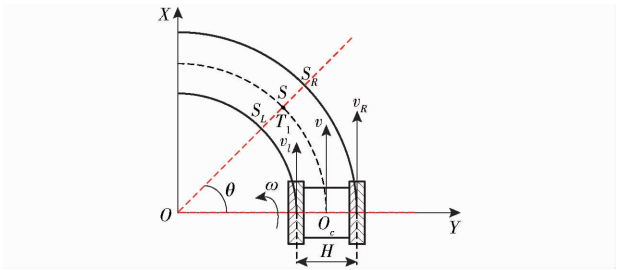


图 7 双电机履带底盘平面运动模型

Fig. 7 Plane motion model of double motor track chassis

履带底盘动力源自左右驱动电机,两侧角速度相同。如图 7 所示,两侧履带到旋转中心的半径不同,则底盘几何中心瞬时速度 v 和角速度 ω 表示为

$$\begin{cases} v = \frac{v_R + v_L}{2} \\ \omega = \frac{v_R - v_L}{H} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11),底盘几何中心转动半径可表示为

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{H}{2} \frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \quad (12)$$

通过上述运动分析,假设底盘驱动轮与地面接触运动为纯滚动无滑移的情况下,运动学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_l \\ v_r \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_R + v_L}{2} \cos \theta \\ \frac{v_R + v_L}{2} \sin \theta \\ \frac{v_R - v_L}{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{H} & -\frac{1}{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据差速驱动方式分析(式(13)), v_l 和 v_r 存在的速度差关系决定底盘 3 种不同的运动状态,如图 8 所示。当 $|v_l| \neq |v_r|$ 时,底盘做圆弧运动;当 $v_l = v_r$ 时,底盘做直线运动;当 $v_l = -v_r$ 时,底盘绕几何中心点原地旋转。

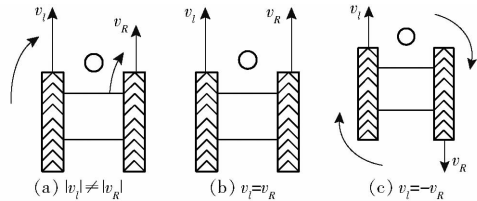


图 8 履带底盘 3 种运动状态示意图

Fig. 8 Schematics of three motion states of track chassis

3.3 导航控制器结构设计

双电机履带底盘自动导航作业时,导航控制模块利用双天线 RTK-GNSS 实时获取底盘位姿和航向信息,与规划路径目标点进行比较得到曲率偏差 ρ ,并引入底盘几何中心速度为控制器输入量;参照双电机履带底盘运动学模型,以 STM32F103 单片机为主控器,提出一种自调节的模糊控制算法,决策得到两侧电机的目标转速 n_2 ,与霍尔测速传感器测得的实际转速 n_1 进行比较,通过增量式 PID 算法得到实际需要的调整转速 Δn ,并下发转速命令到两侧电机控制器,驱动电机完成作业路径自动追踪。控制器结构设计如图 9 所示。

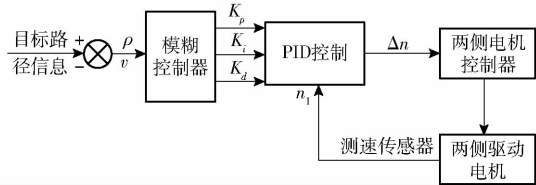


图 9 履带底盘导航控制器结构图

Fig. 9 Crawler chassis navigation control structure

3.4 基于曲率偏差的双输入模糊 PID 控制器设计

3.4.1 模糊 PID 控制算法原理

路径跟踪的实质是通过控制车辆的运动减少车辆与期望路径之间的偏差,且尽量减少纠偏次数。底盘导航作业时,会因履带与地面的滑移产生偏差,使控制效果降低,为提高作业质量和效率,要求农机

自动驾驶系统路径跟踪精度高以及田间作业抗干扰性好^[27]。

本文提出一种基于曲率偏差的双输入模糊 PID 控制算法,算法设定一个位于期望路径及其延长线上不断运动的目标预瞄点 T_1 ,如图 7 所示。若目标点位于车辆几何中心点映射 $\pm 2^\circ$ 的扇形区域内,则履带底盘直线前进;反之,则由导航系统获取定位坐标与目标点的曲率偏差,建立曲率偏差与两侧电机转速关系;通过导航控制系统,转向寻找目标点,靠近目标路径。

3.4.2 双电机 PID 控制器设计

当底盘在田间作业,特别是在湿软田间时,实际速度与目标速度会存在一定偏差,影响路径追踪精度。以 STM32F103 单片机为主控制器,选用增量式 PID 算法,实现左右两侧电机转速的精确控制。而 PID 比例增益参数、积分增益参数和微分增益参数的选择会影响控制器适应性和鲁棒性^[28-29],因此导航控制器以底盘速度误差 Δn 为输入量,3 个增益参数为输出量,其离散化公式为

$$\Delta n = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i(e(k)) + K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (14)$$

式中 K_p ——控制器比例增益
 K_i ——控制器积分增益
 K_d ——控制器微分增益
 $e(k)$ ——第 3 组平均误差
 $e(k-1)$ ——第 2 组平均误差
 $e(k-2)$ ——第 1 组平均误差

每次进行 3 组测试,每组进行多次试验,计算每组平均速度误差,得到最优参数。选用 875 - DIN2N - S2 型霍尔传感器实时获取驱动轮转速,进行多次标定,最终确定最优参数为 $K_p = 4$ 、 $K_i = 9$ 、 $K_d = 0$ 。在该增益参数下,保证两侧驱动电机能快速达到目标转速。

3.4.3 基于曲率输出的模糊控制算法设计

导航作业时,履带和地面间会发生一定滑移,使控制效果降低,因此根据田间滑移后的转向半径与两侧电机转速关系设计模糊控制器。确定以底盘沿目标路径的曲率偏差 ρ 为模糊控制器的输入变量,设定 $\rho > 0$,底盘右转, $\rho < 0$,底盘左转。则底盘做圆周运动时几何中心到圆心半径 R 与曲率之间的关系可表示为

$$R = \frac{1}{\rho} \quad (15)$$

双电机履带底盘直线追踪时,需提前确定 1 条目标导航线,即 AB 线;起点坐标为 $A(x_1, y_1)$,终点为 $B(x_2, y_2)$,则建立底盘路径追踪动模型如图 10

所示, O_R 为底盘旋转中心, ω_l 和 ω_R 分别为左右两侧履带绕几何中心的角速度,rad/s。

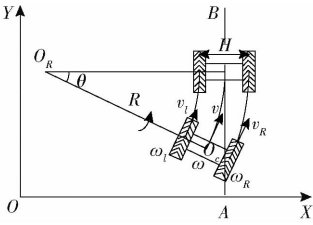


图 10 路径追踪模型
Fig. 10 Path tracking model

如图 10 所示,当履带底盘需偏转回到规划路径时,可近似看作绕圆心 O_R 的圆弧运动,此时有

$$\begin{cases} \omega = \omega_l = \omega_R \\ \omega = \frac{v}{R} = \frac{v_l}{R + \frac{H}{2}} = \frac{v_R}{R - \frac{H}{2}} \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16),将底盘几何中心速度 v 和角速度 ω 转换成左轮速度 v_l 和右轮速度 v_R ,即

$$\begin{cases} v_R = \left(R + \frac{H}{2}\right)\omega \\ v_l = \left(R - \frac{H}{2}\right)\omega \\ \omega = \frac{v}{R} \end{cases} \quad (17)$$

联立式(15)~(17),可得履带底盘两侧驱动电机转速与曲率的关系为

$$\begin{cases} \omega = \rho v \\ v_R = v + \frac{1}{2}\rho H v \\ v_l = v - \frac{1}{2}\rho H v \end{cases} \quad (18)$$

建立模糊控制算法模型,以导航控制模块下发的曲率偏差 ρ 以及底盘几何中心速度 v 为模糊控制器输入量,以底盘角速度和左右两侧电机转速指令作为输出量。其中曲率偏差 ρ 基本论域为 $[-1.4 \text{ m}, 1.4 \text{ m}]$,几何中心速度 v 基本论域为 $[0 \text{ r/min}, 3\,000 \text{ r/min}]$,两侧驱动电机输出速度基本论域均为 $[600 \text{ r/min}, 5\,000 \text{ r/min}]$,3 个参数均采用三角隶属度函数对其模糊化。

曲率偏差 $-0.65 \sim 0.65 \text{ m}$ 为大偏差, $-0.32 \sim 0.32 \text{ m}$ 为中偏差,绝对值大于 0.65 m 为小偏差,根据滑移后的转向半径与两侧电机转速关系制定模糊控制规则和控制量,当底盘位姿为大偏差时,两侧电机转速之差应较大。为减小两侧电机转速之差过大导致的偏差波动,设置底盘位姿为大偏差时,设中心速度小于 $1\,500 \text{ r/min}$,中偏差时为 $1\,500 \sim 2\,500 \text{ r/min}$,小偏差时大于 $2\,500 \text{ r/min}$,以维持底盘保持稳定工作

状态。

按照上述模糊控制算法规则,结合闭环 PID 控制,提出一个基于曲率输出的底盘中心速度可调的模糊 PID 控制算法,可有效减少底盘滑移,实现履带底盘的作业路径自动追踪。此控制算法具有快速响应性,并能在极短时间内实现速度动态调节,具有较强的自主导航行驶能力。

4 试验与结果分析

4.1 试验条件及设备

为检验棉花打顶作业底盘的工作性能,于 2024 年 7 月在新疆维吾尔自治区五家渠市第六师 103 团 1 连棉花种植示范田进行底盘性能和作业试验。

选择打顶期棉株为作业对象,试验仪器包括皮尺、卷尺、钢板尺、MPU6050 型姿态传感器、干燥箱、土壤坚实度测试仪和角度测量仪等。参照 GB/T 5262—2008《农业机械 试验条件测定方法的一般规定》,进行底盘工作参数试验。

4.2 性能试验

根据棉花打顶专用底盘设计目标,分别对行驶偏移率、爬坡性能等指标进行履带底盘性能试验。

4.2.1 直线行驶偏移率试验

在试验棉田选取长度大于 20 m 的路段,并标记起始线和终点线,不进行导航控制,保持直行状态,中途不进行方向变换,对动力底盘进行偏移率试验。每次取 20 m 测试长度,分别记录初始点、结束点与参考线距离,使用秒表分别记录不同速度所需时间,每组重复 3 次试验,进行偏移率计算,计算式为

$$P = \frac{|L_1 - L_2|}{D} \times 100\% \tag{19}$$

式中 P ——底盘偏移率, %
 L_1 ——初始点与参考线距离, mm
 L_2 ——结束点与参考线距离, mm
 D ——行驶直线长度,取 20 m

试验结果如表 3 所示,底盘在电机最大转速 4 000 r/min 时,横向偏差达到最大,最大横向偏差为 440 mm,最大平均偏移率为 1.98%;参照 GB/T

表 3 直线行驶偏移率试验结果

Tab.3 Test results of deviation rate of straight line driving

电机转速/ (r·min ⁻¹)	棉田路偏移量/mm			平均横向 偏移率/%
	试验 1	试验 2	试验 3	
1 000	160	180	190	0.98
2 000	210	300	220	1.22
3 000	300	370	390	1.87
4 000	430	320	440	1.98

15370.4—2012《农业拖拉机 通用技术条件 第 4 部分:履带拖拉机》,最大偏移率均小于国家标准规定的 6%。

4.2.2 爬坡试验

动力底盘主要工作场景为新疆地区沙土地,存在上下坡、坡道转弯。为检验底盘爬坡适应性,在底盘机架上方搭载打顶装置,随机选取坡度 10°~25°坡面进行试验,如图 11 所示。



图 11 爬坡试验
Fig. 11 Climbing test

底盘爬坡试验时,整机以最大行驶速度平稳驶向坡面,当通过坡面后使用角度测量仪测量对应坡面角度。试验结果表明整机可顺利通过 10°、15°、20°、25°坡面,且稳定性较好,满足棉花打顶作业要求。

4.3 作业试验

为验证履带底盘搭载的自动导航控制系统可靠性和合理性,于 2024 年 7 月晴朗天气条件下,在新疆维吾尔自治区五家渠市第六师 103 团 1 连棉花种植示范田进行验证试验,如图 12 所示。采用五点取样法测得土壤含水率为 6.65%~17.56%,土壤坚实度为 221~646 kPa。



图 12 田间试验
Fig. 12 Field trial

4.3.1 路径追踪试验

试验预先在工作地块选用 R26 一体化北斗/GNSS 接收机,确定导航路径起始坐标点 A 和终止坐标点 B,并根据点 A、B 坐标生成工作路径。履带底盘试验时设置初始航向角偏差为 15°,横向距离偏差为 30 mm,每次试验距离 25 m。

图 13 为田间路径跟踪效果(横向偏差),在从初始位置快速上线到目标路径的过程中平均纠偏次

数为 1.8 次,行驶过程均稳定在目标线附近,整个过程导航平均绝对偏差为 15.3 mm。

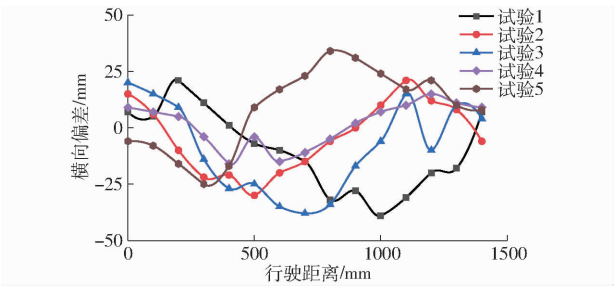


图 13 田间路径跟踪横向偏差变化曲线
Fig. 13 Field path following lateral deviation change curves

试验结果如表 4 所示,双电机履带式底盘在棉田的横向最大绝对偏差不超过 39 mm,标准差不超过 18.5 mm,偏差远小于底盘自身性能试验直线行驶偏移量,参照 GB/T 37164—2018《自走式农业机械导航系统作业性能要求及评价方法》,自主导航控制系统最大绝对偏移小于国标要求的 50 mm,满足国家标准和棉花打顶作业要求。

表 4 路径追踪试验结果 Tab. 4 Result of path tracing test					
试验序号	最大绝对偏移/mm	平均绝对偏移/mm	平均绝对偏移率/%	标准差/mm	纠偏次数
1	39	17.5	0.070	17.5	2
2	30	13.4	0.053	14.7	1
3	38	18.5	0.075	18.5	3
4	16	8.60	0.034	9.7	1
5	34	18.6	0.074	18.1	2

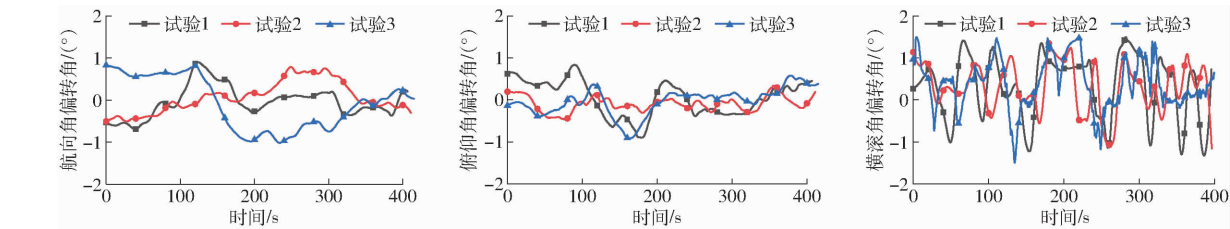


图 14 打顶装置偏转角度变化曲线
Fig. 14 Deflection angle change curves of topping device

5 结论

- (1)针对新疆地区机采棉种植模式,为满足棉花行走底盘通过性好、稳定性高和操作灵活的作业要求,设计了一种双电机高地隙履带式底盘,并对整机和关键部件进行了结构设计和参数确定。
- (2)以 STM32F103 单片机为主控器,加入导航控制模块和电机驱动模块,设计了能够实现作业路径自动追踪的模糊导航控制器。参照履带平台运动学模型,提出了一种基于曲率偏差的自调节模糊

4.3.2 底盘运动稳定性试验

保证棉花打顶装置稳定性是履带底盘的主要设计目的,要求底盘运行过程对打顶装置产生很小的晃动,提高棉花打顶作业效率。在打顶装置执行机构上方安装姿态传感器,实时监测底盘行走过程中打顶装置的角度变化,对底盘行驶过程中执行装置的偏转角度和波动程度进行试验。

选用 WT901BC 型九轴姿态角测量传感器,安装在打顶机构正上方,通过 TTL 串口通信以频率 200 Hz 记录姿态变化数据,间隔 400 s 为一组数据。试验结果如表 5 所示,航向角最大绝对偏转角为 1.03°,横滚角为 1.49°,俯仰角为 1.06°。图 14 为 3 个角度姿态变化曲线,行驶过程各角度波动均围绕在 0°线附近,航向角平均偏转角为 0.38°,横滚角平均偏转角为 0.33°,俯仰角平均偏转角为 0.26°,均能够满足棉花打顶作业的稳定性要求。

表 5 底盘运行稳定性试验结果 Tab. 5 Stability test results of topping device (°)			
姿态角	试验序号	平均绝对偏转角	最大绝对偏转角
横滚角	1	0.39	1.49
	2	0.29	1.48
	3	0.32	1.45
航向角	1	0.30	1.02
	2	0.30	0.90
	3	0.55	1.03
俯仰角	1	0.37	1.06
	2	0.17	0.56
	3	0.25	0.99

- PID 控制算法,能实现底盘行驶速度在极短时间内动态调节,提高履带式移动平台的田间导航作业精度。
- (3)以打顶期棉田为作业对象,分别开展底盘性能和作业试验,结果表明:底盘田间自主导航作业时,最大绝对偏差不超过 39 mm,标准差不超过 18.5 mm,平均绝对偏差为 15.3 mm,且工作过程中搭载的棉花打顶装置航向角平均偏转角为 0.38°,横滚角平均偏转角为 0.33°,俯仰角平均偏转角为 0.26°,满足棉花打顶作业对行走底盘的技术要求。

参 考 文 献

[1] 刘照启,张蔚然,刘海涛,等. 棉花打顶技术应用现状与发展趋势[J]. 现代农村科技, 2020(7): 16.

[2] 谢庆,孔凡婷,石磊,等. 棉花机械打顶关键技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(3): 28–34.
XIE Qing,KONG Fanting,SHI Lei, et al. Research progress on key technologies of cotton mechanical topping[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 28–34. (in Chinese)

[3] 王刚,韩焕勇,王旭文,等. 不同化学打顶剂对新疆棉花群体质量的影响[J]. 中国棉花, 2021, 48(10): 21–24.
WANG Gang,HAN Huanyong,WANG Xuwen, et al. Effect of different chemical topping agents on the population quality of cotton in Xinjiang[J]. China Cotton, 2021, 48(10): 21–24. (in Chinese)

[4] 崔延楠,韩文婷,聂志勇,等. 不同密度下三种打顶方式对棉花株型结构及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(11): 1968–1976.
CUI Yannan,HAN Wenting,NIE Zhiyong, et al. Effects of three topping methods on cotton plant type structure and yield at different densities[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(11): 1968–1976. (in Chinese)

[5] 邓亚辉,宁硕. 新疆北部地区棉花打顶时机及田间管理措施[J]. 新疆农业科技, 2020(6): 5–6.

[6] 周桂鹏. 基于高地隙通用底盘的棉花打顶机设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
ZHOU Guipeng. Design of cotton topping machine based on high-distant universal frame[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[7] 刘正波,鲍义东,卢智琴,等. 棉花打顶机器人高地隙移动平台机构优化设计[J]. 数字通信世界, 2021(1): 76–78,209.
LIU Zhengbo,BAO Yidong,LU Zhiqin, et al. Optimal design of high ground clearance mobile platform mechanism of cotton topping robot[J]. Digital Communication World, 2021(1): 76–78,209. (in Chinese)

[8] 韩长杰,燕长辉,仇世龙,等. 基于机器视觉的双圆盘式棉花打顶装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 36–46.
HAN Changjie,YAN Changhui,QIU Shilong, et al. Design and experiment of double disc cotton topping device based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 36–46. (in Chinese)

[9] XU Y,HAN C J,ZHANG J, et al. Innovative designs for cotton bionic topping manipulator[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1469.

[10] XU Y,HAN C J, QIU S L, et al. Design and experimental evaluation of a minimal-damage cotton topping device[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 2341.

[11] 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1–10.
HU Jingtao,GAO Lei,BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1–10. (in Chinese)

[12] 赵状状,张国忠,罗承铭,等. 考虑滑移滑转的双电机履带底盘路径跟踪算法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 46–54.
ZHAO Zhuangzhuang,ZHANG Guozhong,LUO Chengming, et al. Path tracking algorithm of the dual motor tracked chassis considering skid and slip[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 46–54. (in Chinese)

[13] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1–18.
ZHANG Man,JI Yuhan,LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1–18. (in Chinese)

[14] HUANG P C,ZHANG Z G,LUO X W, et al. Path tracking control of a differential-drive tracked robot based on look-ahead distance[J]. IFAC PapersOnLine, 2018, 51(17): 112–117.

[15] TAKAI R,YANG L,NOGUCHI N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK–GPS and IMU[J]. Engineering in Agriculture Environment & Food, 2014, 7(4): 143–147.

[16] 丁幼春,何志博,夏中州,等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 12–20.
DING Youchun,HE Zhibo,XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 12–20. (in Chinese)

[17] 王伟康,罗承铭,张国忠,等. 双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验[J]. 华中农业大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 199–207.
WANG Weikang,LUO Chengming,ZHANG Guozhong, et al. Design and experiment of automatic navigation system for rice harvester with dual-motor crawler chassis[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(2): 199–207. (in Chinese)

[18] 左文庆. 灌溉方式和株行距配置对膜下滴灌棉花光合物质生产及机采脱叶的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
ZUO Wenqing. Effects of irrigation methods and row spacing configuration on photosynthetic production and defoliation of machine-harvested cotton under mulch drip irrigation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)

[19] 王德成,赵彦瑞,尤泳,等. 履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 178–187.
WANG Decheng,ZHAO Yanrui,YOU Yong, et al. Design and experiment of self-propelled tracked chassis of king grass harvester for gentle sloping fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 178–187. (in Chinese)

fluid-solid coupling[J]. China Rubber Ind. , 2012,59(5):300 – 303. (in Chinese)

[31] 袁春元,周孔亢,吴琳琪,等. 车用空气弹簧有限元分析方法[J]. 机械工程学报, 2009,45(6):262 – 266.
YUAN Chunyuan, ZHOU Kongkang, WU Linqi, et al. Finite element method to analyze vehicle air spring[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(6):262 – 266. (in Chinese)

[32] 徐艳民,郝伟. 基于 Abaqus 的悬架空气弹簧静态力学特性研究[J]. 橡胶工业, 2015,62(1):41 – 44.
XU Yanmin, HAO Wei. Analysis on static mechanical properties of air spring based on Abaqus[J]. China Rubber Ind. , 2015,62(1):41 – 44. (in Chinese)

[33] 屠德新,黄昌文,陈毛权,等. 基于 ABAQUS 的帘线参数对汽车空气弹簧垂向刚度影响的研究[J]. 汽车技术, 2011(2):10 – 13.
TU Dexin, HUANG Changwen, CHEN Maoquan, et al. Study on the influence of cord parameters on the vertical stiffness of air springs for vehicles based on ABAQUS[J]. Automobile Technology, 2011(2):10 – 13. (in Chinese)

[34] 杨泽彪. 车用膜式空气弹簧承载特性建模与试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
YANG Zebiao. Research on modeling and testing of bearing characteristics of vehicular rolling lobe air spring[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)

[35] 李静,丁明慧,李立刚,等. 基于活塞形状的空气弹簧动特性分析与参数优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(2):355 – 363.
LI Jing, DING Minghui, LI Ligang, et al. Dynamic characteristics analysis and optimization of air spring based on the piston shape[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018,48(2): 355 – 363. (in Chinese)

(上接第 129 页)

[20] 洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[21] 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 – 127,201.
LI Shanjun, CHEN Huilong, PENG Jibo, et al. Design and test of hydraulic remote control crawler power chassis for hilly and mountainous orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 119 – 127,201. (in Chinese)

[22] 吴亚. 液压挖掘机履带底盘行驶性能虚拟样机仿真及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WU Ya. Virtual prototype simulation and experimental study on travelling performance of track chassis of hydraulic excavator [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

[23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[24] 刘莫尘,梁文倩,肖化超,等. 履带式自走水力采藕机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 61 – 70.
LIU Mochen, LIANG Wenqian, XIAO Huachao, et al. Design and experiment of crawler-type self-propelled hydraulic lotus root harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2): 61 – 70. (in Chinese)

[25] 粟生强. 丘陵山地果园小型除草机的结构设计及仿真分析[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
SU Shengqiang. Structure design and simulation analysis of small weeding machine in hilly and mountainous orchards[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023. (in Chinese)

[26] 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.
JIANG Yi. Research on key technology of automatic navigation for inspection robot in watermelon shed[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2024. (in Chinese)

[27] 钟银,薛梦琦,袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 40 – 46.
ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(9): 40 – 46. (in Chinese)

[28] 倪博文. 水田作业机器人导航控制系统设计[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
NI Bowen. Design of navigation control system for paddy field operating robot[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)

[29] 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: 1 – 17.