

农业履带底盘关键技术研究现状与展望

孙景彬¹ 曾令坤¹ 应婧^{2,3} 郑航^{4,5} 孙群¹ 孟宪哲¹

(1. 聊城大学机械与汽车工程学院, 聊城 252000; 2. 农业农村部丘陵山地农业装备技术重点实验室, 成都 610066;
3. 四川省农业机械科学研究院, 成都 610066; 4. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 杭州 310021;
5. 浙江省农业科学院农业装备研究所, 杭州 310021)

摘要: 农业履带底盘具有接地比压小、爬坡越障性能好、转弯机动灵活等优点, 已经广泛应用于耕、种、管、收、运等农业生产的各个环节, 并逐步向自动化、智能化的方向发展。本文从农业履带底盘应用情况、稳定性理论及控制技术、驱动系统与转向技术、自主导航与智能控制技术以及农业履带底盘-土壤相互作用理论等方面阐述国内外的研究成果, 着重归纳总结稳定调平、高效传动、平稳转向、自动驾驶等技术在农业履带底盘上应用的进展, 并结合不同作业环节阐明了农业履带底盘在相关领域应用的特点, 最后根据我国当前以及未来农业履带底盘的需求, 从加强高稳定性行走系统优化、高效传动与灵便转向系统创制、自动驾驶与智能化管控技术、履-土系统基础理论研究等方面对农业履带底盘的未来发展方向进行了展望。

关键词: 农业履带底盘; 稳定性; 驱动转向; 自主导航; 智能化控制

中图分类号: S219.2; S22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)11-0202-19

OSID:



Research Status and Prospect of Key Technologies of Agricultural Track Chassis

SUN Jingbin¹ ZENG Lingkun¹ YING Jing^{2,3} ZHENG Hang^{4,5} SUN Qun¹ MENG Xianzhe¹

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology for Hilly and Mountainous Areas,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610066, China

3. Sichuan Academy of Agricultural Machinery Sciences, Chengdu 610066, China

4. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China
(Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021, China

5. Institute of Agricultural Equipment, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: In view of its advantages such as small ground pressure, good climbing performance and flexible turning, agricultural track chassis is currently a mobile agricultural power machinery widely recognized by farmers, which has been widely used in various aspects of agricultural production such as farming, planting, field management, harvesting, transportation, and gradually developing in the direction of automation and intelligence. The development status at home and abroad was mainly expounded from the application of agricultural track chassis, stability theory and control technology, drive system and steering technology, autonomous navigation and intelligent control technology, and agricultural track chassis-soil interaction theory. The application progress of stable leveling, efficient transmission, smooth steering and autonomous driving in agricultural track chassis was summarized. Combined with different agricultural operations, the application characteristics of agricultural track chassis in related fields were illustrated. At last, according to the current and future needs of agricultural track chassis in China, the future development direction of agricultural track chassis was prospected from the aspects of strengthening the optimization of high-stability walking system, creating efficient transmission

收稿日期: 2024-08-15 修回日期: 2024-09-01

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023QC036)、农业农村部丘陵山地农业装备技术重点实验室开放项目(2023KLOP04)、农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建)开放项目(QSKF2023003)、博士科研启动基金项目(318052232)和聊城大学冲一流强特色学科项目(319462208)

作者简介: 孙景彬(1992—), 男, 讲师, 博士, 主要从事智能农机装备与技术研究, E-mail: sunjingbin0208@163.com

and flexible steering system , overcoming the technology of autonomous driving and intelligent control , and researching the basic theory of track – soil system. The research result can provide a good reference for the future technical research of agricultural track chassis.

Key words: agricultural track chassis; stability; drive steering; autonomous navigation; intelligent control

0 引言

“十三五”期间,我国农业机械化迈入了向全面全面高质高效转型升级的发展时期,农业生产从主要依靠人力畜力转向主要依靠机械动力新的阶段^[1]。2022 年,全国农作物耕种收综合机械化率达 73.11%,全国农机总动力达到 1.106×10^9 kW,拖拉机拥有量 2 144.07 万台、配套农具 4 029.14 万部,其中大、中型拖拉机拥有量同比分别增长 12.47%、4.24%,与大中型拖拉机配套农具数量同比增长 9.65%,谷物联合收获机、玉米收获机、水稻插秧机拥有量分别达到 173.11 万台、63.80 万台、98.79 万台,大功率无级变速拖拉机、大喂入量联合收获机等大型高端智能农机装备相继投入农业生产^[2]。当前拖拉机、收获机以及自走式作业底盘的行走系统主要是轮式和履带式,因履带式底盘具有负重能力强、接地比压小、附着性能佳、转弯半径小、越野性能强等优点,目前被广泛应用于农业生产。2022 年中央一号文件明确指出“重点支持粮食烘干、履带式作业、玉米大豆带状复合种植、油菜籽收获等农机,推广大型复合智能农机”,由此可见,履带式拖拉机、收获机和作业底盘在动力机械行走中起主导作用。

农业履带底盘是集成驱动装置、行走系统、液压系统、转向制动装置、电-液-控系统、导航系统于一体的高稳定性、高越障性移动平台,可以自走承载、悬挂牵引多种形式的农机具,来完成特定环节中的生产作业任务,因此,底盘的性能直接决定了机器的作业效率和质量^[3]。底盘在油驱、电驱或液驱动系统的动力提供下,保证高稳定性行驶的同时,要能够在简单或者复杂的工况下挂接不同功能的作业机具或装置,从而实现高质量的耕、播、管、收、运等生产环节作业。因此,农业履带底盘技术的发展关乎我国农业智能化水平的发展和农业现代化的进程。

近年来,国内外学者从“高稳定性、高灵便性、高传动效率、高导航精度、高度智能化”等角度出发,对履带底盘的行走系统设计、转向系统优化、驱动系统匹配、导航算法构建、智能管控创新等方面开展系统性研究并取得了创新性成果。本文从农业履

带底盘应用情况、稳定性理论及控制技术、驱动系统与转向技术、自主导航与智能控制技术以及农业履带底盘-土壤互作理论等方面阐述国内外的发展现状,着重归纳总结稳定调平、高效传动、平稳转向、自主驾驶等技术在农业履带底盘上应用的进展,并结合不同农业作业环节阐明农业履带底盘在相关领域应用的技术原理和特点,根据我国当前以及未来的需求对农业履带底盘技术发展方向进行展望,为现代智能农机装备底盘的优化设计提供参考。

1 农业履带底盘技术应用与研究现状

1.1 履带拖拉机国外产品

国外企业和科研院所对履带式作业底盘的研发起步较早,研发出各具特点的履带式拖拉机和履带作业底盘,均具有较好的牵引附着性能和越野性能。德国芬特公司生产的 1167 型履带拖拉机(图 1),是全球量产最大功率的无级变速履带拖拉机,该机扭矩大,用途广,并且接地面积可达 4.2 m^2 ,对土壤的压实作用小,具有很好的牵引附着性能。



图 1 德国芬特公司生产的 1167 型无级调速履带拖拉机

Fig. 1 1167 type stepless speed crawler tractor produced by German Fent Company

意大利 BCS 公司生产的 Sky - Jump - V950 型

履带式拖拉机^[4](图2),采用前轮胎后橡胶履带型式,适用于果园、茶厂、苗圃等复杂地形的作业。采用 DUALSTEER 型双向转向系统,将拖拉机底盘中央铰接系统和前轮机构连接在一起,该技术结构可以使拖拉机的转弯角度(理论值)达到 70°,极大地减小了拖拉机的转弯半径。同时,该拖拉机具有短轴距和低重心的特点,使得其在陡峭的斜坡环境下表现出较为优越的牵引力、稳定性、机动性和安全性^[5]。

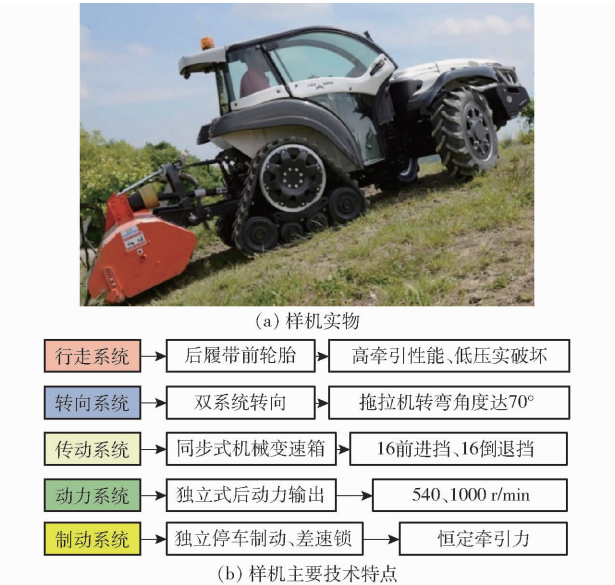


图2 意大利 BCS 公司的 Sky-Jump-V950 型拖拉机
Fig. 2 Sky-Jump-V950 tractor of Italy BCS Company

美国大型农机企业凯斯公司和约翰迪尔公司研发生产了大功率履带拖拉机,其中,凯斯公司生产的 Steiger 715 型四履带拖拉机(图 3a)实现无级变速器、铰接式转向,匹配了具有节油技术自主知识产权的凯斯 IH FPT 发动机,APM 控制变速器在负载变化时自动升降挡,极大提高生产效率,底盘内置履带自动张紧系统,延长履带使用寿命。美国约翰迪尔公司生产的 9470RX 型四履带拖拉机(图 3b)采用 13.5L PowerTech 发动机,18 速的全负载动力换挡系统,具有全新悬浮系统的驾驶室,以及 AutoTrac 驾驶系统和 JDLink 故障诊断系统,稳定高效的传动系统和底盘,可以有效提高该拖拉机在潮湿或松软土地上的附着和牵引能力,并减轻对土壤的损坏。

此外,欧洲国家在小型履带作业底盘方面开展了相关产品的研发应用,例如,丹麦 TIMAN 公司制造的 TIMAN RC-51 型履带割草机(图 4a),在大坡度行驶或者意外停车时,机器具备自动的保护措施。两侧履带能够使车辆与地面始终保持较大的接触面积,从而确保更强的驱动力和稳定性。意大利 Green Climber 公司的 LV 800 PRO 型履带式底盘(图 4b),具有液压履带宽度调节功能(1 300~1 700 mm),避免侧翻的



图3 美国大型农机公司生产的典型履带拖拉机
Fig. 3 Typical track tractor produced in the United States



图4 欧洲国家生产的典型履带式作业底盘
Fig. 4 Typical agricultural track chassis produced in European countries

危险,极低的重心(470 mm),独特的边坡稳定性可在高达 60°倾斜坡度自如作业,MDB 发动机润滑技术可在高达 60°的陡坡上无故障连续使用,快速耦合系统方便快速更换机具。

综上,国外履带拖拉机和履带底盘的研发水平相对较高,着重针对履带拖拉机或底盘的高效传动技术、转向技术、制动技术、土壤低压实技术开展了研究,并且对整机进行集成创制。多数履带拖拉机的机型体积偏大,大规模种植农业环境中比较适宜,在我国部分地区小农户生产(户作)的作业环境中难以应用。履带式作业底盘的样机研发主要集中对稳定高效行驶、安全制动以及农具快速换装技术进行了研究,并实现遥控操作,提高了操纵便捷性,主要在除草、施药等田间管理环节应用比较多。

1.2 履带拖拉机国内产品

国内农机企业对履带式拖拉机进行了相关的研发制造,目前已经批量生产并在农机市场占有率较高的履带拖拉机生产企业有中国一拖、潍柴雷沃、湖南农夫等公司,所生产的产品具有较高的稳定性和可靠性。其中,中国一拖生产的东方红 CH2202 型大功率履带拖拉机(图 5),采用全架式非承载车身系统,抗载能力强,最高车速达 32 km/h,挡位分布适用多种作业需求,电比例差速转向系统实现 360°原地转向。

三角履带拖拉机,采用三角形履带行走结构,具有离地高、灵活轻便、通过性好等优点,配套无级变速系统,驾驶操作安全舒适。适用于果园、菜地、丘陵、山地、大棚、平原、旱地等多种地形环境。对于该类型的履带拖拉机,国内的多个企业进行了研发生产与推广应用,典型机型如图 6 所示。



图 5 中国一拖公司生产的 CH2202 型大功率履带拖拉机
Fig. 5 CH2202 high-horsepower crawler tractor produced by YTO Group corporation



(a) 基于“液压差高装置”的小型山地履带拖拉机
(b) 基于“平行四杆机构”的全向调平地履带拖拉机

图 7 西北农林科技大学研发的山地履带拖拉机
Fig. 7 Hillside crawler tractor developed by Northwest A&F University



(a) 雷沃欧豹M1002型履带拖拉机 (b) 东方红CG902型履带拖拉机



(c) 湖南农夫702型履带拖拉机 (d) 重庆鑫源SR1002型履带拖拉机

图 6 国内典型三角履带拖拉机

Fig. 6 Typical triangular track tractor in China

三角履带拖拉机由于采用三角形履带结构,拥有更好的通过性能,在坡度较大或道路崎岖的地形,可以更好地保持稳定,方便驾驶员操作。此外,三角履带拖拉机的履带宽度相对较窄,因此受到的地面压力较大,可以在较软的地面提供更高的牵引力。一般采用液控行星差速转向机构,方向盘操控,实现左右履带正反转,转弯半径小壅泥少,操纵轻便灵活。传动方面多采用直列式变速箱与发动机直联,啮合式变速机构,变速范围宽,传动效率高,牵引功率大,油耗低。该类履带拖拉机具有很好的推广应用前景。

国内的科研院所和高校也在履带底盘技术方面开展创新实践,其中,西北农林科技大学丘陵山地农机装备团队^[6-8]研发了具备姿态调平功能的系列山地履带拖拉机(图 7),显著提高了其坡地作业的稳定性和安全性,并具备配套农具的坡地自适应仿形作业功能,试验结果表明,相关机型在坡地可较好地实现仿形旋耕、播种和喷药等作业。此外,整机集成遥控技术,实现人机分离,大大提高了操作便捷性和安全性。

由此可见,国内相关农机企业和科研院所针对不同的作业场景,在履带拖拉机研发方面均取得较

好的进展,包括大、中、小不同功率的机型,未来应着重加大丘陵山地等特殊非结构化作业场景中履带拖拉机的研发推广应用力度,有效提高农业综合生产效率。

1.3 履带作业底盘国内研究成果

目前,我国农业生产已经进入耕、种、管、收、运等各生产环节“机器换人”的新时代,农业机械正向全程、全面、高质量阶段发展。随着农业现代化进程的推进,农业机械的高效利用成为提升农业生产效率的关键因素,履带底盘作为一种特殊的农业机械,相比于轮式底盘,其接地面积大、接地压强小、牵引附着性能好,在恶劣苛刻的农业生产环境下展现出更强的适应性和稳定性,尤其是在泥泞、陡坡、崎岖不平的地面作业时能够显著提高农业生产效率。因此,近年来履带底盘得到了深入研究,取得了一系列研究成果。

基于履带底盘实现耕、种、管理方面的研究有:廖庆喜等^[9]针对稻油轮作区播种作业时因机具沉陷打滑影响播种质量的问题,研发了一种以履带式联合收获机为动力平台的油菜直播机,一次作业实现秸秆还田、旋耕、开沟以及播种覆土等工序,减少了进地频率,提高了效率。丁幼春等^[10]研发了小型履带式油菜播种机,并对转向系统进行改进,设计了基于免疫 PID 的导航控制器,满足在黏湿土壤、小地块智能化播种的要求。赵智宇等^[11]针对常规除草方式在丘陵果园环境中效率低的问题,设计了一种液压驱动的果园除草机器人履带底盘,采用自抗扰闭环控制算法来实现运动控制,提高了除草效率和准确性。张青松等^[12]针对雪茄烟叶田间管理的相关要求,结合烟叶植株生长特征和履带底盘转向灵便性好的优点,设计了一种遥控履带自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机,试验验证其满足雪茄烟叶植保要求。刘莫尘等^[13]研发了桑园自走式变比配肥定向撒肥机(图 8),结合工作条件和农艺要求对履带式行走机构进行了设计,该机具可在较高郁闭度的环境工作,提高了桑园机械化管理水平。



图8 桑园自走式撒肥机

Fig.8 Self-walking fertilizer spreader for mulberry garden

基于履带底盘实现收获和运输方面的研究有：万星宇等^[14]设计了全液压驱动的高地隙履带自走式条铺油菜割晒机，底盘采用龙门结构并以较低的左右载物平台实现负载，降低了重心，增强了稳定性。崔志超等^[15]设计了温室用小型多功能电动履带作业平台，能在温室环境完成行走、转弯、升降及挂接运输作业，其双工作模式控制系统可实现远程和在线操作。辛尚龙等^[16]针对中国北方旱地全膜双垄沟播玉米种植方式，设计了玉米茎穗兼收履带式联合收获机，提高了田间垄上行走作业的稳定性的。祝露等^[17]针对林草种植模式中因林木间距小、地表不平导致牧草收获困难的问题，设计了履带式林间草带收割机，具备幅宽小、转弯灵活的优点，在复杂地形下具有较好的通过性。史瑞杰等^[18]为解决在丘陵山区小地块、狭窄道路大型联合收获机工作困难的问题，研究了履带式丘陵山地胡麻联合收获机，在复杂工况下工作平稳，总损失率较小，满足胡麻机械化收获的要求。曾山等^[19]结合再生水稻的农艺要求以及普通收获机履带底盘碾压率高的问题，设计了全液压驱动的三角履带式再生稻收割机底盘，试验验证了设计的可行性。耿端阳等^[20]针对丘陵山区地块小、坡地多等因素制约玉米机械收获的问题，设计了履带式玉米收获机(图9a)，可在坡地改变履带的跨距进而调整重心，提高了底盘在复杂地形的适应能力，降低侧翻风险。王德成等^[21]结合王草收获农艺要求和当前王草收获机动力不足等问题，优化设计了履带自走式王草收获机专用底盘(图9b)，采用倒梯形的橡胶履带行走机构和HST无级变速驱动装置，设计选型液压助力转向系统和车架适应小地块、缓坡地的地形特征。

综上所述，履带作业底盘技术已经被广泛应用于耕、种、管、收、运等各种现代农业机械中，专家学者针对不同作物的种植农艺要求，有针对性地对履带底盘的行走系统进行优化设计，使其能够更好地适应作业需求；驱动动力方面向高效节能低排放方向发展，液压驱动具有便于实现智能控制、简化传动系统的优点，是目前的主流驱动方式，新能源驱动、



(a) 履带自走式玉米收获机



(b) 履带自走式缓坡地王草收获机

图9 典型履带式收获机

Fig.9 Typical crawler harvester

电驱系统也逐步在履带式农用机械上得到应用；农业机械实现一机多用可以有效提高机器的利用率，目前有专家学者研究可以实现耕地、播种、收获等作业机具模块化挂接的先进技术，研制出多功能一体化履带作业底盘机型，提高了动力底盘的通用性和工作效率；传感技术、自动控制技术、卫星定位导航技术等也在履带式底盘上得到广泛应用，提高了农业生产的质量，使我国农业生产不断向智能化、精细化、精准化方向发展。

然而，目前关于履带式农业底盘的研究尚存在一些不足之处：一方面，履带底盘在某些复杂地形如丘陵山区的稳定性和适应性还有待提高，以满足不同恶劣工况对作业性能的要求；另一方面，目前大部分研究是将履带底盘技术应用于农作物的收获作业环节，耕种、播种、田间管理等环节的履带底盘技术应用有待于进一步加强，因此，在未来的农业生产的各环节中，应充分结合履带底盘的多方面优势，加强其在耕、种、管、收、运的全程全面应用。具体需要在以下方面进行完善：进一步优化履带底盘行走系统的结构改进设计，提高其稳定性和地形适应性；逐步加强对驱动动力系统、转向系统、作业系统的最优化匹配研究，提升其可靠性和使用寿命；深度融合智能控制与自主导航技术，实现履带底盘的智能控制和自动化作业，从而更好地适应农业现代化的发展需求。

2 农业履带底盘稳定性理论与调控技术

履带式底盘作为农业机械的重要组成部分，其特殊的结构设计使得能在各种湿滑、松软、不平坦地面上具有出色的稳定性。然而，随着工作环境复杂性和作业要求的不断提高，履带拖拉机的稳定性控制问题愈发凸显，成为行业发展的关键技术。履带拖拉机稳定性是指在作业过程中抵抗外界干扰的能力，主要取决于履带系统、动力系统、操作控制等多方面的综合作用。

2.1 履带底盘稳定性理论及预测模型

复杂地形对履带拖拉机通过性、稳定性和安全性提出挑战。在复杂和地势突变的农田环境中，履带底盘也容易发生滑移、侧翻和后翻等危险事故，因

此其在爬坡、下坡、跨越农田田埂壕沟等障碍物、等高线作业以及坡地转向时的性能有待进一步提高。诸多学者通过建立数学模型、模拟仿真和实地试验等方法,对履带底盘的稳定理论和行驶作业性能进行研究,以提高其作业效率和安全性,促进农业高质量发展。

MOU 等^[22]研究了丘陵果园通用底盘通过性,通过运动学理论分析出最大爬坡度、跨越垂直障碍物高度和沟槽宽度等参数;借助 Recurdyn 多体动力学仿真分析了不同地形下的行驶、越障及跨沟性能,并通过实地试验验证了理论和仿真的准确性。LI 等^[23]研究了拖拉机在动态侧翻时的稳定性指标,在三维参考坐标系建立考虑车体配置和运动特性的数学模型,推导出侧翻和滑移稳定性影响因素,确定了不同地面条件下的临界速度。JIANG 等^[24]构建了拖拉机和农具的 3D 仿真模型,通过设置不同路面条件得出拖拉机侧翻和后翻的临界速度,分析了导致侧翻和后翻的主要影响因素,地面坡度和障碍物高度、障碍物形状影响稳定性,带农具会导致重心位置相对较高且后移,降低稳定性。KISE 等^[25]提出了使用“传感器在环(SIL)”在线监测拖拉机姿态和运动模拟,并进行侧翻预警,有效实现机器状态的预判,但是尚未考虑拖拉机实际操作的因素。ZHU 等^[26]提出了一种基于多传感器的拖拉机姿态预测方法,通过嵌入式多传感器系统获取车辆前方地形信息,采用遗传算法和 BP 神经网络结合的方法预测车辆位置,结合车辆位置和地形信息预测车辆姿态,以实现车辆稳定性控制。

综上所述,在底盘稳定性理论及车身状态预判研究方面,专家学者建立了多种关于底盘稳定性的模型来预测其在不同情况下的稳定性,研究了底盘速度、重心位置、悬挂系统和地面坡度、越障类型等对稳定性的影响,通过传感器、IMU 等预测底盘姿态进行侧翻程度的预报预警。但是,所建立的大部分模型均进行了一系列的假设,与实际应用环境存在偏差,对影响因素的研究缺乏综合考虑。未来研究中应该减少假设,开发更高精度的模型,提高模型可靠性,开展多种因素综合性影响分析,提出更全面的评估指标,并对建立的模型进行实际工况下的验证。

2.2 履带底盘稳定性机构和装置创制

专家学者对履带底盘的稳定性主动干预研究主要集中于对履带行走系的抗倾翻机构和装置进行创新设计,并实现其智能控制,实现车身的调平和重心的调整。

金诚谦等^[27]设计了一种铰链五杆机构,将其应用于履带式联合收获机全向调平底盘上,底盘由上

层车架、下层车架、升降机构等组成,采用“中心点”不动调平法实现自动和手动调节。文献[28-29]提出了一种基于新型四点升降的履带底盘调平系统,开发了对称分布升降机构,立底盘姿态和液压缸位移的数学模型,实时调节液压缸调整量,使履带式联合收获机在不平路面行驶时保持水平,有效避免车辆侧翻,提高作业性能。SUN 等^[30]设计了一种基于平行四杆机构的山地履带拖拉机的横向姿态调整装置,设计了相应的液压系统,并通过台架试验和仿真试验验证了该机构的可行性和可靠性。JIANG 等^[31]针对丘陵山区农业机械作业时机身倾角变化大,作业质量和安全性较差的问题,设计了一种履带式作业机全向调平系统,提出了基于“三层车架”的铰接式全向调平系统结构方案。刘平义等^[32]设计了自适应调平悬架和底盘,采用悬架弹簧根据地形变化实时吸收和释放能量,进行实时动态调平,减小底盘侧倾角和俯仰角。文献[33-34]采用轮履结合的方式,以履带组件为牵引驱动装置,设计了一种适用于丘陵山地的拱腰式履带移动底盘,底盘的履带驱动装置能够被动自适应地形变化,亦能主动调整履带与地面的接触角度,提高履带的附着性能。意大利安东尼奥卡罗拉公司生产的 MACH 4R 型山地拖拉机可实现四轮驱动及轮履互换,具有折腰扭腰功能,动力强劲且适应各种凹凸不平道路,有较好的缓坡地适应性。韩振浩等^[35]设计了一种基于重心自适应调控的山地果园履带运输车,可移动载物台基于动态重心调控原理设计,能实时调节整机重心位置,提升了该底盘的牵引、爬坡和越障等性能。李臻团队^[36-38]提出了一种基于动量飞轮系统的主动防侧翻控制方法。使用主动转向控制作为辅助防侧翻方法,有效降低了侧滑、过转向和急转弯时的车辆横向加速度。

综上所述,在底盘调平机构的研究方面,履带底盘结构设计不断改进可以提高其在丘陵山区等复杂地形的适应性,目前典型的履带底盘稳定性调整机构对比如表 1 所示,结构如图 10 所示。但是,该领域的研究仍存在一些不足之处,部分调平系统会增加底盘高度,影响车辆稳定性和通过性,且控制器的高性能要求可能导致成本上升;在复杂苛刻的作业环境中,调平系统的可靠性和稳定性有待提高。未来,需要对主要部件进行强度分析和结构优化,根据不同工作条件对底盘进行轻量化设计,解决底盘在不同土壤条件下易发生沉陷、滑转滑移等问题,并设计匹配高效调平机构来减少调平动作所需时间,以实现实时调整;同时,开展更多的实际应用和验证,确保调平系统能满足实际作业需求。

表 1 履带底盘稳定性调整机构对比

Tab.1 Comparison of stability adjustment mechanism of

track chassis		
改进方法	调整机构	调整原理
底盘调整技术	铰链五杆机构	采用“中心点不动调平法”实现底盘单侧升降,完成在坡地的姿态调整
	四点升降机构	对称分布的升降可调机构连接底盘框架和行走装置,通过液压缸伸缩改变摆臂位置实现姿态调整
	平行四杆机构	通过液压油缸推动平行四杆机构,使平行四边形发生形状变化,实现底盘单侧的升降
	三层框架机构	上框架与车体固定,下框架与底盘固定,中框架通过液压缸和三角铰链机构分别与上、下框架连接,驱动液压缸伸缩实现姿态调整
可变底盘技术	变轨距机构	同步调整液压缸伸缩量降低质心高度提高纵向稳定性,调节单侧液压缸伸缩量改变履带间距,产生高度差提高横向稳定性
	拱腰机构	通过改变电推杆伸长量实现履带的俯仰运动,进而调节车身姿态
	折腰扭腰机构	利用单点球铰原理,控制两侧折腰转向液压缸实现转向,万向节和扭腰仿形轴实现地面仿形
机械能补偿技术	重心调整机构	改变车身和底盘相对位置,进而改变整机重心位置,提高行驶稳定性
	动量飞轮机构	通过动量飞轮的回转运动,产生与车辆倾翻方向相反的扭矩来阻止底盘发生倾翻

2.3 履带底盘稳定性调控算法设计

履带底盘姿态调整机构是实现其稳定性变化的基础,精准高效的控制算法是实现智能化调控的关键。其中,不同作业环境中工况信息的准确感知、有效信息的智能化处理、位姿的精准化调控是实现稳定控制的基本思路,因此,针对不同工况下的姿态调整,需要设计不同架构的控制逻辑和精准调控算法,国内外专家对此展开了大量研究。

WANG 等^[39]针对整车液压气动悬架系统,提出了基于 Backstepping 控制算法的车身姿态控制策略,由车身姿态控制器和力跟踪控制器组成的双闭环控制系统,实现车身的自动调平。CHEN 等^[40]设计了丘陵山区履带式拖拉机自适应调平控制系统,采用双轴倾角传感器检测拖拉机倾角,控制伺服电机实现车身在横向、纵向坡地的调平,控制算法采用比例算法,调平精度可保持在 1° 范围内。HU 等^[41]开发了自适应调平液压悬架系统,利用二维角度传感器测量底盘姿态信息,控制 4 个液压缸实现车架的动态调平,有效提高农业机器人在丘陵山区的适应性。张锦辉等^[42]针对现有丘陵山地拖拉机姿态调整精度和可靠性难以满足实际需求的问题,基于神经网络 PID 算法设计了丘陵山地拖拉机车身和机具姿态同步控制系统,仿真和实地试验结果表明该同步控制系统具有较好的控制精度和稳定性,且控制性能优于 PID 控制算法。柯超等^[43]针对丘陵山地移栽机车身易倾斜导致移栽效果差的问题,设

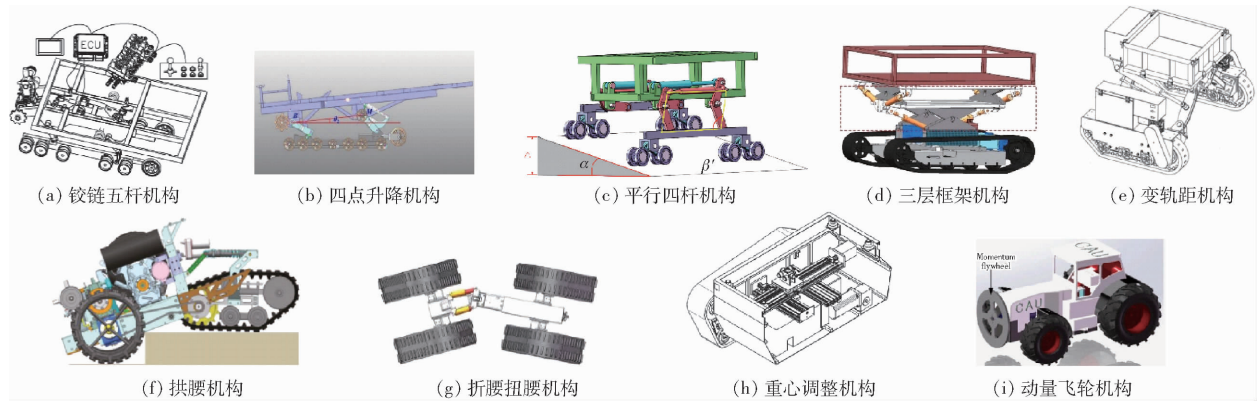


图 10 底盘稳定性调整机构结构原理图

Fig.10 Structure principle diagram of the chassis stability adjustment mechanism

计了一种车身自动调平控制系统,采用四点支撑结构,结合角度误差控制法和位置误差控制法的多传感器耦合调平策略,通过模糊 PID 控制器控制电动推杆动作,并利用卡尔曼滤波器滤除干扰。蒋俞等^[44]设计了“三层车架”的履带式作业机全向调平系统,系统结构包括上层、中间和下层车架,通过液压油缸和三角铰接机构实现横、纵向调平,对调平参数进行敏感度分析得到油缸位移、调平时间、平均推

力的影响因素,并采用多目标遗传算法(NSGA-II 算法)优化了关键结构参数。孙泽宇等^[45]基于前述文献中“三层车架”的全向调平系统,结合 BP 神经网络和 Q 学习算法对 PID 控制参数进行实时更新和优化,实现了对履带式作业机姿态的有效控制(图 11)。汪若尘等^[46]基于前述文献中履带式作业机“三层车架”的结构方案,设计了互联式全向液压调平回路,针对调平液压回路需对未建模动态进行

补偿的问题,设计了一种基于扰动观测器的滑模同步控制方法,控制性能均优于 PID 控制(图 12)。

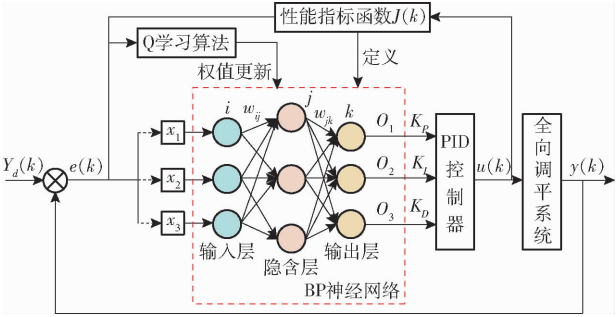


图 11 履带式作业机 QBP-PID 机身姿态控制器结构图
Fig. 11 Crawler QBP-PID body attitude controller structure diagram

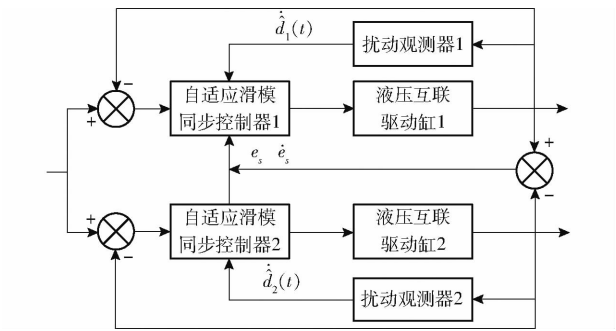


图 12 履带式作业机同步控制系统框图
Fig. 12 Synchronous control system for crawler machine

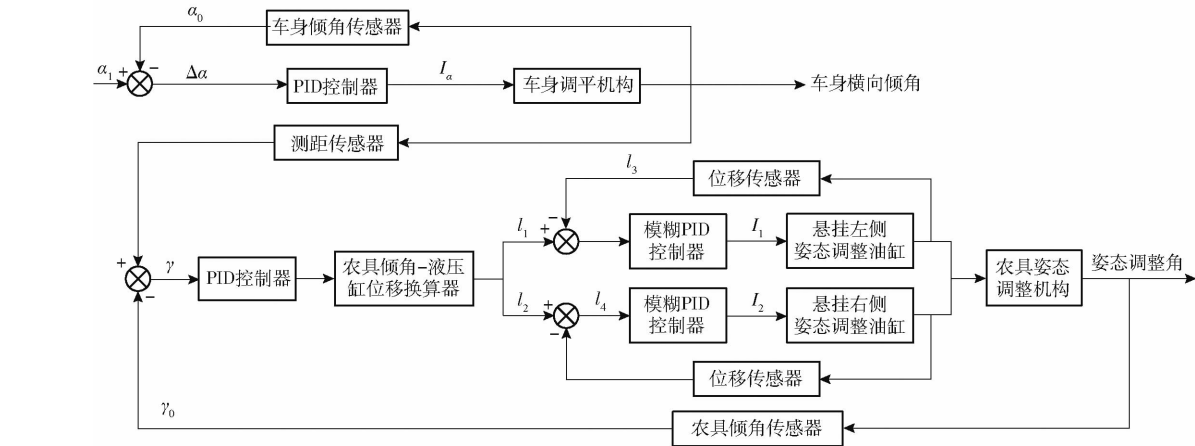


图 13 山地拖拉机与农具姿态协同控制系统原理图
Fig. 13 Principle diagram of attitude cooperative control system for hillside tractor and farm tool

然而,仍存在机械结构调整范围和精度有限、液压系统在负载变化时不稳定、控制策略对环境变化适应性不足等问题。未来的研究应致力于提高调平控制系统的精度、可靠性、适应性和智能化水平,同时加强车身和机具同步姿态控制的研究,更好地满足农业机械在丘陵山区等复杂地形下的作业需求。

3 农业履带底盘驱动系统与转向技术

履带式底盘因具有较大的接地面积而使得其动力性能得以提升,因其可以实现原地转向使得其机

SONG 等^[47]提出了基于滑模控制算法的主动转向(AS)防侧翻方法,根据不同的侧翻状态,基于拉格朗日方法建立了非线性变姿态动力学模型,基于变结构理论构造了拖拉机滑模控制(SMC)算法,通过仿真和模型实验验证了 SMC-AS 控制策略的有效性。PENG 等^[48]针对复杂工况下山地拖拉机自动调平存在的问题,基于四点车体调平机构,研制了自动调平控制系统,采用基于模糊开关增益调节的滑模变结构控制算法,提高调平精度和稳定性,实现实时动态自动调平控制。杨福增等^[49]针对山地履带拖拉机等高地作业时车身调平和农具仿形作业不同的姿态调整需求,设计了车身与农具姿态协同控制系统(图 13),该系统对车身和农具的控制分别采用 PID 算法和双闭环模糊 PID 算法。基于 Simulink 对控制算法进行了仿真分析,结果表明采用双闭环模糊 PID 算法实现农具姿态调整的控制效果优于 PID 算法,能够满足丘陵山区坡地等高线作业需求。

综上所述,履带底盘调平系统和调平方法相继提出,其中调平系统主要包括基于液压、机电的自动调平系统,调平算法主要采用常规控制算法、滑模控制以及基于神经网络等先进技术的控制算法。

动灵活性得以凸显。故如何更好地保证其动力特性和转向性能得到了专家学者的深入研究。

3.1 农业履带底盘驱动系统

目前,履带底盘的动力系统按驱动形式分为机械式、液压式和电力式。机械式动力系统具有良好的越障性、牵引性和稳定性,大范围应用于拖拉机和收获机底盘;液压式驱动系统具有轻量化、功率密度高、无级变速、转向机动灵活等优点,非常便于实现自动化、智能化控制和远程操纵,在国外的先进插秧机、高地隙植保机上得到了广泛应用;电力式驱动系

统具有结构简单紧凑、无污染、噪声低、传动高效、控制灵活等优点,该驱动方式的应用符合新能源背景下的发展趋势。因此,针对不同的作业需求,选配合适的动力系统将决定农业生产的效率和质量。然而,驱动系统的最优化设计是以提高作业效率和作业质量为目标,在保证履带底盘满足行驶、转向、制动等基本功能的基础上,还要具有良好的动力性和经济性。

LIU 等^[50]设计了一种基于静液压传动(HST)的山地履带拖拉机驱动系统(图 14),对拖拉机进行力和运动分析,确定了发动机、HST、驱动后桥等关键部件的参数,对驱动系统的牵引力、系统压力和工作速度等性能指标进行验证;在驱动系统性能测试台上进行了牵引性能和启动加速性能的测试,该系统的传递连续性好,适合在丘陵山区作业。

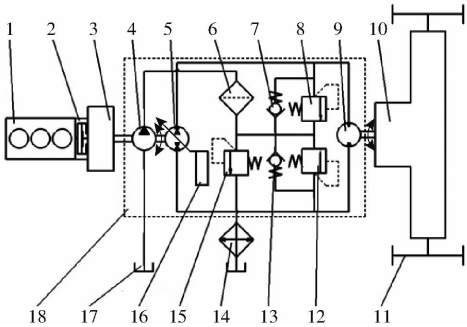


图 14 山地履带拖拉机驱动系统结构示意图

Fig. 14 Sketch of structure of driving system of hillside crawler tractor

1. 发动机 2. 离合器 3. 分动箱 4. 补油泵 5. 柱塞变量泵
6. 过滤器 7. 13. 15. 单向阀 8. 12. 溢流阀 9. 双向液压马达
10. 驱动后桥 11. 驱动轮 14. 散热器 16. 斜盘调整机构
17. 油箱 18. 静液压驱动装置(HST)

孙祺友^[51]设计了一种适应丘陵山地地形的履带底盘 HST 系统,系统采用单泵-双马达的静液压传动方案,与传统履带底盘 HST 系统相比,展现了更高的工作效率和更广的速度调节范围。LOU^[52]设计了履带式全喂入联合收获机复合传动系统,发动机驱动液压泵、液压泵驱动定量马达、定量马达驱动行星齿轮减速器、驱动轮带动履带转动,实现联合收获机的行走和转向以及无级变速。

高明飞等^[53]研究了电驱履带底盘实现转向再生功率传递的构型特征,提出了一种新的图论模型来表示行星传动机构,得出实现转向再生功率传递的参数特征,进而得到实际构型,为传动机构构型设计提供理论依据。LIU 等^[54]针对电动拖拉机电机功率利用率低、续航时间短的问题,提出了一种基于电机最大效率特性曲线的电驱动控制方案,结合汽油发动机最低油耗特性曲线的方法,确定了发动机

在最高效率时的特性曲线。王宝超等^[55]设计了 10 kW 增程式电动拖拉机,动力形式为单电机集中型驱动,并计算不同工况下的功率需求对电驱部件进行了选型,多工况测试表明能实现纯电零排放作业,大负载作业时增程器启动协同电池供电完成续航工作。

为了克服液压驱动或纯电驱的一些弊端,相关学者对混合动力履带底盘进行了相关的研究。朱镇等^[56]针对大功率拖拉机因复杂恶劣工况导致油耗高的问题,采用油电混合动力匹配液压机械无级变速器的方式,设计了一种油电混合-机液复合拖拉机动力系统,研究了驱动模式与传动方式的实现原理,并得到液压机械无级变速器的调速曲线;提出 HMCVT 经济性速比控制策略、基于规则的工作模式划分策略和基于自适应等效因子的燃油消耗最小功率分配策略,验证了其有效性。

韩明兴等^[57]针对传统液压驱动或纯电驱动的履带农机功耗大、系统响应慢、续航短、功率扭矩不足等问题,集成液压驱动和电驱动两套独立动力系统,研制了一种新型高效液电混动履带底盘,研究了其在不同工况下的系统动态特性,结果表明具有良好的稳定性和同步性。傅生辉等^[58]为解决拖拉机作业过程中随机载荷波动引发的频繁换挡问题,提出一种考虑随机载荷自适应修正的换挡控制策略,仿真结果表明换挡次数较少,保证了动力性和工况稳定性。

综上所述,学者针对履带底盘驱动与动力系统的研究主要为静液压无级变速(HST)驱动系统、全液压驱动、纯电驱动系统以及液电混合动力系统,分析驱动理论和传动特性,最大限度提高传动的效率以及工况的适应性。然而,随着农业现代化的深入推进和农业机械化水平的提升,农业履带驱动系统的发展将更加注重全面化、智能化和绿色化。在后续研究中,建议紧密结合复杂农田环境的地形地貌特点,重点突破高效轻量化液压机械无级变速器(HMCVT)驱动技术,融合复杂工况与高效传递的关系,实现作业速度的自适应匹配与调控,确保整机工作的动力性、连续性、经济性和安全性;“双碳”目标正在倒逼电动农机产业加速发展,在“双碳”目标的导向下,农业走绿色低碳发展新路势在必行,应充分借鉴我国电动汽车领域的先进技术,从而缩短电动农机的研发周期;不断创新混合动力技术,在保证动力性和续航能力的基础上逐步向绿色化方向发展。

3.2 农业履带底盘转向技术及性能

在自动驾驶环境下,转向系统的灵活性能直接影响到履带底盘的导航效率和导航质量,履带车辆

的转向过程既动态又复杂,在转向过程中极易出现履带沉陷、滑移和滑转现象,因此,对履带底盘的转向运动特性分析是提高其工作效率的关键。

WANG 等^[59]针对传统液压驱动履带底盘传动效率低、转向半径大的问题,设计了双通道 HST 驱动和两通道行走-转向齿轮传动组成的驱动转向履带收割机底盘,研究了静液压驱动履带底盘在差速转向、差速换向、单边制动转向等不同条件下的转向特性,得出了不同转向模式下的滑移率和修正模型。LÜ 等^[60]研究了底盘在反向差速转向、单边制动转向和正向差速转向过程中的受力,得出转向力矩和转向半径的关系,转向半径对驱动轮扭矩和滑移率影响显著,路面湿度、速度和转向半径的变化导致履带滑移率呈现不同的变化趋势。LIU 等^[61]研究了履带车辆双功率流差动转向系统的性能,根据输出转速和转向半径的关系,构建了包含履带车辆长度、轨距、地面瞬时中心偏移等参数的稳态转向动态模型,以预测其稳态转向特性。LIU 等^[62]以双边独立电动履带车辆为研究对象,对履带车辆的转向过程进行建模,在履带车辆解耦控制系统的基础上,采用 PID 控制设计了车速和横摆角速度控制器,利用灰狼优化算法对控制器的参数进行优化,验证了 GWO-PID 控制比传统 PID 控制精度更高,响应速度更快。TANG 等^[63]针对传统的单边制动转向方式易出现土壤堆积、导致转向不灵活等问题,设计了正反转向变速箱(PNS gearbox)(图 15),可实现直行转向、单边制动转向和原地正负转向 3 种工作模式,原位正、负转向平稳,无积土现象,为转向变速箱结构优化提供理论依据。

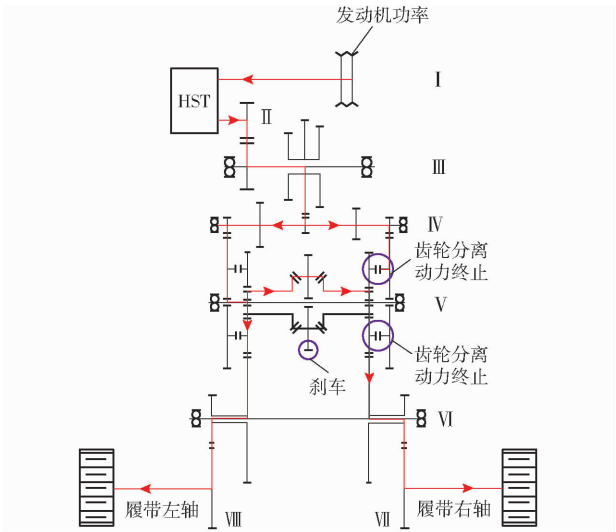


图 15 正反转向变速箱动力传递方式

Fig. 15 Power transmission mode of PNS gearbox

DING 等^[64]提出了一种在不检测车辆实际速度的情况下,预测不同地面条件下履带车辆转向滑移

系数模型,实验表明软地面转向的滑移系数高于硬地面,高含水率土壤上转向的滑移系数较高,转向速度对履带滑移系数的影响不显著。王猛等^[65]针对履带拖拉机差速转向可控性差,影响自动导航精度的问题,以行星差速转向履带拖拉机为例,建立其转弯半径数学模型,分别针对直线路径跟踪和掉头工况建立了基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法。石志标等^[66]研究了新型双功率流差速转向机构,通过调控直线驱动电机和转向驱动电机输入轴的转速大小和方向,使得两端输出轴差速来实现履带车辆转向。杨洋等^[67]为解决农机装备电控液压自动转向系统生产成本高及电动方向盘自动转向系统控制力矩小、存在自由行程等问题,设计了一种基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统,通过直流有刷电机控制全液压转向器工作,实现车轮自动转向。关卓怀等^[68]建立了水田工况下履带联合收获机转向运动学模型(图 16),分析了低速侧、高速侧履带转向滑移率与转向半径、转向角速度的关系,构建了采用限幅平均滤波处理转速信号的转向运动参数测试系统。

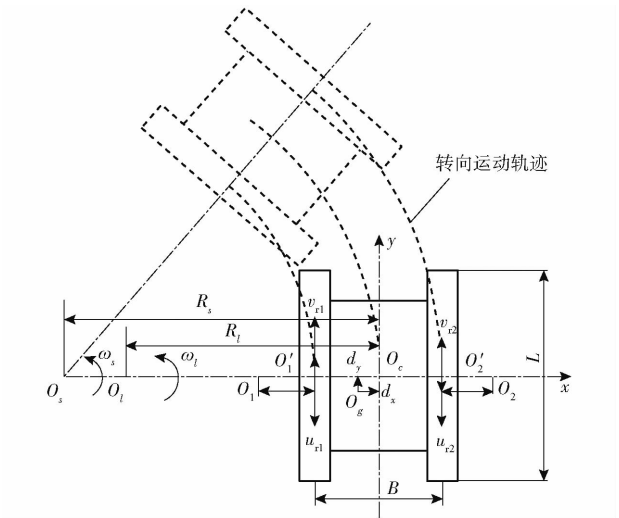


图 16 履带联合收获机转向运动学模型

Fig. 16 Steering kinematic model of tracked combine harvester

综上所述,大部分专家学者关于转向系统的研究是通过建立履带底盘转向模型进而分析影响转向半径的因素和转向心过程力学特性,开发并优化了履带底盘转向控制方法和控制器,设计新型的转向机构。但现有履带底盘仍存在转向可控性差、精度低、受环境影响大的问题,因此,在研究转向模型时,必须紧密结合特定工况下的履带-土壤相互作用关系,特定工况特定土壤环境尽可能设计特定参数的履带和行走系统,这对于提高转向性能至关重要。此外,需要进一步集成高精度导航技术实时纠偏,提高转

向精度,减少滑转和滑移对转向的影响^[69]。

4 农业履带底盘自主导航与智能控制技术

农业机械自动导航技术是实施精细农业的基础,可以大幅度降低操作人员的劳动强度,减少农业生产过程的用工成本,提高作业质量与作业效率,是发展智能农机和智慧农业的关键技术之一,目前该技术已经广泛应用于农业生产的各个环节。履带底盘是现代农业装备的主要行走和动力装置,是完成无人自主化作业的核心,因此目前具备自主导航功能的履带底盘成为受青睐的农业装备,然而自动导航系统的路径跟踪准确性是提高作业效率和作物产量的关键因素,尤其是当履带底盘的转向方式为差速转向时,极易出现滑移或滑转的现象,这将极大地影响底盘对目标路径尤其是非直线路径的跟踪精度。基于上述问题,专家学者针对特定农业生产环节的作业需求,对运用履带底盘的高质量高效导航技术开展研究,并取得了一定的研究成果。

张津^[70]针对果园履带底盘转弯控制精度低的问题,提出了一种基于支持向量机回归算法的果园履带车转弯参数预测模型,通过激光雷达采集点云数据,并进行点云预处理和地面拟合,搭建模拟果园仿真环境,提出一种基于模糊 PID 控制的自适应导航控制决策方法,通过试验验证导航性能。刘志杰等^[71]为提高传统果园小型履带拖拉机导航路径跟踪控制精度和行驶稳定性,提出了一种基于虚拟雷达模型的导航路径跟踪控制算法,以果园典型 U 形路径为例进行了仿真试验和实车试验,结果表明该算法具有较高的路径跟踪精度和行驶稳定性。MA 等^[72]为实现水田履带拖拉机的自主导航,研制了一

套卫星导航与视觉导航相结合的控制系统,其中,利用预览点跟踪算法实现视觉导航,卫星导航模块在水稻缺苗情况下能够很好地进行行跟踪,显著降低了导航偏差。GUAN 等^[73]针对水田环境中因履带沉陷和滑动导航路径跟踪误差大的问题,基于履带联合收获机在水田的运动特性,建立圆弧-切线跟踪模型,计算其转向角,基于模糊控制方法和粒子群算法设计了液压转向控制器,并提出了一种基于最小二乘支持向量机回归的转向特征识别方法,构建了控制变量与实际横摆角速度之间的函数关系,修正了履带沉陷和滑移引起的控制误差。ZHOU 等^[74]为了提高传统模型预测控制(MPC)算法的跟踪控制精度和实时性,将遗传算法与 MPC 算法相结合,采用遗传算法计算实时车速、车辆姿态和路况下的最优时域参数,实现自适应模型预测控制,仿真和实况试验表明该算法能快速消除偏差并保持路径跟踪的稳定性。ZHANG 等^[75]针对水稻履带收获机和运输车两非线性系统,在作业过程中难以精确控制平行停车对齐而导致水稻损失和安全隐患的问题,使用预设路径将二维控制问题解耦为两组一维控制,在识别出纵向驱动系统传递函数的基础上建立了预测模型,设计了纵向预测型纯跟踪控制器和横向改进型纯跟踪控制器,对系统惯性引起的泊车滑移进行预测和补偿,减少了系统在路径跟踪中的误差。HE 等^[76]针对复杂多变的水田条件影响履带收获机的导航跟踪精度,不易获得稳定性能的问题,采用锥指数对稻田条件(PGC)进行分类,利用收获机的振动加速度构造特征向量对 PGC 进行表征,采用粒子群优化支持向量机算法对 PGC 分类进行识别,建立了适应 3 类 PGC 的转向控制模型(图 17),提高了路径跟踪精度。

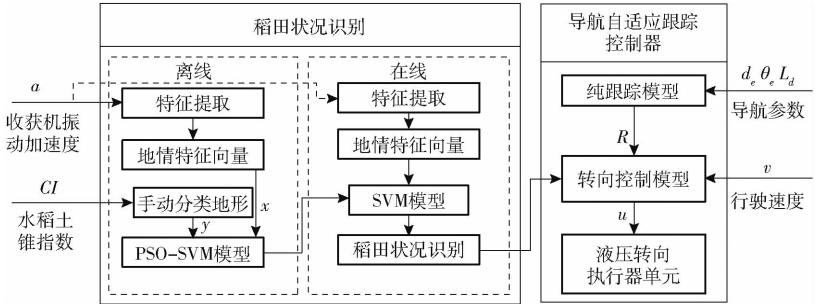


图 17 履带收获机导航自适应跟踪控制系统结构框图

Fig. 17 Navigation adaptive tracking control system structure

陈子文等^[77]提出了离合制动履带平台的概念,搭建了基于 STM30F303VCT6 控制器的 RTK-GNSS 平台自动导航系统,提出一种改进模糊式预瞄控制算法——虚拟探照灯寻径跟踪(VSPT)算法,试验验证了算法具有良好的跟踪效果和路况适应性。

ZHANG 等^[78]针对履带车辆转向控制平稳性差、控制精度低的问题,提出了一种基于虚拟 Ackerman 转向模型的状态反馈导航控制系统,采用卫星实时动态定位全球导航系统;设计了基于极点配置的路径跟踪控制方法、单缸柴油机履带车辆虚拟 Ackerman

转向控制模型以及基于脉宽调制原理的前向转向比例控制方法,试验表明具有较好的稳定性。张朝宇等^[79]针对山区小田块大型农机运移不便、作业效率不高和调头操作受限等问题,设计了一种履带轻简播种机,基于运动学模型和几何模型的模糊自适应纯追踪控制器,根据播种需求采用有限状态机设计了自动驾驶作业控制策略,试验表明该导航控制器直线跟踪稳定。丁幼春等^[10]设计了免疫 PID 控制器,建立了履带式油菜播种机运动学模型和转向角传递函数,在黏湿土壤环境以速度 0.5 m/s 行驶时,其直线跟踪平均绝对偏差为 5.8 cm,最大偏差不超过 15.2 cm,满足播种需求。

何杰等^[80]基于履带自走式花生联合收获机,建立了收获机运动学模型与虚拟转向角函数关系,并通过卡尔曼融合算法获得了阿克曼模型的虚拟转向角(图 18),田间试验表明,在沙地以速度 0.6 m/s 作业时,直线跟踪平均绝对误差为 2.2 cm,最大偏差为 4.1 cm,满足收获需求。

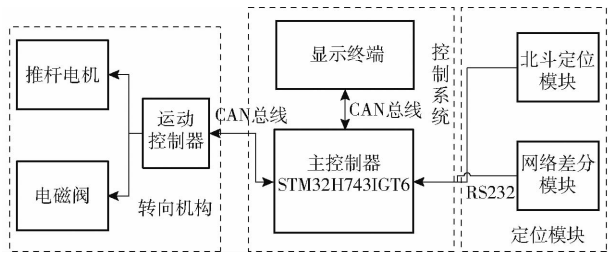


图 18 履带式花生收获机导航控制系统结构框图

Fig. 18 Navigation control system of crawler peanut harvester

齐泽中等^[81]针对点动控制的单侧制动式转向履带底盘自主行走时控制精度低、转向切换频繁的问题,提出了一种基于单侧制动转向履带底盘的三切线局部路径动态规划算法,针对履带底盘转向制动力矩不可控特性,设计了“转向-直行-转向”的局部路径规划方式。

综上所述,针对不同的作业需求,专家学者关于履带底盘的导航关键技术研究主要集中于导航位姿信息获取、导航路径规划以及导航控制 3 方面。目前,定位测姿方面主要基于全球导航卫星系统(GNSS)、惯性导航系统、机器视觉导航系统、多传感信息融合技术,其中,视觉导航具有成本低、信息量丰富的优点,对于信号遮挡和不规则地块环境更为适用;多传感器间的数据融合可以解决单传感器难以适应复杂农田环境的问题。全局路径规划和局部路径规划算法在鲁棒性、实时性和安全性方面各具特色,使用时应充分考虑具体作业环境和要求,进而规划出高效安全、全局近似最优的路径。目前常用的导航控制方面有 PID 控制、模糊控制、纯追踪控

制、滑模变控制以及模型预测等,这些传统的控制算法存在一定的技术缺陷,因此,相关学者尝试将不同的控制方法结合,优势互补来获得更好的控制效果,这将是根据实际作业环境特点实现精确导航控制的有效手段。

5 农业履带底盘-土壤相互作用理论研究

农业底盘行走装置与土壤的生态适应性,是保证农业持续发展必须解决的农业环境保护问题之一。行走装置对土壤的压实作用与土壤肥力、农作物产量及耕作阻力紧密关联,行走装置参数和负荷对土壤压实作用的影响以及如何有效减小压实作用是当前研究的热点。履带拖拉机的接地比压大,对土壤的压实作用较轮胎小,因此被广泛采用。但是,履带行走机构是由柔性的履带将导向轮、支重轮和驱动轮包络起来,其与地面的接触关系复杂,会导致接触面应力和土壤内部应力传递的不均匀,进而增大履带在松软地面的沉陷程度,影响机械的通过性^[82]。

目前专家学者对于履带底盘压实的研究较多。履带车辆对土壤的压实研究主要集中在平地。KELLER 等^[83]研究了履带压实作用下 0.3 m 深度范围土壤中垂直应力在履带长度方向变化情况,得出垂直应力最大值大约是平均值的 3.2 倍;LAMANDÉ 等^[84]分析了车辆采用轮式和履带式行走装置对土壤的压实作用,研究表明履带下 0.35 m 深度处土壤最大垂直应力仅比轮胎减小约 0.2 倍,测定了橡胶履带与土壤接触面内垂直应力在履带长度方向的分布规律,在支重轮的轴线处出现峰值;丁肇等^[85]通过钻孔埋设传感器法研究了履带行走机构压实作用下土壤应力分布均匀性,为行走结构的优化设计提供依据;赵子涵等^[86]分析了地面土壤紧实度和车辆荷载对垂直应力分布的影响,结果表明紧实地面支重轮间履带几乎不受力,应力分布非连续,松软地面上履带应力分布连续,支重轮下应力均匀度随荷载增大而升高。栗浩展等^[87]分析了金属履带行走系对土壤内垂直应力影响规律,得出支重轮轴线位置出现最大应力。PAN 等^[88]对坡地工况土壤压力-沉陷模型进行了构建与验证,针对经典 Bekker 土壤压力-沉陷模型中未考虑坡地角度、土壤含水率、土壤密度等参数的变化问题,经履带板穿入试验验证了土壤含水率及密度对土壤承压特性的影响显著,对经典 Bekker 承压模型进行拓展,得到坡地土壤压力-沉陷模型。FU 等^[89]考虑到履带板与粘性土之间的附着力对车辆-土壤相互作用有显著影响,在不同含水率、剪切速率和载荷下,对粘壤

土、砂质壤土和壤土进行了三轴剪切试验、牵引试验和直剪试验,结合试验结果修改了考虑含水率、剪切速率和载荷的土壤抗剪强度方程,并且考虑履带板的结构参数,开发并验证了粘附模型。此外,该团队^[90]针对东北黑土极易粘附于履带车辆履带板表面的问题,选择履带板高度、履带板厚度和张开角度为结构参数,粘附力和粘附土体为粘附性能的指标,开展理论研究得到了回归模型并验证了可靠性,为新型履带板的设计提供参考。YANG 等^[91]为了分析履带拖拉机在坡地农业作业中接地压力的分布特征,考虑坡地角、土壤条件、工况及履带拖拉机重要参数(质量、重心、轨距)的影响,建立了由坡地土壤压力关联模型组成的坡地比压预测模型(图 19),试验结果表明牵引性能预测模型对爬坡牵引试验中的滑移率和牵引力具有较高的预测精度。

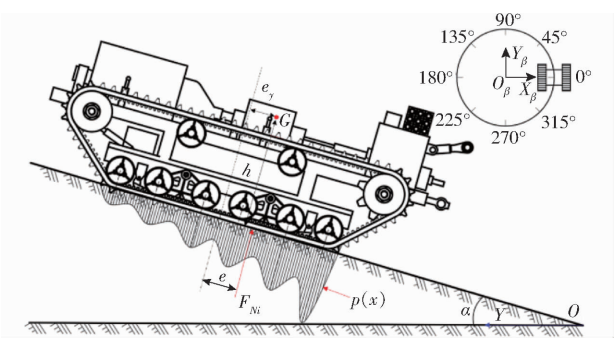


图 19 履带底盘斜坡地接地压力分布

Fig. 19 Ground pressure distribution on slope of track chassis

由此可见,目前履带车辆-土壤互作方面的研究大多数是从履带对土壤接触应力和土壤内部传递应力方面展开,主要包括履带作业底盘参数、履带参数、土壤参数等对土壤内部垂直应力、水平应力的分布均匀性影响规律,研究的工况以平地居多,对于特定环境工况(如坡地、水田等)和特定作业工况(大负载牵引作业、地头转弯等)下土壤接触面应力分布以及土壤内部应力传递规律研究相对较少,这就导致该方面的履带-土壤互作关系理论缺乏,严重影响适用型履带底盘的研发设计。

6 展望

履带底盘的高效使用可以大幅度降低农机对土壤的压实效应,这也是实现我国高标准农田建设的有效途径,对于促进农民增产增收、保障国家粮食安全具有实际意义。近些年在政府部门的政策鼓励与支持下,企业、科研院所等机构的共同努力下,履带作业底盘的研发具备了一定的基础,专家学者也在履带底盘的研发、推广和应用等环节提出了系列合理化方案。但目前有一些基于履带行走的作业机具仍处于实验室阶段,在耕、种、管、收、运等各生产环

节中对于特地工况的适应性、稳定性不高,自动化程度偏低,因此,在农业生产中全面高效地使用履带底盘仍有很大提升空间。建议未来农业履带底盘关键技术研究重点围绕图 20 所示方面展开。

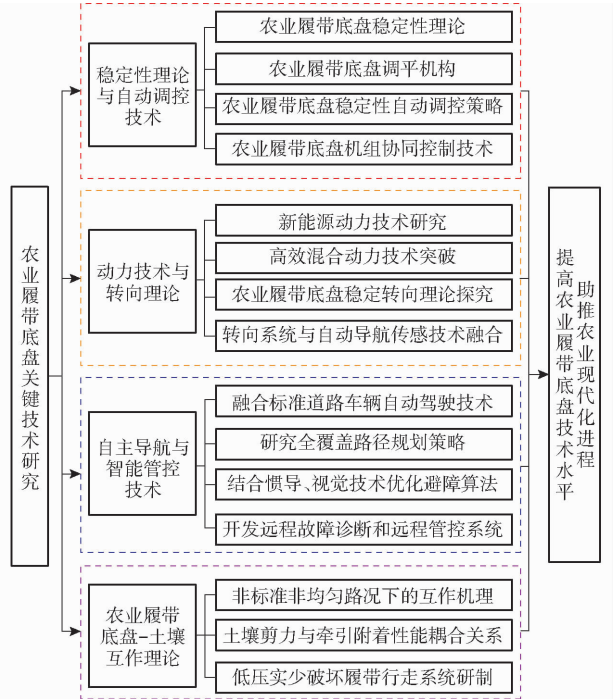


图 20 农业履带底盘关键技术研究路线图

Fig. 20 Research roadmap on key technology of agricultural track chassis

6.1 农业履带底盘稳定性理论与自动调控技术研究

6.1.1 农业履带底盘稳定性理论及调平机构设计

现有调平机构多数在履带底盘车身和履带行走系之间设计加装“车架变形体”,该方案虽然可以通过调整变形体实现车身的调平,但是,增设“车架变形体”在增加整机质量的同时使得履带底盘整机重心上移,反而削弱了其稳定性;并且有些变形体结构的引入导致机架连接处的强度不足,严重影响底盘的工作可靠性。未来需要全面、系统地运用数学、力学、运动学等理论对履带底盘在特定作业工况下的运动学及动力学规律展开分析研究,加强对履带底盘结构的研究,通过改变底盘形状或履带相对位置实现底盘在不规则路面的稳定性调平,对于那些确实有必要加装“车架变形体”来实现调平功能的底盘系统要做好变形体机构原理研究和关键部件的强度设计,在保证强度可靠的同时实现轻量化。此外,履带底盘牵引作业工况下应特别注重:在实现底盘姿态调控的同时,深入探究实时高效的机组(动力底盘+作业机具)的姿态协同控制策略,攻克协调控制智能算法,为丘陵山区的高质高效作业提供保障。总之,对履带底盘调平系统的研究目的是实现稳定行驶和作业,可通过优化车架结

构、合理分配履带布局等方式实现。关于调平速度和精度方面,在强度满足要求时可优先考虑使用电机作为执行机构。

6.1.2 农业履带底盘稳定性自动调控技术

履带底盘稳定性控制方面,应深度结合履带底盘应用场景的多工况信息以及实际农艺要求,在充分研究调平原理模型和调平装置构型的基础上,融合多传感信息技术实现对车辆位姿的精准监测,然后基于模型预测控制、模糊逻辑控制、神经网络控制等先进的控制算法精确且迅速地控制调平机构动作,提高履带底盘在非标准化路面的通过性和稳定性;同时,应进一步加强对主动稳定性控制技术的研究,融合视觉传感技术,结合作业工况信息和机构位姿状态建立高度精确的稳定性评估模型和预测方法,并建立人机交互界面,采用智能仪表盘或虚拟 VR 实时车身姿态显示、工作状态预警,以便于操纵人员及时纠错。

6.2 农业履带底盘动力技术与转向理论研究

6.2.1 农业履带底盘动力系统研究

动力系统能源供应研究方面,在“双碳”目标的导向下,农业走绿色低碳发展新路势在必行,要充分借鉴我国电动汽车领域的先进技术,继续深入探索氢燃料电池技术、太阳能辅助供电技术等节能环保新型能源的应用,在保证充足动力特性和高效续航性能的基础上逐步朝着绿色化方向发展。动力系统优化设计方面,紧密结合复杂农田环境的地形地貌特点,重点突破液压机械无级变速(HMCVT)驱动技术,融合复杂工况与高效传递的关系,实现作业速度的自适应匹配和调控,确保底盘作业的动力性、连续性;大力推广电驱动技术,动力源与驱动电机之间通过软电缆相连,可以摆脱传动系统在设计空间上的束缚,使得整车布置非常灵活,更利于轴向载荷的合理分配。同时,不断创新混合动力技术,采用多目标优化算法对混合动力系统进行建模和仿真,结合实际工况参数,进一步优化混合动力系统,最大限度提升其经济性指标。动力系统控制方面,在不断优化传动系统机构的同时引入模糊逻辑控制、模型预测控制、深度学习等智能控制策略,实现不同工况环境下自动换挡,避免出现频繁换档导致的冲击,保证动力性和燃油经济性,以延长使用寿命、提高农业生产效率。

6.2.2 农业履带底盘转向理论

转向系统的结构和控制设计决定了底盘的机动灵活性,应继续深入探索转向机理,利用有限元分析、多体动力学仿真等计算机模拟技术,进一步明确履带底盘在不同工况下转向参数的影响因

素,建立多因素影响下的转向模型,为转向系统设计提供数据支撑。通过融合激光雷达、惯性测量单元等先进的传感技术以及自适应控制、鲁棒控制等控制算法,实现底盘转向状态的实时监测,提高转向精确性和稳定性,确保机器作业的精准性,此外,应进一步加强转向系统与自动导航及路径跟踪技术的结合。

6.3 农业履带底盘自主导航与智能管控技术研究

6.3.1 农业履带底盘自主导航技术

自主导航技术在农业履带底盘上的应用将大幅度提高作业的精度,降低农民的劳动强度。在积极吸收道路车辆自动驾驶技术的现有成果和成功经验的同时,必须充分考虑农业底盘这种典型非道路作业系统驾驶自动化和作业精准化的实际需求。重点从以下几方面开展研究:加强北斗卫星导航系统与惯性导航系统、视觉传感器等的融合,提高履带底盘在复杂环境下的适应性;进一步研究基于机器视觉和激光雷达的先进感知算法,不断优化避障算法和电液控制算法,提高对农田环境的识别准确率和转向角度控制的精确度,实现更精准的农田边界识别、田间掉头、障碍规避快速修正行走路径等功能;更加注重导航的精度、信号的稳定性以及农机底盘导航失锁续航方法(例如基于自校准变结构 Kalman 滤波器),不断优化轨迹跟踪控制律(例如融合 Lyapunov 方法和反演滑模技术等控制理论的轨迹跟踪控制律),以满足更高的导航作业要求;加强对全覆盖路径规划策略的研究,着重考虑多机协同、动态路径规划、多算法结合以及优化机械转向路线等因素。

6.3.2 农业履带底盘智能管控技术

利用 4G、5G 等通信技术,实现履带底盘与决策中心的数据实时传输,包括作业底盘的实时位置、作业状态、环境信息等,开发基于云数据的远程实时故障诊断系统和远程操控系统,决策中心可通过履带底盘实现农业数据的远程采集,以及基于云数据实现对履带底盘作业状况的远程操控,实现农业生产的协同作业和智能化管理。此外,为了使得先进的技术真正得以应用,研究过程应充分考虑实际需求,深度结合不同作物类型、不同种植区域、不同作业环节,积极有效地开展多层次、多场景的应用示范,促进科学研究、技术迭代和示范应用领域高效链接。

6.4 农业履带底盘-土壤相互作用理论研究

履带底盘的行驶性能很大程度上受土壤特性(土壤类型、含水率、密度、容重、纹理等)的影响,农业履带底盘的作业环境正是不同土壤类型所构成的

不同工况,因此,履带底盘必须有效应对各种土壤环境条件才能确保行驶和作业的机动性和稳定性。目前关于农业履带底盘与土壤互作机理的研究主要集中在履带对土壤接触应力和土壤内部传递应力方面,采用的常用研究方法是虚拟样机多体动力学(MBD)分析法、离散元(DEM)仿真分析法、薄膜压力传感器铺设法、土壤传感器埋设测力法等。但是,现有研究多是基于人为塑造的平整地面工况,分析履带与土壤之间的静态和动态性能,忽略了不均匀地形、不平整地面等突变土壤参数对履带底盘行驶性能的影响,例如,履带底盘转向过程中,因剪切力会使平整路面发生土壤的堆积和拥堵,这些堆积的土壤如何影响底盘的转向性能未见研究报道。因

此,在构建土壤的离散元仿真模型时应根据不同类型土壤选择多样的颗粒接触模型,涵盖土壤层次和颗粒组成的模型,这将更为精确地模拟真实农田环境,提高履带车辆行驶性能的预测精度。

此外,现有研究着重分析履带对土壤的压应力,但是影响履带底盘行驶和驱动性能的主要因素来源于土壤对履带的推力,相反,这种推力使得土壤发生较为严重的剪切破坏,因此,在后续研究中应注重从微观和宏观角度分析底盘的行驶参数和履带的结构参数对土壤剪切破坏的影响,为高牵引附着性能的履带设计和履带底盘轴载配置提供参考,将有助于提高农业履带底盘在软土、潮湿地面的的行驶作业性能,以适应不同的农田环境。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国农业农村部.“十四五”全国农业机械化发展规划[EB/OL].[2024-06-18]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/NYJXHGLS/202201/t20220105_6386316.htm.

[2] 中华人民共和国农业农村部.2022 年全国农业机械化发展统计公报[EB/OL].[2024-06-18]. http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/202406/t20240618_6457395.htm.

[3] 王伟韦,陈黎卿,杨洋,等.农业机械底盘技术研究现状与展望[J].农业机械学报,2021,52(8):1-15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 1-15. (in Chinese)

[4] 吴清分. BCS 公司 Sky-Jump-V950 型半履带式拖拉机[J]. 拖拉机与农用运输车, 2019, 46(6): 8-10, 13.

[5] 孙景彬,刘志杰,杨福增,等.丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J].农业机械学报,2023,54(5):1-18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1-18. (in Chinese)

[6] 张季琴,杨福增,刘美丽,等.山地微耕机液压差高装置的设计[J].拖拉机与农用运输车,2011,38(3):92-93.
ZHANG Jiqin, YANG Fuzeng, LIU Meili, et al. Design of an hydraulic difference in elevation equipment used in mountainous micro-tiller[J]. Tractors and Agricultural Vehicles, 2011, 38(3): 92-93. (in Chinese)

[7] WANG Y J, YANG F Z, PAN G T, et al. Design and testing of a small remote-control hillside tractor[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(2): 363-370.

[8] 孙景彬,楚国评,潘冠廷,等.遥控全向调平地履带拖拉机设计与性能试验[J].农业机械学报,2021,52(5):358-369.
SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358-369. (in Chinese)

[9] 廖庆喜,何坤,万星宇,等.履带联合收获机式动力平台油菜直播机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):54-64.
LIAO Qingxi, HE Kun, WAN Xingyu, et al. Devices for rapeseed direct seeder on tracked combined harvesting power platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 54-64. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 赵智宇,朱立成,周利明,等.丘陵果园除草机器人底盘系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(增刊1):48-57.
ZHAO Zhiyu, ZHU Licheng, ZHOU Liming, et al. Design and experiment of chassis control system for weeding robot in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 48-57. (in Chinese)

[12] 张青松,陈志凌,杜文斌,等.遥控自走式雪茄植株中下层烟叶植保喷雾机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(1):122-133.
ZHANG Qingsong, CHEN Zhiling, DU Wenbin, et al. Design and experiment of novel sprayer for protecting middle and lower leaves of cigar tobacco plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 122-133. (in Chinese)

[13] 刘莫尘,赵庆吉,韩守强,等.桑园自走式变比配肥定向撒肥机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(增刊2):120-130,140.
LIU Mochen, ZHAO Qingji, HAN Shouqiang, et al. Development and test of self-walking mulberry garden integrated machine with variable proportion and directional disperse fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural

- Machinery, 2022, 53(Supp.2): 120 – 130,140. (in Chinese)
- [14] 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.
WAN Xingyu, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground clearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):109 – 121. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 辛尚龙,赵武云,戴飞,等. 旱区全膜双垄沟播履带式玉米联合收获机的设计[J]. 农业工程学报,2019,35(14):1 – 11.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Design of crawler type corn combine harvester for whole plastic film mulching on double ridges in arid regions[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 1 – 11. (in Chinese)
- [17] 祝露,王德成,尤泳,等. 履带式林间草带收割机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):126 – 133.
ZHU Lu, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of crawler-type grass belt harvester in forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 126 – 133. (in Chinese)
- [18] 史瑞杰,戴飞,刘小龙,等. 履带式丘陵山地胡麻联合收割机设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(5):59 – 67.
SHI Ruijie, DAI Fei, LIU Xiaolong, et al. Design and experiments of crawler-type hilly and mountaineous flax combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 59 – 67. (in Chinese)
- [19] 曾山,黄登攀,杨文武,等. 三角履带式再生稻收割机底盘的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(8):1943 – 1950.
ZENG Shan, HUANG Dengpan, YANG Wenwu, et al. Design and test of the chassis of triangular crawler reclaiming rice harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(8): 1943 – 1950. (in Chinese)
- [20] 耿端阳,孙延成,李华彪,等. 履带式坡地玉米收获机设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(13):11 – 19.
GENG Duanyang, SUN Yancheng, LI Huabiao, et al. Design and experiment of crawler corn harvester for sloping fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 11 – 19. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] MOU X B, LUO Q, MA G J, et al. Simulation analysis and testing of tracked universal chassis passability in hilly mountainous orchards[J]. Agriculture, 2023, 13(7): 1458.
- [23] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Development of stability indicators for dynamic Phase I overturn of conventional farm tractors with front axle pivot[J]. Biosystems Engineering, 2015, 134: 55 – 67.
- [24] JIANG M K, HWANG S J, NAM J S. Simulation study for overturning and rollover characteristics of a tractor with an implement on a hard surface[J]. Agronomy, 2022, 12(12): 3093.
- [25] KISE M, ZHANG Q. Sensor-in-the-loop tractor stability control: look-ahead attitude prediction and field tests[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 52(1 – 2): 107 – 118.
- [26] ZHU Q Y, CHEN W, HU H S, et al. Multi-sensor based attitude prediction for agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 24 – 32.
- [27] 金诚谦,杨腾祥,刘岗微,等. 履带式联合收获机全向调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):393 – 402.
JIN Chengqian, YANG Tengxiang, LIU Gangwei, et al. Design and test of posture controlled chassis for caterpillar combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 393 – 402. (in Chinese)
- [28] HU J P, PAN J H, DAI B W, et al. Development of an attitude adjustment crawler chassis for combine harvester and experiment of adaptive leveling system[J]. Agronomy, 2022, 12(3): 717.
- [29] SUN Y X, XU L Z, JING B, et al. Development of a four-point adjustable lifting crawler chassis and experiments in a combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105416.
- [30] SUN J B, MENG C, ZHANG Y Z, et al. Design and physical model experiment of an attitude adjustment device for a crawler tractor in hilly and mountainous regions[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(3): 466 – 478.
- [31] JIANG Y, SUN Z Y, WANG R C, et al. Design and control of a new omnidirectional levelling system for hilly crawler work machines[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108661.
- [32] 刘平义,彭凤娟,李海涛,等. 丘陵山区农用自适应调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):42 – 47.
LIU Pingyi, PENG Fengjuan, LI Haitao, et al. Design and experiment of adaptive leveling chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):42 – 47. (in Chinese)
- [33] XIE X L, HAN X B, ZHANG Z H, et al. Structural design and test of arch waist dynamic chassis for hilly and mountainous areas[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(3): 1921 – 1933.
- [34] 聂建军,闫修鹏,马宗正,等. 新型弓腰式移动底盘的设计及通过性分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(3):515 – 524.

- NIE Jianjun, YAN Xiupeng, MA Zongzheng, et al. Design and trafficability analysis of new bow waist mobile chassis[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(3): 515–524. (in Chinese)
- [35] 韩振浩, 朱立成, 苑严伟, 等. 基于重心自适应调控的山地果园运输车设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 430–442.
- HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Design and test of transport vehicle for hillside orchards based on center of gravity regulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 430–442. (in Chinese)
- [36] QIN J H, WU A B, SONG Z S, et al. Recovering tractor stability from an intensive rollover with a momentum fly-wheel and active steering: system formulation and scale model verification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106458.
- [37] SONG Z S, WANG L L, LIU Y M, et al. Actively steering a wheeled tractor against potential rollover using a sliding mode control algorithm: scaled physical test[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 13–29.
- [38] 秦嘉浩, 李臻, 光岡宗司, 等. 基于模型实验的拖拉机配置对稳定性的影响差异[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1236–1245.
- QIN Jiahao, LI Zhen, MITSUOKA Muneshi, et al. Significance variation of factorial effects on tractor stability employing scale-model-based experimental approach[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1236–1245. (in Chinese)
- [39] WANG Z, XIA Y. Model establishment of body attitude adjustment system based on backstepping control algorithm and automatic leveling technology[J]. Cluster Computing, 2019, 22: 14327–14337.
- [40] CHEN X H, LV X L, WANG X, et al. Design and study on the adaptive leveling control system of the crawler tractor in hilly and mountainous areas[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2022, 66(1): 301–310.
- [41] HU K, ZHANG W Y, QI B. Analysis and design of auto-adaptive leveling hydraulic suspension for agricultural robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(5): 17298814211040634.
- [42] 张锦辉, 李彦明, 齐文超, 等. 基于神经网络 PID 的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 356–366.
- ZHANG Jinhui, LI Yanming, QI Wenchao, et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 356–366. (in Chinese)
- [43] 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. (in Chinese)
- [44] 蒋俞, 孙泽宇, 汪若尘, 等. 丘陵山区履带式作业机全向调平系统设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 64–73.
- JIANG Yu, SUN Zeyu, WANG Ruochen, et al. Design and performance test of the omnidirectional leveling system for crawler work machine in hilly areas[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 64–73. (in Chinese)
- [45] 孙泽宇, 夏长高, 蒋俞, 等. 基于 QBP–PID 的履带式作业机全向调平控制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 397–406.
- SUN Zeyu, XIA Changgao, JIANG Yu, et al. Omnidirectional leveling control of crawler machine based on QBP–PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 397–406. (in Chinese)
- [46] 汪若尘, 苏兆睿, 丁仁凯, 等. 基于滑模同步控制的履带式作业机全向调平系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 394–401.
- WANG Ruochen, SU Zhaorui, DING Renkai, et al. Omnidirectional leveling system of crawler machine based on sliding mode synchronous position control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 394–401. (in Chinese)
- [47] SONG Z S, WANG L L, LIU Y M, et al. Actively steering a wheeled tractor against potential rollover using a sliding-mode control algorithm: scaled physical test[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 13–29.
- [48] PENG H, MA W X, WANG Z S, et al. Leveling control of hillside tractor body based on fuzzy sliding mode variable structure[J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 6066.
- [49] 杨福增, 牛瀚麟, 孙景彬, 等. 山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 414–422.
- YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 414–422. (in Chinese)
- [50] LIU Z J, ZHANG G Q, CHU G P, et al. Design matching and dynamic performance test for an HST-based drive system of a hillside crawler tractor[J]. Agriculture, 2021, 11(5): 466.
- [51] 孙祺友. 丘陵山地履带式底盘 HST 系统设计及动态特性研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
- SUN Qiyu. Design and dynamic characterization of HST system for tracked chassis in hilly mountainous area[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [52] LOU X Y. Study on the design of composite transmission system for crawler type full-feeding combine harvester[J]. Applied

Mechanics and Materials, 2015, 722: 80 – 83.

[53] 高明飞,胡纪滨,李学良,等. 履带车辆传动机构实现转向再生功率传递的构型特征研究[J]. 机械工程学报,2019, 55(24):137 – 144.
GAO Mingfei, HU Jibin, LI Xueliang, et al. Study on the characteristics of configuration for the transmission of tracked vehicles to achieve the transfer of steering regenerative power[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 137 – 144. (in Chinese)

[54] LIU J, XIA C G, JIANG D L, et al. Determination and application of maximum efficiency curve of crawler electric tractor motors[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 1310926.

[55] 王宝超,乔明睿,初香港,等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):431 – 439.
WANG Baochao, QIAO Mingrui, CHU Xianggang, et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 431 – 439. (in Chinese)

[56] 朱镇,赖龙辉,王登峰,等. 油电混合机械液压式拖拉机动力系统节能性[J]. 农业工程学报,2022,38(17):52 – 60.
ZHU Zhen, LAI Longhui, WANG Dengfeng, et al. Energy saving characteristics of the mechanical hydraulic tractor power system with oil electric hybrid power[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 52 – 60. (in Chinese)

[57] 韩明兴,徐琨,廖宜涛,等. 新型液电混动履带底盘电液系统联合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(1):396 – 404, 418.
HAN Mingxing, XU Kun, LIAO Yitao, et al. Co-simulation and test of the electro-hydraulic system of novel hybrid track[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):396 – 408,418. (in Chinese)

[58] 傅生辉,张延安,张稳,等. 考虑随机载荷自适应补偿的 PST 换挡策略与硬件在环试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9): 408 – 416.
FU Shenghui, ZHANG Yan'an, ZHANG Wen, et al. PST shift strategy and hardware in loop test considering adaptive compensation of random load[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 408 – 416. (in Chinese)

[59] WANG Y X, JIN C Q, YANG T X, et al. Analysis and experimental investigation of steering kinematics of driven steering crawler harvester chassis[J]. Agriculture, 2023, 14(1): 65.

[60] LÜ X L, LV X R, SHI X J, et al. Experimental verification of the steering performance of all-hydraulic crawler chassis[J]. Engineering Transactions, 2018, 66(4): 427 – 442.

[61] LIU J, LIU W W. Performance research of dual power flow continuous differential steering system for tracked vehicle[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2508(1): 012011.

[62] LIU J, YANG S Y, XIA Z H. Control of pivot steering for bilateral independent electrically driven tracked vehicles based on GWO – PID[J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(6): 231.

[63] TANG Z, ZHANG H T, LI H C, et al. Development of crawler steering gearbox for combine harvester straight forward and steering in situ[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 120 – 126.

[64] DING Z, WANG Z M, SU Z, et al. A new model to predict the slippage coefficient of tracked vehicles during steering[J]. IEEE Access, 2022, 10: 72006 – 72014.

[65] 王猛,赵博,王长伟,等. 基于高斯混合模型的履带拖拉机转弯半径控制方法[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1): 557 – 563.
WANG Meng, ZHAO Bo, WANG Changwei, et al. Method for controlling turning radius of crawler-type tractors based on GMM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 557 – 563. (in Chinese)

[66] 石志标,刘江,高峰,等. 基于新型双功率流差速转向机构的履带车辆转向性能[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019, 50(4):864 – 872.
SHI Zhibiao, LIU Jiang, GAO Feng, et al. Steering performance of tracked vehicle based on mechanical differential steering mechanism with twin driving[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(4): 864 – 872. (in Chinese)

[67] 杨洋,张刚,查家翼,等. 基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(8):44 – 54,61.
YANG Yang, ZHANG Gang, ZHA Jiayi, et al. Design of automatic steering system based on direct connection of DC motor and full hydraulic steering gear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 44 – 54, 61. (in Chinese)

[68] 关卓怀,沐森林,吴崇友,等. 履带式联合收获机水田作业转向运动学分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(13):29 – 38.
GUAN Zhuohuai, MU Senlin, WU Chongyou, et al. Steering kinematic analysis and experiment of tracked combine harvester working in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 29 – 38. (in Chinese)

[69] 杜小强,洪方伟,马锟宏,等. 农业装备行驶滑动辨识与控制研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 1 – 20.
DU Xiaoqiang, HONG Fangwei, MA Zenghong, et al. State-of-the-art and prospect on sliding identification and control of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8):1 – 20. (in Chinese)

[70] 张津. 基于激光雷达的果园履带车自动导航控制方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.
ZHANG Jin. Research on automatic navigation control method of orchard crawler based on LiDAR[D]. Yangling: Northwest

A&F University, 2023. (in Chinese)

[71] 刘志杰,王小乐,任志刚,等. 基于虚拟雷达模型的履带拖拉机导航路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报,2021,52(6): 376 – 385.

LIU Zhijie, WANG Xiaole, REN Zhigang, et al. Crawler tractor navigation path tracking control algorithm based on virtual radar model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 376 – 385. (in Chinese)

[72] MA Z H, YIN C, DU X Q, et al. Rice row tracking control of crawler tractor based on the satellite and visual integrated navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106935.

[73] GUAN Z H, LI Y, MU S L, et al. Tracing algorithm and control strategy for crawler rice combine harvester auxiliary navigation system[J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 50 – 62.

[74] ZHOU B C, SU X, YU H J, et al. Research on path tracking of articulated steering tractor based on modified model predictive control[J]. Agriculture, 2023, 13(4): 871.

[75] ZHANG W Y, HU L W, DING F, et al. Parking precise alignment control and cotransporter system for rice harvester and transporter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108443.

[76] HE Y Q, ZHOU J, SUN J W, et al. An adaptive control system for path tracking of crawler combine harvester based on paddy ground conditions identification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107948.

[77] 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)

[78] ZHANG L H, ZHANG R R, LI L L, et al. Research on virtual Ackerman steering model based navigation system for tracked vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106615.

[79] 张朝宇,董万静,熊子庆,等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021, 52(12):105 – 114.

ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105 – 114. (in Chinese)

[80] 何杰,满忠贤,胡炼,等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(1):9 – 17.

HE Jie, MAN Zhongxian, HU Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 9 – 17. (in Chinese)

[81] 齐泽中,周俊,叶子渭,等. 单侧制动式转向履带底盘自主行走局部路径规划方法[J]. 农业机械学报,2024,55(6): 52 – 59.

QI Zezhong, ZHOU Jun, YE Ziwei, et al. Local path planning method in automatic walking of single-side brake steering track chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 52 – 59. (in Chinese)

[82] 迟媛,张荣蓉,任洁,等. 履带车辆差速转向时载荷比受土壤下陷的影响[J]. 农业工程学报,2016, 32(17): 62 – 68.

CHI Yuan, ZHANG Rongrong, REN Jie, et al. Steering power ratio affected by soil sinkage with differential steering in tracked vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 62 – 68. (in Chinese)

[83] KELLER T, TRAUTNER A, ARVIDSSON J. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 68(1): 39 – 47.

[84] LAMANDÉ M, GREVE M H, SCHJONNING P. Risk assessment of soil compaction in Europe – Rubber tracks or wheels on machinery[J]. Catena, 2018, 167: 353 – 362.

[85] 丁肇,李耀明,唐忠. 轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析[J]. 农业工程学报,2020, 36(5): 10 – 18.

DING Zhao, LI Yaoming, TANG Zhong. Compaction effects of wheeled vehicles and tracked on farmland soil [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 10 – 18. (in Chinese)

[86] 赵子涵,穆希辉,郭浩亮,等. 橡胶履带轮静态接地压力测试与建模[J]. 农业工程学报,2018, 34(3):72 – 79.

ZHAO Zihan, MU Xihui, GUO Haoliang, et al. Test and modeling on static ground pressure of rubber track conversion system [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 72 – 79. (in Chinese)

[87] 栗浩展,王红岩,芮强,等. 履带车辆地面牵引力的计算与试验验证[J]. 装甲兵工程学院学报,2015, 29(1): 36 – 40.

LI Haozhan, WANG Hongyan, RUI Qiang, et al. Calculation and testing verification of ground traction of tracked vehicles [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015, 29(1): 36 – 40. (in Chinese)

[88] PAN G T, SUN J B, WANG X L, et al. Construction and experimental verification of sloped terrain soil pressure-sinkage model[J]. Agriculture, 2021, 11(3):243 – 260.

[89] FU J, LI J, FU Q K, et al. Development and verification of adhesion models for track shoes operating on clay soils[J]. Biosystems Engineering, 2023, 235: 69 – 82.

[90] FU J, LI J, TANG X L, et al. Optimization of structure parameters of the grouser shoes for adhesion reduction under black soil [J]. Agriculture, 2021, 11(8): 795.

[91] YANG F, LIU Q, JI Y X, et al. Development and validation of sloped ground pressure prediction model for a tracked tractor in hilly and mountainous environments[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 241: 106135.