doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.001

丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述

孙景彬[1]　刘志杰[2,3]　杨福增[2,3]　孙　群[1]　刘　琪[2,3]　雒鹏鑫[2]

(1.聊城大学机械与汽车工程学院,聊城 252000;
2.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
3.农业农村部北方农业装备科学观测实验站,陕西杨凌 712100)

摘要:丘陵山区先进适用农机装备的研发是目前国内农机装备研究的热点和难点问题之一。目前,我国丘陵山区农业生产存在“无机可用,无好机用”的现实问题,并且先进适用丘陵山地农机装备(简称山地农业装备)的研发缺乏必要的理论支撑。本文重点综述了国内外山地农业装备尤其是山地拖拉机及山地农机调平技术、山地拖拉机驱动与动力系统、山地农机具及其作业性能的研究现状,阐述了农机土壤压实与坡地土壤耕作侵蚀的研究进展,总结归纳了山地农机设计及山地农机-土壤互作机理研究的计算机辅助方法。展望丘陵山地农机装备及坡地作业技术的研究重点及发展方向:山地农机-坡地土壤-作物(养分)互作机理研究;山地农机总体设计与农艺及坡地作业场景深度融合;山地农机姿态调平机构与控制策略;山地农机动力高效传递与灵便转向驱动;山地农机作业机组的智能化监测与精确自主导航。以期为我国丘陵山区农机装备的研发设计提供借鉴参考。

关键词:丘陵山地;农业装备;山地拖拉机;坡地作业;精确自主导航

中图分类号:S219;S22　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)05-0001-18　　**OSID**:

Research Review of Agricultural Equipment and Slope Operation Key Technologies in Hilly and Mountains Region

SUN Jingbin[1]　LIU Zhijie[2,3]　YANG Fuzeng[2,3]　SUN Qun[1]　LIU Qi[2,3]　LUO Pengxin[2]

(1. *College of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng* 252000, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
3. *Scientific Observing and Experimental Station of Agricultural Equipment for Northern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The research and development of advanced agricultural machinery equipment in hilly and mountainous areas is one of the hot and difficult problems in the development of agricultural machinery equipment in China. At present, the agricultural production in hilly and mountainous areas still has the practical problem of “no available machinery, no good machinery”, and the research and development of advanced suitable agricultural equipment lacks the necessary theoretical support. The research status of hillside agricultural machinery equipment at home and abroad, especially hillside tractor, hillside agricultural machinery leveling technology, hillside tractor driving and power system, hillside machinery and tools and their operating performance were summarized, and the research progress of soil compaction and soil tillage erosion in slope operation by agricultural machinery was analyzed. The advanced computer aided methods for the design of hillside agricultural machinery and the study of the interaction mechanism between hillside agricultural machinery and soil were summarized. Finally, the research focus and development direction of agricultural machinery equipment and slope operation technology in hilly and mountainous areas were prospected as follows: the interaction mechanism between agricultural machinery and slope soil and crop (nutrient); the overall design of hillside agricultural machinery deeply integrated with agronomy and slope operation scene; efficient and reliable attitude adjustment mechanism and control strategy of hillside machinery; hillside farm machinery efficient transmission and easy steering

收稿日期:2022-12-20　修回日期:2023-02-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0700503)、博士科研启动项目(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,主要从事丘陵山地农业装备与坡地土壤互作机理研究,E-mail:sunjingbin0208@163.com

通信作者:杨福增(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事丘陵山地智能农机装备研究,E-mail:yangfzkm@nwafu.edu.cn

drive; and intelligent monitoring and accurate autonomous navigation of mountain farm machinery operation. This review can provide reference for efficient and high quality production of agriculture in hilly and mountainous areas.

Key words: hills and mountains; agricultural machinery equipment; hillside tractor; slope operation; precise autonomous navigation

0 引言

我国的丘陵山地面积辽阔,约占国土总面积的70%[1],主要分布在19个省区市的1 400余个县市区,其耕地面积、农作物播种面积均占全国的1/3,涉及农业人口近3亿人[2],由此可见该地区农业的发展水平直接关系到我国农业的整体水平。但是,目前丘陵山区的农业机械化水平严重滞后,2020年,丘陵山区县(市、区)农作物耕种收综合机械化率为49%,远远低于全国综合机械化率71%的水平[3]。目前,农业农村部印发的《"十四五"全国农业机械化发展规划》[3]中明确指出"积极发展丘陵山区农业生产高效专用农机,推动丘陵山区通用动力机械装备研发,增加装备供给。"《中共中央国务院关于做好2022年全面推进乡村振兴重点工作的意见》[4]亦明确指出"全面梳理短板弱项,加强农机装备工程化协同攻关,加快丘陵山区机械研发制造并纳入国家重点研发计划予以长期稳定支持。"由此可见,推进丘陵山区适宜农业装备的研发推广迫在眉睫。

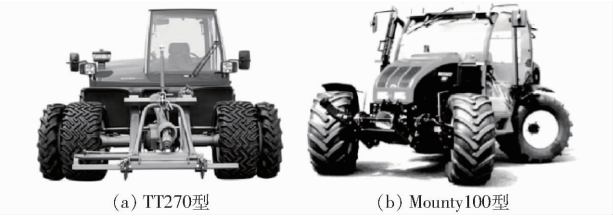
从农业耕地开发的角度来说,必须要有一个适宜开发的范围。丘陵山区耕地从坡度等级情况看:0°~15°的耕地比重最大,占87.5%;15°~25°、25°以上的耕地分别占9.2%和3.3%。从适宜农业装备作业的角度看,2°~6°的缓坡地与2°以下的平耕地区别不大,在该坡度耕地上作业的农业装备基本不需要进行姿态调平就可以满足需求;6°~15°的丘陵地更适宜于中小型农机具作业,并且作业过程中要实现姿态调平来保证农机具的安全性及作业质量;而15°~25°的坡耕地,则只宜使用小型农机具,对姿态调平系统的需求更为必要;25°以上的陡坡地,不宜开发为耕地[1]。故亟需解决的丘陵山区农业装备问题主要是指6°~15°丘陵地和15°~25°坡耕地的机械化问题,即以中小型机械为主的丘陵山区小田块机械化问题;此外指的是丘陵山区特有经济作物如茶叶、水果等的机械化问题[1]。

因此,本文拟综述国内外山地拖拉机整机及其姿态调平技术的现状、山地农机具及其作业性能的研究进展,结合我国丘陵山区的实际特点,分析讨论现有坡地耕作模式及存在问题、坡地作业机理研究的先进方法,展望丘陵山区坡地机械化作业技术与装备、山地拖拉机及其配套机具的研究趋势,以期为我国丘陵山区先进适用农机装备的研发推广提供借鉴。

1 山地拖拉机国内外研究现状

1.1 山地拖拉机国外研究现状

国外企业和科研院所对丘陵山地拖拉机的研发起步较早,研发出各具特点的丘陵山地拖拉机,瑞士Aebi公司生产的TT270型(图1a)和奥地利Reform公司生产的Mounty100型山地型拖拉机(图1b)均具有较好的牵引附着性能和越野性能,但缺乏丘陵山地农业生产所必需的稳定性、地形适应性,而且机型偏大,难以适应我国丘陵山地道路窄、地块小的农业自然条件。



(a) TT270型 (b) Mounty100型

图1 国外大型山地拖拉机

Fig. 1 Foreign large scale hillside tractors

意大利安东尼奥卡罗拉公司生产的MACH4R型拖拉机(图2)采用四轮驱动半履带,有较好的动力性和缓坡地适应性。但该型拖拉机价格相对昂贵,不具有坡地姿态调平机构,较大坡度山地适应性差,难以适应我国丘陵山地相对复杂的作业场景。



图2 MACH4R型山地拖拉机

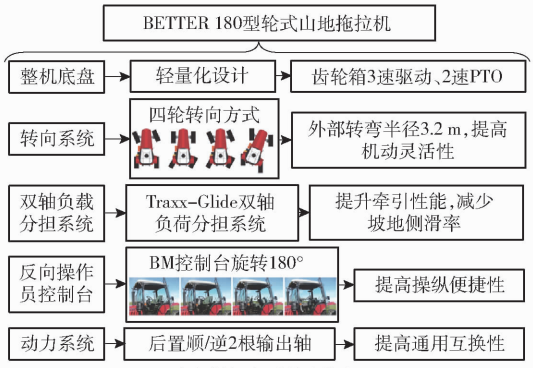
Fig. 2 MACH4R hillside tractor of Italian Corolla company

意大利BM TRACTORS公司生产的BETTER 180型山地拖拉机(图3),具有较好的地面适应性,配备独立轴转向系统,可分别实现前轮、后轮及四轮

转向，装载电子 BETCAM 系统、自动减速装置、自动爬升系统，以防止系统中过大的推进压力。但该机型地面附着性能、坡地自动调平性能欠缺。



(a) 样机实物



(b) 样机主要技术特点

图 3　BETTER 180 型山地拖拉机

Fig. 3　BETTER 180 hillside tractor of Italy BM TRACTORS company

意大利 BCS 公司生产的 Sky－Jump－V950 型山地拖拉机[5]（图 4），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。并采用 DUALSTEER 型双转向系统，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上表现出来的牵引力、稳定性、机动性和安全性均较为优越。

伊朗科技大学及 Jahade Keshavarzi 科研机构分别对山地拖拉机稳定性及行走机构进行了研究，如图 5 所示，该拖拉机在 24°左右的坡地上具有较好稳定性和地形适应性。

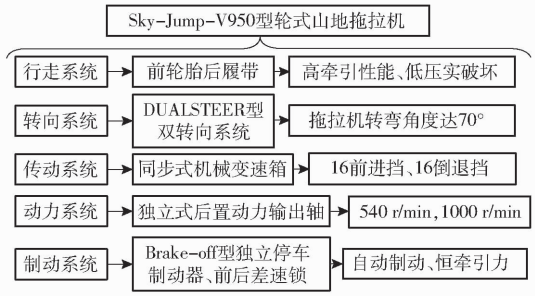
综上，国外的山地拖拉机的研发较为先进，但大多体积偏大、价格昂贵，不适合我国丘陵山区道路窄、地块小的农业自然条件和山区农民购买力偏低的经济条件。

1.2　山地拖拉机国内研究现状

目前国内丘陵山区作业的主要机型为手扶山地拖拉机和微耕机，例如：中国农业大学研制、中国中车集团生产的 STI－8 型山地拖拉机（图 6a），该拖



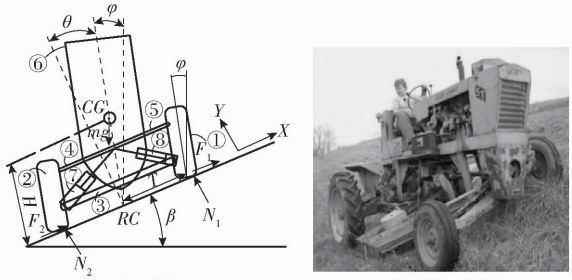
(a) 样机实物



(b) 样机主要技术特点

图 4　Sky－Jump－V950 型山地拖拉机

Fig. 4　Sky－Jump－V950 hillside tractor of Italy BCS company



(a) 调平原理　　(b) 样机实物

图 5　伊朗科技大学研发的山地拖拉机

Fig. 5　Mountain tractor developed by Iranian University of Science and Technology



(a) STI-8型山地拖拉机　　(b) 山地微耕机

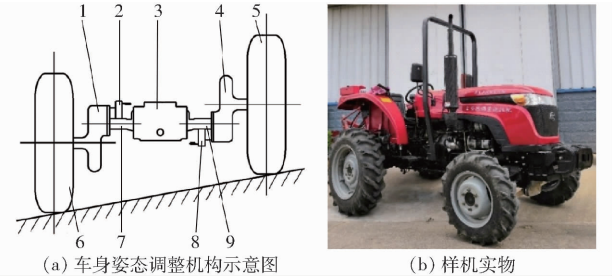
图 6　丘陵山区主要作业机型

Fig. 6　Main machines for operation in hilly and mountainous areas

拉机为小型手扶式拖拉机，可以在小于 25°的坡地上保持车身水平，但手扶式拖拉机操作较为困难，对驾驶人员的操作水平要求较高，人员的安全性难以保证；重庆合盛、北京蓝天等公司研制的山地微耕机（图 6b），其主要特点是体积小、价格低，被我国许多丘陵山区农民使用，但存在动力小、操作强度大、功能单一等缺点。

“十二五”以来，在国家政策和科研项目的支持

下,国内的企业、高校等机构在山地(包括轮式、履带式)拖拉机的研发方面开展了系列工作并取得一些成果。轮式山地拖拉机研究方面,上海交通大学和山东五征集团联合研制了一种具有姿态主动调整功能的山地轮式拖拉机,如图 7 所示,具有较好的坡地适应性[6-7]。四川川龙拖拉机制造有限公司研发了可进行姿态调整的轮式山地拖拉机,如图 8 所示,实地试验表明样机具有较好的稳定性和地形适应性[8]。并且基于电控液压悬挂、智能控制自主作业技术等拖拉机前沿技术,该公司自主开发的重载防脱挡技术和速度匹配液压驱动技术已应用于其丘陵山地拖拉机。

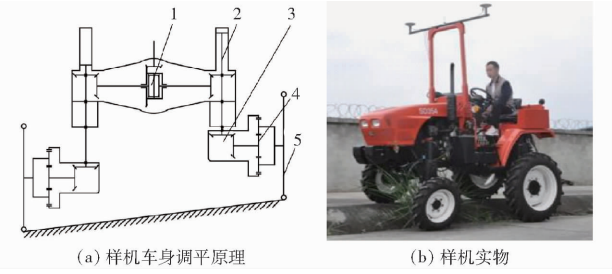


(a) 车身姿态调整机构示意图 (b) 样机实物

图 7 山东五征集团的轮式山地拖拉机

Fig. 7 Wheeled hillside tractor produced by Shandong Wuzheng Group Company

1. 左末端传动机构 2. 左摆动机构 3. 后驱动桥 4. 右末端传动机构 5. 右车轮 6. 左车轮 7. 左半轴套管 8. 右摆动机构 9. 右半轴套管



(a) 样机车身调平原理 (b) 样机实物

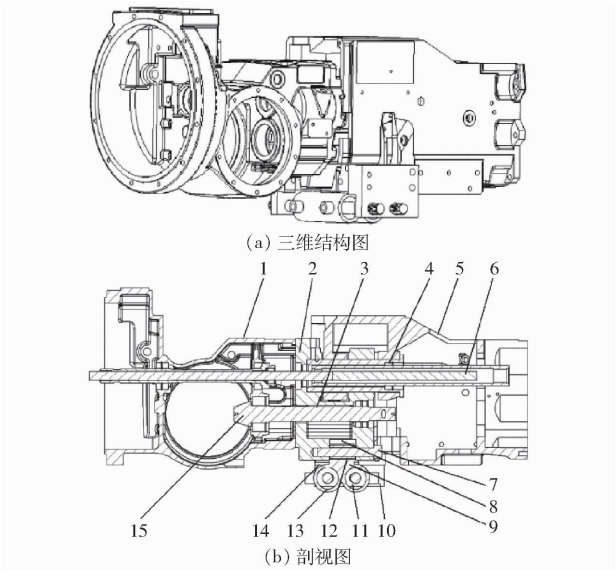
图 8 四川川龙拖拉机制造有限公司的轮式山地拖拉机

Fig. 8 Wheeled hillside tractor produced by Sichuan Chuanlong Tractor Manufacturing Company

1. 中央差速器 2. 调平液压缸 3. 转向节 4. 轮边传动 5. 轮胎

此外,山东五征集团联合山东农业大学[9]针对目前姿态调整式丘陵山地拖拉机只能实现静态调平和差高调平、调平精度低等问题,设计了一种轮式丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置,结构如图 9 所示。该装置通过调整前后车身的相对转动来实现山地拖拉机对复杂路面的适应,扭腰轮式山地拖拉机的样机如图 10 所示。

履带式山地拖拉机研发方面,西北农林科技大学杨福增团队[10-12]研发了一种小型山地履带无人拖拉机(图 11a)。该机采用遥控式液压差高装置(图 11b)来保证拖拉机在 0° ~23°的等高线坡地上



(a) 三维结构图

(b) 剖视图

图 9 扭腰姿态调整装置结构图

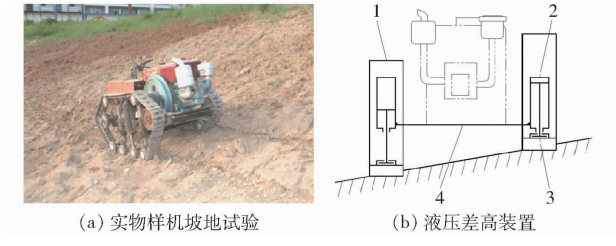
Fig. 9 Structure diagrams of twisting and swinging attitude adjustment device

1. 前桥壳体 2. 滚架 3. 前驱动桥轴孔 4. 摇摆轴孔 5. 过桥壳体 6. 摆动轴 7. 连接轴销 8. 避让凹口 9. 扭腰调整拖动机构 10. 扭腰调整油缸 11. 缸杆套装孔 12. 销轴套 13. 缸杆套装部件 14. 安装座 15. 前桥驱动轴



图 10 扭腰轮式山地拖拉机

Fig. 10 Twisting and swinging wheeled hillside tractor



(a) 实物样机坡地试验 (b) 液压差高装置

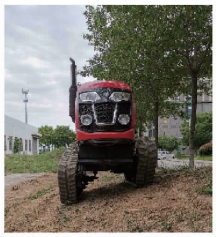
图 11 小型山地履带无人拖拉机

Fig. 11 Small remote control hillside crawler tractor

1. 履带 2. 姿态调整液压缸 3. 台车架 4. 车架

完成横向姿态调整,使车身在坡地始终处于水平状态,提高了其抗侧滑、抗倾翻等坡地稳定性能;同时该机借鉴无人机的设计经验,并依据黄土高原山地实车试验,首次设计了无驾驶座的拖拉机遥控操作系统,其优点是实现了拖拉机的人机分离,彻底消除了操作驾驶人员的坡地安全隐患;需要特别说明的是,操作驾驶人员的坡地安全性是山地拖拉机的安全底线,也是与普通拖拉机的显著区别。

此外，西北农林科技大学杨福增团队研发了一种全向姿态调整山地履带无人拖拉机[13-14]，如图 12 所示。该机基于“平行四杆机构”和“双车架机构”实现机身的横、纵向姿态调整（自动式/遥控式），调平原理如图 13、14 所示。显著提高了山地拖拉机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，试验结果表明该机在坡地可较好地实现坡地仿形旋耕、播种和喷药等作业。此外，整机集成遥控技术，实现人机分离，大大提高了操作人员的安全性和便捷性；基于静液压驱动技术实现整机 0 ~ 8 km/h 的无级调速，从而满足丘陵山区多工况下的行驶和作业速度需求。


(a) 横向姿态调整


(b) 纵向姿态调整



(c) 整机坡地旋耕



(d) 整机坡地播种



(e) 整机坡地喷药

图 12　全向姿态调整山地履带无人拖拉机坡地试验

Fig. 12　Slope performance test of omnidirectional attitude adjustment hillside crawler unmanned tractor

综上所述，目前国内的丘陵山地拖拉机研发大部分处于科研样机阶段，山地农机产品化尚存在不足，有必要进一步优化、改进研发适合我国山区农业自然条件、先进适用、价格合理的丘陵山地拖拉机，

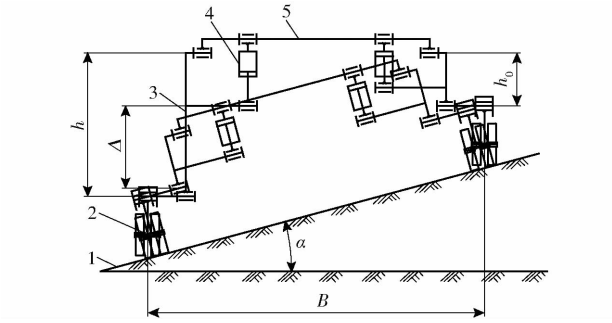


图 13　山地拖拉机横向调平原理图

Fig. 13　Lateral leveling principle diagram of hillside tractor

1. 斜坡　2. 行走系　3. 主从连杆机构　4. 横向调平油缸　5. 下层车架

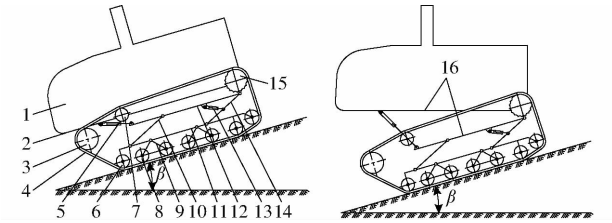


图 14　山地拖拉机纵向调平原理图

Fig. 14　Longitudinal leveling principle of hillside tractor

1. 拖拉机机体　2. 上层车架　3. 履带张紧轮　4. 履带　5. 纵向调平油缸　6. 固定轮　7. 拖带轮　8. 浮动轮　9. 浮动轮支架　10. 从连杆　11. 台车架　12. 下层车架　13. 横向调平油缸　14. 主连杆　15. 驱动轮　16. 双车架机构

由具有一定产业化实力的企业实现其批量生产、推广应用，同时最好借助快速换装模块，高效便捷地适配耕、种、管、收、运等多种作业机具，以解决农业机械化发展的动力瓶颈和卡脖子短板问题。

1.3　山地农机坡地作业机身调平技术研究现状

高效高质量丘陵山地拖拉机的研发已经成为当前农业装备研究领域的热点之一。目前，国内外针对丘陵山地拖拉机的机身姿态调平、农具坡地仿形作业等关键技术已开展了大量研究，并取得了较多的成果。

国外对于山地农机调平系统的研究起步较早，日本久保田、大同等公司生产的履带联合收获机，通过履带升降机构调节单侧履带的高度来补偿机身的横向倾斜[15-19]。HAUN [20] 发明了适用于割草机的调平机构，可使割草机身始终保持水平状态。美国约翰迪尔公司研发了适用于坡地作业的联合收获机调平系统，具有较好的稳定性[21]，但上述两种调平系统均不适用于山地拖拉机的牵引作业，而拖拉机最基本而又繁重的作业方式是通过牵引实现耕地等基本农艺功能，这意味着拖拉机必须具备承受各种载荷（包括各种土壤环境和农艺要求相对应的载荷）的牵引特性。AHMADI[22] 设计了一种拖拉机动态调平模型，研究了在位置扰动下，速度、坡度及地

轮摩擦系数对横向稳定性的影响。LEONARD 等[23]研究了一种车辆自动调平系统,通过采集车身倾角信息来完成车身的姿态调整,但该系统仅能实现车辆的静态调平。

机身调平研究方面:彭贺等[24-25]研制了基于液压缸驱动的轮式拖拉机车身四点调平机构,完成了运动学和动力学的仿真分析,并设计了一套车身自调平控制系统,开展了相关试验验证,如图 15 所示。刘平义等[26-27]设计了一种适用于丘陵山地的自适应调平底盘,通过动态调平减小底盘的侧倾角和俯仰角,但其动力偏小。文献[28-29]基于液压差高机构的微型山地履带拖拉机,运用 PID 算法实时控制车身的调平角。齐文超等[6-7]设计的基于双闭环 PID 的山地拖拉机姿态主动调整控制系统,如图 16 所示,其精度和稳定性基本能够满足实际使用需求。刘国辉等[30]为提高山地拖拉机在复杂农田环境中的作业平稳性,基于 Matlab/Simulink 仿真平台,搭建了半主动悬架拖拉机七自由度时域仿真模型,包括四轮路面激励模型、半主动悬架振动模型、半主动悬架拖拉机车体受力分析模型、车身姿态分析模型以及半主动悬架拖拉机时域仿真模型,以车身垂向位移、车身倾斜角和车身俯仰角作为拖拉机的姿态变化参数进行仿真试验,结果表明相比增量式 PID 控制,基于 BP 神经网络 PID 控制的半主动悬架拖拉机,车身平稳性得到较好提高。

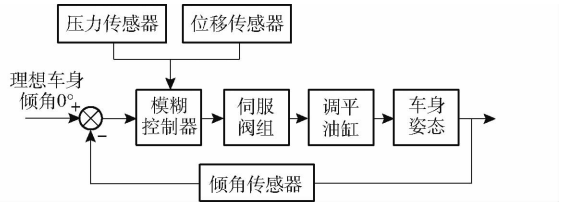


图 15 拖拉机调平控制系统原理图

Fig. 15 Principle diagram of tractor leveling control system

悬挂系统与农具姿态调整方面:蒋俊等[31]为满足配套农机具对坡地地形的适应性,保证农机具作业质量,针对 2 个不同负载的悬挂油缸需要同步运动的工况需求,设计了适用于丘陵山地拖拉机的电控液压悬挂系统,通过 AMESim 软件搭建系统仿真模型,分别对定、变负载 2 种工况进行了仿真分析,结果表明速度、位移误差控制在 5% 以内,基本满足设计要求。范永奎等[32]设计了一款电液悬挂仿形机构,采用带死区的经典 PID 算法控制农具的横向倾角,使其与地面保持平行。翟志强等[33]针对山地拖拉机电液悬挂控制系统田间试验困难、可重复性差的问题,基于半实物仿真技术开展电液悬挂控制系统试验研究,对拖拉机和悬挂装置受力分析,建立拖拉机、悬挂装置的动力学模型,对悬挂系统横向仿形控制、位控制、牵引力控制以及力位综合控制原理进行分析,设计电液悬挂模糊 PID 控制器,试验结果表明模糊 PID 控制性能优于经典 PID 控制。周浩等[34]设计了一种旋耕机自动调平系统,通过 PID 控制器控制电磁换向阀,油缸动作实现农具的自动调平。刘林[35]设计的农具自动调平系统,通过液压换向阀来控制液压缸运动,实现农具的自动调平,其控制精度有待提高。

山地拖拉机与农具姿态协同调整控制方面:张锦辉等[36]采用神经网络 PID 同步控制算法,设计了一种山地拖拉机姿态同步控制系统,实现了车身和农具姿态的同步调整,其控制精度和调整速度均能够满足作业的需求。杨福增等[37]针对山地履带拖拉机等高线作业时车身调平和农具仿形作业不同的姿态调整需求,在建立车身及农具运动学模型的基础上,设计了车身与农具姿态协同控制系统,如图 17 所示,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

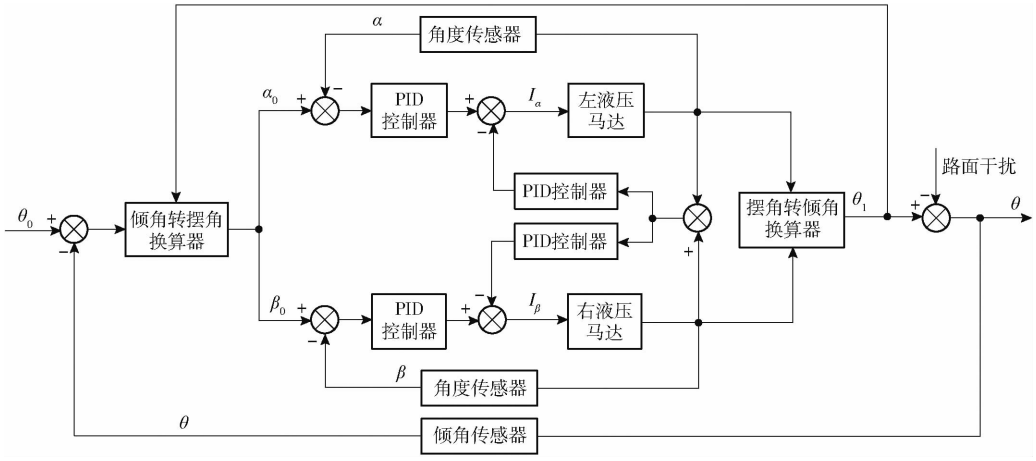


图 16 山地拖拉机姿态主动调整控制系统原理图

Fig. 16 Principle diagram of attitude active adjustment control system for hillside tractor

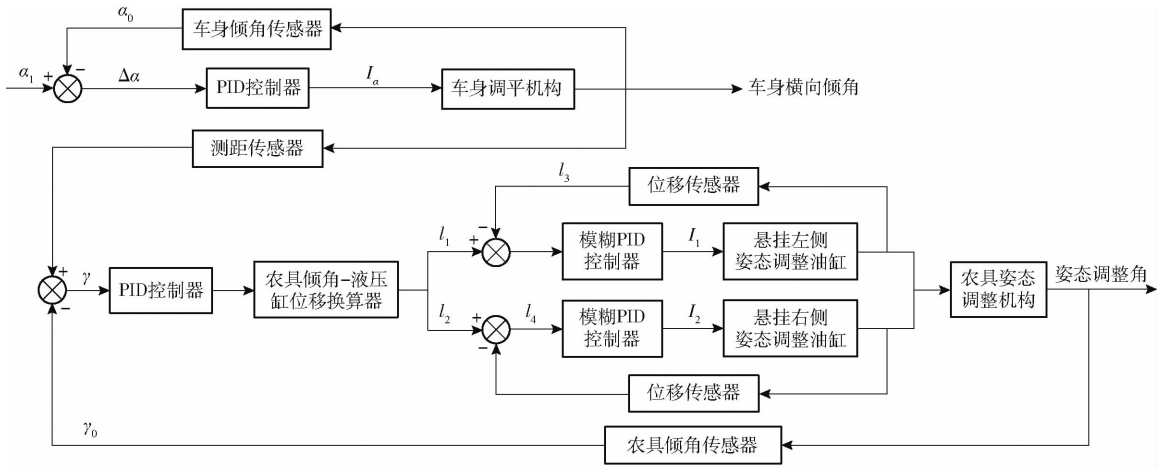


图 17　山地拖拉机与农具姿态协同控制系统原理图

Fig. 17　Principle diagram of attitude cooperative control system for hillside tractor and farm tool

算法，机组姿态协同调整的静态、动态实地试验结果表明该姿态协同控制系统精度和稳定性能够满足丘陵山区坡地等高线作业需求。

综上，国内外专家学者针对山地农机在坡地调平技术方面开展了一定的研究工作，主要是通过创制适宜山地环境的农机调平机构，进而搭建专用的控制系统，设计高效精确的控制策略和算法来实现山地拖拉机机身的姿态调平或者山地动力机与作业机的协同姿态调整。目前，主要完成了室内及坡地试验，需进一步提高机械本体以及控制系统的可靠性，加快推广应用。

1.4　山地拖拉机驱动与动力系统研究现状

丘陵山区的农机工作条件相对比较恶劣，机耕道路狭窄、地块小、坡度大，而拖拉机机身存在体积大、操作困难、稳定性差等现实问题，这些因素均限制了丘陵山地拖拉机的发展，特别是坡地作业时车轮、履带滑移滑转现象导致拖拉机的驱动力不足，会严重影响作业效率和质量。国内外专家针对该问题做了相关研究。

目前国内大多通过构建拖拉机坡地作业动力学模型，并结合仿真试验完成驱动与动力系统设计，进而开展相关研究。LIU 等[38]针对中型山地履带拖拉机坡地作业时调速范围小、操纵复杂、安全性低等主要问题，设计了一种适用于山地履带拖拉机的静压驱动系统。根据山地拖拉机的使用要求，在分析拖拉机受力与运动学的基础上完成驱动系统中的柴油发动机、静压传动(HST)、驱动后桥等关键部件的参数匹配，搭建了驱动系统性能试验台，对驱动系统的牵引性能和起动加速性能进行了测试，台架试验结果表明该驱动系统的设计合理，转速一致性好，有足够的动力储备，能满足坡地作业的动力需求。李江等[39]针对丘陵山地四轮驱动拖拉机作业时车轮打滑导致驱动力不足的问题，优化设计了拖拉机传动系统关键部件，并建立拖拉机动力学模型，对轮间驱动力进行分析，提出了提高驱动效率最佳条件；设计了新型驱动力分配装置以对轴间驱动力重新分配，并搭建控制系统完成仿真试验，结果表明该装置能明显改善打滑现象，提高山地拖拉机的驱动性能。扈凯等[40]针对传统拖拉机难以适应丘陵山地复杂工况的问题，设计了一种丘陵山地拖拉机全液压驱动系统；根据工况需求，驱动系统采用单泵四马达的闭式回路，并使用同步马达防止车轮滑转，基于 AMESim 软件建立液压系统模型并完成仿真，仿真结果表明液压系统满足工作需求；在同步马达不工作时，拖拉机单个车轮滑转会使得系统丧失驱动能力，系统工作压力仅为 1.838 MPa，当同步马达强制分流时，系统工作压力为 19.197 MPa，可使拖拉机重新恢复驱动力，该研究方法为山地农机液压驱动系统的设计提供参考。范永奎等[41]针对丘陵山地拖拉机工作时需要调平车身，悬挂装置实时调节以适应地形变化的具体问题，设计了一种适用于山地拖拉机复合作业的液压多点动力输出系统；基于 AMESim 软件建立多点动力输出系统的仿真模型，仿真结果表明系统压力调整时间约 0.1 s，几乎无超调；室内试验验证了液压系统具有负载反馈、压力补偿和流量分配等功能。

综上所述，学者针对山地拖拉机驱动与动力系统的研究主要为集成静液压无级变速(HST)驱动系统、全液压驱动、轮间驱动力分配、液压多点动力输出等，较多地集成工业领域的现有技术或者产品。在后续研究中，急需紧密结合丘陵山区的地形地貌特点，重点突破高效轻量化液压机械无级变速器(HMCVT)驱动技术，解决核心部件的技术难点，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[42-46]。

1.5 山地机具与作业性能研究现状

1.5.1 坡地作业机具研究现状

针对丘陵山区地块面积小、机耕道路狭窄,大型农业装备运输难、进地难、转场难、操作难等现状,国内的科研机构着重对丘陵山区坡地中小型作业机具进行了研究。

坡地耕整地机具方面:有关坡地耕作机具的研究较少,耕整地还是以小型微耕机作业为主,操纵难度较大,急需研制高效灵便低耕作侵蚀的耕整地机械,从而提高耕作后的坡面平整度,保证后续播种深度的均匀性。坡地播种作业机具方面:丘陵山区地形复杂的小地块播种杂粮时,主流方式是小型拖拉机与机械式排种器配套使用,但机械式排种器在倾斜条件下作业会导致种子在型孔中充填性能下降,从而使重播与漏播现象加剧。为解决上述问题,贾洪雷等[47]设计自吸式绿豆精密排种器,该机气力式排种器坡地作业抗干扰能力强,无需风机提供负压,可节省功耗,满足丘陵坡地等小地块精密播种作业的需求。坡地收获作业机具方面:针对丘陵山区地形和胡麻收获特点,史瑞杰等[48]设计了一种履带式丘陵山地胡麻联合收获机,该机采用防缠绕低损割台、纹杆+杆齿组合式小锥度横轴流脱粒滚筒、组合式窄栅格凹板等结构实现了胡麻茎秆的防缠绕快速喂入、分段式脱粒与分离、清选等作业,并进行田间验证试验。并且,该团队以丘陵山地胡麻联合收获机初选、精选复式清选系统工作模式为研究对象,分别建立初选系统、精选系统 CFD 模型和胡麻脱出物 DEM 模型,采用 CFD-DEM 联合仿真技术,研究丘陵山地胡麻联合收获机复式清选系统最佳工作参数和脱出物各组分运动轨迹及空间形态变化,得出丘陵山地胡麻联合收获机脱出物分离规律,并进行试验验证仿真模型的可靠性[49]。针对丘陵山地玉米种植地块多而碎小制约玉米机械化收获的现状,耿端阳等[50]设计了一款履带式坡地玉米收获机,实现丘陵山地复杂地形条件下玉米的机械化收获;该收获机采用横辊摘穗技术,解决了传统摘穗辊喂入性不流畅和复杂地形下玉米植株的喂入问题。

综上所述,目前国内针对丘陵山区的主要作业机具研究有杂粮播种、胡麻收获、玉米收获等,坡地耕作机械、坡地田间管理(施肥、施药等)机械尚缺乏,因此急需针对我国丘陵山区地域广、作物种植多样化的现状,从区域性差异、土壤类型差异、作物种类差异、农艺要求差异等方面着手,研发适宜于区域性丘陵山区作业的专用机具,例如:坡地高效低侵蚀的耕作机械、大豆玉米带状复合种植专用机械、果园茶管理机械、油菜低损收获机、油茶果收获机、大宗茶自走式收获机等。

1.5.2 山地机具行驶作业性能研究现状

根据山地实际作业地形特点,对山地动力底盘的坡地通过性、越障性等进行相关理论分析,对于坡地高通过性关键结构参数的确定及关键零部件的创新设计具有实质指导意义。

在山地机具行驶作业性能研究方面,主要的研究思路是针对特定作业场景中存在的问题,通过对农机具行驶作业过程构建模型进行理论分析,并结合多体动力学软件进行仿真,最终开展田间试验进行探究。韩振浩等[51-52]为了探究山地果园底盘坡地通过性能的关键结构参数,提高其在复杂行驶路况下的地形适应性,结合山地果园的地形特点,分别对斜坡平地通过性和斜坡越障通过性进行了理论分析,并基于 RecurDyn 软件进行仿真分析,为底盘的优化设计提供了理论参考。吉旭等[53]针对贵州山地土质松软,地块小、坡度大,现有辣椒收获机作业困难等问题,设计了一种适用于丘陵山地的履带自走式辣椒收获机,基于 RecurDyn 软件对收获机的横坡行驶、纵坡上坡、纵坡下坡、翻越垂直壁和跨越壕沟等行驶作业工况进行动力学仿真,进行田间试验验证了收获机的稳定性和通过性。潘冠廷等[54]针对小型山地拖拉机坡地行驶时,常遇台阶、砖头、石块、田埂等障碍,严重影响通过性及稳定性,引发侧滑甚至倾翻等安全问题,选取台阶为越障对象,基于经典力学分析、RecurDyn 软件仿真的方法对山地拖拉机的爬坡越障性能进行了研究,并实地试验验证了所建立的理论及仿真模型在坡度 0°~15°范围内的有效性。孙景彬等[55]针对山地履带拖拉机坡地等高线作业时,坡地土壤内部应力分布规律不明确以及如何提高应力均匀性缓解土壤压实等问题,基于 EDEM-RecurDyn 耦合仿真、土压力盒埋设法分别开展了仿真试验、基于小型坡地土槽的静态试验以及坡地动态试验;其中,静态试验探究了不同深度土壤在含水率、初始紧实度、加载质量及坡地角等影响下的垂直应力分布规律;动态试验探究了山地履带拖拉机坡地等高线行驶/旋耕作业时履带下方土壤应力随作业速度、车身状态(调平/未调平)及牵引负载的变化规律;并分析了履带张紧力对土壤垂直、水平应力分布的影响。

综上所述,国内学者对于山地农机具行驶、作业性能的研究尚处于起步阶段,主要是研究直线行驶的稳定性、通过性,关于山地农机坡地转向、农机大负载作业时的稳定性、直线行驶性、牵引附着性等方面的研究相对较少,尤其应注重深入研究山地农机

作业载荷特性与分布规律，构建山地农机作业载荷谱，从而有效指导高可靠性调平机构及行走系统的设计。

2　农机土壤压实与耕作侵蚀研究现状

2.1　农机土壤压实研究现状

土壤压实是土地退化的一个重要过程，该过程限制根系的生长，影响作物根系对土壤中水分和养分的吸收，进而造成作物减产[56]。土壤压实的程度取决于农业机械的轮胎/履带接触土壤后应力的传递情况，土壤内的应力是机械的重力所引起的垂直（压缩）应力和水平（剪切）应力的组合[57]，当土壤内垂直应力超过土壤抗压强度发生压缩形变，水平应力超过土壤抗剪强度时，土壤发生剪切形变[58]。

对于轮式拖拉机，轮胎的参数对土壤的压实具有显著的影响，BOTTA 等[59]研究了轮胎的参数对土壤压实的影响，结果表明：对于表层土壤，子午线型轮胎相较于斜交线型轮胎可降低对土壤的压实，轮胎的气压对表层土壤的压实影响显著；深层土壤的压实与轮胎的参数、气压均无关。LAMANDE 等[60]研究了土壤在荷载作用下的应力和变形，在大型土箱中进行了二维的竖向应力和位移测量，距离地平面 4 个深度（30、50、70、90 cm）中共设置了 21 个传感器，研究了两种载荷（43、85 kN）、两种接触面积（0.45、0.90 m^2）对土壤垂直方向应力的分布与传递特性的影响。该团队还从 3 个维度（不同深度、不同轮胎宽度、不同行驶方向）实测土壤在轮胎尺寸、轮胎充气压力和轮胎载荷不同组合影响下的垂直应力，结果表明接触应力对土体剖面应力传递具有显著影响。王宪良[61]以轮胎为研究对象，基于模型分析、离散元仿真、田间试验等方法，研究了轮胎运动过程中引起的土壤压实现象，建立了轮胎压实影响因素与土壤容重和紧实度之间的关系；结合 EDEM－RecurDyn 耦合模拟轮胎压实土壤的过程，分析了轮胎轴载及压实次数对土壤应力传递的影响规律，建立了土壤应力传递模型。

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[58]，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[56]。KELLER 等[62]研究了履带压实效应下 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，得出垂直应力分布很不均匀，其最大值大约是平均值的 3.2 倍。LAMANDE 等[63]分析了同一车辆分别使用轮式和履带式行走装置情况下对土壤的压实作用，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，得出在支重轮的轴线处出现峰值。丁肇等[64]通过钻孔埋设传感器的方法研究了履带式行走机构对土壤压实作用下应力分布规律，为行走结构优化提供理论依据。赵子涵等[65]分析了地面紧实程度和车辆荷载对垂直应力分布情况的影响，结果表明，在紧实地面环境中，支重轮间履带几乎不受力，应力的分布是非连续的；松软地面环境中，履带均受力，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[66]分析了金属履带行走系对土壤内垂直应力的影响规律，得出垂直应力在履带长度方向的分布形状近似三角形，支重轮轴线位置出现最大应力。PAN 等[67]对坡地工况下土壤压力-沉陷模型进行了构建与验证，主要针对经典 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，进行了平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；基于二次旋转正交组合试验方法，引入坡地角度再次进行平板穿入试验，计算求得 4 种土壤的承压特性参数，将承压特性参数回归方程带入经典的 Bekker 承压模型进行拓展，得到坡地土壤压力-沉陷的模型。

由此可见，目前农机土壤压实方面的研究主要是从轮胎/履带对土壤接触应力和土壤内部传递应力等方面来展开，并且轮胎对土壤压实的研究居多。针对履带压实土壤的研究主要是拖拉机参数、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，研究工况多为平地工况、坡地工况下的土壤压实机理和规律有待进一步探究。

2.2　土壤耕作侵蚀研究现状

土壤的耕作侵蚀是土壤在耕作机具的直接作用下发生分散、搬运、沉积的过程[68]，专家学者在土壤耕作侵蚀方面做了一定的研究。杜志勇等[69]对耕作土壤侵蚀进行了阐述，经试验得出土壤位移可用 3 种不同的运动（牵拉、掷跳、翻滚）公式来描述，并可以指导耕作工具的设计。

由于耕作过程中土壤运动较为复杂，目前国内大多采用示踪技术对土壤颗粒进行标记，进而探究耕作过程中的土壤侵蚀规律。王占礼等[68,70]以我国黄土区为研究对象，将小立方块作为示踪材料施放于土壤中来示踪和监测土壤的运动，对黄土地区耕作（牛拉铧式犁横坡耕作）侵蚀过程中的土壤再分布规律进行了研究；采用 ^{137}Cs 示踪技术研究了耕作（牛拉铧式犁横坡耕作）侵蚀过程中土壤中营养成分（全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量）的影响规

律,得出土壤养分含量在耕作侵蚀区呈减少趋势、在耕作沉积区呈增加趋势[71]。樊红柱等[72]采用^{137}Cs示踪技术探究了川北山区坡耕地土壤再分配对土壤有机碳和团聚体有机碳含量的影响,可有效指导该地区的施肥管理。殷爽等[73]通过模拟试验的方法探究了东北黑土区农田土壤团聚体有机碳受水侵蚀和耕作侵蚀的影响规律,为黑土质量退化问题的进一步研究提供参考。王勇等[74]采用模拟顺坡耕作的方法研究了长期耕作对坡地不同位置土壤水稳定团聚体和水分分布的影响规律,得出坡上侧的土壤水贮量明显降低,坡下侧的土壤持水能力明显升高。苏正安等[75]通过分析耕作侵蚀对土壤肥力和作物产量的影响研究进展得出,构建精确的耕作侵蚀模型以及深入研究其与其他侵蚀类型(如水蚀、风蚀)等相互作用机制可为我国土壤侵蚀的防治提供指导。赵鹏志等[76]采用物理示踪法研究了典型坡耕地耕作(铧式犁耕作)的位移以及土壤的分布状态,得出坡度对耕作位移的影响显著,耕作深度和速度影响侵蚀的严重程度。李富程等[77]采用磁性示踪(钛铁矿粉)的方法研究旋耕机不同耕作深度下对坡地紫色土的位移影响,得出耕作深度越大,土壤净位移和耕作侵蚀速率越大;采用磁性示踪(钛铁矿粉)的方法研究耕作速度对等高耕作和向下耕作和向上耕作土壤侵蚀的影响,得出耕作速度对等高和向下耕作的土壤侵蚀有明显影响,对向上耕作的影响相对较小;采用磁性示踪(钛铁矿粉)的方法研究旋耕机等高耕作对土壤中碳氮分布规律的影响,得出坡上侧土壤中有机碳和全氮含量显著减少[78-79]。

综上所述,已有研究主要针对的区域和作业工况分别是黄土区的牛拉铧式犁横坡耕作、东北黑土区典型坡面的铧式犁耕、川北山区的顺坡耕作及紫色丘陵区的顺坡机耕等。针对我国不同丘陵地区的不同土壤类型,特定适宜作业模式下的坡地耕作侵蚀机理研究尚不全面,有必要深入研究不同作物种植区、不同耕作机械作业模式下的耕作侵蚀规律。

3 农机设计及农机-土壤互作机理研究方法

山地农机-土壤-作物互作机理的研究可充分借鉴平原地区的研究经验。高可靠性先进农机装备的研发对于促进我国农业现代化的实现意义重大,多体动力学已经逐步应用到农机的研发过程中,其可以在农机样机实现之前就对产品设计进行有效指导,缩短产品开发周期,减少产品开发费用[80]。传统农机作业性能的评价主要是通过室内台架、土槽试验以及田间试验的验证来完成的,但是,土槽、田间试验只能分析土壤的宏观状况,不能从微观的角度去剖析运移特性[81],大量研究表明,离散元法可以模拟分析土壤颗粒与农机具之间的互作用关系,可为先进适用机具的创新设计提供新方法[82]。

3.1 基于多体动力学法

目前,国内有较多学者使用多体动力学软件构建农机-土壤互作模型,并结合仿真分析及试验测试结果,开展农机-土壤互作机理研究,为专用农机具的创制提供技术参考。扈凯等[83]以高地隙三角履带底盘为研究对象,基于多体动力学分析的方法建立履带底盘各组件及车体的拓扑结构模型;构建承重轮-履带接触模型、履带张紧力模型和履带软地面接触模型;建立三角履带底盘的三维模型,采用谐波叠加法构建了水泥硬质路面和农田软质路面的路谱,完成模型仿真与测试验证,结果表明三角履带底盘多体动力学模型具有较高的精度。刘妤等[84]以小型农用履带底盘为对象,运用极限理论和瞬态运动分析法建立底盘的运动学方程,运用拉格朗日法建立底盘的动力学方程,结合底盘的拓扑结构建立其多体动力学模型,经不同路面环境下直线行驶的实车试验与仿真结果对比验证了模型的有效性。陈黎卿等[85]针对秸秆还田机功耗测试难的问题,提出了利用虚拟测试平台评估还田机功耗的方法,建立秸秆还田机的动力学模型,对秸秆还田机的功率消耗进行了虚拟仿真,构建了田间功耗测试系统,通过对比仿真数据验证了该种测试方法的准确性。康建明等[86]针对圆盘式开沟机功率消耗测试结果受环境、设备精度影响较大等问题,基于多体动力学提出了利用虚拟测试平台评估圆盘式开沟机功率消耗的方法。

由此可见,充分借鉴传统农机基于多体动力学法开展设计和试验的经验,将该方法运用到山地农机装备的研发当中,将提高产品研发效率,缩短研发周期,节约成本,有助于新型山地农机产品的快速推广应用。

3.2 基于离散元法

农具部件与土壤之间的相互作用受到土壤性质及土壤动态作用的影响,对不同类型的土壤,其影响效应差异显著,因此,在基于离散元法开展农具部件与土壤互作机理研究之前,还需对土壤颗粒间、土壤与触土部件间的仿真参数进行标定。

目前,国内外专家学者基于离散元法在土壤等散状物料参数标定、土壤与农机互作关系研究方面做了大量工作。UCGUL 等[87]综合 Hertz - Mindlin 及 Hysteretic Spring 典型模型研究了土壤颗粒间的粘结力对其塑性形变的影响规律。AIKINS 等[88]整合 Hysteretic Spring 模型和 Linear Cohesion 模型对

高黏度土壤的静摩擦因数和滚动摩擦因数进行了标定，并经开沟试验验证了参数标定的准确性。ZENG 等[89]建立了土壤-农具-秸秆残茬相互作用的离散元仿真模型，并以 4 种不同的铲进行仿真试验和土槽试验，最终验证模型的有效性。MILKEVYCH 等[90]基于离散法建立了除草过程中土壤与触土部件相互作用引起土壤位移的研究模型，模拟试验和实测试验表明土壤位移具有一致性。UCGUL 等[91]采用离散元法模拟了土壤与板型犁之间的相互作用，经仿真试验与实地试验比较耕作牵引力以及犁沟剖面，结果表明离散元法精度可靠。石林榕等[92]基于延迟弹性模型和线性粘附模型的优点对 6 种含水率的农田土壤进行模型参数标定，经鸭嘴插穴试验验证了模型的有效性。张锐等[93]基于 Hertz - Mindlin 模型，经过堆积角试验完成沙土颗粒的模型参数标定。李俊伟等[94]基于 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 模型标定了东北黑土颗粒接触参数及其与触土部件间接触参数，为高含水率黏土参数标定提供参考。向伟等[95]经堆积试验完成了南方黏壤土的仿真参数标定，成穴试验验证了标定参数的有效性。邢洁洁等[80]基于 Hertz - Mindlin with JKR 模型完成含水率 7.8% 海南砖红壤颗粒间、砖红壤与 28MnB5 板间接触参数的标定，为砖红壤香蕉地触土作业部件的研制提供模型。马帅等[96]综合延迟弹性模型和线性粘附模型的优点，经堆积试验、斜板试验构建了葡萄藤防寒土离散元仿真模型，为专用刮土机的设计提供数据。田辛亮等[97]选用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型对黑土区玉米秸秆-土壤混料的离散元仿真接触参数进行标定，试验验证了仿真模型参数的可靠性。孙景彬等[98]针对黄土高原坡地土壤旋耕部件互作机理研究以及坡地专用旋耕机具设计缺乏准确可靠离散元仿真参数的问题，对坡地土壤与旋耕刀互作的离散元仿真参数进行了标定，并通过坡地旋耕试验验证了参数标定的可靠性。熊平原等[99]基于离散元的方法建立了旋耕刀与土壤之间的仿真模型，分别完成了旋耕作业仿真、土槽试验，测定了作业过程中所受到的扭矩，对比仿真、土槽试验结果来验证所建立的模型准确性。方会敏等[100]对旋耕刀与高秸秆含量土壤相互作用下土壤运动行为进行了宏观与细观的分析及对比。胡建平等[101]构建了双轴旋耕-秸秆-土壤的耕作仿真模型，分析了双轴配置参数对功耗的影响。

综上可知，离散元法在农机设计和虚拟试验中发挥着极为重要的作用，目前已经成为解决与散粒体相关的问题主要研究方法之一，凡涉及颗粒流动、破碎、混合等现象的应用都可以采用离散元法得到较好的仿真分析结果[81]。因此，丘陵山区农机装备与土壤的互作机理研究问题同样可以采用离散元法得以解决。但是，实际农业生产过程中涉及复杂的几何体运动和多相流问题，单纯依靠离散元法分析软件已不能达到复杂的仿真要求[81]，多软件耦合已经成为离散元法发展的一个重要方向，因此，在大型或结构复杂农机装备应用中，离散元软件与其他 CAE 工具耦合使用，如 CFD（计算流体动力学）、FEA（有限元分析）、RBD（刚体动力学）、MBD（多体动力学）等分析方法。

4　展望

我国丘陵山区农业机械化水平是国家实现农业农村现代化的重要基础，近些年在国家和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，丘陵山区农机装备的研发具备了一定的基础，专家学者也在种植制度宜机化、生产装备配套性适宜性等方面提出了系列合理化建议。但目前丘陵山区农业生产发展存在的短板问题仍较为突出，相关装备机具与作业技术仍处于实验阶段，耕、种、管、收、运各生产环节中高效低损智能化机具研发推广仍有很大提升空间。建议未来丘陵山地农机装备及坡地作业技术围绕图 18 所示几方面展开重点研究。

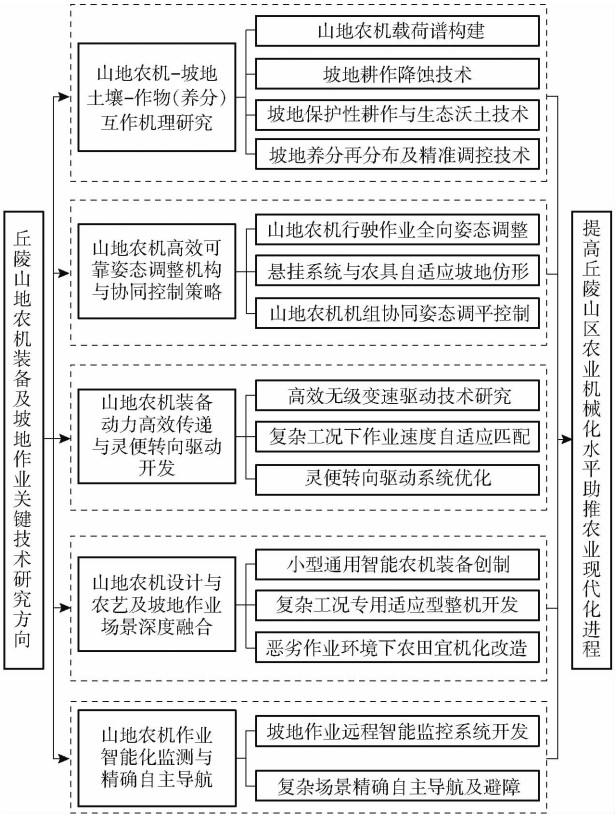


图 18　丘陵山地农机装备及坡地作业关键技术研究路线图

Fig. 18　Research roadmap on key technologies of agricultural machinery and slope operation in hilly and mountains region

4.1 山地农机-坡地土壤-作物(养分)互作机理研究

丘陵山区地形地貌复杂,坡地土壤的类型及物理性质、地貌的几何特性等均影响到山地农机装备的爬坡、越障、制动、侧滑、倾翻等行驶性能和耕作、播种、田间管理、收获等作业性能,因此为了研发适应于丘陵山区自然条件的专用山地拖拉机及配套机具,首先必须研究该地域土壤的物理特性及其与农机行走机构的相互作用关系,研究山地农机装备行驶及作业对坡地土壤理化成分的影响机制与效应,开展系统全面的山地农机-坡地土壤-作物(养分)互作机理研究。

4.1.1 山地农机载荷谱构建

载荷对山地农机装备的性能影响最大,原因在于农机零部件最基本的功能是承受载荷。载荷条件对山地农机的设计、分析、制造及试验起重要作用。山地农机所承受的载荷为较大的随机载荷,与其作业的环境、土壤特性及作物类型、农艺特点关系巨大,随机载荷极易引发疲劳失效,影响农机装备的安全性及作业效率。然而,这种随机载荷的性质、载荷来源、载荷分析与载荷确定方法等较平原地区更加复杂,国内尚未进行深入研究。因此,重点研究山地农机作业载荷特性与分布规律对于指导关键部件设计、预测零部件寿命、产品可靠性分析具有重要意义。

4.1.2 坡地耕作降蚀技术

耕作侵蚀对地形的演化、土壤性质的改变、土壤养分的流失与重新分布、地表生产力的降低均有重要影响。坡地工况的耕作侵蚀会导致坡高侧的土壤耕作层变浅,坡低侧土壤严重堆积,改变原始坡地形貌,影响后续机械化仿形作业,而且会降低土壤的肥力,影响作物产量。然而,等高线耕作是山区农业生产最基本、最重要的耕作方式之一,耕作侵蚀现象也随之产生,威胁到坡地土壤的质量以及水土流失的防治工作。因此,在丘陵山区坡耕地的实际作业过程中,应从降低土壤侵蚀、水土流失的思路出发,基于农艺要求及当地农业高效生产方式,在传统的耕作方式(旋耕、犁耕、深松等)中选择更为适宜的模式,并深入开展耕作减蚀技术研究,揭示不同耕作模式下山地农机-坡地土壤的互作耦合机理,为高效低侵蚀坡地农机具的研发提供理论支撑。

4.1.3 坡地保护性耕作与生态沃土技术

保护性耕作技术目前在平原地区已经有了较长时间的发展,其主要内容是以秸秆覆盖、少耕或免耕播种、深松和地表害虫综合治理为主要内容的现代科学耕作技术体系。保护性耕作技术不仅具有改善土壤结构、增加土壤有机质、节水保墒、提高农田生产力的功能,还具有减少温室气体排放、降低能源消耗、抑制农田退化等环境效益。因此,丘陵山区大力提倡保护性耕作及生态沃土技术对我国实现“碳达峰、碳中和”目标具有实际推动作用。重点应从坡地农田的规模化建设、保护性耕作替代传统翻耕、智能化替代机械化、绿色农药替代传统化学农药、有机肥替代化肥等方面开展,以达到改善土壤结构,培肥地力之目的。

4.1.4 坡地养分再分布及精准调控技术

无论是传统耕作方式,还是保护性耕作,在耕作后土壤的养分分布情况会发生较大的变化,这一变化对坡地种植作物的生产差异性具有更加严重的影响。因此,针对坡地农田的种植农艺要求,研究坡地耕作后土壤养分重新分布规律,对于坡地土壤的综合地力提升具有实际指导意义。目前丘陵山区存在大量中低产坡耕地,其特征表现为土壤结构不良,有机质贫乏,保水保肥能力差,抗侵蚀能力弱等,应充分借鉴平原大田中土壤碳氮调控及主要农作物有机无机养分精准调控的先进技术,开展中低产坡耕地土壤流失阻控、土壤障碍消减、土壤有机质快速提升、耕层结构优化、土壤有机碳库容提升等关键技术研究,进而构建中低产坡耕地农业体系“点-线-面”立体防蚀与多源增碳绿色生产技术模式,助推丘陵山区农业高质量发展。

4.2 山地农机高效可靠姿态调整机构与协同控制策略

姿态调整机构与控制策略是山地农机装备较为重要的理论,原因在于山地农机所行驶的路面、作业的条件复杂多变,会导致较大的功率消耗和车身失稳,甚至引发安全事故。研究山地农机的姿态调整原理,有助于设计更加合理的姿态调整装置以提高山地农机的行驶、作业稳定性,从而保证安全性。目前,国内该方面的研究尚未成熟,需要全面、系统地运用数学、力学、运动学等理论对山地农机装备在山地行驶、作业的运动学及动力学规律展开分析研究,为设计、制造高质高效的姿态调整装置提供理论指导。

4.2.1 山地农机行驶作业全过程姿态调整原理

基于理论推导、仿真分析、台架试验及实地试验相结合的方法研究山地拖拉机在坡地多工况(爬坡、下坡、等高行驶与作业、顺逆坡行驶与作业、坡地转向、越障等)全场景下的机组动力学,分析创新机构姿态调整过程的平顺性、稳定性以及强度可靠性,尤其要确保动力机械姿态调整后仍然具备较好的牵引附着性能,避免出现轮胎或履带“线”接触于地面的情形。

4.2.2　山地农机机组协同姿态调平控制策略

丘陵山区地形复杂，地面差高大，坡度特征明显，致使山地农机作业时发生不连续的姿态变化，尤其是动力机进行牵引作业时，悬挂农机具的位姿会随动力机械位姿的变化而改变，导致农具姿态不能始终与坡地保持平行，严重影响坡地作业质量，难以满足坡地作业要求。因此，在实现机身姿态自适应调控的同时，着重探究实时高效的机组（动力机械 + 作业机械）姿态协同控制策略，攻克协调控制智能算法，为坡地高效高质量作业提供保障。

4.3　山地农机动力高效传递与灵便转向驱动

鉴于丘陵山区地块碎小的现状，山地农机整机布局应尽可能紧凑，根据山区农业要求，重点突破高效轻量化 HMCVT 驱动技术，解决核心部件的“卡脖子”问题，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。突破电液比例动力输出关键技术，提升动力机与农具适配性。以动力机转向时的整车速度、行驶驱动力及转向驱动力矩为约束，优化转向机构的特性参数[102]，研发高效灵便的转向驱动系统，设计不同工况下的转向控制策略，实现复杂多变工况的可变半径转向，以满足碎小地块作业转向需求。

4.4　山地农机作业智能化监测与精确自主导航

丘陵山区农业装备的推广应用会极大提高农业生产的效率和质量，但是该地域地形复杂多变性给操纵人员、农机本身带来了一定的安全隐患。为更好地保证安全性，急需创制动力机行驶速度、机身姿态、液压系统压力流量、山区作业环境、作业负载等传感信息以及发动机转速、PTO 转矩转速等发动机 ECU 工况信号采集传输终端与远程监测系统；开发远程实时故障诊断系统。为了实现高效低损作业，急需研究丘陵山区非标准地块复杂场景下的精确自主导航技术、精准识别避障技术。

4.5　山地农机设计与农艺及坡地作业场景深度融合

针对丘陵山区不同地域的作物生产差异，作物的耕作、播种、施肥施药管理、收获（采摘）、运输等作业环节的“无机可用”、“无好机用”的普遍现实问题，突破高效低侵蚀耕作技术、机械化覆膜精量播种技术、小型智能施肥（施药）机械化作业技术、小地块低损机械化联合收获技术、山区坡地高稳定性运输技术，创制核心零部件，开发相应的农机装备，实现薄弱环节的机械化和一定程度的智能化。山地农机具应尽可能小型化；动力机尽可能通用化，并具备作业装置模块化快速换装功能，配套灵活，实现一机多用，提高动力机的适应性和利用率。

我国丘陵山区广泛分布于我国西北、西南、华北和东南等区域，各地地形、土壤类型、作物种类、种植模式等差异较大，现有山地农机针对性不足，难以适应各地生产需求。因此，山地农机装备的整机开发应立足于不同的地域条件，紧密结合当地农艺要求，根据区域土壤类型、气候特点、种植规模、专用作物生产机具的性能，优化专用适用型农机装备整机开发方案，并研究制定区域性主推耕作模式和技术标准。并重点推进丘陵山区适用农机的专项鉴定，落实农机新产品购置补贴试点政策，加快适宜型农机具研发成果的转化应用。

对于农业作业环境极其恶劣的丘陵山区，应该考虑通过农田宜机化改造来为农机装备提供条件，即“改地适机”，宜机改造工作经过科学、客观的分析判断，对适宜于机械化作业的土地进行整治，针对不同地域、不同坡度及独特生态环境，形成各地域独有的丘陵山地农田宜机化改造技术方案。

参　考　文　献

[1] 罗锡文. 对发展丘陵山区农业机械化的思考[J]. 农机科技推广, 2011(2): 17 - 20.

[2] 农业农村部农业机械化管理司. 加快推进丘陵山区农业机械化[J]. 农机质量与监督, 2019(12):4 - 6.

[3] 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]. [2023 - 02 - 13]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/NYJXHGLS/202201/t20220105_6386316.htm.

[4] 中央人民政府. 中共中央国务院关于做好 2022 年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL]. [2023 - 02 - 13]. http://www.gov.cn/zhengce/2022 - 02/22/content_5675035.htm.

[5] 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.

[6] 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.
QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):381 - 388. (in Chinese)

[7] 齐文超, 李彦明, 张锦辉, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 17 - 23,34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):17 - 23,34. (in Chinese)

[8] 高墨尧. 丘陵山地农机动力底盘及车身调平装置研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
GAO Moyao. Study on the agricultural machinery of powered chassis and body leveling device of hilly mountainous[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[9] 张开兴, 张斓, 李政平,等. 轮式丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 425-433.
ZHANG Kaixing, ZHANG Lan, LI Zhengping, et al. Design and test of twisting and swinging attitude adjustment device of wheel hilly tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 425-433. (in Chinese)
[10] 刘恒培, 杨福增, 刘世, 等. 差高机构对微型履带山地拖拉机稳定性的影响[J]. 拖拉机与农用运输车,2013,40(1): 18-21.
LIU Hengpei, YANG Fuzeng, LIU Shi, et al. Influence of differential height mechanism on the stability of micro-crawler mountain tractors[J]. Tractors & Farm Transporter, 2013, 40(1): 18-21. (in Chinese)
[11] 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 & Farm Transporter, 2011, 38(3): 92-93. (in Chinese)
[12] 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.
[13] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等.遥控全向调平山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)
[14] SUN J B, MENG C, ZHANG Y Z, et al. Design and physical model experiment of attitude adjustment device for crawler tractor in hilly and mountains region[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(3):466-478.
[15] MIKIYA S, KYUKO R. Crawler type traveling device: JP4207856B2[P]. 2009-01-04.
[16] YUKIKAZU T. Posture controlling device for combine harvester: JP2013055897A[P]. 2011-09-07.
[17] TOTSUKASA F. Combine: JP5508619B2[P]. 2009-08-12.
[18] SHUNKI K. Working machine: JP5313516B2[P]. 2008-02-06.
[19] GAM B. Combine: KR101324008B1[P]. 2010-12-29.
[20] HAUN R D. Mower deck leveling system: 20150296711[P]. 2015-10-06.
[21] HOEHN K W, TOMPSON W L. Remotely adjustable disk leveling system: 4809786[P]. 1989-03-07.
[22] AHMADI I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances: modle development [J]. Journal of Terramechanics, 2011,48(5):339-346.
[23] LEONARD K E, WOODY V O. Automatic leveling system: US6106402[P]. 2000-08-22.
[24] 彭贺, 马文星, 王忠山, 等.丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(1): 157-165.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(1):157-165. (in Chinese)
[25] 彭贺, 马文星, 赵恩鹏, 等. 丘陵山地轮式拖拉机车身调平系统设计与物理模型试验[J].农业工程学报, 2018, 34(14): 36-44.
PENG He, MA Wenxing, ZHAO Enpeng, et al. Design and physical model experiment of body leveling system for roller tractor in hilly and mountainous region[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(14):36-44. (in Chinese)
[26] 刘平义, 王春燕, 李海涛, 等. 丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 74-81.
LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(2):74-81. (in Chinese)
[27] 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)
[28] 王涛, 杨福增, 王元杰. 山地拖拉机车身自动调平控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2014,36(7):232-235.
WANG Tao, YANG Fuzeng, WANG Yuanjie. Design of body automatic leveling control system of hillside tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(7):232-235. (in Chinese)
[29] 何金伊, 杨福增, 徐秀栋. 山地履带式遥控微耕机控制系统设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011, 38(2): 19-22.
HE Jinyi, YANG Fuzeng, XU Xiudong. Design of remote control system for hillside crawler micro-farming tractor[J]. Tractor & Farm Transporter, 2011, 38(2): 19-22. (in Chinese)
[30] 刘国辉, 郝称意, 李民赞, 等. 半主动悬架山地拖拉机姿态控制系统设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2):338-348.
LIU Guohui, HAO Chenyi, LI Minzan, et al. Attitude control simulation of mountain tractor based on semi-active suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2):338-348. (in Chinese)
[31] 蒋俊, 张建, 冯贻江, 等. 丘陵山地拖拉机电液悬挂系统的设计与仿真分析[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 31-35.

JIANG Jun, ZHANG Jian, FENG Yijiang, et al. The design and simulation analysis of the electro-hydraulic hitch system in the tractor[J]. Journal of Zhejiang Normal University (Nat. Sci.), 2019, 42(1): 31 – 35. (in Chinese)

[32] 范永奎，翟志强，朱忠祥，等. 丘陵山地拖拉机电液悬挂仿形控制系统研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：517 – 524.
FAN Yongkui, ZHAI Zhiqiang, ZHU Zhongxiang, et al. Electro-hydraulic hitch terrain-adaptive control system for hillside tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 517 – 524. (in Chinese)

[33] 翟志强，陈一明，朱少华，等. 基于半实物仿真的丘陵山地拖拉机电液悬挂控制试验[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 2)：328 – 337.
ZHAI Zhiqiang, CHEN Yiming, ZHU Shaohua, et al. Experiment on electro-hydraulic hitch control system for hilly and mountainous tractor based on semi-physical simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 328 – 337. (in Chinese)

[34] 周浩，胡炼，罗锡文，等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：117 – 123.
ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 117 – 123. (in Chinese)

[35] 刘林. 基于拖拉机三点悬挂耕作机具调平系统研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2014.
LIU Lin. Study on the leveling system of tillage implement based on tractor three-point suspension system[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[36] 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)

[37] 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)

[38] LIU Z J, ZHANG G Q, CHU G P, et al. Design matching and dynamic performance test for an HST-based driving system of a hillside crawler tractor [J]. Agriculture, 2021, 11(5): 466.

[39] 李江，王玉亮，李瑞川，等. 丘陵山地四轮驱动拖拉机驱动力主动分配系统研究[J]. 农机化研究，2019，41(8)：227 – 235.
LI Jiang, WANG Yuliang, LI Ruichuan, et al. Research on driving force allocation system of four wheel drive tractor in hilly area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 227 – 235. (in Chinese)

[40] 扈凯，张文毅，刘宏俊，等. 丘陵山地拖拉机液压驱动系统设计与仿真[J]. 机床与液压，2021，49(16)：93 – 97.
HU Kai, ZHANG Wenyi, LIU Hongjun, et al. Design and simulation of the hydraulic driving system of hilly tractors[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(16): 93 – 97. (in Chinese)

[41] 范永奎，毛恩荣，朱忠祥，等. 丘陵山地拖拉机液压多点动力输出系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：477 – 485.
FAN Yongkui, MAO Enrong, ZHU Zhongxiang, et al. Design and experiment of hydraulic multi-point power output system for hilly and mountain tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 477 – 485. (in Chinese)

[42] 王意. 车辆与行走机械的静液压驱动[M]. 北京：化学工业出版社，2014.

[43] 杨世平，余浩，刘金刚，等. 液压挖掘机动力系统功率匹配及其节能控制[J]. 机械工程学报，2014，50(5)：152 – 160.
YANG Shiping, YU Hao, LIU Jin'gang, et al. Research on power matching and energy saving control of power system in hydraulic excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 152 – 160. (in Chinese)

[44] 魏玉莹. 工程车辆三变量驱动系统控制研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
WEI Yuying. Analysis of control strategy based on construction vehicle three-variable drive system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[45] 赵立军，魏玉莹，刘清河，等. 发动机-变量泵-变量马达驱动系统分层控制[J]. 北京航空航天大学学报，2015，41(8)：1416 – 1421.
ZHAO Lijun, WEI Yuying, LIU Qinghe, et al. Hierarchical control of engine – variable pump – variable motor drive system [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(8): 1416 – 1421. (in Chinese)

[46] 郑永军，江世界，陈炳太，等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：1 – 20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 1 – 20. (in Chinese)

[47] 贾洪雷，张胜伟，陈天佑，等. 丘陵坡地自吸式绿豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(3)：51 – 60.
JIA Honglei, ZHANG Shengwei, CHEN Tianyou, et al. Design and experiment of self-suction mung bean precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 51 – 60. (in Chinese)

[48] 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)

[49] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 丘陵山地胡麻联合收获机复式清选系统仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 93 - 102, 113.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Simulation optimization and experiment on compound cleaning system of hilly area flax combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 93 - 102, 113. (in Chinese)

[50] 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)

[51] 韩振浩, 朱立成, 苑严伟, 等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 413 - 421, 448.
HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Analysis of slope trafficability and optimized design of crawler chassis in hillside orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 413 - 421, 448. (in Chinese)

[52] 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)

[53] 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. (in Chinese)

[54] 潘冠廷, 杨福增, 孙景彬, 等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 374 - 383.
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374 - 383. (in Chinese)

[55] 孙景彬, 褚宏丽, 刘琪, 等. 山地履带拖拉机坡地等高线作业土壤压实应力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 30 - 42.
SUN Jingbin, CHU Hongli, LIU Qi, et al. Distribution of soil compaction stress during contour line operation of hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 30 - 42. (in Chinese)

[56] 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)

[57] 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)

[58] ALAKUKKU L, WEISSOPF P, CHAMEN W C T, et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1-machine/soil interactions[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 73(1/2): 145 - 160.

[59] BOTTA G F, RIVERO D, TOURN M, et al. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 101(1 - 2): 44 - 51.

[60] LAMANDE M, SCHJONNING P, TOGERSEN F A. Mechanical behaviour of an undisturbed soil subjected to loadings: effects of load and contact area[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(1): 91 - 106.

[61] 王宪良. 农机作业土壤压实评价及组合铲松土技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
WANG Xianliang. Study on the evaluation of soil compaction by agricultural tire and combination shovel loose soil technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[62] 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.

[63] LAMANDE 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.

[64] 丁肇, 李耀明, 任利东, 等. 履带式行走机构压实作用下土壤应力分布均匀性分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 52 - 58.
DING Zhao, LI Yaoming, REN Lidong, et al. Distribution uniformity of soil stress under compaction of tracked undercarriage[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 52 - 58. (in Chinese)

[65] 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)

[66] 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)
[67] 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.
[68] 王占礼, 邵明安, 李勇. 黄土地区耕作侵蚀过程中的土壤再分布规律研究[J]. 植物营养与肥料学报,2002, 18(2): 168 – 172.
WANG Zhanli, SHAO Ming'an, LI Yong. Study on the soil redistribution induced by tillage erosion in Loess Region of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 18(2):168 – 172. (in Chinese)
[69] 杜志勇, 史衍玺. 耕作土壤侵蚀模型简介[J]. 水土保持科技情报, 2003(3):16 – 19.
[70] 王占礼, 邵明安. 中国黄土地区耕地侵蚀模拟[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1): 53 – 57.
WANG Zhanli, SHAO Ming'an. Modeling on tillage erosion in Loess Region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1): 53 – 57. (in Chinese)
[71] 王占礼, 邵明安. 黄土坡地耕作侵蚀对土壤养分影响的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 63 – 67.
WANG Zhanli, SHAO Ming'an. Effects of tillage erosion on soil nutrients in Loess Sloping Land of China[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 63 – 67. (in Chinese)
[72] 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 157 – 164.
FAN Hongzhu, ZHANG Jianhui, WANG Yong, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in Mountainous Region Slope Farmland of Northern Sichuan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 157 – 164. (in Chinese)
[73] 殷爽, 李毅然, 李露, 等. 黑土团聚体有机碳对耕作与水蚀的响应差异[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(3): 67 – 73.
YIN Shuang, LI Yiran, LI Lu, et al. Different responses of aggregates-associated organic carbon to tillage and water erosion in the black soil region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(3): 67 – 73. (in Chinese)
[74] 王勇, 张建辉, 李富程. 耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳定性团聚体和水分特征的影响[J]. 水土保持学报,2015, 29(1): 180 – 185.
WANG Yong, ZHANG Jianhui, LI Fucheng. Tillage erosion influences on soil water-stable aggregate and moisture properties on the hillslope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 180 – 185. (in Chinese)
[75] 苏正安, 张建辉. 耕作侵蚀及其对土壤肥力和作物产量的影响研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 272 – 278.
SU Zheng'an, ZHANG Jianhui. Research progress in tillage erosion and its impacts on soil fertility and crop production[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 272 – 278. (in Chinese)
[76] 赵鹏志, 陈祥伟, 王恩姮. 东北黑土区典型坡面耕作侵蚀定量分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 151 – 157.
ZHAO Pengzhi, CHEN Xiangwei, WANG Enyuan. Quantitative assessment of tillage erosion on typical sloping field in black soil area of northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12):151 – 157. (in Chinese)
[77] 李富程, 花小叶, 黄强. 耕作深度对紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 1 – 5.
LI Fucheng, HUA Xiaoye, HUANG Qiang. Effects of tillage depth on tillage erosion by rotary cultivator plough on the steep land in purple soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(4):1 – 5. (in Chinese)
[78] 李富程, 花小叶, 王彬. 紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀特征[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 71 – 78.
LI Fucheng, HUA Xiaoye, WANG Bin. Rate and pattern of tillage erosion by rotary cultivator on the steep land of purple soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016,14(1):71 – 78. (in Chinese)
[79] 巨莉, 李富程. 旋耕机耕作对紫色土碳氮垂直分布过程的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5):7 – 13.
JU Li, LI Fucheng. Effects of rotary tillage on vertical distribution patterns of SOC and total nitrogen in purple soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5):7 – 13. (in Chinese)
[80] 邢洁洁, 张锐, 吴鹏, 等. 海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 158 – 166.
XING Jiejie, ZHANG Rui, WU Peng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 158 – 166. (in Chinese)
[81] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1 – 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):1 – 20. (in Chinese)
[82] 许颖, 孔华祥, 金芳. 浅析计算多体动力学在农业机械中的应用[J]. 江苏农机化, 2014(6): 32 – 33.
[83] 扈凯, 张文毅, 李坤, 等. 高地隙三角履带底盘多体动力学建模与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 386 – 394.
HU Kai, ZHANG Wenyi, LI Kun, et al. Multi-body dynamics modeling and experiment of triangular tracked chassis with high ground clearance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 386 – 394. (in Chinese)
[84] 刘妤, 张拓, 谢铌, 等. 小型农用履带底盘多体动力学建模及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7):39 – 46.
LIU Yu, ZHANG Tuo, XIE Ni, et al. Multi-body dynamic modeling and verification of small agricultural crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 39 – 46. (in Chinese)
[85] 陈黎卿, 梁修天, 曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 106 – 111.
CHEN Liqing, LIANG Xiutian, CAO Chengmao. Virtual simulation and power test of straw counters-field based on multi-body dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 106 – 111. (in Chinese)
[86] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报,2017,48(1): 57 – 63.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Virtual simulation and power test of disc type ditcher based on multi-body

dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(1):57 – 63. (in Chinese)

[87] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121(3): 105 – 117.

[88] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213:105123.

[89] ZENG Z, MA X, CHEN Y, et al. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197:104505.

[90] MILKEVYCH V, MUNKHOLM L J, CHEN Y, et al. Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183:60 – 71.

[91] UCGUL M, SAUNDERS C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190:58 – 70.

[92] 石林榕, 赵武云, 孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 181 – 187.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Parameter calibration of oil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 181 – 187. (in Chinese)

[93] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49 – 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 – 56. (in Chinese)

[94] 李俊伟, 佟金, 胡斌, 等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 130 – 140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different oisture content and soil-engaging component in northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130 – 140. (in Chinese)

[95] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116 – 123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116 – 123. (in Chinese)

[96] 马帅, 徐丽明, 袁全春, 等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 40 – 49.
MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 40 – 49. (in Chinese)

[97] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 100 – 108, 242.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100 – 108, 242. (in Chinese)

[98] 孙景彬, 刘琪, 杨福增, 等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1):63 – 73.
SUN Jingbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):63 – 73. (in Chinese)

[99] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 113 – 121.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):113 – 121. (in Chinese)

[100] 方会敏, 姬长英, FARMAN A C, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22 – 28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22 – 28. (in Chinese)

[101] 胡建平, 赵军, 潘浩然, 等. 基于离散元的双轴旋耕机功耗预测模型[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 9 – 16.
HU Jianping, ZHAO Jun, PAN Haoran, et al. Prediction model of double axis rotary power consumption based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 9 – 16. (in Chinese)

[102] 迟媛, 蒋恩臣. 履带车辆差速式转向机构性能试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7): 14 – 17.
CHI Yuan, JIANG Enchen. Performance tests on differential steering mechanism of tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(7):14 – 17. (in Chinese)