doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.023

西北旱作区多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机设计与试验

王虎存[1]　赵武云[1]　孙　伟[1]　孟养荣[2]　高奎增[3]　史瑞杰[1]

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省农业机械化技术推广总站, 兰州 730050;
3. 山东巨明机械有限公司, 淄博 255000)

摘要: 针对西北梯田地田小路窄的典型作业工况,马铃薯联合收获掉头转弯困难,以及大垄双行覆膜覆土种植方式下,多数联合收获装备存在作业效率低、分离效果差、伤薯率及含杂率高等问题,本文设计一种多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机。该机一次性完成挖掘、薯土分离、薯膜分离、清洁分选、收集装袋、自动卸袋等工作。结合西北梯田地马铃薯主产区收获农艺要求及作业工况,确定了整机结构和关键参数。利用仿生学原理、三维扫描技术、逆向工程建模方法和动力学数值分析等方法,设计并确定了多模转向轮式底盘、复合仿生楔形挖掘铲装置、碎土型分离升运装置、膜秧清除装置、人工除杂与自动清选装置等关键部件结构及核心参数。对整机进行设计并进行了田间试验。田间试验结果表明,平均损失率为 1.98%,平均伤薯率为 1.59%,平均破皮率为 2.15%,平均含杂率为 1.84%,平均生产率为 0.21 ~ 0.36 hm^2/h。设计的多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机各项试验指标均满足国家及行业标准要求。

关键词: 马铃薯; 联合收获机; 多模转向; 仿生; 减粘碎土

中图分类号: S225.7+1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)04-0252-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Potato Combine Harvester Based on Multiple Steering Modes and Anti Adhesion Soil Fragmentation Type

WANG Hucun[1]　ZHAO Wuyun[1]　SUN Wei[1]　MENG Yangrong[2]　GAO Kuizeng[3]　SHI Ruijie[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*
2. *Gansu Technical Promotion General Station of Agriculture Mechanization, Lanzhou* 730050, *China*
3. *Shandong Juming Machinery Co., Ltd., Zibo* 255000, *China*)

Abstract: Potato (*Solanum tuberosum* L.), the fourth-largest staple crop in China, is widely cultivated in the northwest dryland farming regions. Focusing on the typical operating conditions in northwest terraced fields, where plots are small, irregularly shaped, and roads are narrow, which caused significant difficulties for potato combine harvesters when turning and maneuvering in the field. The predominant planting method in this region involved large ridged double-row planting with black plastic film covering and soil placed on top. Many harvesters in the area faced issues such as low operational efficiency, poor tuber-soil separation performance, high tuber damage rates, and high impurity rates. To address these challenges, a potato combine harvester based on multiple steering modes and anti adhesion soil fragmentation type was designed. This harvester can simultaneously perform multiple operations, including digging, tuber-soil separation, membrane separation, surface soil cleaning, sorting, collection, bagging, and automatic unloading. The overall structure of the machine and its key operational parameters were determined based on the harvesting agronomic requirements and field conditions in the primary potato-producing areas of northwest terraced fields. Initially, relevant design principles from automotive and tractor engineering were applied to determine the structure and key parameters of a multi-

收稿日期: 2025-01-10　修回日期: 2025-02-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD200090502)、甘肃省重大专项项目(22ZD6NA046)、甘肃省现代丝路寒旱农业科技支撑项目(GSLK-2021-14)和甘肃省优秀研究生"创新之星"项目(2022CXZX-640)

作者简介: 王虎存(1990—),男,博士生,主要从事旱作农机装备技术研究,E-mail: wanghc@st.gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事北方旱区作物生产装备研究,E-mail: zhaowy@gsau.edu.cn

mode steering wheeled chassis. Furthermore, inspired by the burrowing principle of the northwest mole's head, bionic research methods were employed. Using 3D scanning technology and reverse engineering, the geometric parameters of the mole's head were obtained, and a composite biomimetic wedge-shaped digging shovel device was designed. A dynamics model analysis approach was then used to specifically determine the operational parameters and force analysis for the multi-mode steering wheeled chassis, the composite biomimetic wedge-shaped digging shovel device, the soil-crumbling separation and conveying device, agricultural film and seedling removal device, as well as the manual impurity removal and automatic grading device. Based on these research findings, the entire machine was thoroughly designed by using 3D modeling and 2D drafting, and a prototype was manufactured. Field tests were conducted, and the results showed that the loss rate was 1.98%, the tuber damage rate was 1.59%, the skin-breaking rate was 2.15%, the impurity rate was 1.84%, and the productivity ranged from 0.21 hm^2/h to 0.36 hm^2/h. The potato combine harvester based on multiple steering modes and anti adhesion soil fragmentation type met national and industry standards in all test indicators, providing valuable reference for the mechanization of potato harvesting in northwest dryland areas.

Key words: potato; combined harvester; multi-mode steering; bionics; anti adhesion and soil fragmentation

0　引言

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)作为中国四大主粮作物之一,全国各地广泛种植[1-3]。西北旱作区作为国内马铃薯主产区之一,种植面积占全国22%以上[3-6]。目前,马铃薯收获依旧以分段收获为主,即通过小型悬挂式马铃薯挖掘机挖晒于地表,再经人工捡拾装袋的作业模式,存在人工捡拾成本高、劳动强度大、效率低等问题[7-8]。西北旱作区马铃薯收获季时间短,末期易造成霜冻损伤。当前,我国农村人口老龄化严重,迫切需要小型马铃薯联合收获机具解决当前产业矛盾,以补齐马铃薯机械化收获技术短板。

根据调查研究显示,德国、美国、意大利、波兰等国家在20世纪90年代已经实现了马铃薯联合收获。例如,以德国GRIMMER、比利时AVR Puma3、荷兰Ploeger Oxbo等知名企业为代表,生产的马铃薯收获机械自动化、智能化程度高,实现了集杀秧、挖掘、分离、集装、跟车卸料为一体的联合作业模式,但机具体型庞大,价格高昂,多适于规模化种植的大型农场及平原地区[9-11]。此外,意大利、日本、韩国等丘陵山地较多的发达国家,经高标准农田建设、土地宜机化改造,大部分马铃薯已实现了规模化、规范化种植,马铃薯收获基本趋于大型化联合收获与小型化分段收获双向发展,但因种植模式不匹配、价格高昂很难在我国西北旱作区推广应用。

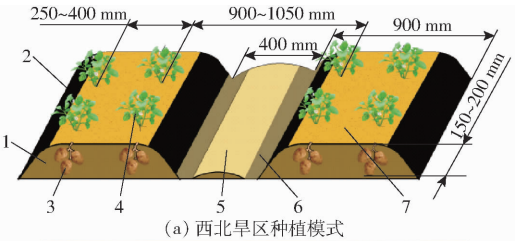
国内马铃薯机械化技术起步晚,但发展速度较快,近年来,我国马铃薯收获机械在减阻挖掘、薯土分离、薯块集装等关键技术上打破了国外垄断,逐步拥有了自主知识产权科研成果,很多联合收获机具正处于中试改进阶段[12-16]。此外,如国内青岛洪珠3110型和4UQL-170型、中机美诺自走式马铃薯捡拾装袋机、山东思代尔4UL-170系列、绥化心语机械4ULHZ-840等大型马铃薯联合收获机具已经在我国黑龙江、内蒙古等大型农场投入使用[3,17-18]。

国内现有的马铃薯联合收获机具,整机尺寸较大、转场及掉头困难,面对西北旱区田小路窄的山地梯田无法适应[3,19]。西北旱作区马铃薯独特的覆膜覆土种植模式,大多收获机械存在薯土薯膜分离不佳、含杂率高,地膜、滴灌带等缠绕,导致机具易壅堵、可靠性及作业效率明显降低。针对我国西北旱作区地形地貌特点及独特的种植模式,本文设计一种多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机,该机器一次性完成挖掘、薯土分离、薯膜分离、清洁分选、自动装袋、自动卸袋等工作,整机尺寸小、自动化程度高,采用多模转向轮式底盘,减粘碎土起收装置等,转场灵活,掉头方便,减粘碎土效果明显,可以有效降低含杂率,提高作业效率和作业质量。

1　种植农艺与作业工况

多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机参考西北旱区大垄双行+黑膜覆盖+膜上覆土马铃薯种植模式,如图1a所示,为大垄双行黑膜覆盖膜顶覆土种植垄形图,垄底宽度为900 mm,垄高为150~200 mm,马铃薯生长深度一般小于180 mm,作业空白行宽度约400 mm,1垄2行种植,行距250~400 mm,为蓄水保墒,采用宽度1 000~1 200 mm、厚度0.01 mm的黑色地膜覆盖,膜顶覆土促使种苗自动破膜,减小烧苗现象[20-22]。如图1b所示,西北旱区大多以山地梯田为主,农田沿山坡等高线呈阶梯台状分布,梯田窄小且弯曲不直,多模转向轮式底盘便

于灵活掉头,且转场速度高。此外,山地机动道路坡陡路窄,减小联合收获机尺寸、降低重心尤为重要。



(a) 西北旱区种植模式



(b) 西北旱作区梯田

图 1 西北地区马铃薯种植模式及作业工况

Fig. 1 Potato planting mode and farmland characteristics in Northwest China

1. 垄体 2. 黑色地膜 3. 薯块 4. 秧苗 5. 作业空白行 6. 膜边土 7. 膜面板结土块

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构与主要参数

如图 2 所示,该机具由多模转向轮式底盘、减粘碎土型起收装置、起收装置液压缸、膜秧清除装置、人工除杂与自动清选装置、遮阳棚、导流槽、吨袋挂架、吨袋自卸平台、驾驶工作台、传动系统等构成。主要参数如表 1 所示。

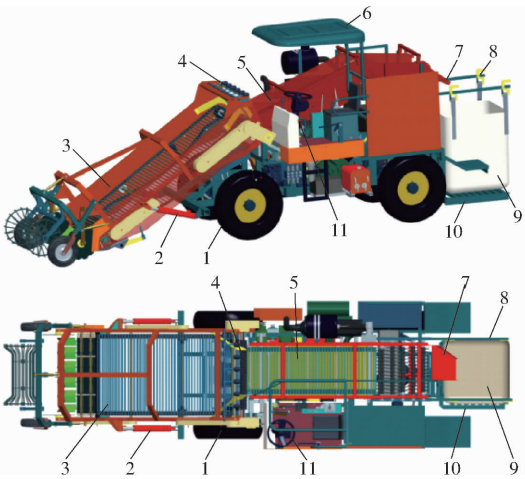


图 2 整机结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of whole machine

1. 多模转向轮式底盘 2. 起收装置液压缸 3. 减粘碎土型起收装置 4. 膜秧清除装置 5. 人工除杂与自动清选装置 6. 遮阳棚 7. 导流槽 8. 吨袋挂架 9. 吨袋 10. 吨袋自卸平台 11. 驾驶工作台

表 1 作业机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of machine

参数	数值/类型
底盘结构	轮式自走型
发动机功率/kW	73.6
发动机额定转速/(r·min^{-1})	2 400
轮距/mm	1 380
轴距/mm	2 200
外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	6.7×1.9×2.5
工作幅宽/m	1.1
作业行数	2
作业深度(可调)/mm	0~220
薯块集装方式	吨袋
生产率/(hm^2·h^{-1})	0.21~0.36

2.2 工作原理

田间收获时,控制起收液压缸,将减粘碎土起收装置降至作业高度,通过正反丝调节拉杆微调前端限深轮,调整挖掘深度。随着机组前进,V 形栅条镇压辊骑垄滚动,破碎垄面板结土块,挫松垄体内部土壤,薯土膜秧混合物被挖掘铲掘起并不断松碎,经过栅条辊轴筛及杆链分离筛不断分离、输送,大部分土壤、残秧、残膜被分离出去,马铃薯及剩余少量土块、杂物被抛送至人工除杂与自动清选装置,该装置由杂物通道和马铃薯通道组成,经人工分拣,剩余少量土块杂物被清理出去,干净的马铃薯通过导流槽落入后方吨袋。装满的吨袋通过吨袋自卸平台降低高度并向后倾斜卸至地面。该机一次性完成挖掘、薯土秧分离、薯膜分离、表皮清洁、分选、自动装袋及卸袋等工作,整机纵向尺寸小、重心低、转弯半径小、转场效率高。

3 主要工作部件设计

3.1 多模转向轮式底盘

西北旱作区马铃薯种植主要分布于小块梯田,农田基本呈带状曲线分布,为使作业机具便于田间掉头和对行作业,且能快速灵活转场,提高作业效率,设计一种小型四轮转向、四轮驱动、四轮等大的多模转向轮式底盘。可通过二位四通手动切换阀进行四轮转向与后轮转向两种转向模式互相切换,一般地,为保证路面高速行走应具有安全性保障,采用后轮转向行驶,在田间掉头时,采用四轮转向模式,以缩小转弯半径。

3.1.1 底盘结构

如图 3 所示,该多模转向轮式底盘主要由车架、前转向驱动桥、后转向驱动桥、发动机、液压机械双流无级变速传动系统(Hydrostatic transmission, HST)、液压转向器、4 组等大人字花轮胎及其他机

械传动系统组成。该机具作业时，底盘骑垄作业，根据西北旱区马铃薯种植农艺要求，垄底宽度 900 mm，作业空白行宽度约 400 mm，为避免两侧轮胎碾压待挖垄体，并选用符合农艺要求的标准转向驱动桥体，因此，该底盘轮距 B_t 设计为 1.38 m，轮胎宽度 b 为 280 mm，轮胎直径 D 为 900 mm，底盘最小离地间隙约 270 mm，此外，为减小机具纵向尺寸和降低重心，并考虑机械部件安装、配合、维修等因素，轴距 L 设计为 2.2 m。

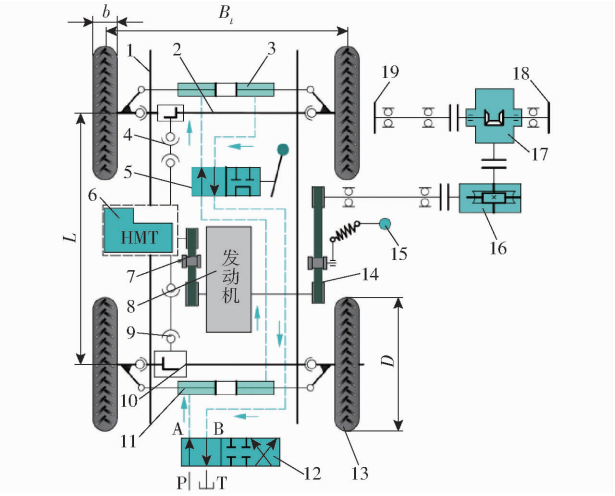


图 3　多模转向轮式底盘结构图

Fig. 3　Structure of multi-mode steering wheeled chassis

1. 车架　2. 前转向驱动桥　3. 前转向油缸　4. 传动轴Ⅰ　5. 手动换向阀　6. HST 传动箱　7. 带传动Ⅰ　8. 发动机　9. 传动轴Ⅱ　10. 后转向驱动桥　11. 后转向油缸　12. 液压转向器　13. 人字花轮胎　14. 带传动Ⅱ　15. 弹性张紧离合器　16. 蜗轮蜗杆减速器　17. 换向器　18. 输出链轮Ⅰ　19. 输出链轮Ⅱ

3.1.2　转向半径

该四轮转向原理是按照前、后液压油缸串联，实现四轮同时异相位偏转，中间通过二位四通手动切换阀可以实现四轮转向与后轮转向模式切换。

如图 4 所示，车辆在转向时各车轮轴心线通过同一瞬心轴线，此轴线垂直于地面，其投影点为点 O，因车辆转向时的底盘中心最小转向半径 R_{min} 随后轮转向偏角 $\alpha(\beta)$ 的变化而变化，所以称点 O 为瞬时转向中心[23]。则有

$$R_{min} = L\cot\alpha_{max} + M/2 \tag{1}$$

$$R_{ymin} = \left[(R_{min} + M/2)^2 + L^2 \right]^{1/2} + \frac{B_t - M}{2} \tag{2}$$

式中　R_{ymin}——外侧轮最小转向圆半径，m

α_{max}——内侧轮最大偏转角，(°)

M——左右转向节主销中心线与地面交点间距离，m

若前后轮同时异相位偏转转向，即四轮转向，则有

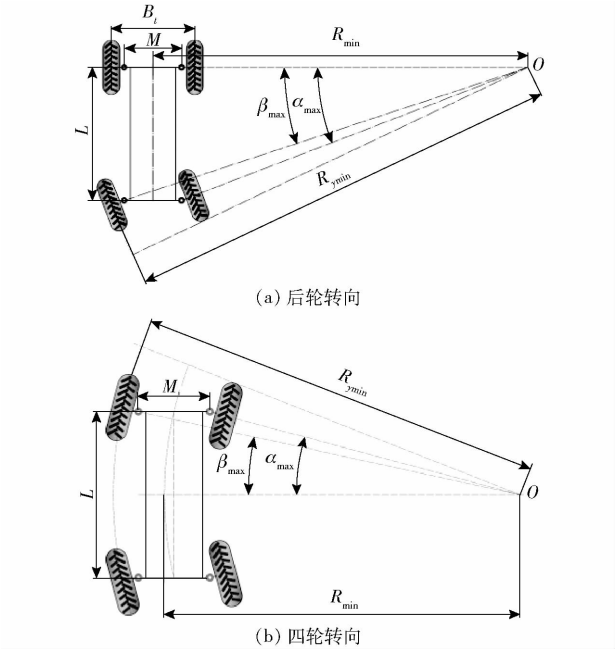


图 4　转向模式原理图

Fig. 4　Principle of steering mode

$$R_{min} = \left[(L/2)^2 + (L\cot\alpha_{max}/2 + M/2)^2 \right]^{1/2} \tag{3}$$

$$R_{ymin} = \left[(L\cot\alpha_{max}/2 + M)^2 + (L/2)^2 \right]^{1/2} + \frac{B_t - M}{2} \tag{4}$$

底盘采用 2 组重载约 3.5 t 的转向驱动桥，其最大转向偏角 α_{max} 为 24°，左右转向节主销中心线与地面交点间距离 M 为 0.95 m，轮距 B_t 为 1.38 m，四轮转向情况下，最大转向偏角 α_{max} 为 24°，通过式(1)～(4)计算得理论最小转向半径为：后轮转向 R_{min} = 5.42 m，R_{ymin} = 6.51 m；四轮转向 R_{min} = 3.15 m，R_{ymin} = 3.81 m。根据理论计算可得，四轮转向半径远小于后轮转向，适用于西北丘陵山地田间作业。

3.1.3　底盘功率设计

经测量该装备总质量 M_Z 约为 3 950 kg；吨袋装满薯块最大质量 M_d 约为 800 kg；另外农机操作人员及分拣人员共 4 人，其总质量 M_r 约为 300 kg，由此，得本机具工作过程中最大质量 M_{max} 约为 5 050 kg。

根据非道路机动车辆道路行驶安全性要求及选用的 HST 无级变速传动系统，道路行走最高车速约 25 km/h，由此可计算机具在道路最高速行走时所需功率 P_{lmax}[24-25] 为

$$P_{lmax} = \frac{1}{\eta_{cr}} \left(\frac{M_{max} g f_r v_{max}}{3\,600} + \frac{C_D A v_{max}^3}{76\,140} \right) \tag{5}$$

式中　η_{cr}——轮式底盘传动效率系数，取 0.9

g——重力加速度，取 9.8 N/kg

f_r——干土路滚动阻力系数，取 0.05

v_{max}——机具最高行走速度，km/h

C_D——空气阻力系数,取 1.1

A——机具前进方向迎风面积,m^2

机具在丘陵山区工作,设计轮式底盘最大爬坡坡度 i_{max} 为 30%,爬坡行驶挡位最高速度 v_p 为 5 km/h,由此可计算机具满载工作情况下最大坡度爬行所需功率 P_{smax} 为

$$P_{smax}=\frac{1}{\eta_{cr}}\left(\frac{M_{max}gf_rv_p}{3\,600}+\frac{M_{max}gi_{max}v_p}{3\,600}+\frac{C_DAv_p^3}{76\,140}\right) \tag{6}$$

一般地,该机具正常工作时,必须克服牵引阻力、滚动阻力、坡度阻力、空气阻力以及机械及液压传动产生的功率损耗,实际作业时机具前进速度 v_s 不超过 4 km/h,最大作业坡度 i_s 不超过 10%,因此,发动机输出的最大功率 P_{max} 为

$$P_{max}=P_T+P_n+\frac{1}{\eta_{cr}}\left(\frac{M_{max}gf_gv_s}{3\,600}+\frac{M_{max}gi_sv_s}{3\,600}+\frac{C_DAv_s^3}{76\,140}\right) \tag{7}$$

其中

$$P_T=\frac{F_nv_s}{3\,600} \tag{8}$$

$$P_n=\frac{1}{\eta_b\eta_w\eta_g\eta_c}\frac{Tn_s}{9\,549}+\frac{pQ}{60\eta_h} \tag{9}$$

式中 P_T——克服牵引阻力消耗的功率,kW

f_g——已耕土壤滚动阻力系数,取 0.18

P_n——机械及液压传动功率损耗,kW

F_n——平均作业阻力,N

η_b——带传动效率,取 0.92

η_w——蜗轮蜗杆传动效率,取 0.7

η_g——齿轮传动效率,取 0.96

η_c——链传动效率,取 0.92

T——液压传动件回转扭矩,N·m

n_s——液压传动工作部件平均转速,r/min

p——液压系统压力,MPa

Q——液压系统总流量,L/min

η_h——液压传动效率,取 0.8

由式(5)~(9)计算得机具以最高速度在道路行驶时所需功率 P_{lmax} 为 18.3 kW,爬行挡速度下满载爬坡度 30% 的坡所需功率 P_{smax} 为 26.37 kW,机具正常作业时消耗最大功率 P_{max} 为 55.35 kW。因此,该轮式底盘配置发动机选用国产四达品牌国四排放标准的农用四缸柴油机,标定功率 P_e 为 73.6 kW,额定转速 2 400 r/min,选用发动机额定功率 P_e 比理论最大功率 P_{max} 超 25%,留有一定功率的储备,应对西北丘陵山地极端工况作业要求。

3.2 减粘碎土型起收装置

3.2.1 结构与工作原理

前端起收装置是马铃薯联合收获中的核心功能模块,其性能直接影响整个收获过程质量与效率。该装置主要功能是完成马铃薯挖掘、前端碎土、薯土分离、膜秧清除等工作。优化前端起收装置减粘脱附与碎土性能,对于降低挖掘阻力、提升薯土分离效率具有重要意义。基于此,设计一种减粘碎土型起收装置,如图 5 所示,其关键组件包括仿形镇压装置、限深装置、复合仿生楔形挖掘铲装置、切秧圆盘、碎土辊组、杆链分离装置及膜秧清除装置等。

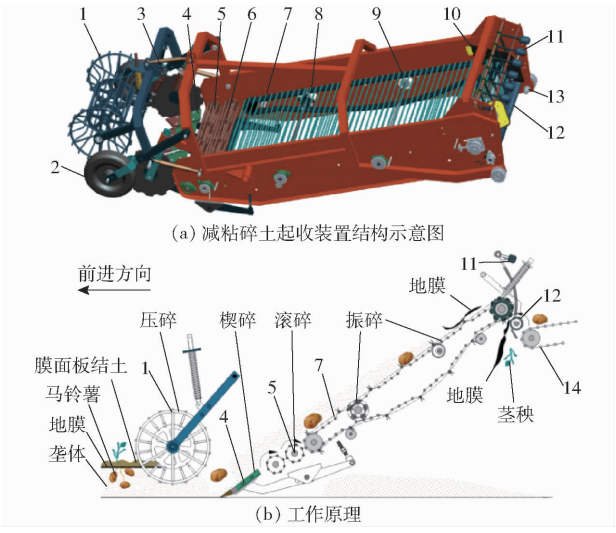


图 5 减粘碎土起收装置结构及工作原理图

Fig. 5 Structure and working principle diagram of anti adhesive and fragmented soil digging device

1. 栅条镇压辊 2. 可调节限深轮 3. 切秧圆盘 4. 复合仿生楔形挖掘铲装置 5. 栅条碎土辊Ⅰ 6. 栅条碎土辊Ⅱ 7. 一级杆链分离筛 8. 主动激振装置 9. 低频偏心缓振装置 10. 集薯栅 11. 配重挡杆 12. 柔性螺旋排膜辊 13. 机架铰接轴 14. 二级杆链分离筛

针对西北丘陵山区地形特点,要求马铃薯联合收获机整机尺寸越小,则更有利于机具高效作业和灵活转场,且起到节能减排作用。前端起收装置减阻碎土性能对整机结构尺寸影响较大,因此,一方面以仿生学及材料学等多学科联合提升挖掘铲减阻抗粘附性能,另一方面采取“提高碎土性能、缩短分离路径”的思路,依次设计仿形镇压装置、复合仿生楔形挖掘铲装置、碎土辊组、一级杆链分离筛振动装置实现垄面板结土块压碎、垄体挖掘楔碎、垄台紧实土壤滚碎、剩余土块振碎等碎土过程。在考虑伤薯前提下,尽可能破碎土块加速薯土分离,降低人工拣选平台分拣压力,同时达到缩短分离路径的目的,以此缩短机具整体尺寸。

3.2.2 复合仿生楔形挖掘铲装置设计

穴居动物长期在土壤环境中生活,进化出有利于减阻碎土的打穴功能[26-30]。西北鼢鼠最为典型,长期生活于田间深度 30 cm 以内的土壤耕作层,善于在地下不断打穴寻觅根茎类食物。

挖掘装置是前端起收装置的关键部件,作为典

型的触土部件，其减粘脱附性能有助于减小挖掘阻力，提升挖掘铲碎土性能有助于促进后端薯土分离效果。本文研究西北鼢鼠打穴原理，发现头部前端鼻颊部位十分发达，呈锥形，打穴过程中楔土、碎土能力较强。如图 6 所示，对西北鼢鼠头部结构进行三维扫描，获取头部形貌点云数据，再通过逆向工程软件将其转换为三维模型。并对西北鼢鼠头部鼻颊部位建立轮廓样条曲线，并提取两侧鼻颊、鼻尖关键特征参数，如最前端鼻颊骨夹角 α_0，鼻尖水平投影夹角 γ，再结合三面楔切土理论分析，以减阻碎土为目标，设计一种仿生楔形挖掘铲。

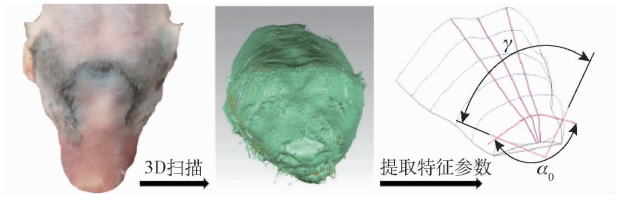


图 6　鼢鼠头部特征提取过程

Fig. 6　Study on head characteristics of northwest zokor

为解决挖掘铲粘附问题，将挖掘铲结构设计为复合材料形式，仿生弓型挖掘铲铲尖部分破土楔土承受的载荷较大，需具备高强度、高耐磨性能。后端铲壁强度要求相对较低，但土壤接触面积较大，土壤粘附产生的阻力也较大。因此，仿生弓型挖掘铲采用厚度 10 mm 的 65Mn 钢板，铲尖通过激光熔覆工艺熔覆一层凹凸起伏的铁基合金材料，铁基合金涂层硬度高，耐磨性能好，且经济成本低，凹凸不平的表面竖纹均有利于提高挖掘铲减粘脱附性能。铲壁与土壤接触面积大，粘附产生的阻力较大，并且影响土壤通过性，过度粘附容易导致挖掘铲部位土壤壅堵，增大机组牵引阻力。因此，对铲壁表面镶嵌超高分子聚乙烯材料（UHMWPE），通过粘附理论分析，该材料具有低表面能和良好的疏水性能，表现出优异的减粘脱附性能[26,30]。基于以上研究，设计了一种复合仿生楔形挖掘铲装置，如图 7 所示，主要由挖掘铲主梁架、过载保护型托架、复合仿生楔形挖掘铲组成。如图 7b 所示，挖掘铲设计长度 L_2 为

$$L_2 = \frac{h}{\sin\beta_0} \tag{10}$$

式中　h——挖掘铲末端安装高度，mm

β_0——挖掘铲倾角，(°)

挖掘铲牵引阻力受土壤类型、挖掘深度、挖掘铲形式和挖掘铲倾角等影响很大，可建立关系式[24]

$$\begin{cases} F_0\cos\beta_0 - f_z - G\sin\beta_0 = 0 \\ N_t - G\cos\beta_0 - F_0\sin\beta_0 = 0 \end{cases} \tag{11}$$

其中

$$f_z = \mu N_t \tag{12}$$

式中　F_0——挖掘铲掘起所需要的力，N

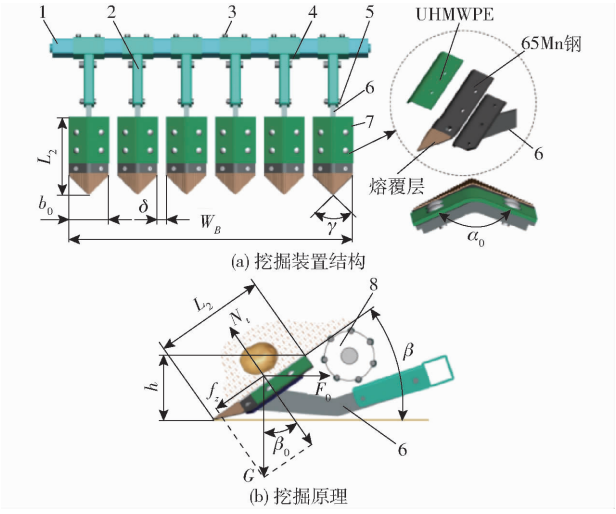


图 7　复合仿生楔形挖掘铲装置

Fig. 7　Composite biomimetic wedge-shaped digging shovel device

1. 铲架　2. 过载保护架　3. 限位螺丝　4. 托架固定销　5. 过载剪切销　6. 托架　7. 复合仿生楔形挖掘铲　8. 栅条碎土辊 I

f_z——挖掘铲摩擦阻力，N

G——挖掘铲上的土壤重力，N

N_t——挖掘铲对土壤的反作用力，N

μ——土薯秧混合物对挖掘铲的摩擦因数

通过推算，挖掘铲倾角为

$$\beta_0 = \arctan\frac{F_0 - \mu G}{\mu F_0 + G} \tag{13}$$

挖掘铲末端高度 h 受栅条碎土辊 I 及挖掘铲托架等安装位置影响，高度 h 设计为（172 ± 15）mm。从土壤三面楔理论出发，考虑挖掘铲碎土性能，挖掘铲倾角 β_0 设计为 35°（±5°可调）。前期田间试验证明挖掘铲过长容易导致壅堵，且增大牵引阻力，因此，最终确定挖掘铲长度 L_2 为 300 mm。

基于马铃薯田间挖掘收获试验经验及考虑环山梯田弯曲垄体对行作业难的问题，对应的挖掘铲有效工作幅宽 W_B 设计值略大于大垄双行模式垄底宽度。其计算式为[15,17]

$$W_B = L_S + D_W + 3\varepsilon + 2D_e \tag{14}$$

式中　L_S——种植行距，mm

D_W——薯块生长平均分布宽度，mm

ε——综合标准差，mm

D_e——收获机前端对行偏差，mm

结合西北旱作区马铃薯种植农艺及实际作业工况，经过计算分析，确定马铃薯挖掘铲有效工作幅宽 W_B 为 1 000 ~ 1 100 mm（可调）。挖掘铲宽度 b_0 设计为 150 mm，滑草间隙 δ 为 20 ~ 40 mm（可调）。

3.2.3　碎土型分离升运装置

刚掘起的垄体薯土混合物比较紧实，适当的破碎垄体有助于提高后端分离效果。因此，设计一种

碎土型分离升运装置,装置包括前端栅条碎土辊组、一级杆链分离筛、主动激振装置、低频偏心缓振装置。栅条碎土辊组具有碎土、分离、输送等作用,马铃薯挖掘铲后端加装栅条碎土辊组,对刚掘起的紧实垄体进行初级碎土、分离,刚掘起的土壤土量大,碎土过程中对马铃薯具有天然的铺垫缓冲作用,但考虑到马铃薯损伤问题,栅条碎土辊Ⅰ转速 n_1 与栅条碎土辊Ⅱ转速 n_2 应满足关系

$$n_2 = (0.85 \sim 0.95) n_1 \tag{15}$$

为避免栅条碎土辊Ⅱ与一级杆链分离筛过渡处发生壅堵,其一级杆链分离筛线速度 v_5 与栅条碎土辊Ⅱ线速度 v_2 应满足

$$v_5 = (1.0 \sim 1.2) v_2 \tag{16}$$

其中

$$v_2 = \frac{n_2 \pi R_2}{30} \tag{17}$$

式中 R_2——栅条碎土辊Ⅱ半径,取 65 mm

如图 8 所示,以点 O 为坐标原点,平行于一级杆链分离筛面为横坐标轴 x,垂直于筛面为纵坐标轴 y,建立直角坐标系。为避免一级杆链分离筛发生土壤堆积壅堵,其线速度与实际作业时机具前进速度 v_s 在 x 轴上分速度关系为

$$v_5 - v_s \cos\theta > 0 \tag{18}$$

其中

$$v_5 = \frac{n_5 \pi R_5}{30} \tag{19}$$

式中 θ——一级杆链分离筛作业倾角,(°)

n_5——一级杆链分离筛驱动轮转速,r/min

R_5——一级杆链分离筛回转半径,取 86 mm

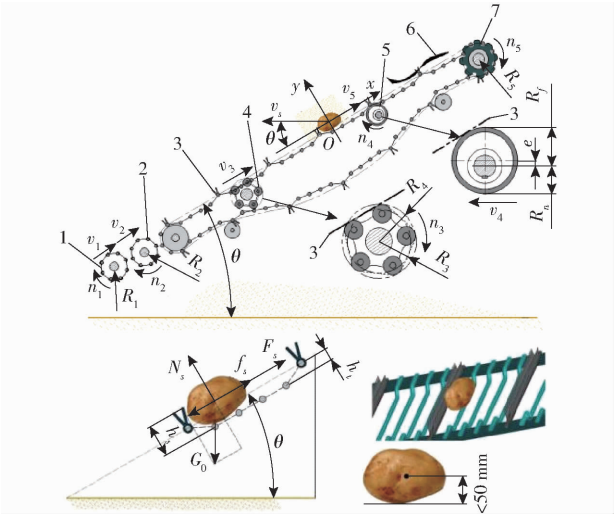


图 8 碎土型分离升运装置结构及参数分析

Fig. 8 Structure and parameter analysis of soil-crumbling separation and conveying device

1. 栅条碎土辊Ⅰ 2. 栅条碎土辊Ⅱ 3. 一级杆链分离筛 4. 主动激振装置 5. 低频偏心缓振装置 6. 地膜 7. 一级杆链分离筛驱动轮

一级杆链分离筛倾角越小,更有利于马铃薯平稳向后端升运,可避免马铃薯沿筛面来回滚落擦伤,但倾角过小会使前端挖掘起收装置纵向尺寸加长,导致机具重心前移,影响机具爬坡越障等通过性能。因此,需要确定一级杆链分离筛倾角 θ,如图 8 所示,马铃薯在一级杆链分离筛受力状况为

$$\begin{cases} G_0 \sin\theta = F_s + f_s \\ G_0 \cos\theta = N_s \\ \mu_s N_s = f_s \end{cases} \tag{20}$$

式中 G_0——薯块重力,N

F_s——柔性硫化齿杆对薯块的作用力,N

f_s——薯块输送所受的摩擦力,N

N_s——薯块在垂直于筛面向上的支持力,N

μ_s——薯块与筛杆之间的静摩擦因数

马铃薯在筛杆节距为 50 mm 的平面杆链分离筛上产生滑移的临界倾角为 27.34°[24]。为减小前端分离装置纵向尺寸,该装备中马铃薯杆链分离筛倾角设计为 35°,超出了普通杆链分离筛临界倾角,薯块在杆链分离筛面会发生滚落擦伤。为解决以上问题,设计了柔性硫化齿杆 + 凹杆组合式分离升运装置。一般地,马铃薯近似于椭球形,其长轴尺寸为 30 ~ 100 mm,马铃薯沿着筛面向上输送基本被横放在筛面上,如图 8 所示,其中心高度基本不超过 50 mm。由于椭圆形物体在斜面上滚落时,挡板高度只要高于物体中心即可阻止其下落,考虑工作时抖动等因素,设计凹杆中心到柔性硫化齿杆中心垂直高度 h_t 为 20 mm,凹杆中心到柔性硫化齿顶垂直高度 h_s 为 60 mm,h_s 大于马铃薯中心高度,可有效避免马铃薯滚落擦伤,该设计满足马铃薯的升运要求。

为提高一级杆链分离筛薯土分离效果,在一级杆链分离筛前段加装一种主动激振装置,考虑到伤薯问题,该振动装置采用高频低幅振动原理。为保证一级杆链分离筛与振动轮运行平稳及减少接触摩擦,振动装置线速度与一级杆链分离筛线速度近似或保持一致,所以

$$\begin{cases} \dfrac{n_3 \pi R_3}{30} \leqslant v_3 \leqslant \dfrac{n_3 \pi R_4}{30} \\ v_3 = v_5 \end{cases} \tag{21}$$

得

$$\frac{n_5 R_5}{R_4} \leqslant n_3 \leqslant \frac{n_5 R_5}{R_3} \tag{22}$$

此外,该主动激振装置振动频率 f 及振幅 A_1 为

$$\begin{cases} f = Z n_3 / 60 \\ A_1 = R_4 - R_3 \end{cases} \tag{23}$$

式中 n_3——主动激振装置转速,r/min

Z——振动装置齿数,取 5

R_3——主动激振装置接触最小半径,取 52 mm

R_4——主动激振装置接触最大半径,取 60 mm

随着土壤在筛面不断分离，中后段筛面土壤越来越少，对薯块缓冲保护作用降低，因此，为促进筛面继续分离，在杆链分离筛中后段加装一种低频偏心缓振装置，为减轻低频偏心缓振装置与一级杆链分离筛接触摩擦磨损，因此，低频偏心缓振装置在远程角线速度、近程角线速度应接近一级杆链分离筛线速度。因此，具体参数关系为

$$\begin{cases} A_2 = 2e = R_f - R_n \\ f_{\max} = n_5 R_5 / (60 R_n) \\ f_{\min} = n_5 R_5 / (60 R_f) \end{cases} \tag{24}$$

式中　A_2——低频偏心缓振装置振幅，mm

e——低频偏心缓振装置偏心距，取 7.5 mm

$f_{\max}$——低频偏心缓振装置允许最大振动频率，Hz

$f_{\min}$——低频偏心缓振装置允许最小振动频率，Hz

R_n——偏心轮近程最小距离，取 47.5 mm

R_f——偏心轮远程最大距离，取 62.5 mm

根据田间试验经验及马铃薯联合收获机设计技术要求，西北丘陵山地马铃薯联合收获机实际作业时前进速度 v_s 为 0.4 ~ 0.6 m/s，一级杆链分离筛线速度 v_5 为 1.2 ~ 1.6 m/s，一级杆链分离筛作业倾角 θ 设计为 35°，通过式(15) ~ (24)分别计算得：栅条碎土辊Ⅰ转速 n_1 为 155 ~ 276 r/min，其线速度 v_1 为 1.05 ~ 1.88 m/s；栅条碎土辊Ⅱ转速 n_2 为 147 ~ 235 r/min，栅条碎土辊Ⅱ线速度 v_2 为 1.0 ~ 1.6 m/s；主动激振装置主轴转速 n_3 为 191 ~ 294 r/min，其振动频率 f 为 16 ~ 24.5 Hz；低频偏心缓振装置转速 n_4 为 183 ~ 322 r/min，其最大频率 $f_{\max}$ 为 5.4 Hz，最小频率 $f_{\min}$ 约为 3 Hz。

3.2.4　膜秧清除装置

西北旱区马铃薯种植主要以雨养为主，为蓄水保墒，大多以覆膜种植为主，残膜及茎蔓分离清除也是收获当中关键环节。因此，设计一种膜秧清除装置。

如图 9 所示，该装置由后端一级杆链分离筛、柔性摘薯栅条辊、4 组配重挡杆、限位杆、柔性浮动螺旋排膜辊、清膜刀等组成。工作时，一级杆链分离筛将残地膜、茎蔓输送至柔性摘薯栅条辊和柔性浮动螺旋排膜辊间隙处，经配重挡杆阻挡作用，在一级杆链分离筛、柔性摘薯栅条辊及柔性浮动螺旋排膜辊相互对转作用下，残地膜、茎蔓从柔性摘薯栅条辊与柔性浮动螺旋排膜辊间隙排出机外。柔性摘薯栅条辊由硫化橡胶杆组成，套装于一级杆链分离筛驱动轴上，与杆链分离筛驱动轴做同轴转动，以减轻一级杆链分离筛凹杆回转过程中因排膜间隙过大，导致漏薯、茎蔓摘薯伤薯等问题。柔性浮动螺旋排膜辊表面硫化正反螺纹橡胶面，增大对地膜、茎蔓摩擦力，便于快速排杂。正反螺旋线有助于将地膜向中间聚集，避免膜下薯块被包裹导致伤薯。清膜刀随时清理缠绕在柔性浮动螺旋排膜辊上的地膜、茎蔓，限位杆可调整配重挡杆旋转位置。为避免地膜、茎蔓发生壅堵，柔性浮动螺旋排膜辊线速度 v_5 需与一级杆链分离筛线速度 v_6 基本保持相等。因此两者转速满足

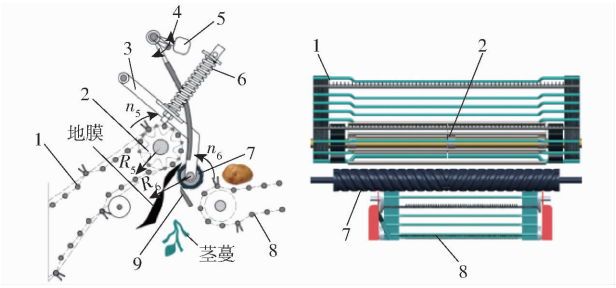


图 9　膜秧清除装置

Fig. 9　Agricultural film and seedling removal device

1. 一级杆链分离筛　2. 柔性摘薯栅条辊　3. 柔性螺旋排膜辊铰接架　4. 限位杆　5. 配重挡杆　6. 浮动预紧弹簧　7. 柔性螺旋排膜辊　8. 二级杆链分离筛　9. 清膜刀

$$v_5 = v_6 = \frac{n_5 \pi R_5}{30} = \frac{n_6 \pi R_6}{30} \tag{25}$$

式中　n_6——柔性浮动螺旋排膜辊转速，r/min

R_6——柔性浮动螺旋排膜辊半径，取 45 mm

一般地，一级杆链分离筛线速度 v_5 为 1.2 ~ 1.6 m/s，根据以上关系确定 n_5 为 133 ~ 177 r/min，n_6 为 255 ~ 340 r/min。

3.3　人工除杂与自动清选装置

通过减粘碎土型起收装置的马铃薯及剩余土块、残秧等杂物，需进一步进行清杂、薯块表皮清土、分级等过程，因此，设计一种人工除杂与自动清选装置。如图 10 所示，该人工除杂与自动清选装置主要由机架、防尘板、二级杆链分离筛、杆链分离筛振动装置、分径隔板、柔性片轮辊组分离装置、导流板、液压传动系统等组成。机器工作时，马铃薯及残余杂物流入薯块通道前端，伴随二级杆链分离筛向后输送，站在机器两侧的工作人员，手动将薯块通道残留土块、茎蔓挑拣至排杂通道，马铃薯再经柔性片轮辊组分离装置进行表皮土壤清洁、大小薯块分级，清洁分级后的薯块最终经导流槽装入后端吨包。该装置采用液压马达驱动二级杆链分离筛运行，二级分离筛驱动轴转速可以通过调速阀进行手动无级变速，手动换向阀可以控制传动系统正、反转切换和关停等动作。此外，分径拣选平台下方安装发动机，防尘

板起到隔绝尘土作用。

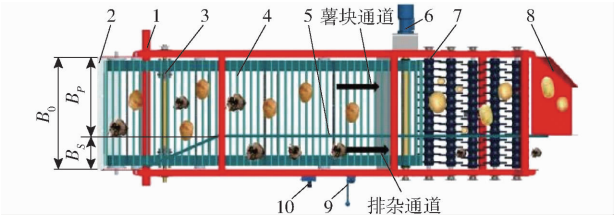


图 10 人工除杂与自动分级装置

Fig. 10 Manual impurity removal and automatic grading device

1. 机架 2. 防尘板 3. 杆链分离筛振动装置 4. 二级杆链分离筛 5. 分径隔板 6. 液压马达 7. 柔性片轮辊组分离装置 8. 导流槽 9. 手动换向阀 10. 调速阀

3.3.1 二级杆链分离筛参数确定

该人工除杂与自动分级装置总幅宽 B_0 设计为 650 mm，排杂通道宽度 B_S 为 200 mm，中间薯块通道宽度 B_P 为 450 mm。机器工作时，为便于人工分拣及安全性考虑，该二级杆链分离筛线速度 v_7 不可高于 0.75 m/s[6]。该二级杆链分离筛驱动轴转速 n_7 为

$$n_7 = \frac{30v_7}{\pi R_7} \tag{26}$$

得

$$v_7 = \frac{n_7 \pi R_7}{30} \leqslant 0.75 \text{ m/s} \tag{27}$$

式中 R_7——二级杆链分离筛驱动轮半径，取 75 mm

由式(26)、(27)可得，工作时，二级杆链分离筛驱动轴转速 n_7 最高不能超过 96 r/min。如图 10 所示，该二级杆链分离筛驱动轴通过液压马达驱动，选用 BM1－200 摆线液压马达，该液压马达排量 V_m 为 200 mL/r，该马达工作时流量 q_m 和输出功率 P_{om} 计算式为

$$q_m = \frac{10^{-3} n_7 V_m}{\eta_v} \tag{28}$$

$$P_{om} = \frac{2 \times 10^{-3} \pi n_7 T_m}{60} \tag{29}$$

式中 η_v——容积效率，取 0.9

T_m——工作转矩，N·m

经测量，该人工除杂与自动分级装置工作时所需转矩 T_m 约为 76 N·m，通过式(28)、(29)计算得该液压马达所需最大流量 q_m 为 21.3 L/min，正常工作输出功率 P_{om} 约为 0.76 kW。

3.3.2 柔性片轮辊组分离装置参数确定

柔性片轮辊组分离装置安装于二级杆链分离筛后端，可降低薯块输送速度，综合考虑整体结构设计、伤薯率以及便于人工辅助分拣等因素，因此，该装置设计为 5 组辊轮轴，其转速、转向一致。该装置分离、薯块表皮清洁，分级效果好，但输送能力差，其辊轮线速度过低会导致薯块堆积，原地翻滚时间过长，容易破皮。因此，该辊轮线速度 v_8 设计为 0.75 ~ 1.25 m/s。辊轮轴转速 n_8 计算式为

$$n_8 = \frac{30v_8}{\pi R_8} \tag{30}$$

式中 R_8——辊轮半径，取 50 mm

经计算，辊轮轴转速 n_8 为 143 ~ 239 r/min。

马铃薯在柔性片轮辊组分离装置受力如图 11 所示。

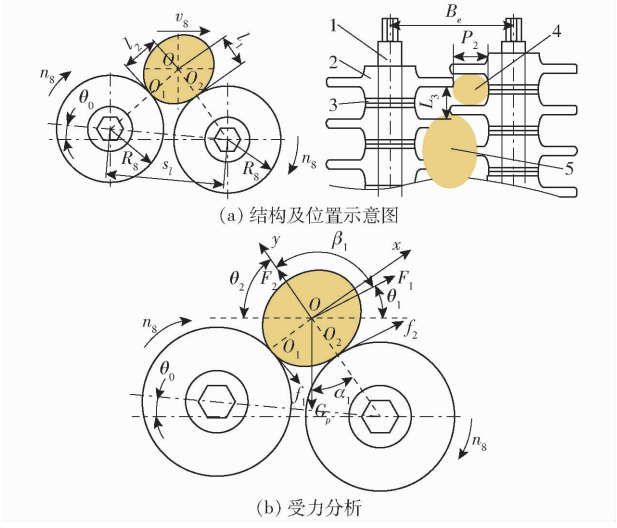


图 11 相邻辊轮受力分析及结构简图

Fig. 11 Force analysis and structural diagram of adjacent rollers

1. 辊轮轴 2. 柔性片轮 3. 间隙调整垫片 4. 小薯 5. 大薯

马铃薯主要受相邻两辊轮支撑力 F_1、F_2、薯块自身重力 G_p 以及两辊轮产生的摩擦力 f_1、f_2。点 O 为马铃薯质心位置，点 O_1 和点 O_2 分别为两个接触点。由图 11b 可得

$$\begin{cases} f_1 = \mu_Z F_1 \\ f_2 = \mu_Z F_2 \end{cases} \tag{31}$$

式中 μ_Z——柔性橡胶与马铃薯摩擦因数

马铃薯在分离、分级、输送过程中，忽略柔性片轮引起的马铃薯离心力，作用在马铃薯上的所有力对接触点 O_2 总力矩 M_2 为

$$\sum M_2 = F_1 l_1 \sin(180° - \beta_1) - G_p l_1 \sin\alpha_1 - f_1(l_2 + l_1 \sin(\beta_1 - 90°)) \tag{32}$$

式中 l_1——点 O 到点 O_2 的距离，m

l_2——点 O 到点 O_1 的距离，m

α_1——马铃薯重力 G_p 与点 O_2 法向夹角，(°)

β_1——支撑力 F_1 与 F_2 夹角，(°)

联立式(31)、(32)可得

$$\sum M_2 = F_1 l_1 \sin\beta_1 - G_p l_1 \sin\alpha_1 + F_1 \mu_Z (l_2 + l_1 \cos\beta_1) \tag{33}$$

马铃薯能够翻越柔性片轮的临界条件：对点 O_2

的总力矩大于等于零，即

$$F_1 l_1(\sin\beta_1 + \mu_Z \cos\beta_1) + F_1 \mu_Z - G_p l_1 \sin\alpha_1 \geqslant 0 \tag{34}$$

同时，应该满足沿着接触点 O_2 切线方向合力大于等于零，即

$$F_1 \sin(180° - \beta_1) + f_2 - f_1 \sin(\beta_1 - 90°) - G_p \sin\alpha_1 \geqslant 0 \tag{35}$$

可得

$$F_1 \sin\beta_1 + F_2 \mu_Z + F_1 \mu_Z \cos\beta_1 - G_p \sin\alpha_1 \geqslant 0 \tag{36}$$

马铃薯在柔性片轮辊组分离装置清选过程中，柔性片轮对马铃薯的两作用力 F_1 和 F_2 之间的夹角 β_1 变化较小，但重力 G_p 与 y 轴负方向夹角 α_1 时刻变化，柔性片轮辊组分离装置倾斜角 θ 对马铃薯通过性影响较大。试验结果证明，该装置马铃薯通过性受到邻接马铃薯的撞击力影响较大，薯块越多会形成从前往后连续推动马铃薯向后输送，即薯块越多，马铃薯原地翻滚次数越少，可降低原地多次翻滚破皮损伤。因此，马铃薯在该过程中的受力比较复杂，柔性片轮转速 n_8、提升倾角 θ_0、辊轮轴间距 B_e、上料量均是影响马铃薯受力的关键因素，也是影响马铃薯在清选过程中伤损率及通过性的重要指标。因此，装置提升角 θ_0 设计为 0°～10°（可调），辊轮轴间距 B_e 设计为 90～110 mm（可调），柔性片轮横向间隙 L_3 设计为 25～35 mm（可调），柔性片轮纵向最大间隙 P_2 设计为 20～40 mm（可调）。

4　田间试验

4.1　试验条件

如图 12 所示，2024 年 10 月在甘肃省定西聚鑫牧草农民专业合作社马铃薯基地进行了田间收获试验。该基地主要以黑膜覆盖、膜面覆土的大垄双行种植模式为主，种植品种为陇薯 10 号和青薯 9 号，田间垄体土壤绝对含水率约 13.7%。



图 12　田间收获试验

Fig. 12　Field harvest test of this equipment

4.2　试验方案与方法

根据文献[31－32]对多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机进行性能检测，主要测定收获过程中马铃薯损失率、伤薯率、破皮率及含杂率，同时，考察轮式自走底盘、减粘碎土起收装置、人工除杂与自动清选装置、传动系统等工作情况。

根据标准要求，选定试验测区长度不小于 50 m，两端稳定区长分别设定 10 m，测定区域宽度选定为作业幅宽的 8 倍以上。试验时，测往返多个行程，每个行程随机选 3 个小区，每个小区长 3 m，宽度为机器的作业幅宽。至少重复 10 次试验并测得试验数据，求出重复试验测定结果的平均值。按照以上标准，其损失率 S_1、伤薯率 S_2、破皮率 S_3 及含杂率 S_4 计算式为[31－32]

$$S_1 = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_Z} \times 100\% \tag{37}$$

$$S_2 = \frac{Q_3}{Q_Z} \times 100\% \tag{38}$$

$$S_3 = \frac{Q_4}{Q_Z} \times 100\% \tag{39}$$

$$S_4 = \frac{Q_5}{Q_5 + Q_6} \times 100\% \tag{40}$$

其中

$$Q_Z = Q_1 + Q_2 + Q_6 \tag{41}$$

式中　Q_1——漏捡薯质量，kg

Q_2——漏挖薯质量，kg

Q_3——伤薯质量，kg

Q_4——破皮薯质量，kg

Q_5——杂质质量，kg

Q_6——收获薯质量，kg

Q_Z——总薯质量，kg

4.3　试验结果分析

该多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机田间试验结果如表 2 所示。

表 2　田间试验结果

Tab. 2　Results of field experiments　%

序号	损失率	伤薯率	破皮率	含杂率
1	2.3	1.6	2.1	2.6
2	2.6	1.4	1.7	1.5
3	1.5	1.8	2.5	1.7
4	2.1	1.7	3.3	1.3
5	1.8	1.9	3.1	1.5
6	1.4	1.3	1.6	4.3
7	1.9	1.6	2.1	1.6
8	2.5	1.7	1.7	1.2
9	1.6	1.5	2.0	1.4
10	2.1	1.4	1.4	1.3
平均值	1.98	1.59	2.15	1.84
技术标准	≤3	≤2	≤3	≤4

由表 2 可得，该多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机，测定该损失率、伤薯率、破皮率以及含杂率均满足国家和行业标准要求。该多模转向轮式底盘在西北丘陵山区坡道行驶、田间掉头均满足行业设计要求，且运行平稳，四轮转向系统在田间掉头转向半径小，具有明显优势，平均生产率 0.21～0.36 hm^2/h，有效提高了收获和转场效率。减粘碎

土型起收装置有效降低了挖掘阻力、提高了挖掘前端碎土效果,为后端分离及人工分拣减轻了压力。人工除杂与自动清选装置液压系统运行平稳,通过转速无级调节,满足不同作业工况收获要求。

5 结论

(1)基于西北旱区马铃薯作业工况,设计了一种多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机。该机一次作业完成挖掘、薯土分离、薯膜分离、薯块清洁分选、收集装袋、自动卸袋等工序。整机结构设计以小型化、轻量化为主体思路,从底盘转向系统、挖掘分离工作部件两方面出发,适于西北旱作区丘陵山地的马铃薯联合收获机。对整机结构及性能参数进行设计,为西北旱作区马铃薯机械化收获提供了参考。

(2)通过结构设计与计算,研发了多模转向轮式底盘,转场及正常挖掘时采用后轮转向,田间掉头及急转弯时,可采用四轮转向,与履带底盘相比,轮式底盘转场方便灵活,且转场速度高,有效提高了收获期工作效率。结果表明,后轮转向外侧轮最小转弯半径为 6.51 m,四轮转向模式下,外侧轮最小转弯半径为 3.81 m,大大缩小了转弯半径,有利于机具在小块梯田灵活作业。

(3)通过仿生学、材料学、动力学分析等相关研究方法,设计了减粘碎土型前端起收装置,有效减小了挖掘阻力,提升了前端起收装置碎土效果,促进了薯土膜秧高效分离,提高了整机收获作业质量及作业效果,解决了薯土分离效果差、含杂率高等问题。

(4)田间试验结果表明,该多模转向减粘碎土型马铃薯联合收获机平均损失率为 1.98%,平均伤薯率为 1.59%,平均破皮率为 2.15%,平均含杂率为 1.84%,平均生产率为 0.21 ~ 0.36 hm^2/h,田间性能试验指标均满足国家和行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 杨然兵,吕士亭,张健,等. 履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(12):231 - 238,343.
YANG Ranbing, LÜ Shiting, ZHANG Jian, et al. Design and test of assisted driving operation system of tracked potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(12):231 - 238,343. (in Chinese)

[2] 魏忠彩,韩梦,苏国梁,等. 装包卸包型马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(10):92 - 104.
WEI Zhongcai, HAN Meng, SU Guoliang, et al. Design and experiment of a bagging and unloading potato combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(10):92 - 104. (in Chinese)

[3] 王虎存,赵武云,孙伟,等. 马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2023,39(14):1 - 22.
WANG Hucun, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Research progress on the technology and equipment for potato mechanized harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14):1 - 22. (in Chinese)

[4] 李涛,杨敏丽,张雄,等. 西北地区马铃薯机械化生产技术与差异性研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊 1):307 - 313.
LI Tao, YANG Minli, ZHANG Xiong, et al. Potato production technology and difference of mechanization level in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):307 - 313. (in Chinese)

[5] CHEN Y, WANG Z, ZHANG H, et al. Investigation of the traveling performance of the tracked chassis of a potato combine harvester in hilly and mountainous areas[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1625.

[6] WANG H, ZHAO W, SUN W, et al. The design and experimentation of a wheeled-chassis potato combine harvester with integrated bagging and ton bag-lifting systems[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1461.

[7] 李学强,王兴欢,刘洋,等. 马铃薯联合收获机环形减损集薯升运装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(12):109 - 120.
LI Xueqiang, WANG Xinghuan, LIU Yang, et al. Design and experiment of circular reducing and collecting potato lifting device for potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12):109 - 120. (in Chinese)

[8] 王法安,曹钦洲,李彦彬,等. 丘陵山区自走式马铃薯联合收获机设计与通过性试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 2):10 - 19.
WANG Fa'an, CAO Qinzhou, LI Yanbin, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled potato harvester in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2):10 - 19. (in Chinese)

[9] 王兴欢. 履带自走式分拣型马铃薯收获机研制与试验[D]. 淄博:山东理工大学,2024.
WANG Xinghuan. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2024. (in Chinese)

[10] 王海翼. 山地自走式马铃薯联合收获机设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
WANG Haiyi. Mountain self propelled potato combine harvester design and experiment[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[11] 程子文,杨德秋,刘萌萌,等. 基于离散元仿真的马铃薯收获机集薯装袋过程研究[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):62 - 74.
CHENG Ziwen, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Bagging process of potato harvester based on EDEM[J]. Transactions

of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2):62 - 74. (in Chinese)
[12] JU Y, SUN W, ZHAO Z, et al. Development and testing of a self-propelled machine for combined potato harvesting and residual plastic film retrieval[J]. Machines, 2023, 11(4): 432.
[13] 杨然兵,田光博,尚书旗,等.马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(2):107 - 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2):107 - 118. (in Chinese)
[14] 王兴欢,魏忠彩,苏国梁,等. 马铃薯收获机扰动分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(4):101 - 112.
WANG Xinghuan, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Design and experiment of simple harmonic disturbance separation device for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4):101 - 112. (in Chinese)
[15] 张兆国,王海翼,李彦彬,等.多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J].农业机械学报, 2021,52(2):96 - 109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2):96 - 109. (in Chinese)
[16] SHEN H, WANG B, WANG G, et al. Research and optimization of the hand-over lifting mechanism of a sweet potato combine harvester based on EDEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(5): 71 - 79.
[17] 杨德秋,汪昕,刘萌萌,等.自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J].农业机械学报, 2024,55(1):85 - 95.
YANG Deqiu, WANG Xin, LIU Mengmeng, et al. Design and experiment of self-propelled potato collecting and bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1):85 - 95. (in Chinese)
[18] 张振东.丘陵山地自走式马铃薯联合收获机设计与仿真[D].昆明:昆明理工大学,2022.
ZHANG Zhendong. Design and simulation of propelled potato combined harvester in hilly country[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
[19] 张兆国,李彦彬,王海翼,等.马铃薯机械化收获关键技术与装备研究进展[J].云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(6):1092 - 1103.
ZHANG Zhaoguo, LI Yanbin, WANG Haiyi, et al. Research progress on key technology and equipment of potato mechanized harvest[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2021, 36(6):1092 - 1103. (in Chinese)
[20] LI J, SUN W, WANG H, et al. An integrated potato-planting machine with full-film mulching and ridged row soil covering [J]. Agriculture, 2024, 14(6): 860.
[21] 刘泉东.马铃薯膜顶坐土促生机理研究及对行覆土装置设计[D].兰州:甘肃农业大学,2023.
LIU Quandong. Study on the growth promotion mechanism of potato covered with plastic film and the design of the row soil covering device[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[22] 孙伟,刘小龙,张华,等.马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J].农业工程学报,2017,33(20):14 - 22.
SUN Wei, LIU Xiaolong, ZHANG Hua, et al. Design of potato casingsoil planter in all-in-one machine combined with fertilizing, sowing, ridging, complete film mulching and planting line covering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 14 - 22. (in Chinese)
[23] 张孝安.农业机械设计手册:上册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[24] JIA B, SUN W, ZHAO Z, et al. Design and field test of a remotely controlled self-propelled potato harvester with manual sorting platform[J]. American Journal of Potato Research, 2023, 100(3): 193 - 209.
[25] 高连兴,师帅兵.拖拉机汽车学:下册[M].北京:中国农业出版社,2009.
[26] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等.农业机械触土部件优化研究现状与展望[J].农业机械学报, 2017,48(7):1 - 13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1 - 13. (in Chinese)
[27] ZHOU D, HOU P, XIN Y, et al. Resistance and consumption reduction mechanism of bionic vibration and verification of field subsoiling experiment[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 10480.
[28] JIA H, WANG W, WANG W, et al. Application of anti-adhesion structure based on earthworm motion characteristics[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 159 - 166.
[29] 曹成茂,刘忠滨,丁武阳,等.宁前胡仿生挖掘铲设计与试验[J].农业机械学报, 2023,54(11):102 - 113.
CAO Chengmao, LIU Zhongbin, DING Wuyang, et al. Design and experiment of Ning-guo *Radix peucedani* bionic digging shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(7):1 - 13. (in Chinese)
[30] 李俊伟,顾天龙,李祥雨,等.黏重黑土条件下马铃薯挖掘铲仿生减阻特性分析与试验[J].农业工程学报, 2023, 39(20):1 - 9.
LI Junwei, GU Tianlong, LI Xiangyu, et al. Analysis and experiment of the bionic drag reduction characteristics of potato digging shovels on clayey black soil conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20): 1 - 9. (in Chinese)
[31] 中华人民共和国农业部.马铃薯收获机质量评价技术规范:NY/T 648—2015[S].北京:中国农业出版社,2015.
[32] 中华人民共和国工业和信息化部.马铃薯收获机械:JB/T 14285—2022[S].北京:机械工业出版社,2022.