

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.012

残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机设计与试验

孙伟 王虎存 赵武云 张华 刘小龙 吴建民
(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对西北黄土高原旱区地膜全域覆盖、种行覆土垄播马铃薯机械化收获易堵塞、分离效果差、可靠性低、残膜污染等问题,设计了残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机,一次性完成排堵挖掘、薯土分离、薯膜分离、集薯铺条、膜秧分离和残膜回收等工序。通过理论分析和数值仿真,对仿生挖掘装置、曲柄摇杆防堵机构、薯土分离装置、薯膜分离装置、膜秧分离及残膜回收装置等关键部件进行解析和结构优化,确定了性能参数。田间试验表明:明薯率为97.4%,伤薯率为1.3%,破皮率为1.8%,残膜回收率为87.5%,生产率为0.17 hm²/h,各项指标均满足国家及行业标准要求。

关键词: 马铃薯挖掘机; 防堵机构; 残膜回收

中图分类号: S225.7⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)09-0105-10

Design and Experiment of Potato Digger with Waste Film Recollection for Complete Film Mulching, Soil Covering and Ridge Sowing Pattern

SUN Wei WANG Hucun ZHAO Wuyun ZHANG Hua LIU Xiaolong WU Jianmin
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In recent years, furrow-ridge potato cultivation with global plastic film mulching technology is widely used in the semi-arid areas of the Loess Plateau, this kind of cultivation mode is favorable for mechanical planting, but the difficulty of machine harvest is increased. In order to solve the problems of blockage in the process of digging, poor separation effect, low reliability and white pollution for the complete film mulching, planting line covering and ridge sowing pattern in the dry land of northwestern Chinese Loess Plateau, a potato digger with waste film recollection was designed, which can complete the anti-blocking digging, potato separating from soil and film, potato collection and striping, disconnecting the film away from the residue seedlings and the waste film recollection in one process. By theoretical analysis and numerical simulation, the crucial parts, such as bionic digging device, anti-blocking crank rocker mechanism, potato and soil separation device, potato and film partition device, residue seedlings and film disconnection device, the waste film recollection components as well as others were analyzed and optimized, and then the performance parameters were determined. Field experiments showed that the potato exposure rate was 97.4%, the potato injury rate was 1.3%, the potato skin damage was 1.8%, the waste film recollection rate was 87.5%, and the productivity can get to 0.17 hm²/h, all the index of the potato digger with waste film recollection satisfied the requirements of national and industry standards, the problems such as the mulched potato harvesting and the waste film recollection were solved at the same time.

Key words: potato digger; anti-blocking mechanism; waste film recollection

0 引言

近年来,西北黄土高原旱区广泛采用马铃薯地

膜全域覆盖沟垄栽培技术^[1-5],为保证马铃薯幼芽自动破膜出苗,通常在种行或全膜面覆盖一层3~5 cm厚的土层^[6-7]。该栽培模式利于机械化种植,但

收稿日期: 2018-05-28 修回日期: 2018-07-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701601-03)、国家自然科学基金项目(51665002)、农业部公益性行业科研专项(201503105)、甘肃省青年科技基金项目(1506RJYA022)和甘肃农业大学伏羲人才项目(GAUFX-02J01)
作者简介: 孙伟(1980—),男,副教授,主要从事旱作农机装备技术研究,E-mail: sunw@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工程研究,E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

增加了机械化收获难度,由于土壤覆盖,至收获时期地膜韧性好,机械化收获时易产生结瘤型包膜壅堵。此外,由于全域地膜保墒技术的广泛应用,残膜污染严重,以甘肃省为例平均每年铺膜种植新增残膜高达 6×10^4 t 左右^[8],迫切需要相关机具解决此问题。

发达国家对马铃薯收获机械的研究起步早,发展技术水平高,近年来融入了不少新技术,使得马铃薯收获机械化、自动化水平得到了很大提高^[9-10]。典型机具有:美国 Double 公司生产的 973 型马铃薯回流收获机,德国格立莫 (Grimmer) 公司生产的 GT-170 型马铃薯收获机,比利时 AVR 公司研制的 Spirit 6200 型双行偏移仓收获机,这些机具主要以露地栽培收获为主,且体积大、配套动力大,不适用于西北旱区山坡地、小块地作业^[11-13]。20 世纪 90 年代起,国内马铃薯收获机械发展迅速,如山西省忻州市农机推广站和内蒙古农业大学联合研制的 4SW-60 型马铃薯挖掘机,中国农业机械化科学研究院研制的 4UL-1 型背负式马铃薯联合收获机,黑龙江省农机院研制的 4U-1、4U-2 型马铃薯挖掘机,山东富邦农业机械装备有限公司生产的 4U-2 型马铃薯收获机,青岛洪珠农机厂生产的 4U-83 型及 4U-130 型马铃薯收获机,这些挖掘机技术已经基本成熟,在国内广泛使用^[11-14],但这些机具多采用压草轮或立辊式防堵装置,主要防止杂草、残秧缠绕,对韧性较好的残膜反而更容易缠绕在回转式防堵部件上,阻碍机具正常工作。

目前,马铃薯挖掘机均没有附带残膜回收功能,后期回收残膜增加了机组进地次数和燃油消耗。针对西北黄土高原旱区马铃薯种植模式,设计一种残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机,该机具实现马铃薯挖掘和残膜回收联合作业,以提高机具使用效率,降低作业成本。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

如图 1 所示,该机具由悬挂架、传动系统、仿生挖掘装置、曲柄摇杆防堵机构、薯土分离装置、薯膜分离装置、残膜回收装置、可调地轮等构成。

1.2 工作原理

该机具采用三点悬挂式,在拖拉机牵引下,挖掘铲楔入垄下将薯土膜秧混合物掘起至薯土分离装置,在三角振动轮作用下将土壤筛下,清选的薯块膜秧被薯土分离筛输送至后方的薯膜分离装置上,薯块穿过薯膜分离筛的筛眼并在集薯栅作用下呈带状铺到地面上,同时,残膜、茎秧和膜上土壤被薯膜分离装置输送至残膜回收装置的正上方,残膜被卷膜

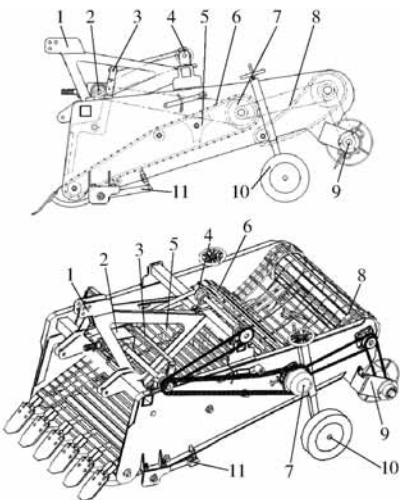


图 1 整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of whole machine

- 1. 悬挂架 2. 传动系统 3. 防堵装置 4. 偏心轮 5. 三角振动轮 6. 薯土分离筛 7. 摩擦式过载保护器 8. 薯膜分离筛
- 9. 残膜回收装置 10. 可调地轮 11. 仿生挖掘铲角度调节机构

针抓取并缠绕到锥形筒上,茎秧和土壤被抛扔到地面上,当残膜缠绕到和卷膜针旋转直径大小相同时卸掉残膜,继续作业。此外,挖掘深度可通过拖拉机中央拉杆长度和可调地轮调节,挖掘铲角度可以通过角度调节机构调节。

1.3 主要技术指标

该联合作业机主要参考西北旱区种植模式以及当地的农艺要求^[15-17],如图 2 所示,为马铃薯黑膜覆盖种行覆土垄播模式,垄底宽度为 900 mm,垄高为 150~200 mm,行距 400 mm,黑膜厚度 0.012 mm,宽度 1 200 mm,膜上覆土厚度为 35~45 mm。此外,重点优化结构以解决挖掘过程中壅堵以及残膜回收等问题,主要技术参数如表 1 所示。

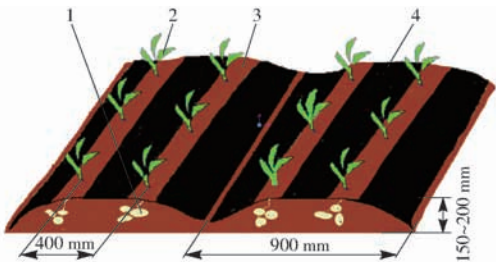


图 2 马铃薯全膜覆土垄播模式

Fig. 2 Complete film mulching, planting line covering and ridge sowing pattern

- 1. 马铃薯 2. 马铃薯残秧 3. 苗带覆土 4. 黑色地膜

2 主要工作部件设计

2.1 仿生挖掘装置

马铃薯挖掘装置的基本功能是把薯土膜秧混合物掘起顺利铺放于薯土分离装置上,设计重点是减小挖掘阻力、提高碎土性能、适应不同地况、延长使

表1 联合作业机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of combined machine

参数	数值
机具尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	2.24×1.46×1.15
配套动力/kW	22.1~29.4
工作幅宽/m	1
作业深度/mm	80~300(可调)
薯膜分离筛眼规格(长×宽)/(mm×mm)	130×190.5
收膜幅宽/m	1
生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.15~0.27
作业行数	2

用寿命等。为此,设计了一种仿生挖掘装置,如图3所示,该挖掘装置由仿生挖掘铲、挖掘铲架和角度调节机构等构成。挖掘铲采用本课题组提出的仿生挖掘铲,该挖掘铲铲尖曲率的变化有利于减小水平方向挖掘阻力,而且仿生挖掘铲铲尖使得土壤应力较集中,容易碎土,更具挖掘碎土减阻效果^[18-19]。挖掘铲刃口采用下磨刃,材料为10 mm 厚的65Mn 钢板,对挖掘铲刃口部位进行局部热处理、发黑处理,以提高其耐磨性和抗腐蚀性等^[20-21]。目前,全膜覆土种植模式垄宽约为0.9 m,为适应垄宽和便于动力配套,设计挖掘幅宽为1 m,经查阅相关资料,多铲挖掘装置滑草间隙一般为30~40 mm^[22],该挖掘铲之间的滑草间隙 δ 设计为35 mm,为满足挖掘铲结构设计要求,单铲宽度 B 设计为137 mm。

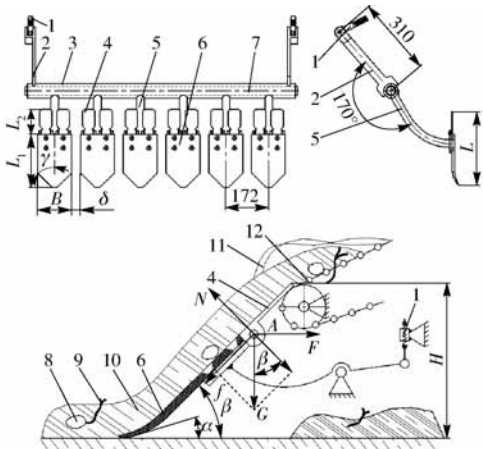


图3 仿生挖掘装置结构图

Fig.3 Bionic digging mechanism

1. 调节螺杆 2. 限位杆 3. 挖掘铲主架 4. 分石栅 5. 弯曲架
6. 仿生挖掘铲 7. 挖掘铲轴 8. 马铃薯 9. 残秧 10. 土壤
11. 残膜 12. 薯土分离筛

为保证铲刃自动清理功能,挖掘铲刃斜角 γ 应满足

$$90^{\circ}-\gamma>\lambda$$

(1)

式中 λ ——土薯秧混合物与挖掘铲摩擦角,($^{\circ}$)
 γ ——挖掘铲刃斜角,取 $40^{\circ}\sim50^{\circ}$

西北黄土高原旱区主要以黄绵土为主,马铃薯

挖掘入土切削角 α 一般为 $16^{\circ}\sim24^{\circ}$ ^[22],入土切削角越小,切入阻力也越小,该仿生挖掘装置可通过角度调节机构调整挖掘铲入土切削角 α 大小,其范围为 $15^{\circ}\sim25^{\circ}$,便于适应不同区域的挖掘作业。如图3所示,机具工作时,挖掘铲在切入过程中,土壤依次发生塑性流动、崩裂等行为,随着机具前进,土薯膜秧杂草等多种混合物容易在挖掘铲上方产生壅堵,主要由于挖掘铲总长 L 过大,掘起的土壤无法及时被薯土分离筛分离。挖掘铲总长 L 的确定主要取决于挖掘铲末端至水平地面的垂直高度 H 和挖掘铲楔角 β 。铲后端水平高度 H 设计为220 mm,过小容易使分离筛的下半部分触及挖掘沟底,无法尽快分离掉推送到薯土分离筛上的土壤。对于挖掘铲楔角 β ,研究其工作时的阻力并进行分析,根据图3 建立方程^[22-25]

$$\begin{cases} F\cos\beta-f-G\sin\beta=0 \\ N'-G\cos\beta-F\sin\beta=0 \end{cases}$$

(2)

其中

$$\begin{aligned} f &= \mu N' \\ \mu &= \tan\lambda \end{aligned}$$

(3)

式中 F ——挖掘铲掘起土壤所需要的力, N
 f ——摩擦力, N
 G ——挖掘铲上的土壤重力, N
 N' ——挖掘铲对土壤的反作用力, N
 μ ——土薯秧混合物与挖掘铲的摩擦因数
最后得到挖掘铲楔角为

$$\beta=\arctan\frac{F-\mu G}{\mu F+G}$$

(4)

为了防止挖掘铲过长而壅堵及保证足够的挖掘铲后端垂直高度 H ,挖掘铲楔角 β 设计为 $30^{\circ}\sim42^{\circ}$ 。挖掘铲的总长度 L 包括挖掘铲长度 L_1 和分石栅长度 L_2 ,经过计算分析, L_1 取200 mm, L_2 取100 mm。由于西北地区属多石土壤地带,所以在铲尾设计分石栅,防止薯土分离筛和挖掘铲的间隙位置被石块等坚硬物体卡死,造成故障。

2.2 曲柄摇杆防堵机构

马铃薯挖掘机防堵装置主要用于自动清理机架两侧缠挂的杂草及秧膜,防止机架两侧产生结瘤性壅堵而影响挖掘效率。目前国内马铃薯挖掘机防缠绕装置主要以切土圆盘配合压草轮形式和立辊旋转式为主,前者用于大型马铃薯挖掘机上,主要针对杂草和茎秧,后者多用于工作幅宽小于1.3 m 的小型马铃薯挖掘机,但在使用过程中,杂草及秧膜易缠绕于立辊上,清理困难,严重时导致立辊卡死损坏机构。针对以上问题设计了曲柄摇杆防堵机构,如图4 所示,该机构主要由摆动刀、连接架、连杆、偏心轮以及传动装置组成,摆动刀

下端前侧加工成切割刃口,工作时,通过快速往复运动切割缠绕在机架两侧的杂草秧膜,并且间歇抖动有助于消除结瘤型包膜堵塞隐患,以提高机具的挖掘效率。

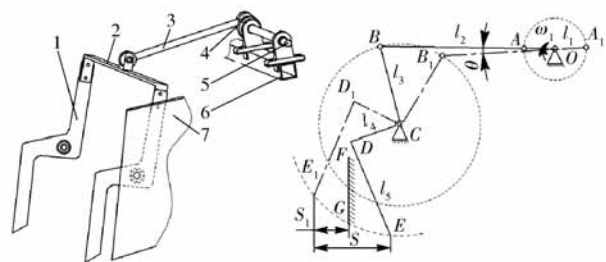


图4 曲柄摇杆防堵机构简图

Fig. 4 Mechanism diagram of anti-blocking crank rocker
1. 摆动刀 2. 连接架 3. 连杆 4. 偏心轮 5. 传动装置 6. 机架 7. 机架侧板

为了提高该机构的可靠性,采用 CAD/CAM 技术对该机构进行了虚拟仿真优化,包括建立虚拟模型、在机构仿真模块中设置初始条件、创建伺服电机(角速度: 10π rad/s)、进行运动学仿真分析、通过“回放”排除干涉、结构优化后对 E 点进行速度及加速度测量,并导出数据,生成相应的曲线图,如图 5 所示,分析得出该机构运动稳定,无异常拐点或波动出现,由于曲柄摇杆机构的急回特性,所以加速度曲线波动稍大^[26]。

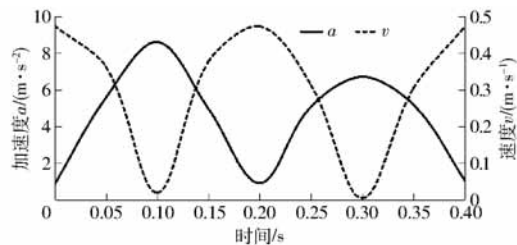


图5 E点速度和加速度曲线

Fig. 5 Curves of velocity and acceleration at E point
图4为仿真优化后的机构简图,E点和E₁点为防堵甩刀的两个极位点,水平振幅S为52 mm,FG为机架侧板易堵塞位置,摆动刀的有效工作行程S₁为30 mm,其他机构参数如表2所示。

表2 曲柄摇杆防堵机构主要技术参数
Tab. 2 Main technical parameters of anti-blocking crank rocker

参数	数值
曲柄OA角速度 $\omega_1/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	10π
极位夹角 $\theta/(\circ)$	4
曲柄OA长度 l_1/mm	28
连杆AB长度 l_2/mm	475
摇杆BC长度 l_3/mm	390
摇杆CD长度 l_4/mm	150
摇杆DE长度 l_5/mm	340

2.3 薯土分离装置

2.3.1 分离筛及其组件

薯土分离装置主要将挖掘铲掘起的土薯混合物进行清选和分离,并将清选出来的马铃薯及秧膜向后输送。对于西北黄土高原旱区,地块小,马铃薯收获机多以29.4 kW以下拖拉机配套,以一级分离为主,分离装置要求高。现有的马铃薯挖掘机分离筛明薯率低,分离装置使用寿命短,故障率高,为此对马铃薯薯土分离装置进行优化。如图6所示,该薯土分离装置采用杆条式分离筛,具有较强的分离性能^[24,27],主要由导向轮、刮土板、托带轮、抬升轮、薯土分离筛、被动抖动轮、驱动轮、摩擦式过载保护器等构成。

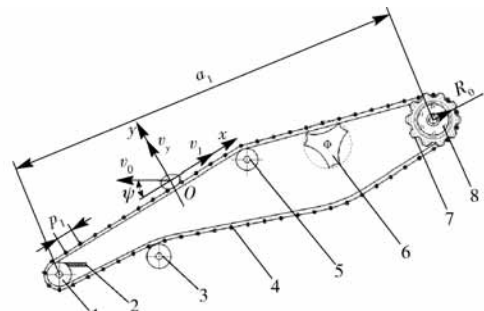


图6 薯土分离装置结构图

Fig. 6 Structure diagram of potato and soil separation device
1. 导向轮 2. 刮土板 3. 托带轮 4. 薯土分离筛 5. 抬升轮 6. 抖动轮 7. 驱动轮 8. 摩擦式过载保护器

机具作业时,导向轮和抬升轮的凸出法兰边对杆条式薯土分离筛具有一定的导向作用,可防止薯土分离筛跑偏与机架侧板发生干涉。由于导向轮工作在湿度较大的土壤环境下,易粘土壤或者残秧、残膜等,致使导向轮工作直径增大,使得薯土分离筛过紧而崩断或减小抖动振幅,影响明薯率,因此,在靠近导向轮的机架侧板上安装有刮土板,自动清理杂物,避免上述问题发生。该杆条式分离筛及配套的驱动轮节距 p_1 为50 mm,机具长期使用会导致分离筛拉长变松,影响分离效果,所以导向轮与驱动轴中心距 a_1 设计为可调,范围为1 200 ~ 1 260 mm,以便随时调整分离筛松紧程度。此外,挖掘作业环境复杂,经常出现石块或树根等坚硬物体损坏薯土分离筛,因此在该驱动轴上安装摩擦式过载保护器,提高机具可靠性。

对马铃薯输送过程进行运动学分析,如图6所示,以O点为坐标原点,平行于筛面为横坐标轴x,垂直于筛面为纵坐标轴y,建立直角坐标系。为满足马铃薯正常输送要求,土薯秧混合物的线速度必须大于机具前进速度在x轴上的分速度,所以

$$v_1 - v_0 \cos \psi > 0 \tag{5}$$

式中 v_1 ——薯土分离筛线速度, m/s
 v_0 ——机具前进速度, m/s
 ψ ——薯土分离筛与水平地面夹角, ($^\circ$)

根据薯土分离筛线速度公式

$$v_1 = \frac{n_0 \pi R_0}{30} \quad (6)$$

式中 n_0 ——驱动轴转速, r/min
 R_0 ——驱动轮分度圆半径, m

在工作过程中, 保证拖拉机恒定油门输出, 该驱动轴转速 n_0 一般为 153 r/min, 其驱动轮分度圆半径 $R_0 = 100$ mm, 因此, 薯土分离筛的线速度 v_1 为 1.6 m/s, 设计薯土分离筛前部与水平地面夹角 ψ 为 31° , 拖拉机前进速度 v_0 为 0.5 ~ 1.6 m/s, 通过计算满足马铃薯正常输送要求^[22]。

为简化传动机构, 该薯土分离装置采用被动抖动轮, 其结构如图 7 所示, 抖动轮转速与薯土分离筛线速度及抖动轮周长关系为

$$n_1 = 60v_1/l \quad (7)$$

式中 n_1 ——抖动轮转速, r/min
 l ——抖动轮周长, m

该抖动轮抖动频率 f_1 为

$$f_1 = Zn_1/60 \quad (8)$$

式中 Z ——抖动轮齿数

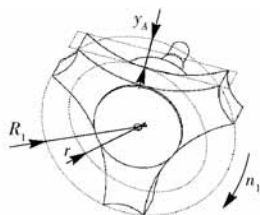


图7 抖动轮结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of shaking wheel

已知抖动轮周长 $l = 0.6$ m, 抖动轮齿数 $Z = 3$, 计算可得抖动频率 $f_1 = 8$ Hz, 抖动轮振幅 $y_A = R_1 - r = 37.5$ mm。如图 7 所示, 抖动轮旋转大径 $R_1 = 100$ mm, 支撑薯土分离筛的最小回转半径 $r = 62.5$ mm, 薯土分离筛的最低线速度 $v_{\min}$ 为

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{gR_1}{1 - K_0}} \quad (9)$$

其中 $K_0 = r/R_1$

式中 g ——重力加速度, 9.8 m/s²

通过计算得 $K_0 = 0.625$, 一般地, K_0 取 0.6 ~ 0.7 时, 可以得到较好的分离效果^[27], 计算得 $v_{\min} = 1.26$ m/s, 由于已经算得薯土分离筛 $v_1 = 1.6$ m/s, 所以均满足马铃薯输送分离要求。

2.3.2 过载保护器

如图 8 所示, 该摩擦式过载保护器主要由驱动

链轮、法兰盘、摩擦片、转动套、预紧弹簧、预紧螺栓构成, 摩擦片、驱动链轮及法兰盘均安装在转动套上, 通过螺栓和预紧弹簧将其压紧在一起, 依靠摩擦阻力传递转矩, 当驱动轴的工作阻力突然增大时, 即分离筛遇到坚硬物体卡死, 此时摩擦阻力小于工作阻力, 仅有驱动链轮和法兰盘转动, 而驱动轴、转动套、薯土分离装置均停止工作, 避免损坏薯土分离装置。此外, 可通过调节压紧螺母调节摩擦阻力, 以适应不同环境的作业。

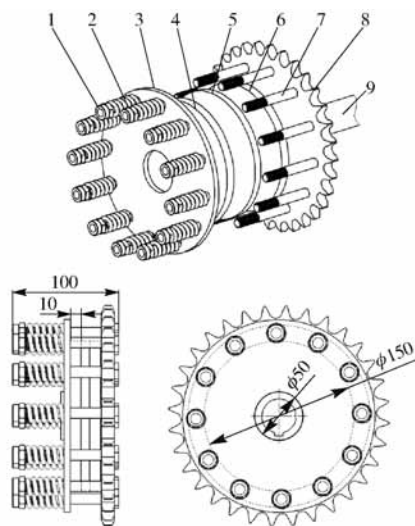


图8 摩擦式过载保护器简图

Fig. 8 Diagram of friction overload protector

1. 压紧螺母 2. 预紧弹簧 3. 法兰盘 4、6. 摩擦片 5. 转动套
 7. 螺栓 8. 驱动链轮 9. 驱动轴

该过载保护器正常工作时有^[23]

$$\begin{cases} T_c = \frac{K_1 T}{K_M K_V} \\ Q = \frac{2T_c}{D_p \mu_1 m} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} T = 9550P/n_0 \\ D_p = (D_1 + D_2)/2 \end{cases} \quad (11)$$

式中 T_c ——设计转矩, N·m
 K_1 ——过载保护器工况系数, 取 1.5
 T ——正常工作所需转矩, N·m
 K_M ——过载保护器接合频率系数, 取 1.00
 K_V ——过载保护器滑动速度系数, 取 1.19
 Q ——压紧力, N
 D_1 ——摩擦盘工作面外径, m
 D_2 ——摩擦盘工作面内径, m
 D_p ——摩擦盘工作面的平均直径, m
 m ——摩擦面对数
 μ_1 ——摩擦因数, 取 0.3
 P ——薯土分离装置的设计功率, 取 3.5 kW

联立式(10)、(11)得到

$$Q=\frac{19\ 100K_1P}{n_0K_MK_VD_p\mu_1m}\quad(12)$$

由于 K_1 、 K_M 、 K_V 、 μ_1 均为定值,机具正常作业时薯土分离装置的功率 P 和驱动轴转速 n_0 基本恒定,因此压紧力 Q 与摩擦盘工作面的平均直径 D_p 、摩擦面对数 m 成反比。此外,考虑到薯土分离筛线速度要求,通过计算传动比,该驱动链轮选择12A-1型号的33齿链轮,为满足安装要求,摩擦盘工作面外径 D_1 最大设计为150 mm,摩擦盘工作面的内径 D_2 设计为50 mm,摩擦面对数 m 设计为4,通过式(12)可得压紧力 Q 为4 589.6 N,因此,该过载保护器的最大工作载荷为4 589.6 N。

2.4 薯膜分离装置

由于地膜上方覆盖土壤,地膜风化程度相对较低,挖掘时地膜比较完整,一定程度上降低了地膜回收难度。在薯土分离筛后方设计一种薯膜分离装置,如图9所示,该装置主要由薯膜分离筛、导向轮、特种链轮、托膜栅条辊、驱动轴、特种链轮等组成,薯膜分离筛由特种链条、包胶杆条、包塑钢丝构成。机组作业时,薯土分离筛输送过来的薯块通过薯膜分离筛上的大筛孔快速分离,剩余膜上的残秧、土壤被薯膜分离筛输送至末端平抛到地面上,地膜则垂直落到残膜回收装置上被收卷起来。

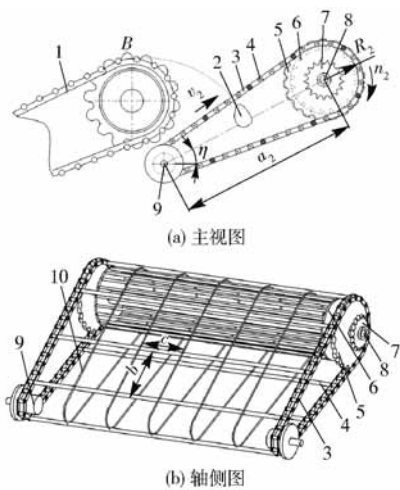


图9 薯膜分离装置结构图

Fig. 9 Structure diagrams of film and potato separation device
1. 薯土分离筛 2. 马铃薯 3. 特种链条 4. 包胶杆条 5. 特种链轮 6. 托膜栅条辊 7. 驱动链轮 8. 驱动轴 9. 导向轮 10. 包塑钢丝

该装置安装于薯土分离筛的后下方,与水平地面的倾角 η 设计为 35° ,导向轮与驱动轮中心距 a_2 设计为500 mm。由于薯膜分离筛的传动链条经常会因夹持土壤脱链,故选择大节距($p_2=38.1$ mm)的2062型特种链条和特种链轮,提高了机构的可靠性,每5个链扣安装一根包胶杆条与包塑钢丝交错

成筛状,其筛眼长度 b 为190.5 mm,宽度 c 为130 mm。为避免下落过程中伤薯,杆条均采用包胶型,以降低伤薯率。驱动轴内侧安装的托膜栅条辊防止地膜缠绕于驱动轴上,影响机构可靠性及残膜回收率。

为了保证地膜在薯膜分离筛上的线速度与薯土分离筛的线速度 v_1 匹配,使地膜完整地通过薯膜分离筛,特种链轮转速尤为重要,已知

$$v_2=\frac{n_2\pi R_2}{30}\quad(13)$$

式中 v_2 ——薯膜分离筛线速度,m/s
 n_2 ——特种链轮转速,r/min
 R_2 ——薯膜分离筛特种链轮分度圆半径,m
联立式(6)、(13)得到

$$n_2=\frac{n_0R_0}{R_2}\quad(14)$$

由此可知,特种链轮转速 n_2 与薯土分离筛驱动轴转速 n_0 及薯土分离筛驱动轮分度圆半径 R_0 成正比,与自身半径 R_2 成反比。

2.5 残膜回收装置

目前,国内已经有很多的残膜回收机具被广泛应用^[28],主要以耙齿型、齿链型、铲链型为主,在技术上依然存在壅土、漏膜、传输地膜性能差等问题^[29-32],并且都以单独作业为主,二次作业费工费时,增加了作业成本。因此,在马铃薯挖掘机上直接设计一种残膜回收装置,如图10所示,该残膜回收装置主要由调节架、固定锥筒、活动锥筒、卷膜轴、卷膜针、定位装置、万向传动轴等组成。

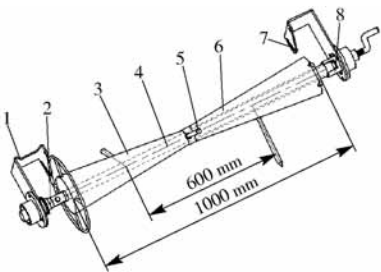


图10 残膜回收装置结构图

Fig. 10 Structure diagram of roll film recovery device
1. 调节架 2. 万向传动轴 3. 固定锥筒 4. 卷膜轴 5. 卷膜针 6. 活动锥筒 7. 调节螺孔 8. 定位装置

工作时,调节架与机架侧板通过螺栓固定,地膜从薯膜分离装置后端溜下,被安装在正下方顺时针旋转的卷膜锥筒不断缠绕,完成残膜回收工作,卷膜锥筒上安装便于拆卸的卷膜针,对残膜起到辅助缠绕工作,调节架可调整适当的接膜位置,以便地膜顺利缠绕,其余残秧抛扔到地面,保证地膜干净回收。当地膜缠绕直径达到卷膜针最大回转直径时,开始人工卸膜。

机具正常作业时,为使得残膜被顺利卷到锥筒上,卷膜针有着向后拉送、辅助缠绕的作用,其轨迹近似于余摆线。如图 11 所示,设卷膜轴旋转中心 O 为坐标系原点, x 轴正向与机具前进方向一致, y 轴正向垂直向上,则卷膜针的运动方程为

$$\begin{cases} x_F = v_0 t + R_3 \cos(\omega_2 t) \\ y_F = R_3 \sin(\omega_2 t) \end{cases} \quad (15)$$

式中 R_3 ——卷膜针端点 F 的转动半径,mm

ω_2 ——卷膜轴旋转角速度,rad/s

t ——时间,s

卷膜针端点的分速度为

$$\begin{cases} v_{Fx} = v_0 - R_3 \omega_2 \sin(\omega_2 t) \\ v_{Fy} = R_3 \omega_2 \cos(\omega_2 t) \end{cases} \quad (16)$$

式中 v_{Fx} ——卷膜针端点 F 的水平分速度,m/s

v_{Fy} ——卷膜针端点 F 的垂直分速度,m/s

因此,卷膜针端点 F 的绝对速度为

$$v_F = \sqrt{v_{Fx}^2 + v_{Fy}^2} \quad (17)$$

$$v_F = \sqrt{v_0^2 - 2v_0 R_3 \omega_2 \sin(\omega_2 t) + R_3^2 \omega_2^2} \quad (18)$$

$$v_F = \frac{n_3 \pi R_3}{30} \quad (19)$$

式中 n_3 ——卷膜轴转速,r/min

通过分析可得,当 $v_F > v_0$ 时,卷膜针端点 F 的轨迹成余摆线,卷膜针有向后拉拽的作用,卷膜质量会更加稳定,并且,卷膜装置的作业效果主要与卷膜针的旋转半径、前进速度以及卷膜轴的转速有关,以此确立试验因素对该装置作进一步优化。多次试验表明,卷膜针旋转半径为 $R_3 = 175$ mm,卷膜轴转速约为 110 r/min,作业前进速度 v_0 为 0.7 ~ 1.5 m/s 时,残膜回收的作业质量相对稳定。

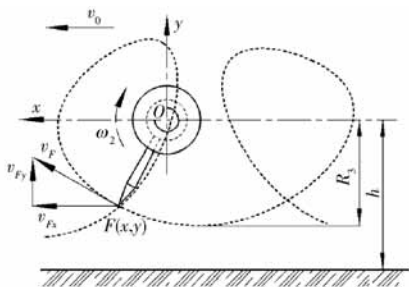


图 11 卷膜针运动轨迹

Fig. 11 Movement track of film roll needle

此外,卷膜轴距离地面的高度 h 也随调节架的变化而变化,范围为 375 ~ 475 mm,由于马铃薯种植垄宽为 900 mm 左右,故残膜回收装置工作幅宽设计为 1 000 mm,总共安装 3 支卷膜针,两端卷膜针之间垂直距离为 600 mm,中间卷膜针安装于固定锥筒和活动锥筒之间,同时也为活动锥筒传递扭矩。经多次试验,最终校正固定锥筒和活动锥筒锥度为

1:5 时,便于人工轻松卸膜。

在残膜回收过程中,尤其在回转缠绕地膜收集装置上,如何快速卸膜是关键环节,直接影响机组的作业效率。如图 12 所示,设计一种锥筒式卸膜装置,主要由活动锥筒、卷膜轴、调节架、轴承套、定位套、T 型螺纹顶尖轴、T 型螺纹套等组成。人工卸膜时,首先拔掉 3 根卷膜针(该卷膜针利用钢珠接杆转换接头原理,可轻易安装,便于拆卸),其次,旋转 T 型螺纹顶尖轴(该 T 型螺纹顶尖轴与卷膜轴之间以车床顶尖机构原理配合),待顶尖轴退出卷膜轴锥孔时,将卷膜轴从定位套槽孔托出,最后,拔出活动锥筒,由于卷膜中心支撑部位被抽空,阻力大大减小,可轻易拆下整卷残膜,卸膜完成后安装好活动锥筒和卷膜针继续作业,整个卸膜工作可由一人轻易完成。

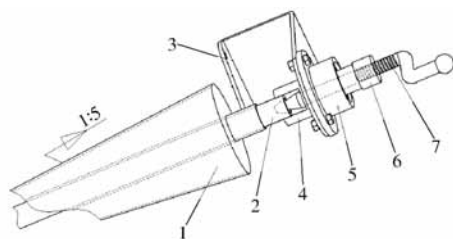


图 12 卸膜装置结构图

Fig. 12 Structure diagram of film unloading device

1. 活动锥筒 2. 卷膜轴 3. 调节架 4. 定位套 5. 轴承套 6. T 型螺纹套 7. T 型螺纹顶尖轴

3 田间试验

3.1 试验条件

2017 年 10 月初在甘肃省兰州市西固区西柳沟街道柴家台村甘肃农业大学机电工程学院马铃薯试验基地进行了田间收获及残膜回收试验。

该试验田分为 4 块梯田,土壤类型为黄绵土,共 0.7 hm² 左右,每块梯田垄长大于 200 m,土壤平均含水率为 12.52%,容重为 1.05 ~ 1.16 g/cm³,坚实度小于 2.8 × 10⁵ Pa,以全膜覆土垄播模式为主,种植品种为新大坪、青薯 9 号、陇薯 7 号。该联合作业机配套动力为东方红 404 型拖拉机,发动机标定功率为(12 h)29.4 kW,田间作业情况如图 13 所示。

3.2 试验方案与方法

试验完成后,根据 NY/T 1130—2006《马铃薯收获机械》和 NY/T 1227—2006《残地膜回收机 作业质量》对残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机性能进行检测,主要测定条铺在地的马铃薯明薯率、破皮率、损伤率和残膜回收的拾净率,同时也考察了仿生挖掘铲、曲柄摇杆防堵机构、两组分离筛以及残膜回收装置的工作情况。



图 13 田间试验

Fig. 13 Field test

随机在试验田里选择 30 m 长的垄带进行试验检测,重复 10 次试验,求出 10 次重复试验测定结果的平均值。明薯率、伤薯率、破皮率算法为^[33]

$$T_o = \frac{W_o}{W} \times 100\% \tag{20}$$

$$T_s = \frac{W_s}{W} \times 100\% \tag{21}$$

$$T_p = \frac{W_p}{W} \times 100\% \tag{22}$$

其中 $W = W_o + W_s + W_p + W_z$ (23)

式中 T_o ——明薯率,% T_s ——伤薯率,%
 T_p ——破皮率,%
 W_o ——明薯质量,kg
 W_s ——伤薯质量,kg
 W_p ——破皮薯质量,kg
 W_z ——埋薯质量,kg
 W ——总薯质量,kg

同样,通过上述试验进行残膜回收率检测,检测方法选取质量法,对每段垄带上回收的残膜清洗干净并去除水分称其质量,计算该联合作业机对残膜的拾净率,其计算公式为^[34]

$$C = \frac{W_m}{W_l} \times 100\% \tag{24}$$

式中 C ——残膜回收拾净率,%
 W_m ——作业后的回收地膜总质量,kg
 W_l ——30 m 长的同等型号新地膜总质量,kg

3.3 试验结果分析

残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机田间试验结果如表 3 所示。

表 3 田间试验结果

Tab. 3 Results of field experiments		%
测定指标	技术标准	测定均值
明薯率	≥96	97.4
伤薯率	≤1.5	1.3
破皮率	≤2	1.8
残膜拾净率	≥75	87.5

由表 3 可知,设计的残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机性能指标均满足国家和行业标准要求,多次试验,该机具各个机构运行均比较稳定,除部分机构部位通过试验调整外,其他无故障发生,可靠性高,并且该机具在挖掘过程中较传统机型更加顺畅,解决了壅堵问题,平均生产率约为 0.17 hm²/h。在残膜回收性能试验中,该机具拾净率高,残地膜回收含杂率低,卸膜过程简单、顺畅,一人可在 2 min 内完成一次人工卸膜,1 hm²约卸膜 30 次,大大提高了机具作业效率。

4 结论

(1)基于西北黄土高原旱区马铃薯地膜全域覆盖、种行覆土栽培模式,设计了残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机。该机一次作业完成排堵挖掘、薯土分离、薯膜分离、集薯铺条、膜秧分离和残膜回收等工序,提高了机具的利用率和机械化作业水平。

(2)对机具关键部件进行了设计与改进,确定了仿生挖掘铲、曲柄摇杆防堵机构、薯土分离装置的结构及工作参数,解决了挖掘过程中壅堵阻塞问题,提高了作业效率,加装过载保护装置提高了机具的可靠性。

(3)对该残膜回收装置进行了创新性设计,先通过薯膜分离装置分离出马铃薯、部分残秧和土壤,再进行卷膜回收,降低了回收地膜的含杂率,并且对卸膜装置进行设计优化,解决了人工卸膜难、拆膜慢的问题,提高了整机作业效率。

(4)田间试验表明,残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机明薯率为 97.4%,伤薯率为 1.3%,破皮率为 1.8%,残膜拾净率为 87.5%,生产率约为 0.17 hm²/h,田间性能试验指标均达到国家和行业标准要求。

参 考 文 献

1 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 casing soil planter in all-in-one machine combined with fertilizing,

- sowing, riding, complete film mulching and planting line covering[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 14–22. (in Chinese)
- 2 石玉章. 黑色地膜覆膜方式对旱地马铃薯的影响[J]. 甘肃农业科技, 2012(7): 41–42.
SHI Yuzhang. Influence of black film mulching on potato in dry land [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2012 (7): 41–42. (in Chinese)
- 3 张立功, 马淑珍. 黄土丘陵区(庄浪)旱作马铃薯全膜覆盖关键技术集成研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 84–92.
ZHANG Ligong, MA Shuzhen. Research on the key technologies of whole plastic-film mulching of potato in loess hilly region (Zhuanglang) [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 84–92. (in Chinese)
- 4 郭占红. 甘肃省马铃薯高产高效栽培技术与机械化技术的研究探索[J]. 农业机械, 2017(12): 84–86.
GUO Zhanhong. Research on high yield and high efficiency cultivation technology and mechanization technology of potato in Gansu province [J]. Farm Machinery, 2017 (12): 84–86. (in Chinese)
- 5 王鑫, 张涛, 李树杰, 等. 黑色全膜覆土马铃薯机械种植增产增效试验研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(6): 89–93.
WANG Xin, ZHANG Tao, LI Shujie, et al. Experimental study on increasing yield and efficiency of mechanical potato planting with whole black film mulching technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 89–93. (in Chinese)
- 6 戴飞, 辛尚龙, 赵武云, 等. 全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 76–83, 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170309&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.009.
DAI Fei, XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of combined potato planting machine for covering soil on top of full film surface [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 76–83, 56. (in Chinese)
- 7 陈强, 韩文贺, 王国红, 等. 春马铃薯膜上覆土技术的应用研究[J]. 农学学报, 2015, 5(1): 1–4.
CHEN Qiang, HAN Wenhe, WANG Guohong, et al. Application research of covering soil over membrane technology of spring potato cultivation [J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(1): 1–4. (in Chinese)
- 8 戴飞, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 64–72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170109&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 64–72. (in Chinese)
- 9 HEMMANT A, TAKI O. Potato losses and mechanical damage by potato diggers in the fereidan region of Isfahan [J]. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 2001, 5(2): 195–209.
- 10 AZIZI P, SAKENIAN DEHKORDI N, FARHADI R. Design, construction and evaluation of potato digger with rotary blade [J]. Cercetari Agronomice in Moldova, 2014, 47(3): 5–13.
- 11 刘剑君, 邓明俐, 贾世通, 等. 马铃薯收获机械现状与发展趋势[J]. 农学学报, 2015, 5(1): 95–99.
LIU Jianjun, DENG Mingli, JIA Shitong, et al. The present situation of potato harvester and its development trends [J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(1): 95–99. (in Chinese)
- 12 史明明, 魏宏安, 刘星, 等. 国内外马铃薯收获机械发展现状[J]. 农机化研究, 2013, 35(10): 213–217.
SHI Mingming, WEI Hongan, LIU Xing, et al. The present situation of potato harvester development at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10): 213–217. (in Chinese)
- 13 史明明, 魏宏安, 胡忠强, 等. 国内外马铃薯收获机械产品现状调查[J]. 农业机械, 2013(7): 100–105.
SHI Mingming, WEI Hongan, HU Zhongqiang, et al. The present situation of potato harvester development at home and abroad [J]. Farm Machinery, 2013(7): 100–105. (in Chinese)
- 14 桑永英. 马铃薯收获现状分析与发展趋势[C]. 中国农业机械学会 2006 年学术年会论文集(上册), 2006.
- 15 杨来胜, 王程, 何培洪, 等. 西北地区马铃薯膜上覆土最佳土层厚度试验[J]. 农学学报, 2016, 6(7): 60–63.
YANG Laisheng, WANG Cheng, HE Peihong, et al. Optimum thickness of covering soil on plastic films of potato cultivation [J]. Journal of Agriculture, 2016, 6(7): 60–63. (in Chinese)
- 16 辛尚龙, 戴飞, 石林榕, 等. 单垄双行马铃薯施肥覆膜播种机工作参数优化[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 282–287.
XIN Shanglong, DAI Fei, SHI Linrong, et al. Optimization of working parameters of potato planter with fertilizer and mulching [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(5): 282–287. (in Chinese)
- 17 孙伟, 刘小龙, 石林榕, 等. 刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 38–45.
SUN Wei, LIU Xiaolong, SHI Linrong, et al. Covering soil on plastic-film characteristics of scraper lifting belt mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 38–45. (in Chinese)
- 18 石林榕, 孙伟, 王蒂, 等. 马铃薯仿生挖掘铲片的设计与仿真[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 268–272.
SHI Linrong, SUN Wei, WANG Di, et al. Design and simulation research on the potato bionic digging shovel [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 268–272. (in Chinese)

- 19 胡宗政,石林榕,赵武云. 仿生铲的减阻碎土机理及仿真研究[J]. 农业机械,2015(17):115-118.
HU Zongzheng,SHI Linrong,ZHAO Wuyun. The mechanism and simulation of the drag reduction and soil breaking of the bionic shovel [J]. Farm Machinery, 2015 (17):115-118. (in Chinese)
- 20 郭良生,黄霓裳. 钢铁常温发黑处理剂的研制[J]. 表面技术,1997(2):13-14,49.
GUO Liangsheng, HUANG Nichang, Researches on the application of hydrogen peroxide to surface technology [J]. Surface Technology,1997(2):13-14,49. (in Chinese)
- 21 王建江. 钢铁材料发黑处理的现状与未来[J]. 材料保护,1994(7):11-13.
WANG Jianjiang. The present situation and future of blackening of steel materials[J]. Materials Protection,1994(7):11-13. (in Chinese)
- 22 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 23 中国有色工程设计研究总院. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- 24 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):17-24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(6):17-24. (in Chinese)
- 25 魏宏安,王蒂,连文香,等. 4UFD-1400 型马铃薯联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2013,29(1):11-17.
WEI Hongan, WANG Di, LIAN Wenxiang, et al. Development of 4UFD-1400 type potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(1):11-17. (in Chinese)
- 26 东南大学机械学学科组. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,1997.
- 27 刘宝,张东兴,李晶. MZPH-820 型单行马铃薯收获机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(5):81-86.
LIU Bao, ZHANG Dongxing, LI Jing. Design on MZPH-820 single-row potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):81-86. (in Chinese)
- 28 谢建华,侯书林,刘英超. 残膜清理回收机具的研究现状及存在的问题[J]. 中国农机化,2012(5):41-44.
XIE Jianhua, HOU Shulin, LIU Yingchao. Research status and trends of plastic film residue collectors[J]. Chinese Agricultural Mechanization,2012(5):41-44. (in Chinese)
- 29 游兆延,顾峰玮,吴峰,等. 垄作花生残膜回收技术研究[J]. 农机化研究,2016,38(1):207-211.
YOU Zhaoyan, GU Fengwei, WU Feng, et al. Research on ridged peanut residue plastic film recycling technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(1):207-211. (in Chinese)
- 30 谢建华,侯书林,付宇,等. 残膜回收机弹齿式拾膜机构运动分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):94-99.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s118&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.018.
XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and experiment on spring-tooth mulching plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):94-99. (in Chinese)
- 31 胡凯,王吉奎,李斌,等. 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(19):24-32.
HU Kai, WANG Jikui, LI Bin, et al. Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(19):24-32. (in Chinese)
- 32 吕钊钦,张磊,张广玲,等. 链条导轨式地膜回收的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):48-54.
LÜ Zhaoqin, ZHANG Lei, ZHANG Guangling, et al. Design and test of chain guide rail-type plastic film collector[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(18):48-54. (in Chinese)
- 33 NY/T 1130—2006 马铃薯收获机械[S]. 2006.
- 34 NY/T 1227—2006 残地膜回收机 作业质量[S]. 2006.