

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.013

# 玉米全膜双垄沟残膜回收机优化设计与试验

王久鑫<sup>1</sup> 赵武云<sup>1</sup> 刘小龙<sup>1</sup> 戴飞<sup>1</sup> 辛尚龙<sup>1</sup> 吴正文<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃武威兴旺农机制造有限公司, 武威 733018)

**摘要:** 针对现有玉米全膜双垄沟残膜回收机作业中存在起膜单体仿形能力差、易堵塞、根茬易被挑起及卸膜难等问题,对机具的起膜装置、卷膜装置及卷膜装置的传动方案进行优化设计。起膜装置由8个仿形起膜单体、滑块、导轨及调压弹簧组成,起膜单体能够随地形上下仿形,解决了根茬被挑起、堵塞及冲击振动问题。卷膜装置由主从动锥型卷膜辊、辅助卷膜齿和联动卸膜转臂组成。其中,卷膜辊应用了摩擦传动恒线速度机理,保证卷膜松紧程度均匀;辅助卷膜齿采用快速插接机构插接在主从动锥型动卷膜辊上,实现残膜高效缠绕;主从动卷膜辊设计为锥型结构,便于脱膜;联动卸膜转臂能够保证主从动锥型卷膜辊近似直线分开,使卸膜较为便捷。通过分析偏心伸缩弹齿的运动,确定了弹齿周向分布4个。以残膜回收率、缠膜率和含杂率为评价指标,采用正交试验得出样机最优工作参数为:前进速度3 km/h、偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速60 r/min、卷膜辊转速90 r/min。以最优工作参数进行了田间试验验证,结果表明,作业机残膜回收率为89.46%,缠膜率为1.93%,含杂率为25.53%,满足全膜双垄沟残膜回收技术要求。

**关键词:** 旱区; 玉米全膜双垄沟; 残膜回收机; 优化设计

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)01-0119-10

OSID:



## Improved Design and Experiment of Collector for Corn Whole Plastic Film Mulching on Double Ridges

WANG Jiuxin<sup>1</sup> ZHAO Wuyun<sup>1</sup> LIU Xiaolong<sup>1</sup> DAI Fei<sup>1</sup> XIN Shanglong<sup>1</sup> WU Zhengwen<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Wuwei Xingwang Machinery Manufacturing Co., Ltd., Wuwei 733018, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of poor profiling effect, easy congestion, stubble lifting, and unsatisfactory film unloading performance of the existing collector machine for corn whole plastic film mulching on double ridges, the improved design of film lifting, film rolling device and the transmission scheme of the machine were carried out. The film lifting device consisted of eight profiling film lifting monomers, slider, guide rail and pressure regulating spring, which can be profiled up and down with the terrain, and solved the problems of stubble lifting, congestion and impact vibration. The film rolling device was composed of main and subordinate moving cone-shaped film rolling roller, the auxiliary film rolling teeth and the linkage film unloading rotating arm. Among them, the film rolling roller was applied as the constant linear speed mechanism of friction transmission to ensure the uniform tightness of the film rolling. The auxiliary film rolling teeth were inserted on the main and subordinate moving film rolling roller by the fast insertion mechanism to realize the efficient winding of the residual film. The main and subordinate moving film rolling roller was designed as the cone-shaped structure to facilitate film unloading. The linkage film unloading rotating arm can ensure that the main and secondary cone-shaped roll were separated approximately in a straight line, which made the film unloading easier and faster. By analyzing the movement of eccentric telescopic elastic teeth, it was determined that the number of circumferential distribution of elastic teeth was 4. Taking the orthogonal test as the optimization design method, the recovery rate, winding rate and impurity content rate of the residual film as the evaluation

收稿日期: 2020-04-01 修回日期: 2020-10-11

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503105)、国家自然科学基金项目(52065005、51775115)和甘肃农业大学盛彤笙创新基金项目(GSAU-STC-2018-27)

作者简介: 王久鑫(1989—),男,讲师,博士生,主要从事农业机械化工技术与装备研究,E-mail: wjx@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

index, the optimal working parameters of the prototype were obtained by using the comprehensive balance method, which was the forward speed of 3 km/h, the rotation speed of the eccentric retractable elastic tooth take-up drum was 60 r/min, and the rotation speed of the film roll was 90 r/min. The field test was carried out with the optimal working parameters. The test results showed that the recovery rate of the residual film of the machine was 89.46%, the wrapping rate was 1.93%, and the impurity rate was 25.53%. The result met the technical requirements of the collector for corn whole plastic film mulching on double ridges and can provide a reference for the design of the residual film recovery machine.

**Key words:** arid regions; corn whole plastic film mulching on double ridges; plastic film residue recovery machine; optimal design

## 0 引言

玉米全膜双垄沟播技术是甘肃省推广的一项新型抗旱耕作技术,该技术集覆盖抑蒸、垄沟集雨、垄沟种植技术于一体,实现了保墒蓄墒、就地入渗、雨水富集叠加、保水保肥,增加了地表温度,提高了肥水利用率<sup>[1]</sup>。因此地膜覆盖栽培技术在中国北方干旱地区玉米、马铃薯等作物种植中得到广泛应用。但是,随着地膜使用量逐年增加及应用面积不断扩大,作物成熟收获后,大量未及时回收的地膜遗留在田间,不仅造成田间土壤污染和环境污染<sup>[2-3]</sup>,同时还影响秋后整地作业及来年顶凌覆膜工作的进行<sup>[4-7]</sup>。人工回收和机械回收是玉米全膜双垄沟残膜回收的两种主要方式。人工回收劳动强度大、效率低,因此机械回收是解决残膜污染的有效手段。近年来,国内许多学者研制了各种残膜回收机<sup>[8-12]</sup>,取得了显著进展。戴飞等<sup>[13]</sup>设计了一种由弧形起膜铲铲起膜土混合物、并通过偏心伸缩弹齿挑膜和收膜的残膜回收机,但是起膜和卷膜效果不理想,卸膜较复杂。由佳翰等<sup>[14]</sup>设计了一种铲齿组合式残膜捡拾机,该机结构简单,但是根茬易被挑起,起膜铲处易堵塞。顾满等<sup>[15]</sup>设计了一种网链式残膜回收机,该机膜土分离效果较好,但是根茬易被挑起,残膜含杂率较高。由于受限于玉米全膜双垄沟种植的特殊农艺技术要求<sup>[16]</sup>,目前市场上已有的残膜回收机不能很好地适应残膜回收作业要求,其主要原因是起膜装置仿形能力差。市场上残膜回收机的起膜装置包括整体仿形和单体仿形,单体仿形的残膜回收机比整体仿形的起膜和搂膜效果好,但也存在一定的局限性<sup>[17-19]</sup>。本课题组前期研发的具有凸轮驱动仿形功能的玉米全膜双垄沟残膜回收机能较好地完成残膜回收作业,通过试验确定了最佳工作参数<sup>[20]</sup>,试验发现:残膜回收机对实际田间环境的适应性较差,在工作工程中出现凸轮驱动仿形起膜铲产生冲击噪声、起膜单体撕扯地膜和从动卷膜辊时转时停等问题。

针对上述问题,并结合田间实际作业情况,本文在分析玉米全膜双垄沟膜-茬分布特性和机械化残膜回收的基础上<sup>[21-22]</sup>,采用偏心伸缩弹齿挑膜滚筒与具有自动仿形功能的起膜齿相配合完成起膜和输膜作业,而卷膜装置采用具有相同锥度的主从动卷膜辊,同时设置具有仿形功能的切膜圆盘装置,将整个幅宽的地膜在小垄垄沟位置进行切分,以便利用偏心伸缩弹齿挑膜滚筒和起膜齿完成起膜、搂膜和输膜的作业过程,从而提高残膜捡拾率。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

图1为玉米全膜双垄沟残膜回收机结构图,主要由机架、切膜圆盘、悬挂架、起膜装置、偏心伸缩弹齿挑膜滚筒、导膜板、残膜回收装置及地轮等组成。其中,起膜装置主要由起膜齿、滑块、导轨及调压弹

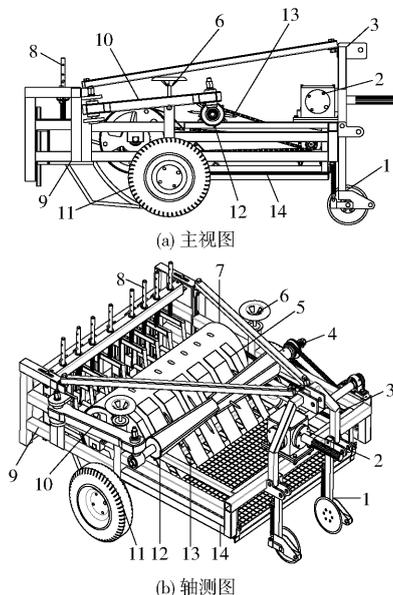


图1 玉米全膜双垄沟残膜回收机结构图

Fig. 1 Structure diagrams of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges

1. 切膜圆盘 2. 变速箱 3. 悬挂架 4. 摩擦盘 5. 导膜板 6. 地轮升降装置 7. 偏心伸缩弹齿挑膜滚筒 8. 起膜装置 9. 机架
10. 联动卸膜转臂 11. 地轮 12. 卷膜辊 13. 辅助卷膜齿 14. 集膜箱

簧等组成,卷膜装置由锥型卷膜辊、辅助卷膜齿、联动卸膜转臂和集膜箱组成。作业机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 作业机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of operation machine

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 640×1 460×730
配套动力/kW	23.2~29.4
整机质量/kg	280
作业速度/(km·h <sup>-1</sup> )	2.0~4.0
生产率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.25~0.50
工作幅宽/mm	1 200
作业深度/mm	0~50

## 1.2 工作原理

机具前进作业时,地轮横跨在左、右大垄垄体中间覆土带上,首先仿形切膜圆盘将宽度为 1.2 m 的地膜在小垄垄沟位置切成 3 条,地膜被单体仿形的起膜齿铲起并沿其弧形部位向上运动。此时,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒中伸缩弹齿转动伸出将地膜挑起并运送到滚筒上方,当伸缩弹齿完全缩进滚筒时,地膜借助惯性力,在导膜板导向作用下进入集膜箱,残膜中夹杂的部分茎叶、土块从导膜板缝隙中漏下,主从动卷膜辊在摩擦圆盘摩擦力驱动下近似横线速度旋转,将整块地膜在辅助卷膜齿作用下缠绕起来,地膜碎片、土壤和秸秆等进入集膜箱,土壤通过集膜箱下盖网孔漏下,进一步完成膜土分离与残膜回收作业。残膜回收过程中,仿形切膜圆盘在小垄垄沟处将整个幅宽的地膜切成 3 条,作用是当起膜齿铲起地膜时,防止小垄垄沟膜面上板结的土壤将地膜撕扯碎,难于回收。仿形起膜齿在土壤反作用力、起膜齿重力和弹簧弹力共同作用下上下浮动,有效避开玉米根茬、石块及较大土块等障碍物。当卷膜辊上缠满一定数量地膜时,人工转动联动卸膜转臂,主从动锥型卷膜辊近似直线分离,缠绕在主从动锥型卷膜辊上的地膜沿着锥面顺利卸下,当集膜箱装满碎膜时,在田间地头提升起机具,打开集膜箱下盖,卸下碎膜。

## 2 关键部件设计与参数确定

### 2.1 传动比计算

玉米全膜双垄沟残膜回收机的动力传动原理如图 2,作业时与拖拉机采用后三点悬挂方式联接,通过调节仿形起膜单体上的弹簧预压缩量,改变起膜齿的入土深度。拖拉机动力通过动力输入轴传递给输出轴,输出轴通过链传动将动力传递至中间轴,中间轴通过链传动带动偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转动,

并通过链传动带动主动摩擦盘转动,主动摩擦盘依靠摩擦力将动力传递给从动摩擦盘,从动摩擦盘转动带动主从动卷膜辊转动,完成挑膜和卷膜作业过程。

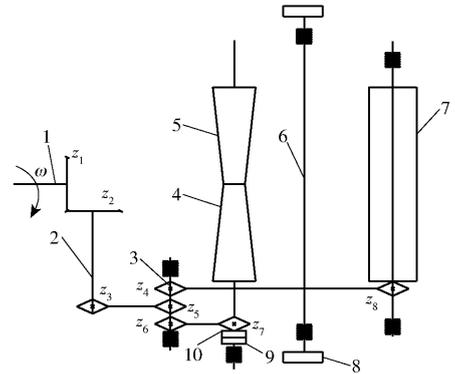


图 2 作业机系统传动原理图

Fig. 2 Schematic of transmission system

1. 动力输入轴
2. 动力输出轴
3. 中间轴
4. 主动卷膜辊
5. 从动卷膜辊
6. 地轮轴
7. 偏心伸缩弹齿挑膜滚筒
8. 地轮
9. 从动摩擦盘
10. 主动摩擦盘

在整个传动系统中,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒和锥型卷膜辊由拖拉机输出轴控制其转速和动力切断,锥型卷膜辊依靠摩擦传动原理实现恒线速度转动,作业机前进过程中,为了很好完成捡膜作业任务,拖拉机行走速度必须与其输出轴的转速相匹配。

由试验确定其传动比为:  $\frac{z_2}{z_1} = \frac{32}{16}$ ,  $\frac{z_5}{z_3} = \frac{28}{13}$ ,  $\frac{z_8}{z_4} =$

$\frac{28}{13}$ ,  $\frac{z_7}{z_6} = \frac{18}{13}$ , 则偏心伸缩弹齿挑膜滚筒和卷膜辊的

传动比分别为:  $i_1 = \frac{z_2 z_5 z_8}{z_1 z_3 z_4}$ ,  $i_2 = \frac{z_2 z_5 z_7}{z_1 z_3 z_6}$ 。当拖拉机

匀速前进时,动力输出轴的转速为 540 r/min,则偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速为 58.2 r/min,卷膜辊的转速为 90.5 r/min。

### 2.2 起膜与挑膜装置设计

课题组前期设计的凸轮驱动型单体仿形起膜齿虽能很好地实现仿形功能和解决壅土现象,但在运动过程中凸轮机构和起膜齿之间存在刚性冲击、噪声大,各个仿形起膜齿单体相互错开运动,将地表上铲起的地膜撕扯碎,不利于后期输膜和卷膜作业。为了更好地实现“先拢膜,后收膜”的玉米全膜双垄沟机械化残膜回收要求<sup>[23-25]</sup>,本文设计了一种单体仿形起膜齿(结构参数如图 3a 所示)。

作业机的起膜装置主要由弧形起膜齿、调压弹簧、入土深度调节杆、直线导轨、滚珠滑块和仿形杆组成。起膜装置的直线导轨安装在作业机机架架上,起膜单体与两个滚珠滑块采用螺栓连接,滚珠滑块沿着直线导轨上下移动,入土深度调节杆

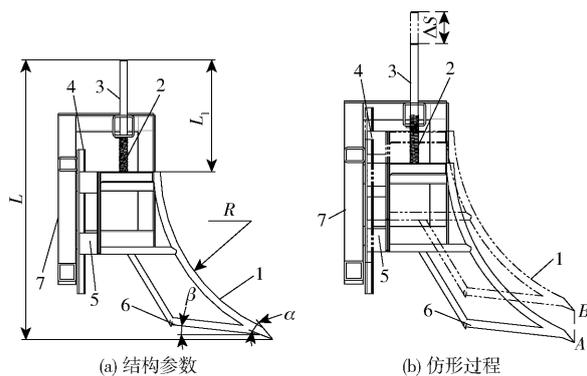


图3 起膜装置结构与原理图

Fig.3 Structure and principle diagrams of film lifting device

1. 弧形起膜齿
2. 调压弹簧
3. 入土深度调节杆
4. 直线导轨
5. 滚珠滑块
6. 仿形杆
7. 机架

穿过机架上方调节横杆圆孔,仿形入土过程如图3b所示。作业机前进时,为了便于起膜单体入土,起膜单体与地面之间的夹角 $\beta$ 取 $3^\circ \sim 10^\circ$ ,本文中取 $7^\circ$ ,起膜单体在土壤反作用力、弹簧力和自身重力共同作用下进入玉米全膜双垄沟的大小垄体中,通过入土深度调节杆来调节起膜单体入土深度( $0 \sim 50$  mm)。作业过程中遇到玉米根茬、石块等杂物阻碍作用时,起膜单体在仿形杆仿形作用下,起膜单体克服调压弹簧弹力的作用沿着直线导轨由A点运动到B点,此时相邻起膜单体之间的空间变大,阻碍物通过相邻起膜单体之间的间隙增大,避免玉米根茬、石块等阻碍物在起膜单体处滞留和拥堵,越过阻碍物后起膜单体在弹簧力和自身重力的作用下自行复位。

起膜单体是残膜回收机的关键部件,起膜单体的数量及安装位置是关键因素。根据玉米全膜双垄沟种植的农艺要求,所用地膜宽度为1200 mm,综合考虑起膜齿起膜压茬和通过性,首先取7个起膜单体,按照方案1布置在后方机架上(如图4a所示),即起膜单体1和2完成玉米全膜双垄沟右侧大垄上起膜作业;同理起膜单体6和7完成玉米全膜双沟左侧大垄上起膜作业;起膜单体4完成玉米全膜双垄沟小垄上起膜作业;起膜单体3和5完成小垄垄沟的起膜作业。田间试验发现,当机具前进时,起膜单体3和5恰好处在小垄垄沟里,由于玉米刚收获完,小垄垄沟里的玉米根茬还没有腐烂,起膜单体3和5易将玉米根茬挑起,堵塞在相邻两起膜单体之间,导致偏心伸缩弹齿挑膜滚筒的弹齿不能顺利通过,将地膜撕碎,挑膜作业过程不顺畅。小垄垄沟膜面上板结的土壤和根茬共同制约作用,起膜单体4不能较好完成小垄垄面上地膜的起膜,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒不能挑起地膜,影响地膜的捡拾率,起膜单体1、2、6和7能较好地完成左右大垄垄面上地膜

的起膜作业。课题组根据试验过程发现的问题对起膜单体的数量和布置方式重新改进,选取8个起膜单体,按照方案2布置在后方机架上(如图4b所示),起膜单体4和5之间距离为150 mm,布置在小垄垄面上,起膜单体3和6向左右大垄均匀靠近,避免正对小垄垄沟,起膜单体1、2、7和8均匀布置在左右大垄垄面上。田间试验发现方案2符合玉米全膜双垄沟残膜回收的设计要求。

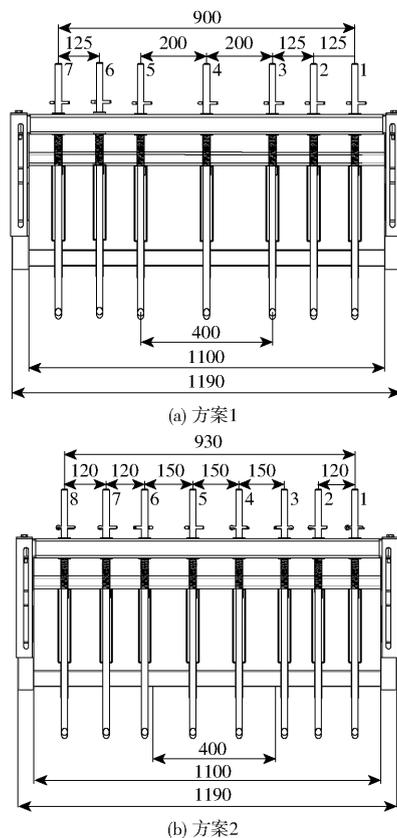


图4 起膜单体布置方案

Fig.4 Assumption diagrams of single spring tooth distribution

### 2.2.1 伸缩弹齿数目确定

偏心伸缩弹齿在作业过程中将地膜扎起,随着滚筒旋转,弹齿向内缩进,将扎起的地膜输送到卷膜装置,其捡拾过程分为3个阶段:前期扎膜、中期挑膜和后期脱膜。首先滚筒转速是个重要参数,滚筒转速较低时,在前期扎膜过程中,伸缩弹齿无法将地膜扎起,在挑膜过程中不能将地膜挑起,在脱膜过程中不易脱膜。滚筒转速较高时,伸缩弹齿将地膜拉扯撕裂,不利于扎膜和挑膜,严重影响残膜捡拾机的作业性能。其次偏心伸缩弹齿圆周方向分布数目也影响偏心伸缩弹齿扎膜挑膜脱膜的连续性,该作业机捡拾地表以下50 mm范围内的地膜,为了保证作业机捡拾的连续性、减少漏捡现象、提高作业效率,通过理论推导发现偏心伸缩弹齿的圆周方向分布数目与偏心伸缩弹齿长度、弹齿入土深度、滚筒转速等满足数学关系式<sup>[26]</sup>

$$\frac{\sqrt{h(2R-h)}}{\pi z^2 - z\phi_1} = \frac{v_m}{z\omega} \quad (1)$$

式中  $R$ ——偏心伸缩弹齿长度, m  
 $h$ ——偏心伸缩弹齿入土深度, m  
 $z$ ——偏心伸缩弹齿在圆周方向个数, 个  
 $\omega$ ——偏心滚筒旋转角速度, rad/s  
 $v_m$ ——作业机前进速度, km/h  
 $\phi_1$ ——偏心轴初始相位角, ( $^\circ$ )

以试验样机为例, 根据滚筒的结构参数和运动参数, 取  $R = 0.2$  m,  $h = 0.05$  m,  $\omega = 6$  rad/s,  $v_m = 3$  km/h,  $\phi_1 = 45^\circ$ , 经计算综合考虑取  $z = 4$ , 即偏心伸缩弹齿圆周方向分布个数为 4 个。

### 2.2.2 偏心伸缩弹齿运动分析

偏心伸缩弹齿运动是作业机前进运动和伸缩弹齿绕滚筒与偏心轴回转运动的复合运动, 滚筒的旋转方向与机具前进方向相反。如图 5 所示, 在直角坐标系  $xOy$  中, 滚筒的半径为  $r$ , 伸缩弹齿  $O_1A_2B_2$  长度为  $L$ , 曲柄  $OO_1$  长度为  $e$ , 即滚筒回转中心与伸缩弹齿回转中心的偏距, 曲柄的初始位置与铅垂方向的夹角为  $\theta_1$ , 假设经过时间  $t$ , 伸缩弹齿从铅垂位置转到  $O_1A_2B_2$  位置, 此时伸缩弹齿与滚筒的交点为  $A_2$ , 这个时间段滚筒转过的角度为  $\omega t$ 。偏心伸缩弹齿  $A$  点和  $B$  点的运动方程分别为<sup>[27]</sup>

$$\begin{cases} x_A = v_m t - r \sin(\omega t) \\ y_A = -r \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_B = v_m t - e \sin\theta_1 - L \sin\theta \\ y_B = -e \cos\theta_1 - L \cos\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\theta$ ——偏心伸缩弹齿经过时间  $t$  转过的角位移  
 由图 5 可知

$$\theta = \theta_1 + \arcsin \frac{\sin(\omega t - \theta_1)}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos(\omega t - \theta_1)}} \quad (4)$$

其中  $\varepsilon = e/r$

设  $r = 0.2$  m,  $e = 0.06$  m,  $L = 0.2$  m,  $\theta_1 = 45^\circ$ ,  $\omega = 6$  rad/s,  $v_A = \omega r$ ,  $\lambda = v_A/v_m$ 。将上述数据输入运动仿真软件 ADAMS 中, 可以求出不同  $\lambda$  值时相应

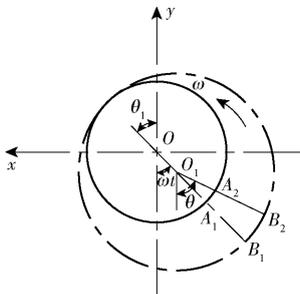


图 5 偏心伸缩弹齿运动参数示意图

Fig. 5 Movement parameters schematic of eccentric telescopic elastic teeth

的滚筒伸缩孔  $A$  和伸缩弹齿  $B$  点运动轨迹, 对运动轨迹进行分析可知, 当曲柄初始位置与铅垂方向的夹角为  $45^\circ$  时, 伸缩弹齿的末端  $B$  点入土过程平缓, 出土过程迅速, 这有利于扎膜挑膜。当  $\lambda$  增大时, 有利于扎膜挑膜, 不存在漏捡现象, 但是  $\lambda$  不能太大, 即  $v_A$  不能太大, 因  $v_A = \omega r$ , 当  $r$  过大时, 滚筒占据空间体积较大, 挑送行程较长, 容易漏捡; 当  $\omega$  较大时, 会导致伸缩弹齿将地膜撕扯碎, 不宜扎膜挑膜;  $v_m$  不能太小, 否则将会影响作业效率。综合考虑, 当  $\lambda$  为  $1.2 \sim 1.6$ ,  $\omega = 6$  rad/s 时,  $v_m$  为  $2.7 \sim 3.0$  km/h, 偏心伸缩弹齿圆周方向分布数目为 4 个时, 作业效果较佳。

### 2.3 卷膜装置设计

卷膜装置位于残膜回收机前端, 主要由主动锥型卷膜辊、从动锥型卷膜辊、辅助卷膜齿、联动卸膜旋转臂、主从动摩擦圆盘等部件组成, 如图 6 所示<sup>[28]</sup>。其中主从动锥型卷膜辊 (长度均为 500 mm, 大端直径均为 120 mm, 小端直径均为 80 mm, 半锥角均为  $2.29^\circ$ ) 上安装快速插接的辅助卷膜齿, 实现主从动锥型卷膜辊顺利卷膜, 保证回收率。主从动锥型卷膜辊上均布 4 根脱膜条, 目的是作业过程中, 当缠绕在卷膜辊上的地膜表面含有水时, 减小地膜与卷膜辊之间的表面张力, 易于脱膜。

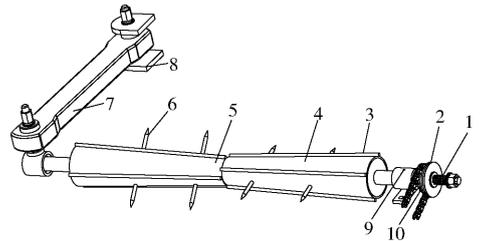


图 6 残膜卷膜装置结构示意图

Fig. 6 Structure schematic of residual film rolling device

1. 压缩弹簧 2. 主从动摩擦圆盘 3. 脱膜条 4. 主动锥型卷膜辊 5. 从动锥型卷膜辊 6. 辅助卷膜齿 7. 联动卸膜旋转臂 8. 联动卸膜旋转臂支架 9. 轴承座 10. 链轮

主动锥型卷膜辊通过轴承座安装在机架上, 其轴上有空转的主动摩擦圆盘构件, 主动摩擦圆盘构件由链轮和圆型摩擦圆盘零件组成, 从动摩擦圆盘以型面接方式与主动卷膜辊轴联接, 在压缩弹簧力的作用下, 主动摩擦圆盘依靠摩擦力将运动和动力传递给从动摩擦圆盘, 从而带动主动卷膜辊和从动卷膜辊旋转 (主动卷膜辊和从动卷膜辊通过六方杆联接传动), 实现了卷膜辊恒线速度旋转, 避免卷膜时随着卷膜半径不断增大导致卷膜辊线速度增大, 而导致地膜被拉紧撕断现象发生。摩擦圆盘恒线速度调节机理如图 7 所示<sup>[29]</sup>, 卷膜辊未卷膜时半径为  $r$ , 卷膜辊卷膜后半径为  $R$ , 以线速度  $v$  运转, 则卷膜辊的转速  $n$  为

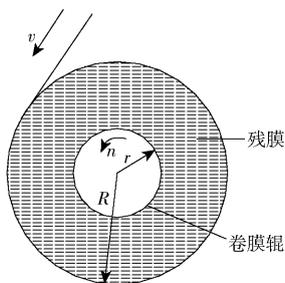


图7 卷膜辊模型

Fig. 7 Roll model

$$n = v / (2\pi R) = \omega / (2\pi) \quad (5)$$

随着收卷地膜层数不断增加,卷膜辊的卷径  $R$  不断增加,为了保证线速度不变,必然要降低转速  $n$ ,对于锥型卷膜辊构件,转矩为

$$M = J\alpha \quad (6)$$

其中  $J = m(t)R^2(t) \quad (7)$

$$\alpha = -\frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

由式(6)~(8)得

$$\omega = \int \frac{M}{m(t)R^2(t)} dt \quad (9)$$

式中  $J$ ——卷膜辊转动惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

$\alpha$ ——卷膜辊角加速度,  $\text{rad}/\text{s}^2$

$m(t)$ ——卷膜辊及地膜质量,  $\text{kg}$

由式(9)可知,随着卷膜半径的增大及地膜质量的增加,摩擦传动实现作用在卷膜辊上的扭矩为定值,使得卷膜辊的角速度不断降低,实现卷膜辊恒线速度卷膜,防止地膜被拉紧撕断。

从动卷膜辊与联动卸膜转臂以转动副联接在一起,通过转臂支架固接在机架上,当主动卷膜辊转动时带动从动卷膜辊转动,实现卷膜。当卷膜辊上缠有一定数量地膜时,在田间地头停车,拔下辅助卷膜齿,转动联动卸膜转臂,从动卷膜辊与主动卷膜辊沿轴线近似直线移开一定距离,完成锥型卷膜辊卸膜,同时打开集膜箱,将碎片地膜、秸秆和少量土块卸下,如图8所示。



图8 锥型卷膜辊作业过程

Fig. 8 Operation process of cone-shaped film rolling roller

### 3 田间试验

#### 3.1 试验条件

2019年10月,在甘肃省定西市安定区鲁家沟

镇进行玉米全膜双垄沟残膜回收机作业性能田间试验,如图9所示。试验地面积为  $200\text{ m} \times 100\text{ m}$ ,土壤为黄绵土,含水率为  $13.2\%$ ,相对湿度为  $45\%$ ,坚实度为  $750\text{ kPa}$ ,玉米种植模式采用全膜双垄沟农艺模式,双垄底宽  $1\ 100\text{ mm}$ ,小垄宽  $400\text{ mm}$ ,行距为  $400\text{ mm}$ ,株距为  $280\text{ mm}$ ,地表有少量的秸秆,小垄垄沟里分布一定数量的玉米根茬,留茬高度为  $10\sim 15\text{ cm}$ ,大小垄体上覆盖的地膜均为甘肃省政府规定采购的标准白色地膜,厚度为  $0.01\text{ mm}$ ,宽度为  $1\ 200\text{ mm}$ ,小垄垄沟和大垄覆土带处有板结的土块。选用动力为东方红 MF404 型拖拉机,标定功率为  $29.4\text{ kW}$ ,拖拉机驾驶员熟练掌握残膜回收机的使用技术规范。



图9 残膜回收机作业性能田间试验

Fig. 9 Field test on recovery performance of residual film

#### 3.2 样机评价指标

样机评价指标依据 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》规定确定,选取土壤含水率基本相同的试验地作为测试区,每次测试区域长度为  $100\text{ m}$ 。每次试验结束后将锥型卷膜辊上的残地膜卸下,分离残地膜与杂质,用电子秤分别测出残地膜和杂质的质量,计算出残膜回收率、缠膜率及含杂率作为样机的评价指标,试验结果取 10 次测定指标的平均值,计算方法为<sup>[30-33]</sup>

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{m_2}{m_2 + m_3} \times 100\% \\ Y_3 = \frac{m_0}{m_0 + m_3} \times 100\% \end{cases} \quad (10)$$

式中  $Y_1$ ——残膜回收率, %

$Y_2$ ——缠膜率, %

$Y_3$ ——含杂率, %

$m_0$ ——试验区回收到卷膜辊上残地膜中杂质质量, g

$m_1$ ——试验区未回收的残地膜质量, g

$m_2$ ——试验区缠绕在作业机上残地膜质量, g

$m_3$ ——试验区缠绕在主从动锥型卷膜辊上的残地膜质量, g

### 3.3 正交试验设计

为了避免残膜回收机作业过程中撕膜、壅膜等现象的发生,提高残膜回收率,降低缠膜率和含杂率,通过更换偏心伸缩弹齿挑膜滚筒和卷膜滚筒主轴上的链轮来改变传动比,实现作业机前进速度与偏心伸缩弹齿挑膜滚筒及卷膜滚筒转速的匹配,将作业机前进速度设置为 2~4 km/h,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速设置为 50~70 r/min,卷膜辊转速设置为 80~100 r/min,为了减少样机在大田试验的次数,采用三因素三水平正交试验,试验因素与水平如表 2 所示。

表 2 试验因素与水平  
Tab.2 Test factors and levels

水平	因素		
	前进速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	偏心伸缩弹齿挑膜 滚筒转速/(r·min <sup>-1</sup> )	卷膜辊转速/ (r·min <sup>-1</sup> )
1	2	50	80
2	3	60	90
3	4	70	100

### 3.4 试验结果与分析

通过正交试验探讨作业机在不同作业参数配合下残膜回收效果,寻找到最优工作参数,即保证残膜回收率较高前提下,将缠膜率和含杂率降到最低,正交试验设计和结果如表 3 所示(A、B、C 为因素水平值),对正交试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。由正交试验结果及方差分析可知,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速对残膜回收率的影响显著,作业机前进速度对残膜回收率的影响中等,卷膜辊转速对残膜回收率的影响很小,表明偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速较低时,不能将起膜齿铲起的地膜及时挑起,造成地膜在起膜齿处壅堵,当偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速较高时,伸缩弹齿将地膜撕扯碎,导致残膜回收率降低,即当偏心伸缩弹齿转速为 60 r/min 时,残膜回收率较高。作业机前进速度对缠膜率的影响显著,卷膜辊转速对缠膜率的影响中等,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速对缠膜率影响较小,表明当作业机前进速度较小和较大时,小垄垄沟处玉米根茬被挑起,造成缠膜率升高,即当作业机前进速度为 2 km/h,缠膜率较低。作业机前进速度对含杂率的影响显著,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速对含杂率的影响中等,卷膜辊转速对含杂率的影响较小,表明作业机前进速度较小时,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒和卷膜辊转速较高时,杂质与地膜分离较充分,含杂率较低。由于试验指标含有多个,所以采用综合平衡法分析,每组试

验重复 3 次求平均值,从表 3 试验结果和表 4 方差分析进行综合评价可知,当卷膜辊旋转速度较高时,卷膜辊上残膜缠绕较紧,不便于卸膜,卷膜辊转速对缠膜率和含杂率的影响小于前进速度和偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速,作业机前进速度较慢时影响作业效率,因此为了保证作业的效率及容易卸膜,综合考虑选取最优方案为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>。即样机的前进速度为 3 km/h,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速为 60 r/min,卷膜辊转速为 90 r/min。

表 3 正交试验方案与结果

Tab.3 Orthogonal test scheme and result

试验号	因素			残膜回 收率/%	缠膜 率/%	含杂率/ %
	A	B	C			
1	1	1	1	84.56	2.43	24.56
2	1	2	2	90.46	2.12	21.78
3	1	3	3	87.14	1.83	19.25
4	2	1	2	83.52	2.04	27.56
5	2	2	3	93.56	1.96	25.89
6	2	3	1	89.12	2.11	24.35
7	3	1	3	83.56	2.97	29.75
8	3	2	1	91.78	3.25	31.23
9	3	3	2	86.25	3.08	30.15
$k_1$	87.387	83.880	88.487			
$k_2$	88.733	91.933	86.743			
回收率	$k_3$	87.197	87.503	88.087		
	R	1.536	8.053	1.744		
	S	4.208	92.607	5.001		
$k_1$	2.127	2.480	2.597			
$k_2$	2.037	2.443	2.413			
缠膜率	$k_3$	3.100	2.340	2.253		
	R	1.063	0.140	0.344		
	S	2.086	0.032	0.226		
$k_1$	21.863	27.290	26.713			
$k_2$	25.983	26.300	26.487			
含杂率	$k_3$	30.377	24.583	24.963		
	R	8.514	2.707	1.750		
	S	108.785	11.253	5.461		

### 3.5 田间试验验证与分析

正交试验所得到的最优工作参数与 2.1 节理论推导的机械传动部件速度非常接近,即作业机前进速度为 3 km/h,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速为 60 r/min,卷膜辊转速为 90 r/min。按照 3.2 节中的试验方法进行田间试验验证。田间试验结果与 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》标准对比如表 5 所示。

从表 5 可知,当拖拉机匀速前进速度为 3 km/h,玉米全膜双垄沟残膜回收机残膜回收率为 89.46%,缠膜率为 1.93%,含杂率为 25.53%,试验各项指标都满足残膜回收机的技术要求。试验过程

表4 方差分析  
Tab.4 Variance analysis

方差来源	残膜回收率						缠膜率						含杂率					
	平方和	自由度	均方	F	F <sub>α</sub>	P	平方和	自由度	均方	F	F <sub>α</sub>	P	平方和	自由度	均方	F	F <sub>α</sub>	P
A	4.208	2	2.104	7.746	99.01	0.05	2.086	2	1.043	77.259	99.01	0.01	108.785	2	54.383	29.227	99.01	0.01
B	92.607	2	46.304	16.413	19	0.01	0.032	2	0.016	1.185	19	0.05	11.253	2	5.627	3.023	19	0.05
C	5.001	2	2.501	0.886	9	0.10	0.226	2	0.113	8.370	9	0.10	5.461	2	2.731	1.647	9	0.10
e	5.642	2	2.821		4		0.027	2	0.014		4		3.722	2	1.861		4	
总和	107.458	8					2.371	8					129.221	8				

表5 整机性能试验结果

Tab.5 Result of machine performance %

参数	试验值	技术标准值
残膜回收率	89.46	≥80
缠膜率	1.93	≤2
含杂率	25.53	≤30

中样机运行平稳,随着拖拉机匀速前进,起膜齿能自动仿形,完成起膜作业任务,拖拉机前进速度较慢时,起膜齿挑起玉米根茬,堵塞在起膜单体之间,从而导致缠膜率和含杂率升高,当偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速较低时,不能将起膜单体拢起的残膜及时伸缩捡拾,造成残膜在起膜区域堆积,导致残膜回收率降低,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速较高时,伸缩弹齿将地膜撕扯打碎,使地膜不易被挑起,导致残膜回收率下降。当前进速度和偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速匹配合适,卷膜辊速度中等时,可以避免作业过程中根茬对残膜回收的影响,卸膜比较快捷顺畅,试验效果满足设计和农艺要求。

## 4 结论

(1)改进后的起膜齿能有效避开小垄垄沟中的根茬,通过自适应仿形避免作业过程中根茬和板结

土壤在起膜单体之间堵塞,保证起膜挑膜作业过程较为顺畅。改进后卷膜装置的卷膜和卸膜作业效果较理想。在卷膜过程中,摩擦传动方案保证了主从动锥型卷膜辊恒线速度旋转、卷膜松紧均匀、卸膜顺畅;在卸膜过程中,转动联动卸膜转臂,从动锥型卷膜辊与主动锥型卷膜辊沿轴线近似直线分开,使卸膜较为便捷,提高了作业效率。

(2)以正交试验为优化设计方案,以作业机前进速度、偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速和卷膜辊转速为因素,以残膜回收率、缠膜率和含杂率为评价指标,对试验结果进行了方差分析,结果表明,偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速对残膜回收率影响显著,作业机前进速度对缠膜率和含杂率影响显著,卷膜辊转速对缠膜率和含杂率的影响小于前进速度和偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速的影响。应用综合平衡法得出,当样机前进速度为3 km/h、偏心伸缩弹齿挑膜滚筒转速为60 r/min、卷膜辊转速为90 r/min时,作业效果最优。

(3)对样机的最优工作参数进行田间试验验证,结果表明,作业机残膜回收率为89.46%,缠膜率为1.93%,含杂率为25.53%,试验结果满足国家标准的相关要求。

## 参 考 文 献

- [1] 银敏华,李援农,张天乐,等.集雨模式对农田土壤水热状况与水分利用效率的影响[J/OL].农业机械学报,2015,46(12):194-203.  
YIN Minhua, LI Yuannong, ZHANG Tianle, et al. Effects of different rainwater harvesting patterns on soil hydrothermal regimes and water use efficiency of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 194-203. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151226&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151226&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.026. (in Chinese)
- [2] 赵武云,戴飞,杨杰,等.玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(11):91-97.  
ZHAO Wuyun, DAI Fei, YANG Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 91-97. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131117&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131117&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.017. (in Chinese)
- [3] QIN S H, ZHANG J L, DAI H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 87-94.
- [4] BU L D, LIU J L, ZHU L, et al. The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semi-arid region[J]. Agricultural Water Management, 2013, 123(10): 71-78.
- [5] 王志超,李仙岳,史海滨,等.农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):101-106.

- WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 101 - 106. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150515&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150515&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.015. (in Chinese)
- [6] 张丹,胡万里,刘宏斌,等.华北地区地膜残留及典型覆膜作物残膜系数[J].农业工程学报,2016,32(3):1-5.  
ZHANG Dan, HU Wanli, LIU Hongbin, et al. Characteristics of residual mulching film and residual coefficient of typical crops in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 1 - 5. (in Chinese)
- [7] 赵岩,陈学庚,温浩军,等.农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J/OL].农业机械学报,2017,48(6):1-14.  
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1 - 14. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170601&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170601&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.001. (in Chinese)
- [8] 王松林,高爱民,王波,等.旱地全膜双垄沟残膜回收机关键作业参数试验分析[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(6):660-664.  
WANG Songlin, GAO Aimin, WANG Bo, et al. Design of retrieving machine for film residue with whole plastic film mulching on double ridges in arid land[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science), 2014, 40(6): 660 - 664. (in Chinese)
- [9] 蒋德莉,陈学庚,颜利民,等.随动式残膜回收螺旋清杂装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):137-145.  
JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on spiral impurity cleaning device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 137 - 145. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190415&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190415&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.015. (in Chinese)
- [10] 马少辉.滚针式残膜回收机试验及分析[J].塔里木大学学报,2019,31(4):59-64.  
MA Shaohui. Test and analysis of rolling needle residual membrane recovery machine[J]. Journal of Tarim University, 2019, 31(4): 59 - 64. (in Chinese)
- [11] 王玉柱,白相萍,郭晓晴,等.玉米起茬残膜回收机结构设计与性能试验[J].中国农机化学报,2019,40(10):4-8.  
WANG Yuzhu, BAI Xiangping, GUO Xiaoqing, et al. Structural design and performance test of corn stubble and residual plastic film recycling machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10): 4 - 8. (in Chinese)
- [12] 郑士琦,曹肆林,王敏,等.旋转脱膜式残膜回收机的设计与试验[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(10):1-9.  
ZHENG Shiqi, CAO Silin, WANG Min, et al. Design and experiment of rotary unloading based mulch film residue collector [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2020, 48(10): 1 - 9. (in Chinese)
- [13] 戴飞,赵武云,张锋伟,等.玉米全膜双垄沟残膜回收机作业性能优化与试验[J].农业工程学报,2016,32(18):50-60.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Optimization and experiment of operating performance of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 50 - 60. (in Chinese)
- [14] 由佳翰,张本华,温浩军,等.铲齿组合式残膜捡拾装置设计与试验优化[J/OL].农业机械学报,2017,48(11):97-104.  
YOU Jiahao, ZHANG Benhua, WEN Haojun, et al. Design and test optimization on spade and tine combined residual plastic film device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 97 - 104. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20171112&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171112&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.012. (in Chinese)
- [15] 顾满,胡志超,游兆延,等.网链式残膜回收机膜土输分机构参数试验优化[J].中国农机化学报,2019,40(11):20-26.  
GU Man, HU Zhichao, YOU Zhaoyan, et al. Parameter test optimization of membrane soil transport mechanism of network chain residual plastic film collector[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 20 - 26. (in Chinese)
- [16] 韩心宇,刘鹏霞,王赟,等.甘肃玉米铺膜种植区残膜回收机械化技术适应性分析[J].中国农机化学报,2019,40(5):36-40.  
HAN Xinyu, LIU Pengxia, WANG Yun, et al. Adaptability analysis of residual film mechanization collecting in the areas of planting of corn with film-mulching of Gansu Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 36 - 40. (in Chinese)
- [17] 王旭峰,胡灿,鲁兵,等.抛膜链齿输送式残膜回收机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(3):122-129.  
WANG Xufeng, HU Can, LU Bing, et al. Design and experiment of sprocket conveying residual film recycling machine of casting film[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 122 - 129. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180314&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180314&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.014. (in Chinese)
- [18] 康晓悦,赵岩,田辛亮,等.残膜回收机搂膜装置支撑梁仿真分析[J].新疆农机化,2019(3):41-42.  
KANG Xiaoyue, ZHAO Yan, TIAN Xinliang, et al. Simulation analysis of supporting beams of cuddle film device of residual

- film recycling machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2019(3): 41-42. (in Chinese)
- [19] 张学军, 刘家强, 史增录, 等. 残膜回收机逆向膜土分离装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 46-55.  
ZHANG Xuejun, LIU Jiaqiang, SHI Zenglu, et al. Design and parameter optimization of reverse membrane and soil separation device for residual film recovery machine [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 46-55. (in Chinese)
- [20] 辛尚龙, 赵武云, 戴飞, 等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 311-319.  
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Improved design and experiment of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 311-319. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2018s041&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s041&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.041. (in Chinese)
- [21] 赵海军. 残膜捡拾滚筒的运动学和动力学研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005.  
ZHAO Haijun. Study on kinematics and dynamics of roller for collecting plastic film residue [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [22] 张新超, 毕新胜, 王志欢, 等. 钉齿滚筒式残膜回收机关键部件的设计与研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 72-76.  
ZHANG Xinchao, BI Xincheng, WANG Zhihuan, et al. The design and research of key-parts of spiked tooth plastic film residue recovery[J]. Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 72-76. (in Chinese)
- [23] 王久鑫, 赵武云, 戴飞, 等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机的设计与试验[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(10): 26-30.  
WANG Jiuxin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Design and test of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Forestry Machine & Wood Working Equipment, 2018, 46(10): 26-30. (in Chinese)
- [24] 郭笑欢, 戴飞, 赵武云, 等. 全膜双垄沟废膜捡拾打捆机的设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(9): 32-36.  
GUO Xiaohuan, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design of the whole double furrow film picking baler machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(9): 32-36. (in Chinese)
- [25] 孙岳, 简建明, 田玉泰, 等. 残膜回收机旋转式起膜装置起膜机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 304-310.  
SUN Yue, JIAN Jianming, TIAN Yutai, et al. Analysis and experiment of filming mechanism of rotary film-lifting device of residual film recycling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 304-310. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2018s040&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s040&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.040. (in Chinese)
- [26] 陈发, 史建新, 王学农, 等. 弧型齿残膜捡拾滚筒捡膜的机理[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 36-41.  
CHEN Fa, SHI Jianxin, WANG Xuenong, et al. Study on collecting principle of arc-type tooth roller for collecting plastic residue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 36-41. (in Chinese)
- [27] 徐良庆. 伸缩扒杆式残地膜捡拾装置[J]. 农业机械学报, 1994, 25(2): 60-64.  
XU Liangqing. A study on the retractable finger type pickup collector for residual mulching plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1994, 25(2): 60-64. (in Chinese)
- [28] 甘肃农业大学. 一种锥型卷膜装置: 201822200933.1[P]. 2019-09-03.
- [29] 余海涛, 孙国栋, 梁永强, 等. 粘扣带视觉检测的恒线速度传动设计[J]. 机床与液压, 2015, 43(20): 150-152.  
YU Haitao, SUN Guodong, LIANG Yongqiang, et al. Transmission design of constant line speed in velcro vision inspection [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(20): 150-152. (in Chinese)
- [30] 戴飞, 高爱民, 张锋伟, 等. 玉米全膜双垄沟气动直插式穴播机设计与仿真[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 284-289.  
DAI Fei, GAO Aimin, ZHANG Fengwei, et al. Design and simulation of pneumatic direct insert hill-seeder with corn whole plastic-film on double ridges[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 284-289. (in Chinese)
- [31] 安军芳, 王赞, 张涛, 等. 残膜回收机伸缩杆式捡拾滚筒的改进设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2014, 52(3): 7-9.  
AN Junfang, WANG Yun, ZHANG Tao, et al. The improvement design on telescopic rod type collecting roller of residual film recycling machine[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2014, 52(3): 7-9. (in Chinese)
- [32] 辛尚龙, 戴飞, 赵武云, 等. 马铃薯挖掘与残膜回收一体机的改进设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 164-172.  
XIN Shanglong, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Improved design and experiment of combined operation machine for both potato harvesting and plastic film collecting[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11): 164-172. (in Chinese)
- [33] 戴飞, 郭笑欢, 赵武云, 等. 帆布带式马铃薯挖掘-残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 104-113.  
DAI Fei, GUO Xiaohuan, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of canvas belt combined operation machine for potato digging and plastic film collecting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 104-113. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180312&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180312&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.012. (in Chinese)