

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009

马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验

戴飞¹ 赵武云¹ 孙伟¹ 吴正文² 宋学锋¹ 李勇¹

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

摘要: 针对大面积推广大垄双行覆膜马铃薯栽培模式所造成的田间残膜污染问题, 设计了马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机, 一次作业可同步实现薯块挖掘铺条与残膜回收。通过对样机关键作业部件进行设计选型, 确定了阶梯挖掘铲、土薯抖动升运装置及浮动式气力卷膜装置结构及作业参数, 分析了浮动式气力卷膜装置作业过程, 得出确保该装置不产生残膜滞留堵塞、拉断及打滑现象的必要条件, 对地轮田间行走产生不滑动的滚动条件进行了分析计算, 并完成了样机相关作业性能试验。田间试验结果表明, 当联合作业机作业速度为 1.8 ~ 2.0 km/h 时, 残膜回收率为 91.6%, 明薯率为 96.8%, 伤薯率为 2.3%, 试验指标均达到了国家和行业标准要求, 试验结果满足设计要求。

关键词: 马铃薯; 气力辅助残膜回收; 收获; 联合作业机

中图分类号: S223.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0064-09

Design and Experiment of Combined Operation Machine for Potato Harvesting and Plastic Film Pneumatic Auxiliary Collecting

DAI Fei¹ ZHAO Wuyun¹ SUN Wei¹ WU Zhengwen² SONG Xuefeng¹ LI Yong¹

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

2. Gansu Wuwei Business Flourishes Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Wuwei 733018, China)

Abstract: According to the problems of field plastic film pollution caused by the cultivation pattern of potato big ridge double line which was promoted in large area in Northwest China, the combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting was designed, which had synchronous implementation function of potato harvesting and plastic film pneumatic collecting. Based on design and selection of key operation parts for the prototype, the structure and operation parameters of ladder digging blade, soil-potato dither conveyor device and floating pneumatic curl-up film mechanism were determined. The operation process of floating pneumatic curl-up film mechanism was analyzed and the conditions to make sure that the floating pneumatic curl-up film mechanism did not produce the phenomenon of plastic film remained and jam, tensile and skid were achieved, the conditions of wheel did not slip but rolling in the field were analyzed and calculated. For the relevant work performance test of prototype, the field experiment results showed that when the operation speed of the combined operation machine was 1.8 ~ 2.0 km/h, the plastic film collecting ratio was 91.6%, the obvious ratio of potato was 96.8% and the injury ratio of potato was 2.3%, which met the relevant work quality evaluation specification requirements, and also the experiment results met the design requirements of combined operation machine. The research achievement would provide an important reference for root-tuber crop collecting machine development under plastic film mulching cultivation.

Key words: potato; plastic film pneumatic auxiliary collecting; harvesting; combined operation machine

引言

地膜覆盖栽培技术在我国农业生产中占有重要

的战略地位, 带动了农业生产力的显著提高和生产方式的不断改进, 不仅能够增加农作物产量, 且可扩大其适作区范围, 尤其在我国北方干旱地区马铃薯、

收稿日期: 2016-01-24 修回日期: 2016-02-19

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503105)和甘肃省科技重大专项计划项目(143NKDJ018)

作者简介: 戴飞(1987—), 男, 讲师, 主要从事北方旱区作物生产装备工程研究, E-mail: daifei@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区农业工程技术与装备研究, E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

玉米等作物的生产种植中起到了重要作用^[1-2]。然而,随着地膜投入量和应用面积越来越大,农田残留地膜污染已呈现日趋严重的态势,带来土壤结构破坏、耕地质量下降、作物减产以及农事操作受阻、次生环境污染等一系列不利影响,造成巨大的经济损失,已成为影响旱作农业区农田环境的重大威胁之一^[3-4]。甘肃省作为我国马铃薯西北优势产区,2014年马铃薯覆膜种植面积已达到 $4.02 \times 10^5 \text{ hm}^2$,主要采用大垄双行黑色地膜覆盖栽培模式,每年仅铺膜种薯新增残膜高达近 $6 \times 10^4 \text{ t}$,是控制残膜污染的主要领域,迫切需要切实有效的残膜治理技术及配套作业机具^[5]。

机械化回收残膜是解决残膜污染的主要手段,按作业季节残膜回收可分为:苗期收膜、春播前整地收膜和秋后收膜^[6]。受制于旱作农业区多为雨养地覆膜种植,降雨量小、蒸腾量大,苗期已不能收膜;播前整地时间紧,且残膜在田间搁置时间长破碎严重,残膜回收率低;马铃薯收获后当年使用的地膜强度相对较高,且覆盖在地表以连片或大块状存在,是机械化回收的较佳时期,但田间大量地膜滞留及马铃薯挖掘后覆土的再次掩埋对于薯块收获时明薯率及后续残膜回收率皆产生较大影响。近年来,我国科研工作者针对棉花、玉米作物田间残膜回收研制了多种机具,取得了一定成效^[7-10];针对马铃薯残膜回收进行了尝试,但回收工艺仍然以马铃薯收获后地膜的二次捡拾为主,劳动强度较大^[11];课题组前期对马铃薯挖掘与机械式残膜回收联合作业机进行了初步设计,但研发样机作业耐久性不高,其机械输膜、卷膜装置易产生残膜堵塞与滞留现象,作业效果不稳定^[12]。为此,在一代样机基础上改进设计一种能够同步实现马铃薯挖掘收获与气力辅助残膜回收的高性能联合作业机。

1 整机结构与工作原理

1.1 结构组成

马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机主要由阶梯挖掘铲、防地膜缠绕装置、浮动式气力卷膜装置、升运导膜杆、离心式风机、土薯抖动升运装置、减速护栏、薯块集条装置、升降手柄、变速箱、地轮及尾轮等组成,样机具体结构如图 1 所示。

其中,阶梯挖掘铲为三阶平面组合结构,浮动式气力卷膜装置主要由卷膜驱动辊、卷膜从动辊、卷膜辊、浮动滑槽架和气流导膜板组成,土薯抖动升运装置由导向撑链轮、升运链、托链轮、抖动轮及驱动轮等组成。

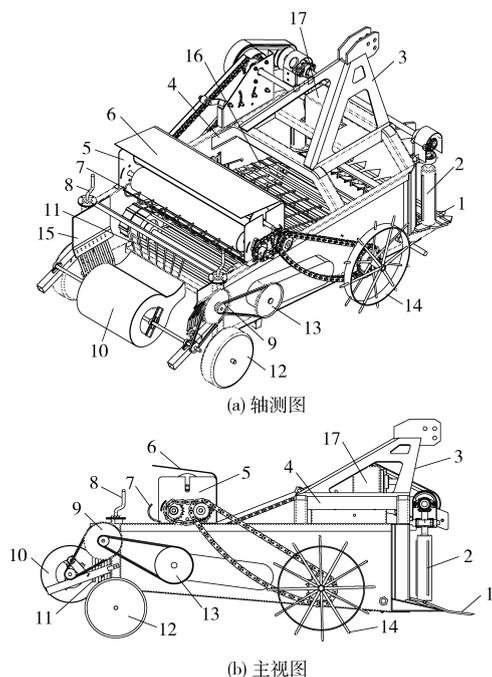


图 1 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机结构图

Fig. 1 Structure diagrams of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting

1. 阶梯挖掘铲 2. 防地膜缠绕装置 3. 牵引架 4. 机架 5. 浮动式气力卷膜装置 6. 气流导膜板 7. 升运导膜杆 8. 升降手柄 9. 风机带轮 10. 离心式风机 11. 薯块减速护栏 12. 尾轮 13. 传动带轮 14. 地轮 15. 薯块集条装置 16. 土薯抖动升运装置 17. 变速箱

1.2 工作原理

传动系统如图 2 所示,机具以三点后悬挂方式与拖拉机联接,通过变速箱将动力分别传递至整机两侧防地膜缠绕装置与土薯抖动升运装置驱动轮上,驱动轮与传动带轮同轴连接,在带传动作用下将动力传递至风机带轮并进一步带动离心式风机转动;同时随着整机前行地轮转动,通过链传动将动力传递至浮动式气力卷膜装置卷膜驱动辊上,卷膜驱动辊与卷膜从动辊通过链传动连接转动,并在卷膜辊轴两侧挂接预紧弹簧的作用下通过接触式滚动方

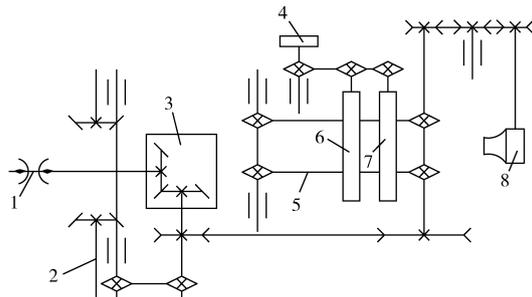


图 2 联合作业机传动系统

Fig. 2 Schematic diagram of transmission system for combined operation machine

1. 传动轴 2. 防地膜缠绕装置 3. 变速箱 4. 地轮 5. 土薯抖动升运装置 6. 卷膜驱动辊 7. 卷膜从动辊 8. 离心式风机

式带动卷膜辊转动。

田间作业时,阶梯挖掘铲将“膜-土-薯”复合体同时疏松掘起,在两侧防地膜缠绕装置相向转动的作用下顺利进入土豆抖动升运装置,随着“膜-土-薯”物料的不断运移,大量土壤在抖动轮的作用下通过升运链滑落,当“膜-土-薯”物料运移至升运导膜杆部件时,“土-薯”物料受自身重力影响滑落至土豆抖动升运装置,但田间残膜由于其连片或大块状特性,并在后续物料的挤推作用下夹杂少许土壤沿着升运导膜杆倾斜向上提升;当残膜进一步输送至升运导膜杆末端部弧形脱膜齿附近时,受离心式风机高速气流作用进入浮动式气力卷膜装置,并在卷膜驱动辊、卷膜从动辊、气流导膜板及卷膜辊的共同作用下完成残膜回收。与此同时,“土-薯”物料在土豆抖动升运装置的作用下进一步输送,并在薯块集条装置的配合下完成挖掘薯块的带状铺放。作业机后置薯块减速护栏由树脂橡胶棒制成,可有效抑制薯块在升运链末端的高速抛掷及跌落损伤,降低收获作业时的伤薯率。

1.3 主要技术指标

根据甘肃省马铃薯大垄双行的主导种植模式及其农艺要求,联合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)/(m×m×m) | 2.10×1.10×0.92 |
| 工作幅宽/m | 0.90 |
| 配套动力/kW | 23.2~29.4 |
| 挂接方式 | 后三点悬挂 |
| 整机质量/kg | 286 |
| 作业速度/(km·h ⁻¹) | 1.8~2.0 |
| 生产率/(hm ² ·h ⁻¹) | 0.16~0.25 |
| 残膜回收率/% | ≥90 |
| 明薯率/% | ≥95 |
| 伤薯率/% | ≤5 |

2 关键部件设计与参数确定

2.1 阶梯挖掘铲

如图3所示,阶梯挖掘铲既要入土阻力小,又要有良好的碎土性能,保证在“膜-土-薯”物料复合体进入土豆抖动升运装置前能够将三者进行初步疏松作业,打破覆盖在薯块顶部的“膜-土”板结层,满足掘起物料的顺利后输。采用阶梯状挖掘铲通过3组不同的铲面倾角(α_1 、 α_2 、 α_3),分别实现作业机低减阻入土、高性能碎土及“膜-土-薯”疏松过程。

由图3可以看出,阶梯挖掘铲的入土段、碎土段

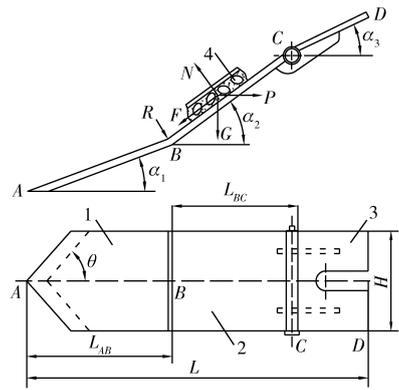


图3 阶梯挖掘铲结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of ladder digging blade

1. 铲体入土段 2. 铲体碎土段 3. 铲体疏松段 4. “膜-土-薯”复合体

及“膜-土-薯”复合体疏松段皆与倾角 α 有关,根据“膜-土-薯”复合体在铲体不同功能段的移动条件可建立方程^[13]

$$\begin{cases} P\cos\alpha - F - G\sin\alpha \geq 0 \\ N - G\cos\alpha - P\sin\alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$F = \mu N \quad (2)$$

式中 P ——沿着阶梯挖掘铲移动“膜-土-薯”复合体所需要的力, N

F ——铲面与“膜-土-薯”复合体摩擦力, N

N ——阶梯挖掘铲对“膜-土-薯”复合体的反作用力, N

G ——铲面上“膜-土-薯”复合体重力, N

μ ——“膜-土-薯”复合体与阶梯挖掘铲的摩擦因数

α ——铲面不同作业功能段的倾角,(°)

由式(1)、(2)计算得出

$$\alpha = \arctan \frac{P - \mu G}{G + \mu P} \quad (3)$$

根据式(3)可以看出,当阶梯挖掘铲面倾角 α 变小时,“膜-土-薯”复合体沿着阶梯挖掘铲移动所需的力变小,挖掘阻力小,入土性能好,但易出现壅土现象,碎土性能差;当阶梯挖掘铲面倾角 α 变大时,碎土性能好,但挖掘阻力大^[14]。

为保证阶梯挖掘铲铲刃的自动清理,铲刃斜角、“膜-土-薯”复合体与阶梯挖掘铲的摩擦因数应满足^[13]

$$\begin{cases} 90^\circ - \theta > \varphi \\ \mu = \tan\varphi_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中 θ ——阶梯挖掘铲铲刃斜角,为 50°

φ ——“膜-土-薯”复合体与阶梯挖掘铲的摩擦角,(°)

φ_{\max} ——“膜-土-薯”复合体与阶梯挖掘铲的最大摩擦角,(°),取临界值

由式(4)计算得出, $\varphi_{\max} = 40^\circ$, $\mu = 0.84$ 。

马铃薯收获机挖掘铲倾角 α 一般应在 $14^\circ \sim 25^\circ$ 之间^[15]。因此, 依照式(1)~(4)的计算分析与阶梯挖掘铲实现的不同功能要求, 取铲体总长 $L = 310$ mm, 铲宽 $H = 110$ mm。其中, 铲体 AB 段倾角应取较小值, α_1 取 16° , $L_{AB} = 140$ mm; 中部铲体 BC 段倾角增大有利于碎土, α_2 取 23° , 为降低挖掘阻力, 同时缩短铲体长度, $L_{BC} = 75$ mm; 为使受到挤压的“膜-土-薯”复合体折弯疏松, 铲体 CD 段倾角应取较小值, α_3 取 13° 。为防止阶梯挖掘铲前部铲刃受力过大而出现应力集中, 铲体 AB 段与 BC 段过渡处以 $R = 10$ mm 的加工圆弧过渡, 铲体 CD 段通过销钉与主铲体铰接。整机挖掘入土角可根据其后置升降手柄进行调节。

2.2 土薯抖动升运装置

如图 4 所示, 土薯抖动升运装置由导向撑链轮、升运链、托链轮、抖动轮及驱动轮等部件组成。当整机作业时, 该装置能够实现“膜-土-薯”复合体的提升输运及大部分土壤的抖动筛分, 并最终完成薯块的后置抛落。为保证“膜-土-薯”复合体充分疏松分离, 土薯抖动升运装置有效输运距离为 1 300 mm, 升运宽度为 900 mm; 抖动轮选用三头型, 其大节圆半径为 $R = 58$ mm, 小节圆半径为 $r = 36$ mm, 能够使升运链实现 22 mm 的理论振动幅值。

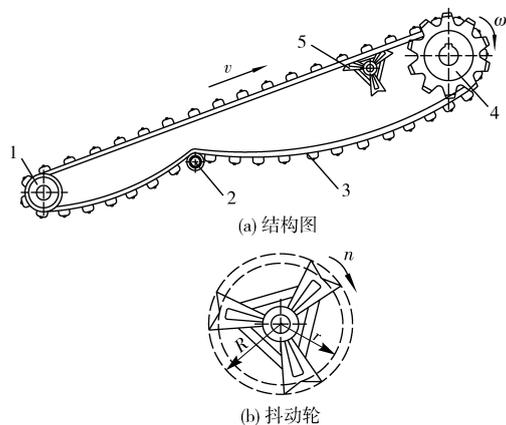


图 4 土薯抖动升运装置示意图

Fig.4 Schematic diagrams of soil-potato dither conveyor device

1. 导向撑链轮 2. 托链轮 3. 升运链 4. 驱动轮 5. 抖动轮

升运线速度、抖动轮转速及抖动频率对于“膜-土-薯”复合体的疏松分离起着至关重要的作用, 是影响土薯抖动升运装置作业性能的关键参数。

其中, 土薯抖动升运装置升运最低线速度^[13]为

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{gR}{1-K^2}} \quad (5)$$

其中

$$K = \frac{r}{R}$$

式中 v_{\min} ——升运最低线速度, m/s

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

K ——系数

由式(5)计算得出: $K = 0.62$, $v_{\min} = 0.96 \text{ m/s}$ 。

因此, 土薯抖动升运装置升运线速度不应当小于 0.96 m/s , 与此同时土薯抖动升运装置升运线速度还应与整机的前进作业速度相匹配。升运线速度过小会减小“膜-土-薯”复合体的提升速度, 产生物料拥堵现象, 降低联合作业机工作效率; 升运线速度过大会导致“膜-土-薯”复合体疏松分离效果变差, 降低整机明薯率与残膜回收率。试验过程中发现, 当整机前进作业速度为 $0.50 \sim 0.55 \text{ m/s}$, 匹配的土薯抖动升运装置升运线速度 v 为 $1.0 \sim 1.1 \text{ m/s}$ 时, 整机土薯升运作业效果较佳。因此, 土薯抖动升运装置相关重要参数均在此条件下确定。

土薯抖动升运装置中被动式抖动轮转速与升运线速度、抖动轮周长的关系^[13]为

$$n = \frac{60v}{L_1} \quad (6)$$

其中 $L_1 = \pi[1.5(R+r) - \sqrt{Rr}]$

式中 n ——抖动轮转速, r/min

L_1 ——抖动轮周长, m

由式(6)计算得出抖动轮周长 $L_1 = 0.3 \text{ m}$, 抖动轮转速 n 为 $200 \sim 220 \text{ r/min}$ 。

在土薯抖动升运装置中, 当抖动轮类型及其转速确定情况下, 对应的抖动频率为

$$f = \frac{Zn}{60} \quad (7)$$

式中 f ——抖动频率, Hz

Z ——抖动轮凸顶数, 取 3

由式(7)计算得出 f 为 $10.0 \sim 11.0 \text{ Hz}$ 。

因此, 当联合作业机田间工作前进速度为 $0.50 \sim 0.55 \text{ m/s}$ 时, 土薯抖动升运装置相应的升运线速度可达 $1.0 \sim 1.1 \text{ m/s}$, 装置选取周长为 0.3 m 的三头型抖动轮, 其转速在 $200 \sim 220 \text{ r/min}$ 之间, 对应抖动频率保持在 $10.0 \sim 11.0 \text{ Hz}$ 之间, 能够实现 22 mm 的理论振动幅值, 在此作业参数条件下整机土薯升运性能良好。

2.3 浮动式气力卷膜装置

2.3.1 结构组成与工作原理

如图 5 所示, 浮动式气力卷膜装置安装在土薯抖动升运装置上端部, 主要由卷膜驱动辊、卷膜从动辊、卷膜辊、浮动滑槽架、气流导膜板、升运导膜杆及离心式风机等组成。当整机田间作业时, 地轮顺时针转动并通过链条 II 将动力传递至卷膜驱动辊处, 卷膜驱动辊端部同轴安装有两个同类型链轮, 并将动力通过链条 I 传递至卷膜从动辊处(均为顺时针

转动,角速度 $\omega_2 = \omega_3 = 15 \text{ rad/s}$,卷膜辊在其辊轴两侧挂接的预紧弹簧、卷膜驱动辊和卷膜从动辊的共同作用下产生相对逆时针转动。

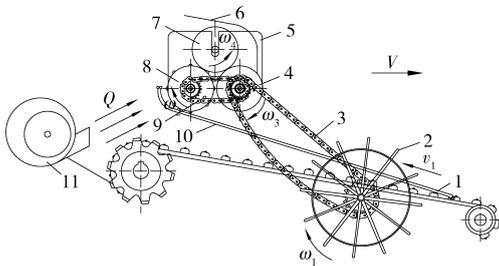


图5 浮动式气力卷膜装置结构图

Fig.5 Structure diagram of floating pneumatic curl-up film mechanism

1. 升运链 2. 地轮 3. 链条 I 4. 卷膜驱动辊 5. 浮动滑槽架
6. 气流导膜板 7. 卷膜辊 8. 卷膜从动辊 9. 链条 II 10. 升运导膜杆 11. 离心式风机

为保证卷膜从动辊能够将离心式风机高速气流吹送过来的残膜瞬时抓取送移,卷膜从动辊表面圆

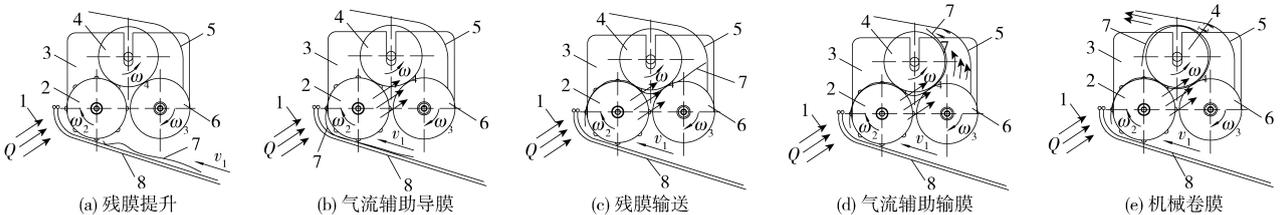


图6 浮动式气力卷膜装置作业过程

Fig.6 Operation process of floating pneumatic curl-up film mechanism

1. 风机气流 2. 卷膜从动辊 3. 浮动滑槽架 4. 卷膜辊 5. 气流导膜板 6. 卷膜驱动辊 7. 田间残膜 8. 升运导膜杆

整机田间作业过程中发现,大部分残膜缠绕回收时以间断大块状存在,仅少量残膜呈连片状态^[16]。当残膜为间断的大块状升运至导膜杆尾部弧形脱膜齿部位时,受到沿着该弧形脱膜齿公法线方向风机高速气流的吹送与引导,残膜在卷膜从动辊上纹杆的摩擦牵引,及卷膜辊两侧预紧弹簧力、卷膜驱动辊的辅助作用下不断传输,最终依靠离心式风机气流、气流导膜板的辅助导向及卷膜辊的缠绕转动完成残膜回收(残膜与卷膜辊之间的摩擦系数约为0.20);当残膜为少量连片状时,风机高速气流仍然起到对残膜进入浮动式气力卷膜装置的引导作用,但当连片状残膜进入装置内部后,离心式风机部分气流由于受到连片状残膜阻挡难以从正面方向进入导膜板下端部与卷膜驱动辊形成闭合区域,使得大量高速气流换向从卷膜辊缠绕拉伸残膜的左右端部空隙进入闭合区域,实现对残膜两侧的风送式辅助作业,同样在气流导膜板作用下完成相同作业原理的残膜回收。

2.3.3 浮动卷膜装置机构参数

如图7所示,浮动卷膜装置主要由卷膜从动辊、

周阵列设置有8组纹杆元件;气流导膜板下端部与卷膜驱动辊形成闭合区域,上端部沿着卷膜辊顶部切线方向延伸,通过气流导膜板与离心式风机的风送配合,既实现了残膜的顺向引导卷收,又降低了薯秧、土壤与残膜的混合夹杂程度;卷膜辊由4组弧形叶片组成,与其左、右轴套配合安装,当残膜缠绕至预定厚度时可将两边的轴套与叶片分离,并将弧形叶片直接从残膜卷中抽出,完成卸膜作业。

2.3.2 作业过程分析

浮动式气力卷膜装置作业过程如图6所示,当“膜-土-薯”复合体经阶梯挖掘铲疏松作用并沿着升运链向上提升输送时,疏松的复合体物料在整机前进速度、升运链速度的作用下先沿着升运导膜杆向上运移,其中薯块、大量土壤在重力影响下,沉降至整机土豆抖动升运装置上并向后运输;此时连片或大块状的残膜仍然留在升运导膜杆上,并进一步沿着升运导膜杆向上运移。

卷膜驱动辊及卷膜辊组成,三者的滚筒半径均为 $r_1 = r_2 = r_3 = 75 \text{ mm}$ 。装置中卷膜驱动辊与卷膜从动辊转速相同,卷膜辊在其辊轴两侧挂接弹簧预紧力的作用下产生相反方向的转动。

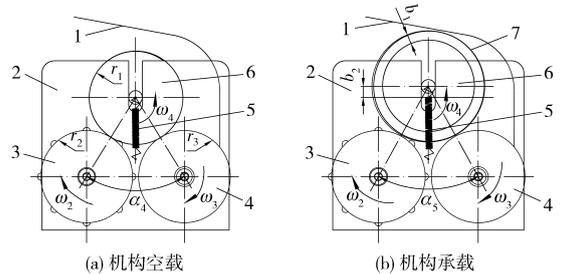


图7 浮动卷膜装置

Fig.7 Device of floating curl-up film

1. 气流导膜板 2. 浮动滑槽架 3. 卷膜从动辊 4. 卷膜驱动辊
5. 预紧弹簧 6. 卷膜辊 7. 田间残膜

为保证升运导膜杆运移的残膜能及时被卷膜辊卷起,且避免因卷膜辊转速过慢或过快引起的地膜滞留堵塞或拉断现象,需保证在相同时间内地轮前进距离应与卷膜辊卷起的地膜长度一致。由于卷膜辊始终被紧压在卷膜驱动辊与卷膜从动辊上,因此

三者的轮缘线速度相等^[17];当浮动卷膜装置如图 7a 进行残膜卷膜前空载状态时,卷膜辊与卷膜驱动辊、卷膜从动辊中心连线夹角 α_4 取 65° ,可得

$$\omega_2 r_2 = \omega_3 r_3 = \omega_4 r_1 \quad (8)$$

式中 ω_4 ——卷膜辊空载角速度,rad/s

由式(8)计算得出卷膜辊空载角速度 $\omega_4 = 15 \text{ rad/s}$ 。

当浮动卷膜装置如图 7b 进行残膜卷膜作业时,卷膜辊直径为变量,可得

$$\begin{cases} \omega_2 r_2 = \omega_3 r_3 = \omega_4' r_1' \\ r_1' = r_1 + b_1 \\ b_1 = b_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$(r_2 + r_3) \sin \frac{\alpha_4}{2} = (r_1' + r_2) \sin \frac{\alpha_5}{2} \quad (10)$$

$$F_1 = K_1 b_2 \quad (11)$$

式中 ω_4' ——卷膜后卷膜辊角速度,rad/s

r_1' ——缠绕了残膜后的卷膜辊半径,mm

α_4 ——卷膜辊空载时与卷膜驱动辊、卷膜从动辊中心连线夹角, $(^\circ)$,取 65°

α_5 ——卷膜后卷膜辊与卷膜驱动辊、卷膜从动辊中心连线夹角, $(^\circ)$

b_1 ——卷膜厚度,mm

b_2 ——卷膜辊在浮动滑槽内向上的浮动位移,mm

F_1 ——弹簧预紧力,N

K_1 ——倔强系数,取 $1\ 350 \text{ N/m}$

按照试验计算,每回收 0.5 hm^2 地残膜卷膜厚度约为 25 mm ,要求当达到该厚度时进行卸膜,即 $b_1 \leq 25 \text{ mm}$,计算中卷膜厚度取最大值 25 mm 。

由式(9)~(11)计算得出残膜卷膜回收作业完成后卷膜辊与卷膜驱动辊、卷膜从动辊中心连线夹角 $\alpha_5 = 53.7^\circ$,卷膜辊在浮动滑槽内向上的浮动位移 $b_2 = 25 \text{ mm}$,卷膜满载后卷膜辊角速度 $\omega_4' = 11.25 \text{ rad/s}$,弹簧预紧力 $F_1 = 33.75 \text{ N}$ 。

因此,由参数确定结果可以看出:当浮动卷膜装置从开始卷膜至卸膜作业时,卷膜辊与卷膜驱动辊、卷膜从动辊中心连线夹角由 65° 减小至 53.7° ,卷膜辊在浮动滑槽内向上浮动高度为 25 mm ,卷膜辊的角速度由 15 rad/s 降低至 11.25 rad/s ,卷膜辊与浮动滑槽架相连接弹簧预紧力为 33.75 N ,确保浮动卷膜装置不发生残膜滞留堵塞、拉断及卷膜打滑现象。

2.3.4 离心式风机关键参数

离心式风机转速 n_1 、风量 Q 、风机全压 p 是决定离心式风机作业性能的重要参数,其中离心式风机的设计转速 $n_1 = 1\ 200 \text{ r/min}$;按照试验过程中升运

导膜杆弧形脱膜齿处的残膜质量为 $4.5 \sim 5.1 \text{ g}$ 计算,残膜悬浮速度为 $2.0 \sim 2.4 \text{ m/s}$ ^[18]。由于田间收回的残膜覆有部分泥土、夹杂薯秧等杂质,因此实际风机气流速度应高于临界残膜悬浮风度,风机气流速度 v_1 越大对气流吹送导膜越有利,但消耗功率随之增大,综合考虑风机气流速度 v_1 取 3.2 m/s 。离心式风机气出口设计为矩形,其横截面尺寸为 $180 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ (长×宽),可得风机气出口面积 $A = 0.065 \text{ m}^2$ 。

离心式风机风量 Q 计算式^[19]为

$$Q = v_1 A \quad (12)$$

可计算得出离心式风机风量 $Q = 0.21 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

离心式风机全压 p 计算式为

$$p = p_d + p_s \quad (13)$$

其中

$$p_s = \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

式中 p_s ——离心式风机出口静压,Pa,利用排气试验装置测得离心式风机工作时的出口静压 $p_s = 173.5 \text{ Pa}$

p_d ——气流出口动压,Pa

ρ ——空气密度,取 1.2 kg/m^3

由式(13)可计算得出离心式风机气流出口动压 $p_d = 6.1 \text{ Pa}$,全压 $p = 179.6 \text{ Pa}$ 。

2.3.5 地轮行走作业条件分析

浮动式气力卷膜装置中卷膜驱动辊、从动辊及卷膜辊的作业动力皆由联合作业机地轮转动带动,地轮在田间行走出现的附着能力差(行走打滑)或受阻强度大而无法转动均对作业效果产生重要影响,因此,需要对地轮田间行走产生不滑动的滚动条件进行分析计算。

如图 8a 所示,联合作业机地轮由半径 r_4 为 230 mm 的钢制轮辋及轮爪组成,12 组轮爪以地轮回转中心 O 点为基准均布排列,则地轮轮爪与其垂直中心线的夹角 α_6 为 15° 。当整机前进作业时,顺时针转动行走的地轮需克服田间土壤、轴承摩擦力

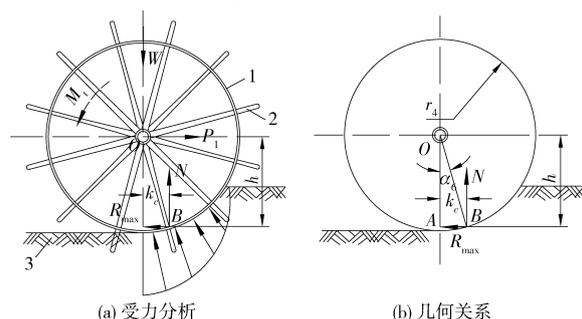


图 8 地轮受力示意图

Fig. 8 Force diagrams of wheel

1. 轮辋 2. 轮爪 3. 田间土壤

矩及地轮带动其他部件所需扭矩等的阻碍作用(阻力矩为 M_l),以地轮轮爪 OB 扎入田间土壤 B 点瞬间状态建立方程,获得能使地轮产生不滑动的滚动条件^[20]

$$\begin{cases} P_1 \leq R_{\max} \\ P_1 h > W k_c + M_l \end{cases} \quad (14)$$

其中 $R_{\max} = f_r W$ (15)

式中 P_1 ——地轮所受的拉力, N

R_{\max} ——地轮滚动时与土壤支撑面接触力的水平分力之和最大值, N

W ——联合作业机地轮所承受的载荷, 取 2 600 N

k_c ——地轮滚动时土壤支撑面接触力的水平分力之和、铅垂分力之和交点与地轮垂直中心线的距离, m

h ——地轮滚动时土壤支撑面接触力的水平分力之和、铅垂分力之和交点与地轮水平中心线的距离, m

f_r ——轮爪入土后地轮滚动摩擦因数, 取 0.60

由图 8b 几何关系可以得出

$$\begin{cases} \frac{k_c}{h} = \tan\alpha \\ \frac{k_c}{r} = \sin\alpha \end{cases} \quad (16)$$

由式(14)~(16)计算得出能使地轮田间行走产生不滑动的滚动条件为

$$\begin{cases} P_1 \leq 1\,560\text{ N} \\ M_l < 191.9\text{ N}\cdot\text{m} \end{cases}$$

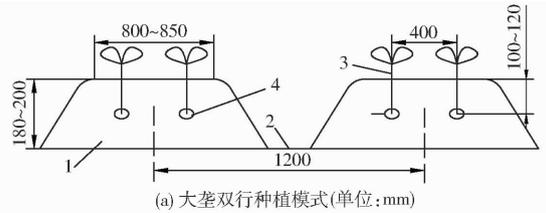
即整机田间作业时,地轮所受到的拉力应当小于或等于 1 560 N,地轮需克服田间土壤、轴承摩擦力矩及其带动卷膜驱动辊、从动辊及卷膜辊转动的阻力扭矩应小于 191.9 N·m。

3 田间试验与分析

3.1 试验条件

2015年10月,在甘肃省定西市安定区香泉镇进行了马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机田间作业性能试验。试验用地尺寸为 300 m × 80 m,土壤为黄绵土,含水率约为 13.6%,马铃薯种植品种为新大坪,采用大垄双行覆膜种植模式,如图 9a 所示,其中垄体高为 180 ~ 200 mm,垄体宽为 800 ~ 850 mm,种植行距为 400 mm,两垄体中心线位置相距 1 200 mm,结薯深度为 100 ~ 120 mm。联合作业机田间作业回收黑色残膜厚度为 0.01 mm、宽度为 1 200 mm,按照马铃薯大垄双行机械化起垄覆

膜种植作业农艺要求,垄体两侧覆土厚度为 30 ~ 40 mm,膜上覆土厚度为 35 ~ 45 mm,因此,田间回收残膜几乎全部被土壤、薯秧翻埋覆盖,故在马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机工作前,试验地预先进行杀秧处理不会对覆盖地膜造成较大损伤,试验地况如图 9b 所示。



(a) 大垄双行种植模式(单位:mm)



(b) 试验地况

图 9 试验地示意图

Fig. 9 Schematic diagrams of experiment field

1. 大垄垄体 2. 垄沟 3. 马铃薯薯秧 4. 薯块

3.2 试验方法

按照样机预期实现的设计功能,结合国家行业标准 GB/T 25412—2010《残膜回收机》和 NY/T 648—2002《马铃薯收获机质量评价技术规范》规定的试验方法进行马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机田间作业性能试验(如图 10 所示),联合作业机动力选取东方红-300 型拖拉机,标定功率为 22.1 kW,整机作业速度控制在 1.8 ~ 2.0 km/h。其中,选取残膜回收率、明薯率、伤薯率作为试验现场能够体现整机工作性能的测试指标,同时考察阶梯挖掘铲、土薯抖动升运装置、浮动式气力卷膜装置的工作运转情况。



(a) 试验样机

(b) 作业过程

图 10 田间作业性能试验

Fig. 10 Field performance test of combined operation machine

规定试验小区以单一垄体宽度(800 ~ 850 mm)为基准,测定区长度为 20 m,试验小区在试验地中随机选取,马铃薯收获与残膜回收试验重复 10 次,试验结果取 10 次试验测定指标的平均值。其中,残

膜回收率、明薯率、伤薯率计算式^[21-23]为

$$T_1 = \left(1 - \frac{m_1}{m_0}\right) \times 100\% \quad (17)$$

$$T_2 = \frac{m_2}{m} \times 100\% \quad (18)$$

$$T_3 = \frac{m_3}{m} \times 100\% \quad (19)$$

其中
式中

- $m = m_2 + m_3 + m_4$
- T_1 ——残膜回收率, %
- m_1 ——联合作业机回收残膜的质量(卷膜辊上残膜质量), g
- m_0 ——试验小区覆盖地膜总质量, g
- T_2 ——明薯率, %
- T_3 ——伤薯率, %
- m ——总薯质量, kg
- m_2 ——明薯质量, kg
- m_3 ——伤薯质量, kg
- m_4 ——埋薯质量和漏挖薯质量, kg

3.3 试验结果与分析

马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机田间试验结果如表2所示。

表2 田间试验结果

Tab.2 Result of field experiment %

| 试验指标 | 标准值 | 试验值 |
|-------|-----|------|
| 残膜回收率 | ≥80 | 91.6 |
| 明薯率 | ≥95 | 96.8 |
| 伤薯率 | ≤5 | 2.3 |

由试验结果可以得出,马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机残膜回收率(91.6%)、明薯率(96.8%)及伤薯率(2.3%)均达到国家和行业标准要求,能够实现马铃薯挖掘集条铺放与残膜回收的联合作业过程。阶梯挖掘铲与“膜-土-薯”复合体的高性能疏松行为接触,保证了三者后续的二次有效分离;气力辅助残膜回收既降低了传统收获工艺配套下机具的进地次数,又协同薯块挖掘的同时及时完成残膜回收,减少了田间表面覆盖物的滞留,间接提高了作业机明薯率,降低了回收残膜的含杂率;土薯抖动升运装置运行平稳,在升运链末端树脂橡胶减速护栏的配合作用下有效降低收获作业时的伤薯率;浮动式气力卷膜装置工作过程可靠,能够随着“卷膜-卸膜”作业过程进行其动态工作参数的不断

适应与调整,依靠离心式风机高速气流、气流导膜板的吹送导向及卷膜辊的转动缠绕最大限度完成残膜回收。

试验过程中发现,当整机作业速度保持在1.8~2.0 km/h范围内时,残膜回收率较高且相对稳定;当联合作业机前进速度过高时,“膜-土-薯”复合体与阶梯挖掘铲相互作用时间缩短不能够充分疏松分离,残膜在升运导膜杆弧形脱膜齿处有较大量的滞留,地轮产生滑移,影响残膜进入浮动式气力卷膜装置的及时性与准确性;当地轮转速增加后,卷膜辊速度相继提高,在缠绕过程中对残膜产生撕扯而发生断裂,进而影响残膜回收的连续性与膜片的完整性。因此,有待于后续进一步试验优化。残膜回收过程表明,由于马铃薯大垄双行起垄覆膜种植模式的特殊农艺要求(垄体两侧覆土厚度为30~40 mm,膜上覆土厚度为35~45 mm),掩埋于垄体表面土壤内的黑色地膜保持基本完整,这也是保证浮动式气力卷膜装置工作过程可靠、残膜回收率高的主要原因之一。

4 结论

(1)通过对阶梯挖掘铲、土薯抖动升运装置及浮动式气力卷膜装置重要作业部件进行设计与选型,并完成其关键参数计算确定,研制了马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机,该机能够较好解决田间马铃薯薯块与覆盖地膜同步机械化联合回收的作业难题。

(2)采用所设计的阶梯挖掘铲通过不同的铲体倾角,能够实现将“膜-土-薯”复合体充分挖掘疏松,保证复合体物料后续的二次有效分离;土薯抖动升运装置抖动频率合理,升运速度稳定,可实现“膜-土-薯”复合体的充分分离与输送,并在其后置树脂橡胶减速护栏的配合作用下有效降低联合作业机伤薯率;通过对地轮田间行走产生不滑动的滚动条件进行分析计算,确保浮动式气力卷膜装置工作过程可靠,能够随着“卷膜-卸膜”作业过程对其动态工作参数进行适应与调整,最大限度完成残膜回收。

(3)田间试验表明,马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机作业后残膜回收率为91.6%,明薯率为96.8%,伤薯率为2.3%,田间性能试验指标均达到了国家、行业标准要求,试验结果满足设计要求。

参 考 文 献

- 赵爱琴,魏秀菊,朱明. 基于 Meta-analysis 的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 1-7. ZHAO Aiqin, WEI Xiuju, ZHU Ming. Meta analysis on impact of plastic film on potato yield in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 1-7. (in Chinese)
- 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, 211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151226&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.026
- 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, 211. (in Chinese)
- 3 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对土壤水力参数及土壤结构的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 101 - 106, 140. 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.
- 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, 140. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 马彦, 杨虎德. 甘肃省农田地膜污染及防控措施调查[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 478 - 483.
- MA Yan, YANG Hude. Investigation on pollution caused by mulching plastic film in Gansu Province and the countermeasures[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 478 - 483. (in Chinese)
- 6 王吉奎, 付威, 王卫兵, 等. SMS-1500 型秸秆粉碎与残膜回收机的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 168 - 172.
- WANG Jikui, FU Wei, WANG Weibing, et al. Design of SMS-1500 type straw chopping and plastic film residue collecting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 168 - 172. (in Chinese)
- 7 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]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 94 - 99.
- XIE Jianhua, HOU Shulin, FU Yu, et al. Motion analysis and experiment on spring-tooth mulching plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 94 - 99. (in Chinese)
- 8 李斌, 王吉奎, 胡凯, 等. 残膜回收机顺向脱膜机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 23 - 28.
- LI Bin, WANG Jikui, HU Kai, et al. Analysis and test of forward film removing mechanism for polythene film collector[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 23 - 28. (in Chinese)
- 9 杨丽, 张东兴, 侯书林, 等. 玉米苗期地膜回收机结构参数分析与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 29 - 34.
- YANG Li, ZHANG Dongxing, HOU Shulin, et al. Analysis of structural parameters and experiment of plastic film collector for corn fields during seedling period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 29 - 34. (in Chinese)
- 10 王学农, 史建新, 郭俊先, 等. 悬挂式棉秆粉碎还田搂膜机搂膜机构的设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 135 - 140.
- WANG Xuenong, SHI Jianxin, GUO Junxian, et al. Experimental study and design on film raking mechanism of hanging film raker with cotton-stalk crushing and returning to field[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 135 - 140. (in Chinese)
- 11 吕钊钦, 张磊, 张广玲, 等. 链条导轨式地膜回收机的设计与试验[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)
- 12 李勇, 赵武云, 戴飞, 等. 马铃薯挖掘与残膜回收联合作业机的研制与试验[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2016, 42(1): 102 - 107.
- LI Yong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Development and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film collecting[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2016, 42(1): 102 - 107. (in Chinese)
- 13 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 14 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)
- 15 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 experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 17 - 24. (in Chinese)
- 16 张佳喜, 王学农, 张丽, 等. 农田地膜拉伸性能变化对缠绕式回收的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 41 - 47.
- ZHANG Jiayi, WANG Xuenong, ZHANG Li, et al. Effects of mechanical tensile properties of plastic film on plastic recycling method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 41 - 47. (in Chinese)
- 17 杨丽, 刘佳, 张东兴, 等. 棉花苗期地膜回收机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 73 - 77.
- YANG Li, LIU Jia, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of plastic film collector for cotton fields during seedling period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 73 - 77. (in Chinese)
- 18 李斌. 后置链齿耙式残膜回收机工作机理研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- LI Bin. Research on residual film recycling mechanism of rear chain harrowmachine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese)
- 19 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)
- 20 北京农业工程大学. 农业机械学(上册)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- 21 吴建民, 李辉, 孙伟, 等. 拨指轮式马铃薯挖掘机试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 173 - 177.
- WU Jianmin, LI Hui, SUN Wei, et al. Experiment on poke finger wheel type potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 173 - 177. (in Chinese)
- 22 GB/T 25412—2010 残地膜回收机[S]. 2010.
- 23 NY/T 648—2002 马铃薯收获机质量评价技术规范[S]. 2002.