

分类号: S23
学号: 20222109063

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学 硕士学位论文



滚筒式斜向捡拾残膜回收装置的设计与研究

学位申请人	祝国庆
指导教师	温浩军 研究员 缙海啸 副教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

分类号: S23
学号: 20222109063

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



滚筒式斜向捡拾残膜回收装置的设计与研究

学位申请人	祝国庆
指导教师	温浩军 研究员
	缙海啸 副教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	农机装备工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Design and research of drum type oblique picking and recycling device
for residual film**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Zhu guoqing

(Agricultural machinery and equipment engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wen haojun

May,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 祝国庆 时间： 2025 年 05 月 24 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 祝国庆 时间： 2025 年 05 月 24 日

导师签名： 陶世军 时间： 2025 年 05 月 24 日

摘要

覆膜栽培技术是一种重要的农艺措施，但随着地膜使用量的持续增长，这种残留物的“白色污染”亟待采取有效措施加以治理。机械化回收残膜现已成为解决残膜污染主要手段，但在窄行处因根茬与土壤作用下存在残膜漏捡的情况。本文针对残膜回收机工作过程出现残膜漏捡的情况，在分析残膜漏捡原因的基础上，通过改变捡膜齿排列方式和幅宽密度等方法，设计一款滚筒式斜向捡拾残膜回收装置，实现对窄行处根茬与土壤影响下的漏捡残膜的高频次捡拾，提高残膜回收率。主要研究工作及结论如下：

(1) 对作业前环境进行测定，测得棉花茎秆平均质量分布数为 124.6 g/m^2 ，杂质土壤平均分布数为 546.9 g/m^2 ；测得地膜粘结力的平均面积分布力为 0.69 N/m^2 ，地膜孔隙大小最小值为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ，最大的为 $50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ；对当年残膜样本在 200 mm/min 和 500 mm/min 下进行力学性能拉伸试验，不同速度下最大值均为 3.52 N 。

(2) 通过对在根茬与土壤作用下的残膜漏捡原因分析，提出了提高捡膜齿对漏捡残膜捡拾频次的斜向捡拾（螺旋排列）的设计方案；通过理论分析确定了捡膜齿间距 160 mm ，周向捡膜齿数目 8 个，滚筒上双螺旋排布导程 320 mm ，表现形式为斜向捡拾；通过运动分析确定了装置工作参数范围，机具前进速度 $5\sim 9 \text{ km/h}$ ，捡拾滚筒转速 $50\sim 70 \text{ r/min}$ ，入土深度为 $30\sim 50 \text{ mm}$ ；通过脱膜装置运动过程分析，确定脱膜胶片数目为 6 个；斜向捡拾装置在该结构参数和工作参数下对漏捡残膜的捡拾频次达到 3 次。

(3) 构建残膜-根茬-土壤的离散元模型，运用 EDEM-Adams 联合仿真法分析了工作参数对残膜捡拾影响；采用 Design-Expert 仿真试验设计，选取行进速度、滚筒转速和入土深度为自变量，构建残膜回收率（无边膜）的预测模型。通过数值模拟优化，获得最优参数组合：机具前进速度 6.2 km/h ，捡拾装置转速 65 r/min ，捡膜齿入土深度 41 mm ，此时残膜回收率（无边膜）最优值为 98.96% 。

(4) 进行了样机制作和田间试验，选定残膜回收率为试验指标，使用最优的机具前进速度、捡拾装置转速、捡膜齿入土深度参数进行田间验证试验，试验每组残膜回收率都达到了 90% 以上，测得残膜回收率（无边膜）值为 98.16% ，与仿真实验值误差在 5% 以内，满足设计要求。

关键词：农业机械；残膜回收；表层残膜；斜向捡拾；仿真试验

Abstract

Plastic film mulching technology, as a crucial agronomic practice, has led to significant challenges in residual film contamination with the continuous increase of plastic film usage. While mechanized residual film recovery has become the predominant approach for addressing this "white pollution", existing systems exhibit film leakage phenomena during narrow-row operations due to interactions between root stubble and soil. This study addresses the residual film leakage during the operation of film recovery machinery. Based on analysis of leakage mechanisms, a cylindrical oblique-angle residual film pickup device was designed by modifying pickup teeth arrangement and operational coverage density. The mechanism achieves high-frequency retrieval of residual film leakage under root stubble-soil interactions in narrow-row spacing, thereby improving residual film recovery rate. The main research work and conclusions are as follows:

(1) The pre-harvest environment was measured, and the average distribution of cotton stem mass was 124.6 g/m^2 , and the average distribution of impurity soil was 546.9 g/m^2 ; The average area distribution force of the adhesive force of the film was measured to be 0.69 N/m^2 , and the minimum pore size of the film was $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, with the maximum being $50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$; Mechanical tensile tests were conducted on the residual film samples at 200 mm/min and 500 mm/min , with a maximum value of 3.52 N at different speeds.

(2) Through the analysis of the causes of film missing in the film picking stage under the action of cotton straw and soil, the design scheme and working principle of oblique film picking (spiral arrangement) are proposed to improve the collecting frequency of film missing teeth; Through theoretical analysis, the pitch of film picking teeth is 160 mm , the number of circumferential film picking teeth is 8, and the lead of double helix arrangement on the roller is 320 mm , which is manifested as oblique picking; Through motion analysis, the working parameter range of the device is determined, the forward speed of the machine is $5\sim 9 \text{ km/h}$, the rotating speed of the picking roller is $50\sim 70 \text{ r/min}$, and the depth of the device into the soil is $30\sim 50 \text{ mm}$; Through the motion process analysis of the release device, the number of release film is determined to be 6.

(3) A discrete element model of residual film cotton straw soil was constructed, and the EDEM Adams co-simulation method was used to analyze the influence of working parameters on residual film picking; The Design-Expert response surface method was used to design the simulation experiment, and the travel speed, roller speed and soil depth were selected as independent variables to build the prediction model of the recovery rate of residual film (borderless film). Through numerical simulation optimization, the optimal parameter combination was determined as follows: implement forward velocity of 6.2 km/h , pickup device angular velocity of 6.81 rad/s (65 r/min), and tool penetration depth of 41 mm . Under these conditions, the residual film recovery rate (excluding edge films) achieved a maximum value of 98.96% . Under the structure

parameters and working parameters, the inclined picking device can pick up the missing film for 3 times.

(4) Prototype production and field experiments were conducted, with residual film recovery rate and surface residual film recovery rate selected as experimental indicators. The optimal machine forward speed, picking drum speed, and depth of picking teeth into the soil were selected for field verification experiments. The experimental value of surface residual film recovery rate (edgeless film) in the field experiment was 98.16%, with an error of less than 5% compared to the simulation theoretical value. The residual film recovery rate of each group in the experiment reached over 90%, meeting the design requirements.

Key words: Agricultural machinery; Recovery of residual film; Surface residual film; Pick up obliquely; Simulation test

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第1章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状及分析.....	2
1.2.1 国外残膜回收研究现状.....	2
1.2.2 国内残膜回收研究现状.....	4
1.3 研究目标及内容.....	7
1.3.1 研究目标.....	7
1.3.2 研究内容.....	7
1.4 研究方法及技术路线.....	8
1.4.1 研究方法.....	8
1.4.2 技术路线.....	9
第2章 作业环境测定和残膜力学特性测定.....	10
2.1 作业前环境测定.....	10
2.1.1 膜面杂质量确定.....	10
2.1.2 地膜与表层土壤粘结力测定.....	12
2.1.3 棉花窄行地膜孔隙统计.....	12
2.2 不同速度下残膜拉伸性能试验.....	14
2.3 本章小结.....	16
第3章 滚筒式斜向捡拾残膜回收装置设计与分析.....	17
3.1 斜向捡拾残膜回收装置方案确定.....	17
3.1.1 漏捡原因分析.....	17
3.1.2 残膜回收装置的结构及工作原理.....	22
3.2 斜向捡拾装置关键部件结构设计.....	23
3.2.1 斜向捡拾装置结构组成.....	23
3.2.2 斜向捡拾装置工作过程.....	24
3.2.3 斜向捡拾下捡膜齿排列配置.....	24
3.3 滚筒式斜向捡拾机构运动学分析.....	27
3.3.1 斜向捡拾装置运动轨迹分析.....	27

3.3.2	斜向捡拾下残膜不漏捡分析	30
3.4	脱膜装置设计与分析	35
3.4.1	脱膜装置组成与工作原理	35
3.4.2	脱膜运动过程与分析	36
3.5	本章小结	37
第 4 章	基于 DEM-MBD 的斜向捡拾装置联合仿真试验研究	39
4.1	仿真模型建立与分析	39
4.1.1	联合仿真实论介绍	39
4.1.2	Adams 模型建立	39
4.1.3	EDEM 模型建立	41
4.1.4	仿真模型验证	45
4.1.5	斜向捡拾残膜效果分析	46
4.2	捡拾装置仿真试验方案	48
4.2.1	仿真试验方法	48
4.2.2	试验指标	48
4.2.3	试验因素确定	49
4.3	单因素仿真试验结果与分析	49
4.3.1	机具前进速度对残膜回收率的影响	49
4.3.2	捡拾装置转速对残膜回收率的影响	50
4.3.3	捡膜齿入土深度对残膜回收率影响	51
4.4	多因素仿真试验结果与分析	51
4.4.1	试验因素和水平	51
4.4.2	试验方案与结果	52
4.4.3	试验结果分析及优化	53
4.5	本章小结	56
第 5 章	田间试验验证	57
5.1	残膜回收机样机及试验条件	57
5.1.1	样机制作	57
5.1.2	试验条件	57
5.2	试验方案设计	58
5.2.1	试验因素的选择	58
5.2.2	试验指标的选择	58
5.3	试验结果及分析	59
5.4	本章小结	60

第 6 章 结论与展望.....	61
6.1 结论.....	61
6.2 展望.....	62
参考文献.....	63
致谢.....	68
作者简介.....	69
导师评阅表.....	70

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

覆膜农艺作为一种重要的栽培措施，在现代农业生产体系中展现出显著的多功能性效益。该技术通过建立地表物理屏障，有效改善了农田微环境，其主要功能体现在以下几个方面：首先，能够提升土壤温度，创造有利于作物生长的热环境；其次，可显著减少土壤水分蒸发，增强土壤保水能力；再次，对田间杂草具有明显的抑制作用；此外，该技术还能优化水分利用效率，促进作物产量提升。这项技术已成为现代农业发展的重要技术支撑^[1-3]。20世纪70年代，覆膜栽培技术被引入中国农业体系，并迅速在棉花、玉米和花生等主要作物种植中得到广泛应用^[4]。截止2021年，中国的地膜使用量约占全球总量的90%，覆盖面积和年使用量均位居世界第一^[5,6]。覆膜栽培技术的空间应用已由北方旱作区延伸至南方高海拔冷凉带，其覆盖对象由高附加值农产品拓展至粮食作物主体^[7]。

棉花作为重要的经济作物和战略物资，在我国农业生产中占据关键地位。根据国家统计局最新统计数据显示，2023年全国棉花种植面积约为236.93万公顷^[8]。新疆自然条件优越，极其适合种植棉花，棉花的种植面积在全国中的比例在不断提升，截止2023年，新疆棉花占全国种植面积的85.0%，如图1-1所示。新疆棉花种植采用地膜覆盖技术，然而地膜覆盖技术在推动新疆棉区产业化进程的同时，也使其成为典型农膜污染区，据统计截止2020年该区域棉田残膜量已达200 kg/hm²^[9]。

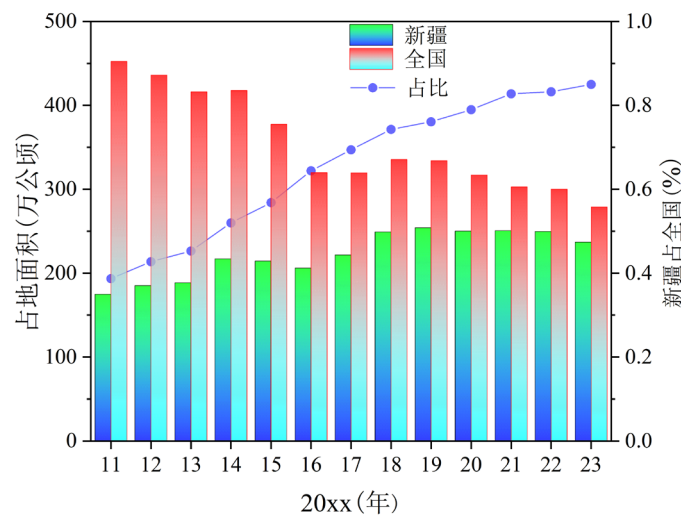


图 1-1 棉花种植面积

Fig. 1-1 Cotton planting area

农膜残留物在耕作层中的累积将显著改变土壤三相结构，导致水肥输导路径受阻（孔隙度降低），进而引发作物根系发育障碍。据研究，此类污染可使耕层生物活性抑制，直接影响农田生态系统服务功能^[10]。相关试验证明：每公顷棉田残留地膜 200 kg 时，其饱和导水率减少为正常情况下的 12%^[11]。针对农田残膜污染，我国构建了“标准+法规”治理体系：GB 13735-2017 规定农膜厚度大于等于 0.01 mm，2020 年《农膜管理规范》确立政府主导的多元共治机制（农业农村部令 2020 年第 4 号），标志着污染防治已纳入农业绿色发展优先议程^[12,13]。

当前农膜污染防治主要采用三种技术模式：生物降解材料、传统人工捡拾和机械化回收。生物可降解地膜（BDM）作为一种环境友好型替代产品，具有田间原位降解的特性，可有效降低回收成本。然而，与传统的聚乙烯地膜相比，BDM 面临诸多挑战：首先，其生产工艺复杂，导致生产成本较高；其次，降解产物对土壤微生物多样性和群落结构的影响仍存在学术争议；此外，机械性能和耐久性仍需改进。这些因素导致 BDM 的市场渗透率极低，远低于预期水平。传统人工捡拾模式依赖镢耙等简易工具，通过多步骤操作（包括地膜收集、垄间清理等）完成回收作业。然而，这种劳动密集型方法存在以下显著缺陷：作业强度远超机械化作业，单位面积作业成本高，作业效率低下，且难以有效回收耕作层和边缘区域的残留地膜。这些局限性严重制约了人工回收模式的应用前景^[14]。

我国主要覆膜作物区现阶段以机械回收为主。以新疆为例，兵团地区已实现机械化回收，自治区也达到了 95% 的地区实现机械化回收^[15]。机械化残膜回收装置通过与秸秆处理装备的集成创新，实现了农业废弃物协同处理。该技术模式较传统方式提升了作业效率，显著降低了农田残膜的污染风险^[16,17]。机械化回收模式凭借其显著的作业效能优势、人力成本节约及经济性特征，已成为当前农田残膜治理的主流技术路径，但机械回收过程中仍然存在地膜漏捡的状况，其主要存在于棉田窄行处和边行处，因此致使残膜回收率降低。本文拟对残膜回收机的回收装置进行研究，为解决残膜窄行处的漏捡提供理论依据。

1.2 国内外研究现状及分析

1.2.1 国外残膜回收研究现状

国际农业实践中普遍采用厚度为 20~50 μm 的加厚型农用薄膜。这种规格的薄膜具有显著的性能优势：首先，抗老化指数比薄型膜高，田间使用寿命长；其次，力学性能显著提升。因此国外一些发达国家针对残膜回收问题的进行研究，机型主要以卷收式残膜回收机为主^[18]，如图 1-2 所示。

20世纪90年代中期美国农业工程领域学者 Brooks 及其团队开发了一套农田残膜自动化收集装置。该设备采用卷收装置对地表塑料残留物进行拉卷回收,结合多级振动筛分,在传送装置中实现聚合物材料与土壤基质的高效分离。经净化的残膜随后进入旋转式压缩仓,通过液压控制装置完成标准化打包处理,从而实现农田地膜的全程机械化治理^[19]。

澳大利亚农业工程学者 Rocca 团队开发了一套地膜收集装置。该设备采用双向聚拢机构将地表残膜集中,随后通过卷收装置将残膜拉起,并借助多级传送带将其输送至旋转式卷绕装置。最终,该设备实现残膜的标准化成卷回收,显著提升了农田地膜污染治理效率^[20]。1989年,Chrysler 研发了一套农田残膜收集装置,并深入探讨了输送带速度与机械行进速度同步匹配的工程学原理。该设备在地膜输送过程中,通过侧向振动分离机构实现土壤颗粒及其他异质物的有效去除,随后利用重力作用使净化后的残膜沿斜面滑入收集容器^[21]。

1995年,Lavo 研发了一套创新型卷筒式残膜回收装置。该装置采用卷收机构完成残膜的收集作业,并通过刷子实现地膜表面土壤颗粒的高效清除。这种设计有效解决了传统回收装置存在的土壤附着问题,为后续机械化回收技术的发展奠定了基础^[22]。1993年,美国农业工程专家 Sawyer 团队成功研制了一套滴灌系统与塑料薄膜协同回收装置。该设备采用铲式松膜机构实现地表薄膜的初步松动,随后利用地膜自身张力完成土壤剥离过程。该装置通过液压驱动系统分别控制地膜和滴灌带的卷绕作业,实现两种农业塑料制品的同步回收与分类收集。这种创新设计不仅提高了回收效率,还实现了不同类型农业废弃物的有效分离^[23]。

在欧洲农业工程实践中,以法国和英国为代表的地区普遍采用牵引式卷绕装置进行农田残膜治理。该技术体系依托拖拉机动力输出,通过铲式松膜机构实现地表薄膜的初步分离。操作人员需手动将地膜起始端固定于旋转卷绕轴上,随后由地轮传动系统提供持续动力,完成残膜的机械化收集过程。这种半自动化回收模式在保证作业效率的同时,也降低了设备制造成本^[24-26]。

国际农业工程界正积极推进生物可降解材料的研发与应用,旨在通过环境友好型薄膜的自分解特性解决农田塑料污染问题^[27]。我国科研机构在该领域也开展了系统性研究,如新疆兵团第八师开展的示范项目显示,尽管技术创新取得突破,但受限于生产成本与市场价格的三重压力,目前主要局限于小规模试验田应用。从技术经济性角度评估,现有可降解地膜的成本效益比尚未达到大规模商业化推广的阈值,与我国现代农业发展阶段存在一定适配性差距。



图 1-2 卷收式残膜回收机

Fig. 1-2 Coiling-type post-harvest plastic mulch recovery apparatus

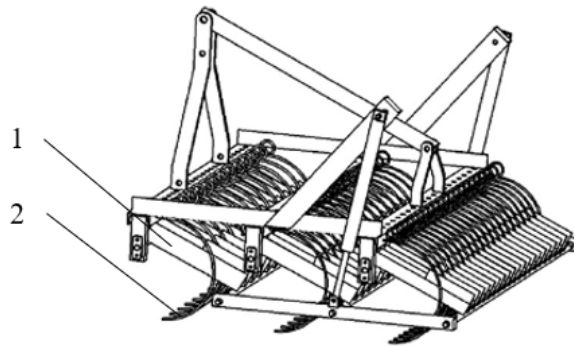
国外学术界关于农田残膜回收装备的研究主要聚焦于松膜机构和卷绕装置两大核心组件。研究重点多集中于机械行进速度与卷膜线速度的动力学匹配优化,以实现稳定回收效果。值得注意的是,欧美地区普遍采用厚度规格为 0.012~0.015 mm 的加厚型农用薄膜^[28],这与我国普遍使用的地膜厚度 0.008~0.01 mm 存在显著差异,这种材料特性差异直接影响回收设备的设计参数与作业性能,因此国际现有回收技术对我国农膜污染治理的参考价值存在显著局限性。

1.2.2 国内残膜回收研究现状

为了应对残膜污染带来的挑战,据统计我国农业工程领域的学者研发了几十种残膜回收机械^[29],为农田生态环境保护提供了重要的技术支撑。根据回收时期的不同可划分为:播前残膜回收机、苗期残膜回收机和秋后残膜回收机^[30];在新疆棉区残膜污染治理技术中,秋后回收装备占据主导地位^[31],这种季节性集中回收模式有效契合了当地棉花种植制度与气候特征,成为保障农田生态安全的关键技术手段。秋后残膜回收机中根据收膜部件的不同回收机械主要为弹齿式残膜回收机、齿链式残膜回收机以及滚筒式残膜回收机^[32]。

(1) 弹齿式残膜回收机

如图 1-3 所示,为国内典型的弹齿式残膜回收装备,该回收装备主要适用于两个农事节点:春播前耕作层残膜治理和秋收后地表残膜清理。弹齿式残膜回收机拥有结构简单、作业阻力小、可靠性好、造价低等优点。结构主要由弹齿与刮膜板组成,工作时拖拉机带动装置,通过弹齿将残膜搂集在一起,随后再通过液压装置将弹齿上的残膜通过刮膜板脱落到地上,完成残膜的捡拾。关于弹齿式回收装置的性能优化研究,新疆农业大学靳伟团队和石河子大学研究人员通过分析发现,作业效能主要受四个关键参数调控:机械行进速度、弹齿转速及入土深度,这些研究成果为提升残膜回收效率提供了重要的理论依据^[33-35]。



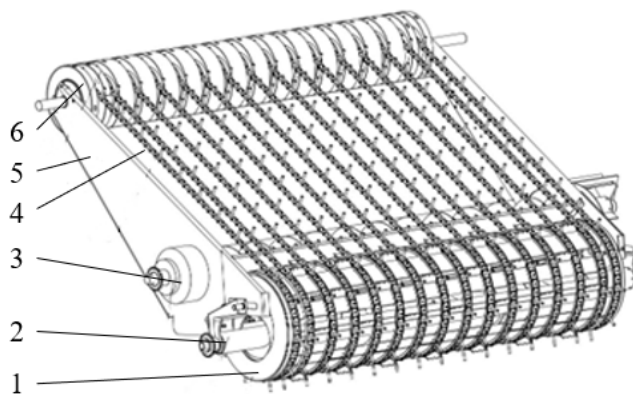
1.刮膜板 2.弹齿

图 1-3 弹齿式残膜回收机

Fig. 1-3 Spring-tooth plastic mulch residue recovery machine

(2) 齿链式残膜回收机

石河子大学院士团队设计了一种随动式残膜回收机，属于齿链式残膜回收机的一种。其主要包括支撑框架、输送搅龙、抓取组件、传输链条和脱膜轮等核心部件，如图 1-4 所示。其工作原理基于链传动系统的连续运动，通过自制捡膜齿穿透地膜并利用材料力学特性实现大面积收集。脱膜轮机构随后完成薄膜与捡膜齿的机械分离，并将回收物输送至收集容器。研究表明，该设备的回收效率与地膜材料特性参数及表面附着物质有关 [32,36,37]。当该机器在残膜性能较低和土壤较重的情况下，残膜易被扯断，造成残膜的漏捡。



1.捡拾滚筒 2.二级输送搅龙 3.一级输送搅龙 4.捡拾链 5.支架 6.脱膜轮

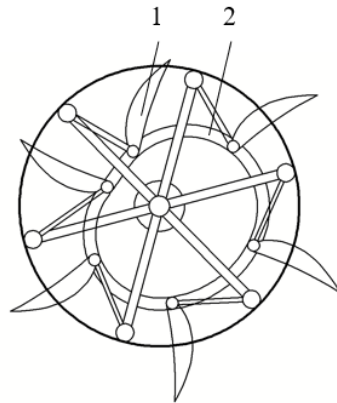
图 1-4 随动式残膜回收机捡拾机构

Fig. 1-4 Pickup mechanism of subsequent plastic mulch collector

(3) 滚筒式残膜回收机

石河子大学、新疆农垦科学院等研制了多种滚筒式残膜回收机，如图 1-5 所示。该设备采用逆向旋转滚筒与偏心机构协同作用的工作机制。当挑膜机构运动至滚筒下部时，一组弹齿完成出土动作时，后续弹齿应同步切入耕作层完成残膜抓取 [38,39]；旋转至上部位置时，捡膜齿收缩并由输送装置将回收物转移至下一处理装置。独特的滚筒运动学设

计确保了残膜与滚筒接触面无相对滑动，有效降低了堵塞和残膜断裂等技术问题^[40-43]。

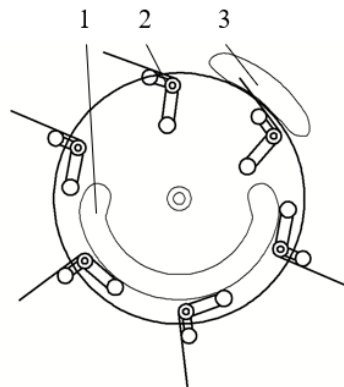


1.捡膜齿 2.凸轮导轨

图 1-5 伸缩杆式残膜回收机捡拾机构

Fig. 1-5 Retractable pole type residual film recycling machine picking mechanism

因滚筒式残膜回收机的凸轮不易更换，新疆农业大学张学军^[44,45]等设计一款易更换的双滚筒式残膜回收机，如图 1-6 所示。该拾取装置采用双向凸轮机构设计，其工作过程可分为三个阶段：首先，在正向拾取阶段，弹齿组件在正向凸轮导轨的约束作用下，驱动双摇臂机构保持恒定角速度运动，从而完成地表残留塑料薄膜的拾取作业；随后进入过渡阶段，随着正向凸轮约束的解除，弹齿组件在重力矩作用下实现自主翻转；最后，在反向卸膜阶段，反向凸轮导轨为双摇臂提供运动导向，使其与脱膜滚筒形成协同作业机制，高效完成残膜卸除任务。



1.正向凸轮导轨 2. 双拐臂机构 3.反向凸轮导轨

图 1-6 双滚筒结构示意图

Fig. 1-6 Dual-drum structural schematic diagram

滚筒式残膜回收机的残膜回收率较高，不过残膜捡膜齿在捡拾过程中，地膜在根茬和土壤的干扰下被撕裂易出现漏检的现象。

目前国内残膜回收机对于回收装置的研究聚焦于漏膜现象的研究：是对捡膜齿交错排列和捡膜齿前进方向运动轨迹重合的研究，是考虑的整膜的回收；但对窄行处棉杆与