



李自皓,罗海峰,王修善,等.卧式油菜割晒机横向差速输送装置设计与优化[J].江西农业大学学报,2025,47(2):486-504.
LI Z H,LUO H F,WANG X S,et al.Design and optimization of transverse differential speed conveying device for horizontal rapeseed windrower[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(2):486-504.

卧式油菜割晒机横向差速输送装置设计与优化

李自皓¹,罗海峰^{1,2,3*},王修善¹,李园¹,张晟¹,童学权¹

(1.湖南农业大学机电工程学院,湖南长沙410128;2.湖南省现代农业装备工程技术研究中心,湖南长沙410128;3.智能农机装备湖南省重点实验室,湖南长沙410128)

摘要:【目的】油菜分段收获包括割晒作业和捡拾脱粒2个阶段,具有损失率低、适收期长、油菜籽品质好等优点;为解决卧式油菜割晒机割晒作业排禾过程中茎秆与铺放台分离不彻底、易拥堵,以及铺放过程中茎秆铺放角度差异大等问题。根据油菜的种植方式、生物特性以及割晒要求,采用差速链齿式输送方式设计一种卧式油菜割晒机横向差速输送装置。【方法】该卧式油菜割晒机采用履带式联合收割机行走系统作为动力底盘,横向差速输送装置悬挂于联合收割机输送槽上,能一次完成切割、输送、铺放等工序;对差速输送链、拨齿、仿形铺放台等关键部件进行结构设计,实现茎秆与铺放台有效分离和稳定放铺;对油菜横向输送、侧向抛离等过程进行运动学分析,建立铺放过程数学模型,明确影响油菜茎秆铺放角的关键因素。【结果】基于EDEM构建了油菜茎秆割晒作业过程仿真模型,以拨齿速比、铺放台倾角、前进速度为因素,以茎秆铺放角为评价指标,开展了Box-Behnken仿真试验,以茎秆铺放角最小为目标构建了优化目标函数,并运用Design-Expert软件求解得到最佳参数组合为:拨齿速比1.12、铺放台角度22.38°、前进速度1.09m/s,最优铺放角为9.54°。【结论】在最优参数组合下,油菜茎秆平均铺放角为10.82°,与理论值的相对误差为11.82%,平均铺放宽度和平均铺放厚度为810 mm、649 mm,铺放宽度变异系数和铺放厚度变异系数为8.2%、9.7%,割晒作业过程顺畅、无堵塞,可满足实际收获要求。该研究可为卧式油菜割晒机输送装置结构与优化提供参考。

关键词:农业机械;油菜;割晒机;分段收获;差速输送;EDEM

中图分类号:S225.2

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2025)02-0486-19

CSTR:32399.14.aauj.2025043



Design and optimization of transverse differential speed conveying device for horizontal rapeseed windrower

LI Zihao¹, LUO Haifeng^{1,2,3*}, WANG Xiushan¹, LI Yuan¹,
ZHANG Sheng¹, TONG Xuequan¹

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Modern Agricultural Equipment Engineering Technology Research Center of Hunan Province, Changsha, Changsha, 410128, China; 3. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment of Hunan Province, Changsha 410128, China)

收稿日期:2024-11-26 修回日期:2025-01-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2300103)和湖南省农业农村厅项目(湘财农指202045)

Project supported by the National Key Research and Development Program Projects(2022YFD2300103)and Project of Department of Agriculture and Rural Affairs of Hunan Province (Hunan Provincial Finance Department's Agricultural Guidance Fund 202045)

作者简介:李自皓,硕士生,orcid.org/0009-0000-2224-3802,997555711@qq.com;*通信作者:罗海峰,教授,博士,主要从事农业机械研究,orcid.org/0009-0002-7976-6289,luohaifeng@hunau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [Objective] Segmented harvesting of rapeseed includes two stages: windrowing and pickup threshing. This method has advantages such as low loss rate, long period of suitable harvesting, and high-quality rapeseed. To address the challenges of stem detachment from the spreading platform, susceptibility to clogging, and significant variations in stem laying angles during the operation of a horizontal rape windrower machine, Based on the planting patterns, biological characteristics of rapeseed and the requirements for windrowing, a transverse differential speed conveying device for horizontal rapeseed windrower was designed by adopting the differential speed chain-tooth conveying method. [Method] The horizontal rapeseed windrower adopts a tracked combine harvester's traveling system as its power chassis. The transverse differential conveying device is attached to the conveyor trough of the combine harvester, enabling the machine to complete cutting, conveying, and laying operations in a single pass. This design employs a differential gear conveying mechanism. Key components, including the differential speed conveying chain, the gear, and the conforming laying platform, have been meticulously structured to ensure efficient stem separation from the platform and to maintain a consistent laying pattern. A thorough kinematic analysis has been performed on the traverse processes of cutting, horizontal conveyance, and lateral throwing of rape stems. This analysis has led to the development of a mathematical model for the laying process, and the key factors influencing the laying angle of rapeseed stalks were identified. [Result] A simulation model of the rapeseed stem windrowing process was built based on EDEM. Taking the tine speed ratio, platform inclination angle, and forward speed as factors and the stem laying angle as the evaluation index, a Box-Behnken simulation experiment was conducted. An optimization objective function was established with the goal of minimizing the stem laying angle. Using Design-Expert software, the optimal parameter combination was determined as follows: tine speed ratio of 1.12, platform inclination angle of 22.38° , and forward speed of 1.09 m/s, resulting in an optimal laying angle of 9.54° . [Conclusion] The results of field validation tests show that the average laying angle of rapeseed stems is 10.82° , with a relative error of 11.82% compared with the theoretical value. The average laying width and average laying thickness are 810 mm and 649 mm, respectively. The variation coefficients for laying width and laying thickness are 8.2% and 9.7%, respectively. The windrowing operation process is smooth without blockage, which can meet the actual harvesting requirements. This research provides a reference for the structural design and optimization of the conveying device of horizontal rapeseed windrowers.

Keywords: agricultural machinery; rape; windrower; segmented harvest; differential speed conveying; EDEM

【研究意义】油菜机械化收获是油菜高质量生产最重要的环节之一,对提高油菜生产效益和综合生产力、保障我国食用油安全等有显著影响^[1-3]。油菜机械化收获分为联合收获和分段收获2种^[4-5],其中联合收获是采用一次性作业完成油菜的切割、输送、脱粒和清选等工序,而分段收获主要是通过割晒机将油菜割倒,经过晾晒后熟后,再由捡拾机对其进行捡拾、脱粒和清选等工序。由于油菜植株高大、分支较多、成熟期不一致等生物特性,导致在联合收获过程中损失严重,而分段收获虽然需要2次下田作业,但具有收获过程损失率低、适收期长、油菜籽品质好等优点^[6-9]。近年来,随着国家对作物收获过程损失的进一步重视^[10-11],油菜分段收获的优势逐渐凸显,但在分段收获割晒作业过程中仍存在茎秆铺放角度差异大、茎秆与割台分离不彻底等问题,制约着油菜割晒机的发展^[12]。【前人研究】为了解决以上问题,国内外学者主要通过设计割晒机茎秆输送装置、分析油菜铺放角影响因素、优化割晒机作业参数等方面开展研究。在设计割晒机茎秆输送装置方面:中间分禾与导向铺放组合式^[13]、输送带与立辊组合式^[14]、倾斜输送带式^[15]等油菜割晒输送装置通过优化油菜茎秆输送方式提高了油菜铺放质量;在分析油菜铺放角影响因素方面:石增祥等^[16]通过理论研究分析了油菜在割晒机上输送过程和排禾铺放过程的运动情况、王修善等^[17]分析了油菜割晒机稳定作业条件、万星宇等^[18]结合油菜栽培农艺开展了油菜植株铺放过程分析,明确了影响油菜铺放质量的植株参数、割晒机技术参数与栽培农艺要求;在优化割晒机作业参数方

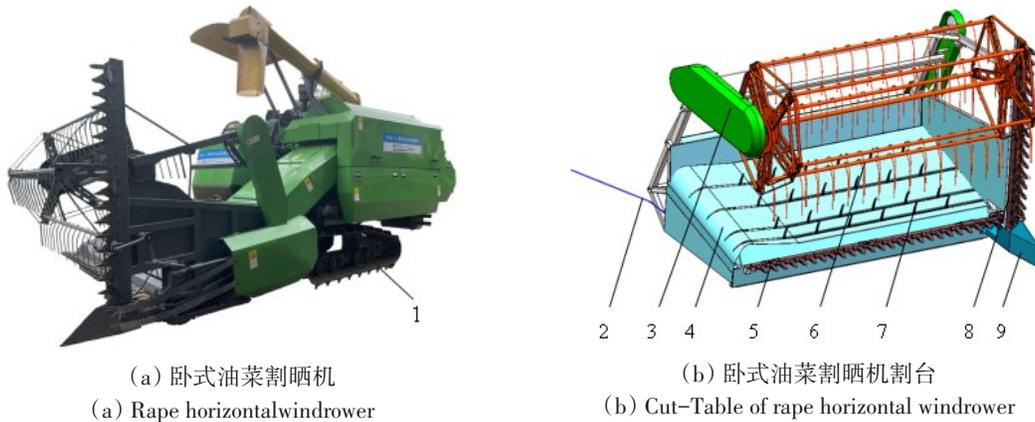
面:文献[19-21]采用 ANSYS、ADAMS 等仿真软件构建了油菜割晒作业过程仿真模型,优化并确定了割晒机最优作业参数。

【本研究切入点】目前,由于田间作业环境复杂、油菜植株易倒伏等原因,油菜输送过程拥堵、铺放角度大等问题依旧未能完全解决。【拟解决的关键问题】研究提出一种卧式油菜割晒机横向差速输送装置,对差速传动系统、拨齿、仿形铺放台等进行具体结构设计与优化,并对油菜茎秆切割放倒、横向输送、侧向抛离等过程进行分析,建立铺放过程数学模型,分析影响铺放作业效果的直接和间接因素;基于 EDEM 构建单株油菜茎秆-横向差速输送装置仿真模型,通过仿真优化试验,寻求割晒机最优作业参数,并通过仿真验证试验和田间验证试验验证油菜割晒机作业效果。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

结合南方油菜种植地区土壤特性及油菜割晒作业要求,卧式油菜割晒机采用履带式联合收割机行走系统作为动力底盘,将割台挂接于联合收割机输送槽上,如图 1 所示。卧式油菜割晒机割台主要由分禾筋、保护罩、铺放台、横割刀、拨禾轮、横向差速输送装置、竖割刀、分禾器等组成。



1:动力底盘;2:分禾筋;3:保护罩;4:铺放台;5:横割刀;6:拨禾轮;7:横向差速输送装置;8:竖割刀;9:分禾器。
 1: Power chassis; 2: Divider tendon; 3: Protective cover; 4: Laying platform; 5: Horizontal cutter; 6: Reel; 7: Horizontal differential convey device; 8: Vertical cutter; 9: Divider.

图 1 卧式油菜割晒机结构示意图
 Fig.1 Structure schematic of rape horizontal windrower

1.2 工作原理及主要参数

卧式油菜割晒机采用横向输送、侧边铺放、茬上晾晒的割晒工艺,在实现有序铺放的基础上,达到首尾搭接的效果,利于后期捡拾脱粒。田间作业时,油菜植株先由分禾器进行被动分禾,再经竖割刀切断相互交错的分枝进行主动分禾;分禾后油菜植株在拨禾轮的作用下,向割台方向倾斜,在接触到横割刀时被切断;切断后的油菜在自身重力的作用下倒向铺放台,经横向差速输送装置输送到割台排禾端抛出,有序铺放在机具侧边留茬上,割台主要参数如表 1 所示。

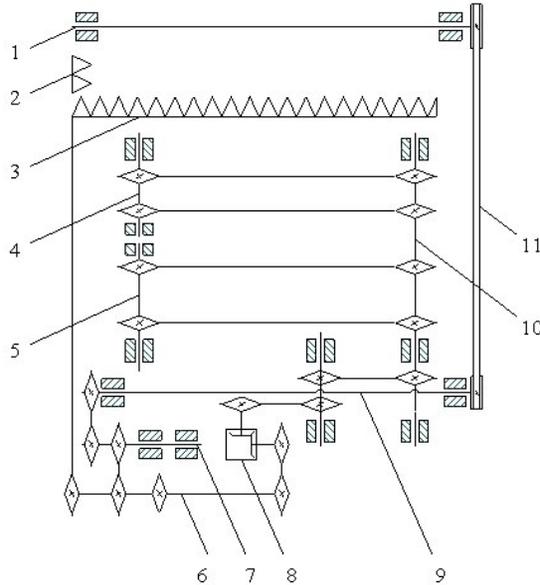
表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数 Parameters	值 Values
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm) Machine size(length×width×width)	1 750×2 350×1 900
整机质量/kg Total machine mass	800
行走系统动力/kW Locomotion system power	55.7
割幅/mm Cutting width	2 200
作业速度/(m·s ⁻¹) Operating speed	0.8~1.4
拨齿速比 Gear ratio	1~1.5
铺放台倾角/(°) Tilting angle of laying platform	10~25
纯工作时间生产率/(hm ² ·h ⁻¹) Pure working time productivity	0.79

1.3 工作原理

卧式油菜割晒机割台传动系统如图 2 所示。工作时,动力从动力输入轴分别传递到过桥 I 轴、变速箱、横割刀与竖割刀,再由过桥 I 轴将动力传递到过桥 II 轴,使得拨禾轮皮带转动带动拨禾轮旋转;此外变速箱将动力传递到主动轴,带动从动 I 轴、从动 II 轴转动。



1: 拨禾轮轴; 2: 竖割刀; 3: 横割刀; 4: 从动 I 轴; 5: 从动 II 轴; 6: 动力输入轴; 7: 过桥 I 轴; 8: 变速箱; 9: 过桥 II 轴; 10: 主动轴; 11: 拨禾轮皮带。

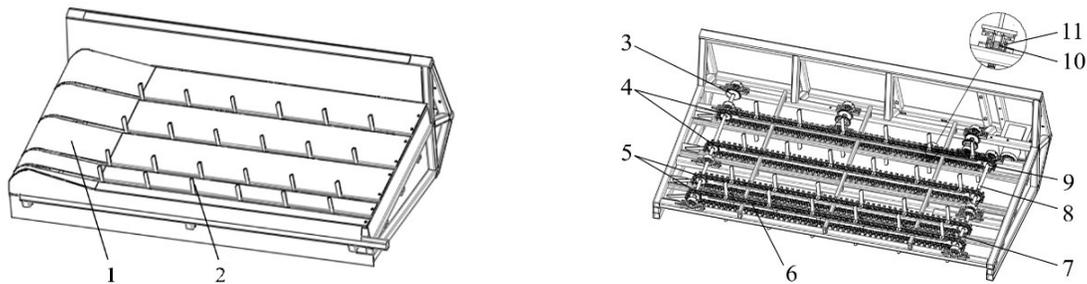
1: Reel shaft; 2: Vertical cutter; 3: Horizontal cutter; 4: Driven shaft I; 5: Driven shaft II; 6: Power input shaft; 7: Bridge shaft I; 8: Transmission; 9: Bridge shaft II; 10: Drive shaft; 11: Reel belt.

图 2 传动系统示意

Fig.2 Transmission system diagram

2 横向差速输送装置结构设计与分析

横向差速输送装置是实现油菜茎秆稳定输送、均匀铺放的关键部件,由主动轴、主动链轮、分段式从动轴、从动链轮、输送链条、拨齿等组成,通过采用不同齿数主动链轮,实现拨齿的差速运动,如图 3 所示。结合油菜割晒作业的农艺要求与割晒机结构参数,主、从动轴直径设计为 20 mm,输送链条型号为 10A 双



(a) 差速输送系统外部图

(a) External diagram of the horizontal differential conveying device

(b) 差速输送系统内部图

(b) Internal diagram of the horizontal differential conveying device

1: 铺放台; 2: 拨齿; 3: 主动轴; 4: 主动链轮 I; 5: 主动链轮 II; 6: 输送链条; 7: 从动 I 轴; 8: 从动 II 轴; 9: 从动链轮; 10: 键; 11: U 型槽。

1: Laying platform; 2: Gear; 3: Drive shaft; 4: Driving sprocket I; 5: Driving sprocket II; 6: Conveyor chain; 7: Driven shaft I; 8: Driven shaft II; 9: Driven sprocket; 10: Key; 11: U-shaped groove.

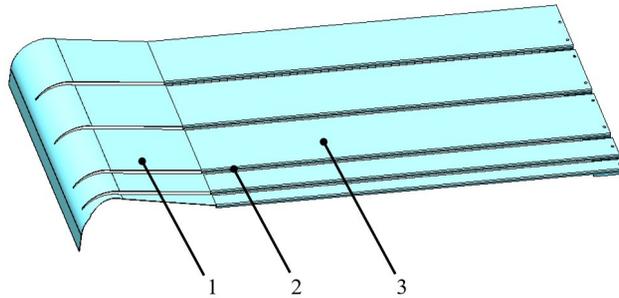
图 3 横向差速输送装置结构示意图

Fig.3 Structural diagram of horizontal differential conveying device

耳式链条,有效输送长度为 2 200 mm。输送链条下装有 U 型槽内键式链条托轨,与输送链条相互配合,可防止输送链条偏移,同时保持拨齿伸出割台高度一致。为提高横向差速输送装置对油菜植株的输送能力,根据油菜植株的物理特性及油菜种植的农艺要求,采用四排输送链齿设计,每排安装 13 个拨齿,间距 254 mm,共 52 个拨齿。

2.1 仿形铺放台结构设计

仿形铺放台一方面是对倒向输送装置的油菜植株起到支撑作用;另一方面是防止拨齿把油菜植株带入铺放台内造成堵塞,其三维结构如图 4 所示。



1:斜突起;2:拨齿间隙;3:水平铺放台。

1:Gear clearance;2:Oblique protrusion;3:Horizontal laying platform.

图 4 仿形铺放台三维结构

Fig.4 Three-dimensional structure of the copy laying table

仿形铺放台结构包括排禾端斜突起、拨齿间隙和水平铺放台。当拨齿运动到仿形铺放台上表面时,拨齿通过间隙伸出对油菜茎秆进行推送;当拨齿运动到割晒机排禾端时,拨齿逐渐收入仿形铺放台内部,起到提前卸力作用,减少拨齿回转时对油菜茎秆回带。

油菜茎秆在铺放台上的输送过程主要分为 3 个阶段,如图 5 所示:a 为拨齿做横向运动且油菜茎秆在水平铺放台上时的推送过程、b 为拨齿做横向运动且油菜茎秆在铺放台斜突起上时的推送过程、c 为拨齿做回转运动时对油菜茎秆进行抛送的过程。

当油菜茎秆输送到铺放台斜突起上时,对油菜茎秆进行受力分析,如图 6 所示,此时茎秆受到拨齿对茎秆的推力 F ,铺放台对茎秆的支持力 N ,与拨齿接触并相对运动产生的摩擦力 f_1 ,与铺放台接触并相对运动产生的摩擦力 f_2 ,以及自身重力 mg ,图中 v_b 为拨齿运动速度。

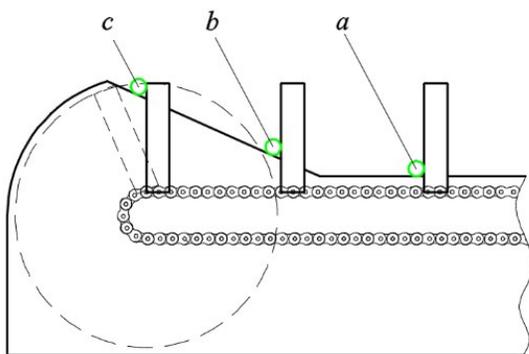


图 5 油菜茎秆运动状态示意

Fig.5 Schematic diagram of rapeseed stem movement status

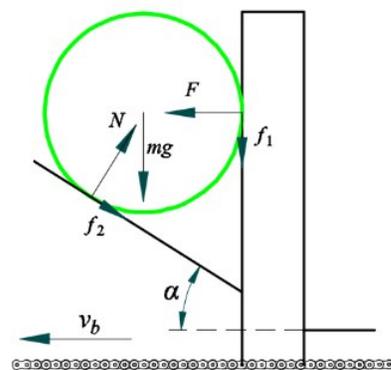


图 6 斜突起上茎秆受力分析

Fig.6 Diagram of stress analysis on rapeseed stem during throwing process

由图 6 可知,铺放台排禾端斜突起的角度是铺放台设计的关键,角度过大会导致茎秆无法正常输送、出现卡死的情况;角度过小将影响油菜抛出铺放台时的速度方向,降低油菜茎秆抛出距离,影响油菜铺放质量。因此,在油菜茎秆在铺放台上输送的过程中,若油菜茎秆能够在铺放台斜突起上顺利输送,则表明设计的铺放台能够满足输送要求。

铺放台取不同角度时,对油菜茎秆的受力情况进行分析,如图 7 所示,拨齿对油菜茎秆作用的力为 F 和 f_1 ,合力为 F_p ;铺放台对油菜茎秆作用的力为 N 和 f_2 ,合力为 F_b ,其二者的合力方向是判断油菜茎秆能否稳定输送的依据。

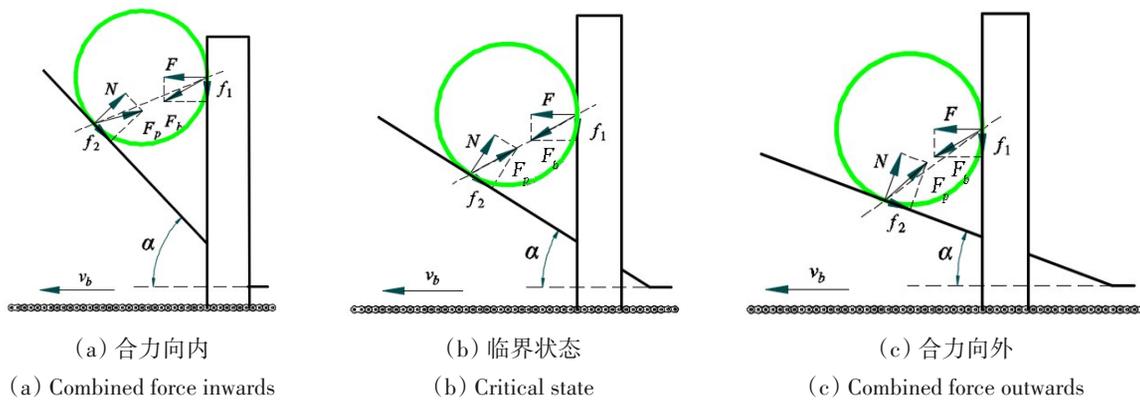


图 7 斜突起不同角度油菜茎秆受力分析

Fig.7 Analysis of force on rapeseed stems with oblique protrusions at different angles

图 7(a)为铺放台斜突起角度过大,导致拨齿与铺放台对油菜茎秆的合力沿作用点连线向内,此时油菜茎秆无法进行正常输送;图 7(b)为临界状态,拨齿与铺放台对油菜茎秆的合力与作用点连线重合,油菜茎秆恰好可以正常输送;图 7(c)为铺放台斜突起角度过小,此时拨齿与铺放台对油菜茎秆的合力沿作用点连线向外,油菜茎秆可以正常输送,但由于铺放台角度过小的问题,会影响油菜茎秆抛送距离。

当处于临界状态时,铺放台斜突起角度为:

$$\alpha = 90^\circ - 2\arctan\mu \tag{1}$$

式(1)中, μ 为油菜植株与钢板之间的动摩擦因数,实测为 0.57。

根据式(1)可得, α 为 30.64° ,即铺放台斜突起角度 $\alpha \leq 30.64^\circ$ 。为满足油菜茎秆输送要求,同时达到茎秆抛送距离最远,故取铺放台斜突起角度 α 为 30° 。结合铺放台斜突起角度及前期研究,可得铺放台斜突起具体设计尺寸,如图 8 所示。

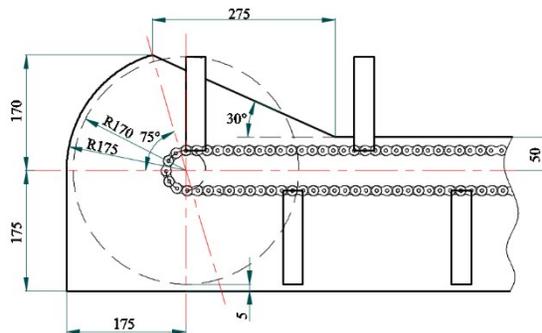


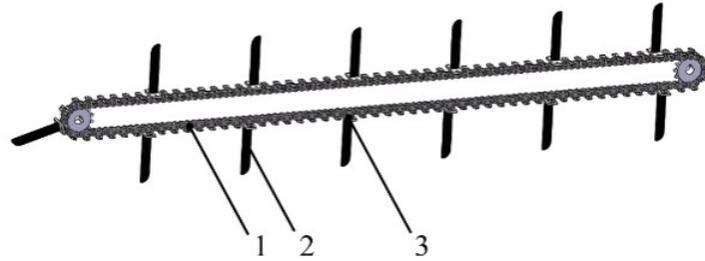
图 8 仿形铺放台斜突起尺寸示意

Fig.8 Schematic diagram of the size of oblique protrusion on the pattern-imitating laying platform

2.2 输送链齿结构设计

输送链齿由拨齿、输送链条(10A 带耳链条)和螺栓组成,如图 9 所示,拨齿通过螺栓联接等间距安装在输送链条上,输送链条安装在链轮上。作业过程中,主动链轮带动输送链条运动,拨齿在跟随输送链条运动的同时对油菜茎秆进行推送,并在排禾端将其抛出进行铺放。

油菜茎秆在铺放台上输送过程中,会形成具有一定厚度的油菜茎秆堆积层,堆积层厚度会影响油菜输送效果。前期研究表明,当有效割幅为 2 200 mm,输送拨齿有效长度应大于 114.29 mm,即可满足油菜茎秆输送要求。为保证油菜茎秆在割台上稳定输送,结合割晒机机架尺寸、链条与铺放台之间间隙,设定拨齿总长度为 140 mm,伸出割台长度为 120 mm,同时为了满足拨齿稳定性和输送可靠性,设置拨齿宽度为 30 mm。

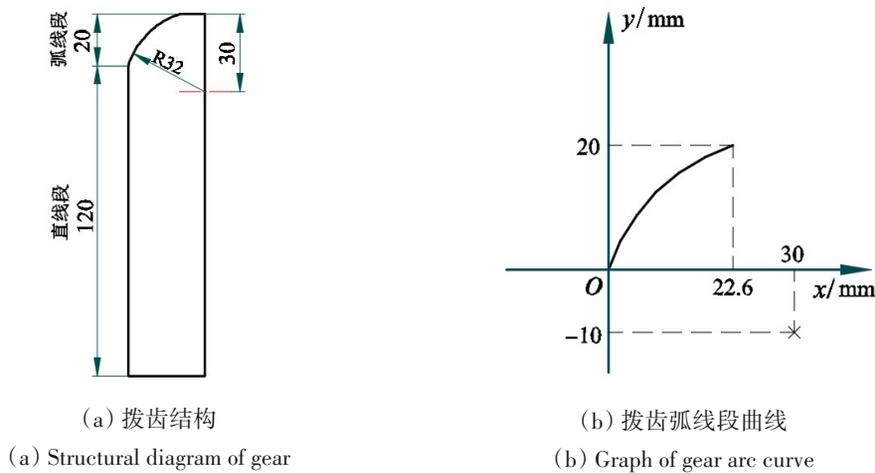


1: 输送链条; 2: 拨齿; 3: 螺栓。
1: Conveyor chains; 2: Gear; 3: Bolt.

图 9 输送链齿结构示意图

Fig.9 Structural sketch of poke finger conveyor chain

当拨齿做回转运动时,拨齿对油菜茎秆的推力方向由水平向左转为向左下方方向,易造成卡死情况。为避免油菜茎秆抛送过程卡死,需对抛送过程拨齿与油菜茎秆接触部分进行优化,采用圆弧形设计,如图 10 所示。



(a) 拨齿结构 (b) 拨齿弧线曲线
(a) Structural diagram of gear (b) Graph of gear arc curve

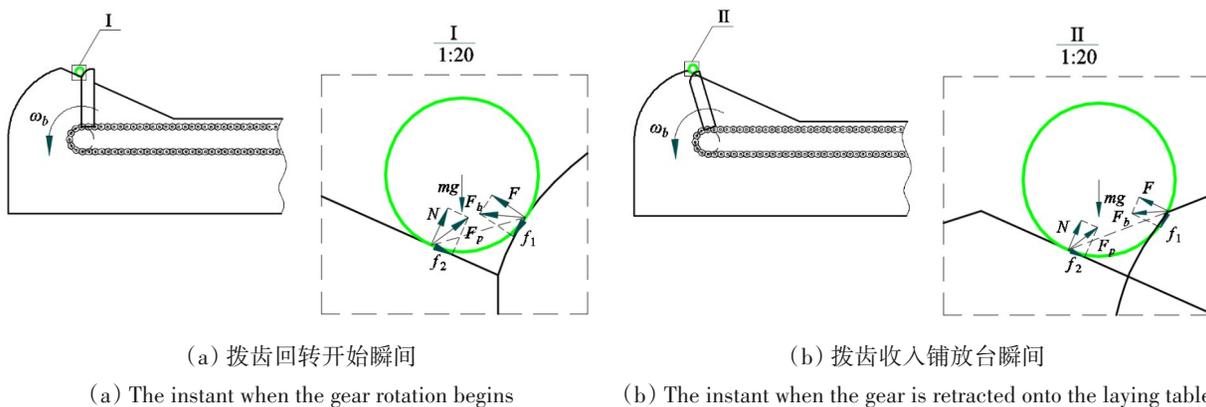
图 10 拨齿结构示意图

Fig.10 Structural schematic diagram of Gear

拨齿弧线轨迹方程为:

$$(x - 30)^2 + (y + 10)^2 = 32^2 \quad (0 \leq x \leq 22.6, 0 \leq y \leq 20) \quad (2)$$

对此过程中油菜茎秆受力情况进行分析,如图 11 所示。油菜茎秆受拨齿的作用力为推力 F 和摩擦力 f_1 ,铺放台对油菜茎秆的作用力为支持力 N 和摩擦力 f_2 ,以及自身重力 mg 。



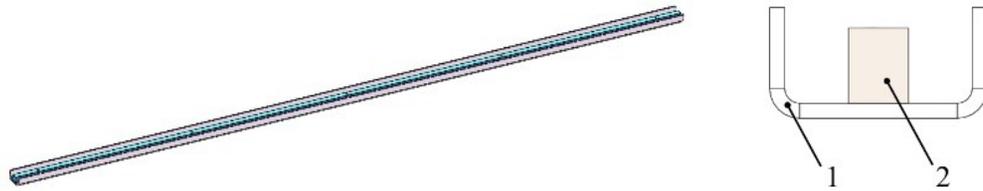
(a) 拨齿回转开始瞬间 (b) 拨齿收入铺放台瞬间
(a) The instant when the gear rotation begins (b) The instant when the gear is retracted onto the laying table

图 11 抛送过程油菜茎秆受力分析

Fig.11 Diagram of stress analysis on rapeseed stem during throwing process

2.3 链条托轨结构设计

U型槽内键式链条托轨由U型槽和45号锰钢键组成,如图12所示,根据10A链条具体尺寸,选择尺寸为8 mm×10 mm的键作为支撑,其安装于链条下端,与链条紧密配合。托轨一方面对输送链条起到支撑作用,防止链条下垂,保证拨齿伸出铺放台长度,从而提高拨齿对油菜植株推送的稳定性;另一方面由于割台作业过程中呈一定角度,导致输送链条运动过程处于倾斜状态,易出现链条脱出链轮的情况,托轨能够有效保证输送链条按规定轨迹运行,防止脱轨。



1:U型槽;2:45号锰钢键。

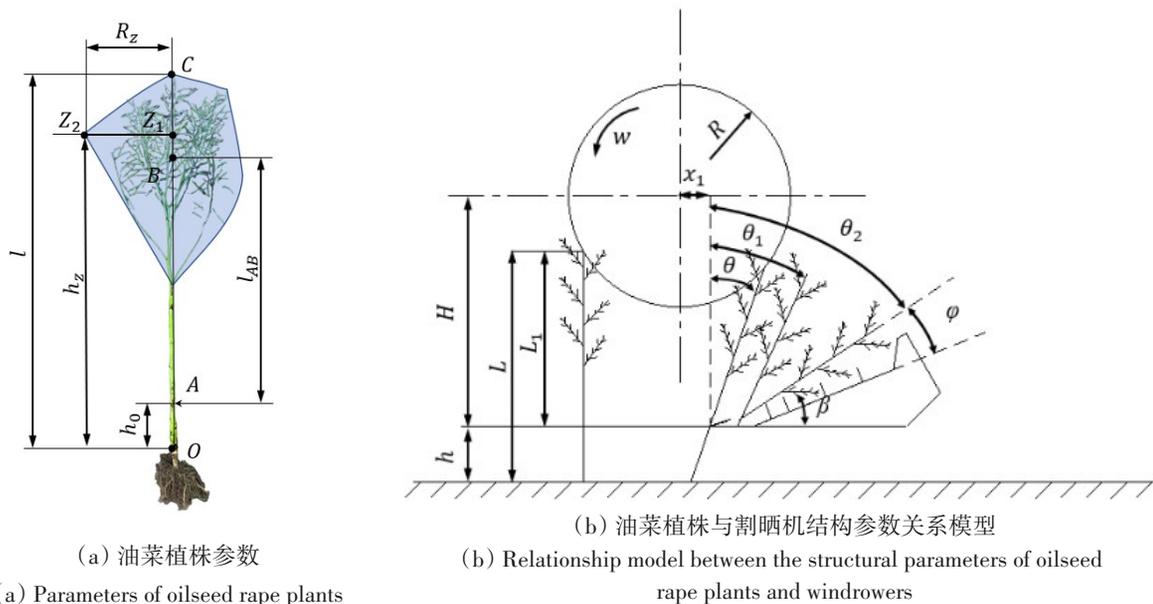
1:U-shaped groove;2:45 Manganese steel key.

图12 仿形铺放台三维结构

Fig.12 Three-dimensional structure of the copy laying table

3 油菜运动过程分析

油菜植株角果层集中于油菜主茎秆上部,为探究油菜茎秆铺放角与卧式油菜割晒机关键部件之间关系,建立油菜植株参数及定轴转动过程模型,如图13所示。(图中O为油菜植株与土壤交点,A为油菜主茎秆切割点,B为切割后油菜植株重心,C为油菜主茎秆上端点)



(a) 油菜植株参数

(a) Parameters of oilseed rape plants

(b) 油菜植株与割晒机结构参数关系模型

(b) Relationship model between the structural parameters of oilseed rape plants and windrowers

图13 植株参数与定轴转动过程

Fig.13 Rape plant parameters and fixed axis rotation process

在忽略空气阻力、油菜茎秆分支相互牵连作用的理想条件下,油菜茎秆铺放过程可分为切割后油菜茎秆在拨禾轮作用下的平抛运动、与铺放台接触后油菜茎秆绕A点的定轴转动过程、茎秆在横向差速输送装置作用下的横向输送过程、茎秆自排禾端被抛出后的斜抛运动过程以及茎秆落地后绕A点的定轴转动过程。

在拨禾轮无回带条件下,油菜茎秆被横割刀切断后,以与拨禾轮齿线速度相同的速度做平抛运动,初速度为:

$$v_0 = v_d = \omega R \quad (3)$$

式(3)中, v_0 为油菜茎秆平抛运动初速度, m/s; v_d 为拨禾轮拨齿线速度, m/s; ω 为拨禾轮角速度, rad/s; R 为拨禾轮半径, m。

为保证偏心拨禾轮的稳定推送, 拨禾轮速比 $\lambda_d > 1$ ^[22], 即:

$$\lambda_d = \frac{v_d}{v_m} > 1 \quad (4)$$

式(4)中, λ_d 为拨禾轮速比, 取 $\lambda_d=2$; v_m 为机具前进速度, m/s。

根据油菜植株参数和收获要求, 设计拨禾轮半径 $R=0.5$ m, 计算可得: 油菜茎秆平抛运动初速度 v_0 为 1.6~2.8 m/s, 拨禾轮角速度 ω 为 2.29~4 rad/s。

为减少拨禾轮拨禾过程对油菜角果层的冲击, 拨禾轮轴的安装高度 H 需满足拨禾时拨禾轮齿垂直入禾, 即:

$$H = l - h_0 + \frac{R}{\lambda_d} \quad (5)$$

式(5)中, l 为油菜植株高度, 一般为 1.5~2.0 m; h_0 为割茬高度, 取 0.25~0.50 m。

计算得拨禾轮安装高度 H 范围为 1.25~2.0 m。

拨禾轮前后位置 x_1 影响拨禾轮对油菜茎秆的推送, 为避免影响横向差速输送装置, 拨禾轮轴应相对于横割刀适当前移, 取 0.2 m。

在平抛过程中, 油菜茎秆初始相位角 θ 受油菜植株高度及拨禾轮轴的安装位置的影响。由勾股定理可得:

$$(L_1 \sin \theta + x_1)^2 + (H - L_1 \cos \theta)^2 = R^2 \quad (6)$$

式(6)中, L_1 为油菜植株切割后高度, m。

假设油菜茎秆平抛至与铺放台接触瞬间发生完全非弹性碰撞, 碰撞后油菜茎秆由平抛运动变为绕茎秆下端点 A 的定轴转动。由动量守恒可得:

$$Jw_0 - m_0 v_0 l_{AB} \cos \theta = 0 \quad (7)$$

式(7)中, J 为植株对点 A 的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; w_0 为植株初始角速度, rad/s; m_0 为单株油菜植株质量, kg; l_{AB} 为切割后植株重心高度, m。

忽略油菜茎秆之间的牵连影响, 将油菜植株简化为正圆锥刚体式的模型。可得 J 为:

$$J = \frac{3}{10} m_0 r^2 \quad (8)$$

式(8)中, r 为油菜植株角果层最大半径, 即 $Z_1 Z_2$, m

茎秆转动至与第 1 排拨齿接触过程中, 由动能定理得:

$$m_0 g l_{AB} (\cos \theta - \cos \theta_1) = \frac{1}{2} J w_1^2 - \frac{1}{2} J w_0^2 \quad (9)$$

式(9)中, w_1 为茎秆与第一排拨齿接触时角速度, rad/s; θ_1 为茎秆与第 1 排拨齿接触时相位角, rad。

由式(7)、式(9)计算得:

$$\begin{cases} w_0 = m_0 v_0 l_{AB} \cos \theta / J \\ w_1 = \sqrt{2 m_0 g l_{AB} (\cos \theta - \cos \theta_1) / J + w_0^2} \end{cases} \quad (10)$$

由转动过程角动量定理得:

$$m_0 g l_{AB} \sin \theta_z = J \frac{dw}{dt} \quad (11)$$

式(10)、(11)中, θ_z 为茎秆转动过程相位角, rad。

由式(10)、式(11)可得, 茎秆定轴转动到与第 1 排拨齿接触时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{J(w_1 - w_0)}{m_0 g l_{AB} (1 - \sin \theta)} \quad (12)$$

茎秆自与第 1 排拨齿接触到与第 3 排拨齿接触过程中, 由动能定理得:

$$m_0 g l_{AB} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = \frac{1}{2} J w_2^2 - \frac{1}{2} J w_1^2 \quad (13)$$

式(13)中, w_2 为茎秆与第3排拨齿接触时角速度, rad/s; θ_2 为茎秆与第3排拨齿接触时相位角, rad。

同样由转动过程角动量定理得转动时间为:

$$t_2 = \frac{J(w_2 - w_1)}{m_0 g l_{AB} (1 - \sin \theta_1)} \quad (14)$$

茎秆在横向差速输送装置作用下的横向输送过程中, 由于油菜植株在转动过程中底端先接触拨齿被输送, 在植株完全倒向铺放台被拨齿后由4排拨齿同时输送, 如图14所示。

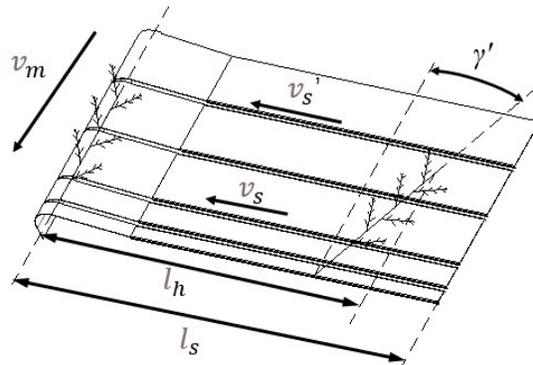


图14 横向输送过程

Fig.14 Horizontal conveying process

当油菜植株在铺放台上转动过程结束时, 茎秆与机具前进方向的夹角 γ' 为:

$$\gamma' = \arctan \frac{v_s t_2}{D} = \arctan \frac{v_s J (w_2 - w_1)}{m g l_{AB} D (1 - \sin \theta_1)} \quad (15)$$

式(15)中, v_s 为第1、2排拨齿运动速度; D 为第1排拨齿与第3排拨齿间距, 取0.37 m。

为保证铺放台上的油菜可顺畅输送至油菜排禾端, 输送齿链速比 ψ (拨齿速度与机具前进速度的比值) 一般取1.4~2.0, 本文输送齿链速比取2.0。由:

$$\psi = \frac{v_s}{v_m} \quad (16)$$

计算可得横向差速输送装置线速度为1.6~2.8 m/s。

为保证油菜茎秆铺放质量和铺放角度均匀, 假设位于铺放台正中间的油菜茎秆输送到铺放台最左端时, 茎秆角果层与根部同时被抛出, 即取油菜植株横向输送距离 l_h 为0.11 m, 则植株横向输送的时间 t_3 为:

$$t_3 = l_h / v_s \leq l_s / v_s \quad (17)$$

式(17)中, l_h 为油菜植株横向输送距离, m; l_s 为铺放台总长, m。

则横向输送过程中油菜植株沿机具前进方向运动距离 S_1 为:

$$S_1 = v_m (t_1 + t_3) = \frac{v_m J (w_1 - w_0)}{m_0 g l_{AB} (1 - \sin \theta)} + \frac{v_m l_h}{v_s} \quad (18)$$

位于铺放台正中间的油菜茎秆输送到铺放台最左端时被输送到铺放台最左端时, 油菜茎秆角果层与根部同时被抛出。可得第1、2排拨齿与第3、4排拨齿运动速比 λ_b 为:

$$\lambda_b = \frac{v_s'}{v_s} = \frac{l_h}{l_h - D \tan \gamma'} = \frac{11}{11 - 37 \tan \gamma'} \quad (19)$$

油菜植株被输送至铺放台排禾端后, 在惯性的作用下做斜抛运动, 以油菜茎秆底端与土壤接触点为原点建立坐标系 $O-xyz$, 茎秆输送方向为 x 轴, 割晒机行进方向为 y 轴, 垂直于地面方向为 z 轴。如图15所示。

抛送过程拨齿处于回转状态, 链轮半径与拨齿顶端回转半径比值约为1/6, 则油菜茎秆斜抛运动过程关系为:

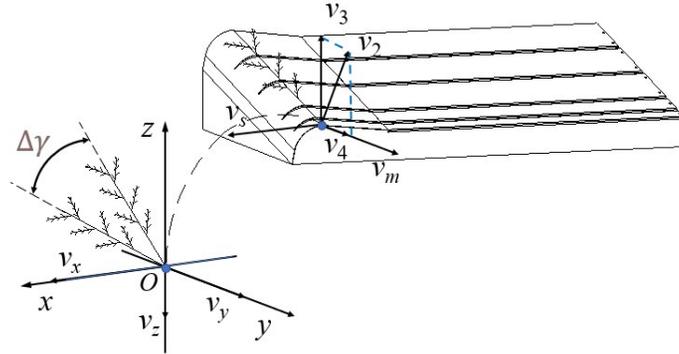


图 15 斜抛运动过程

Fig.15 Oblique throwing process

$$\begin{cases}
 v_p = 6v_s \\
 v_x = v_p \\
 v_y = v_4 + v_m \\
 v_z^2 - v_3^2 = -2gh_p \\
 v_3 = v_2 \cos \beta = v_p \tan \alpha \cos \beta \\
 v_4 = v_2 \sin \beta = v_p \tan \alpha \sin \beta \\
 t_4 = (v_z + v_3)/g \\
 \Delta S_x = v_x t_4 \\
 S_2 = v_y t_4
 \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中, v_p 为油菜茎秆抛出铺放台时速度, m/s; v_x 为油菜茎秆落地瞬间沿 x 轴方向的速度, m/s; v_y 为茎秆落地瞬间沿 y 轴方向的速度, m/s; v_z 为茎秆落地瞬间沿 z 轴方向的速度, m/s; h_p 为茎秆抛出时离地高度, m; ΔS_x 为茎秆沿铺放台方向抛出总位移, m; S_2 为茎秆斜抛运动过程沿机具前进方向位移。

由式(20)计算得:

$$\begin{cases}
 v_x = v_p \\
 v_y = v_p \tan \alpha \sin \beta + v_m \\
 v_z = \sqrt{(v_p \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p} \\
 t_4 = \frac{\sqrt{(v_p \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p} + v_p \tan \alpha \cos \beta}{g} \\
 \Delta S_x = \frac{v_p \sqrt{(v_p \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p}}{g} + \frac{v_p^3 \tan \alpha \cos \beta}{g} \\
 S_2 = \frac{v_p \tan \alpha \sin \beta \sqrt{(v_p \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p}}{g} + \frac{v_m \sqrt{(v_p \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p}}{g} \\
 \quad + \frac{v_p^2 \tan^2 \alpha \sin \beta \cos \beta}{g} + \frac{v_m v_p \tan \alpha \cos \beta}{g}
 \end{cases} \quad (21)$$

油菜茎秆在落地瞬间, 假设油菜茎秆与地面发生全塑性碰撞。此时植株的转动过程由 xOy 平面内的定轴匀速转动运动与 yOz 平面内的定轴加速转动运动组成。

油菜茎秆在 yOz 平面内的定轴加速转动运动过程中, 由动量定理可得:

$$Jw_3 - m_0 \sqrt{v_y^2 + v_z^2} l_{AB} \sin(\beta + \varphi) = 0 \quad (22)$$

式(22)中, w_3 为油菜茎秆在 yOz 平面内做定轴转动运动时初始角速度, rad/s; φ 为油菜茎秆完全放倒时与水平面夹角, $^\circ$ 。

茎秆转动至铺放于留茬上过程中, 由动能定理得:

$$m_0 g l_{AB} \sin \beta = \frac{1}{2} Jw_4^2 - \frac{1}{2} Jw_3^2 \quad (23)$$

式(23)中, w_4 为油菜茎秆在 yOz 平面内做定轴转动运动结束时角速度, rad/s。

同样由转动过程角动量定理得转动时间 t_5 为:

$$t_5 = \frac{J(w_4 - w_3)}{m_0 g l_{AB} (1 - \cos(\beta + \varphi))} \quad (24)$$

茎秆在 xOy 平面内的定轴匀速转动运动过程中, 由动量定理可得:

$$Jw_5 - m_0 v_p l_{AB} = 0 \quad (25)$$

茎秆在此过程中在 xOy 平面内转过的角度 γ 为:

$$\gamma = w_5 t_5 = \frac{v_p (w_4 - w_3)}{g(1 - \cos(\beta + \varphi))} \quad (26)$$

综上所述, 油菜植株铺放过程运动总时间 t 、油菜植株沿铺放台方向抛出总位移 ΔS_x 、油菜植株随机具前进方向总位移 ΔS_y 与油菜植株落地后与机具前进方向夹角 $\Delta\gamma$ 分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} t &= t_1 + t_3 + t_4 = \frac{J(w_1 - w_0)}{m_0 g l_{AB} (1 - \sin \theta)} + \frac{l_h}{v_s} + \frac{\sqrt{(6v_s \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p} + 6v_s \tan \alpha \cos \beta}{g} \\ \Delta S_x &= \frac{6v_s \sqrt{(6v_s \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p}}{g} + \frac{6v_p^3 \tan \alpha \cos \beta}{g} \\ \Delta S_y &= S_1 + S_2 = \frac{v_m l_h}{v_s} + \frac{(\sqrt{(6v_s \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p} + 6v_s \tan \alpha \cos \beta) \sqrt{(6v_s \tan \alpha \cos \beta)^2 - 2gh_p}}{g} \\ \Delta\gamma &= \gamma = \frac{6v_s (w_4 - w_3)}{g(1 - \cos(\beta + \varphi))} \end{aligned} \right. \quad (27)$$

由式(27)可知, 直接影响油菜茎秆铺放角度的油菜植株参数主要为油菜植株高度、重心高度、转动惯量、单株油菜质量等, 割晒机作业参数主要为铺放台倾角、拨禾轮转速、割晒机行进速度、拨齿速比等; 部分植株参数、割晒机技术参数间接影响铺放质量, 如拨禾轮安装位置影响油菜茎秆切割时初始相位角。

4 基于 EDEM 的茎秆铺放仿真试验

油菜茎秆输送铺放过程的数学模型分析结果表明, 影响茎秆铺放角度的主要因素为铺放台倾角、机具前进速度、拨齿速比, 仍需进一步通过试验研究各因素及其相互作用对茎秆铺放角度的影响。由于实际作业过程中田间情况复杂, 影响因素难以精确控制, 故基于 EDEM 构建油菜茎秆-横向差速输送装置仿真模型, 并开展 Box-Behnken 仿真试验以确定最佳参数组合。

4.1 几何建模及参数设定

4.1.1 油菜茎秆模型的建立

通过 Solidworks 三维软件, 建立单株油菜茎秆刚体模型并保存为 .stl 格式; 将保存好的 .stl 文件导入到 EDEM 仿真软件的颗粒模板中, 通过 EDEM 创造者模块创建单个颗粒模板, 并将其命名为油菜茎秆颗粒模板; 之后对油菜茎秆模型各项参数进行设置, 设置 x 方向网格为 200 个、 y 方向网格为 200 个、 z 方向网格为 400 个, 确定模型平滑值为 2, 最小颗粒半径为 3 mm; 最后通过颗粒模板生成油菜茎秆颗粒模型, 如图 16 所示。



图 16 油菜茎秆仿真模型

Fig.16 Simulation model of rapeseed stalk

4.1.2 仿真试验模型的建立

通过 Solidworks 三维软件对割晒机部件进行实体建模,为缩短仿真计算时长,对割晒机三维模型进行简化,简化为拨禾轮、铺放台和差速输送装置三部分,并以 .step 格式导入 EDEM 中,为方便讨论,设置割晒机部件材料为 Q235 钢;单株油菜茎秆通过 EDEM 仿真软件,采用 Hertz-Mindlin(no slip)模型,生成微球颗粒聚集组成的油菜茎秆模型。通过前期测验及查阅文献,对油菜植株颗粒、部件的材料参数与油菜-油菜、油菜-部件、部件-部件接触参数进行设定^[23,26],仿真参数如表 2 所示。

表 2 离散元模型基本参数

Tab.2 Basic parameters of discrete element model

参数 Parameters	值 Values
油菜茎秆泊松比 Poisson's ratio of oilseed rape stems	0.23 ^b
部件泊松比 Poisson's ratio of a component	0.3 ^b
油菜茎秆剪切模量/Pa Shear modulus of oilseed rape stems	1×10 ^{6b}
部件剪切模量/Pa Shear modulus of a component	7.94×10 ^{4b}
油菜茎秆密度/(kg·m ⁻³)Density of oilseed rape stems	809 ^b
部件密度/(kg·m ⁻³) Density of a component	7 850 ^b
油菜茎秆间碰撞恢复系数 Coefficient of restitution for collision between oilseed rape stems	0.4 ^b
油菜茎秆间静摩擦系数 Static friction coefficient between oilseed rape stems	0.57 ^a
油菜茎秆间滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient between oilseed rape stems	0.18 ^a
茎秆-部件碰撞恢复系数 Coefficient of restitution for collision between stems and components	0.4 ^b
茎秆-部件静摩擦因数 Static friction factor between stems and components	0.97 ^a
茎秆-部件滚动摩擦因数 Rolling friction factor between stems and components	0.2 ^a

a 表示该项为实测值,b 表示该项为文献参考值。

a represents the measured value,b represents the reference value in the literature.

在仿真试验中通过 Solidworks 设置铺放台倾角,通过 EDEM 设置拨齿运动速度和机具前进速度。仿真试验模型如图 17 所示。

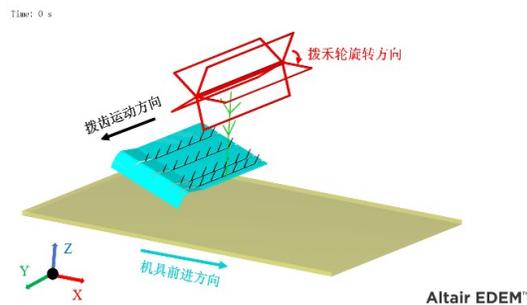


图 17 仿真试验模型

Fig.17 Simulation test model

4.2 几何建模及参数设定

以拨齿速比 X_1 、铺放台倾角 X_2 与机具前进速度 X_3 为试验因素,以油菜铺放角 Y 为评价指标进行仿真试验,因素水平编码表如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Test factors and coding

水平 Level	因素 Factors		
	拨齿速比/ X_1 Gear ratio	铺放台倾角/ X_2 (°) Tilting angle of laying platform	前进速度 X_3 /(m·s ⁻¹) Forward speed
(-1)	1.00	10.0	0.8
(0)	1.25	17.5	1.1
(1)	1.50	25.0	1.4

为了获取仿真试验油菜茎秆铺放角,以茎秆底端为原点建立 $O-xyz$ 坐标系,定义机具前进速度方向为 x 轴的负方向,垂直于地面向上方向为 z 轴的正方向,横向输送方向为 y 轴正方向,如图 18 所示。

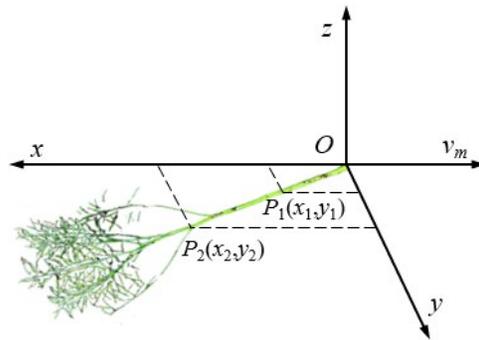


图 18 铺放角测量

Fig.18 Measuring of laying angle

待仿真试验完成后,任意选取主茎秆上两点 P_1 、 P_2 ,获取 P_1 、 P_2 两点的坐标,则油菜铺放角为:

$$Y = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{28}$$

式(28)中, Y 为油菜铺放角, $^\circ$; x_1 、 x_2 为 P_1 、 P_2 横坐标; y_1 、 y_2 为 P_1 、 P_2 纵坐标。

4.3 试验结果与分析

卧式油菜割晒机横向差速输送装置铺放质量影响因素仿真试验结果如表 4 所示。利用 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 5 所示。

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Test plan and data

序号 No.	X_1	$X_2/(\text{^\circ})$	$X_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	铺放角 $Y/(\text{^\circ})$ Laying angle
1	1.00	10.0	1.1	20.83
2	1.50	10.0	1.1	15.34
3	1.00	25.0	1.1	13.07
4	1.50	25.0	1.1	10.15
5	1.00	17.5	0.8	18.91
6	1.50	17.5	0.8	18.45
7	1.00	17.5	1.4	20.09
8	1.50	17.5	1.4	9.21
9	1.25	10.0	0.8	18.89
10	1.25	25.0	0.8	13.11
11	1.25	10.0	1.4	12.46
12	1.25	25.0	1.4	11.19
13	1.25	17.5	1.1	7.06
14	1.25	17.5	1.1	7.41
15	1.25	17.5	1.1	8.33
16	1.25	17.5	1.1	8.75
17	1.25	17.5	1.1	6.98

根据铺放角度 Y 方差分析结果可知,回归模型 P 值小于 0.000 1,表明回归模型显著,失拟 P 值 0.166 2 > 0.05,说明模型能正确反应 Y 与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的关系并对试验结果进行预测。其中因素 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 的 P 值小于 0.01,说明对模型影响极显著,因素 X_1X_2 、 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,说明对模型影响不显著,剔除不显著因素后,铺放角度 Y 的二次回归模型为:

大;随着拨齿速比的增大,油菜茎秆铺放角逐渐减小,变化速率先变小后增大。

固定横向差速输送装置拨齿速比,将其设定为零水平值,即1.25,可获得油菜割晒机前进速度与铺放台倾角之间的影响关系,如图19c所示。可得:油菜割晒机前进速度与横向差速输送装置拨齿速比之间交互作用不显著。随着前进速度增大,油菜茎秆铺放角先减小后增大,变化速率先减小后增大;随着铺放台倾角的增大,油菜茎秆铺放角逐渐减小并趋于平缓,且变化速率逐渐减小

4.4 最优参数组合与验证

为寻求油菜割晒机最佳作业参数组合,提高油菜茎秆铺放质量,运用Optimization工具,以最小铺放角为优化目标,建立作业参数优化模型:

$$\begin{cases} \min Y = (X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 1 \leq X_1 \leq 1.5 \\ 10^\circ \leq X_2 \leq 25^\circ \\ 0.8\text{m/s} \leq X_3 \leq 1.4\text{m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

优化求解得出割晒机最优参数组合为:拨齿速比1.12、铺放台倾角22.38°、前进速度1.09 m/s,最优参数组合下的理论铺放角为9.54°。

为了验证割晒机最优参数组合准确性,以最优作业参数作为仿真条件,在EDEM中进行仿真试验验证,试验所得铺放角为8.36°,与理论铺放角相对误差为14.11%,基本与理论值一致。

5 田间试验

5.1 试验条件

为了进一步验证卧式油菜割晒机横向差速输送装置田间作业性能,于2022年5月在浏阳市沙市镇油菜种植基地进行田间验证试验,如图20所示。试验油菜品种为“沔油737”甘蓝型优质双低油菜,种植密度为23~28株/m²。试验前设置拨齿速比、铺放台倾角分别为1.1、22°,通过液压装置调节横割刀高度处于离地350 mm处。田间试验过程中,控制割晒机前进速度为1.1 m/s。



图20 田间试验

Fig.20 field experiment

5.2 评价指标

参考标准JB/T7733-《割晒机技术条件》,以油菜茎秆铺放角、上下层铺放角度差、平均铺放宽度和厚度、铺放宽度和铺放厚度变异系数、为油菜茎秆铺放质量评价指标^[27]。

具体测量方法为:铺放角为油菜茎秆与机具前进方向的夹角,上下层铺放角度差为上、下层茎秆铺放角最大差值,反映茎秆铺放均匀度。在测点处油菜铺放层上、下各选一株油菜,角度尺测量上层铺放角 γ_{iu} 和下层铺放角 γ_{id} ,计算方法为:

$$\gamma = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \left(\frac{\gamma_{iu} + \gamma_{id}}{2} \right) \quad (31)$$

$$C_h = \frac{\sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (h_i - \bar{h})^2}}{\bar{h}} \times 100\% \tag{32}$$

式(32)中, C_l 为铺放宽度变异系数,%; \bar{l} 为铺放宽度平均值,mm; C_h 铺放厚度变异系数,%; \bar{h} 铺放厚度平均值,mm。

5.3 试验结果

田间试验结果如表 6 所示。根据表 6 可知油菜茎秆铺放角平均值为 10.82°, 与预测值的相对误差为 11.82%, 上下层铺放角度差为 15.83°, 平均铺放宽度和平均铺放厚度为 810 mm、649 mm, 铺放宽度变异系数和铺放厚度变异系数为 8.2%、9.7%。

表 6 田间试验结果
Tab.6 Field test results

指标 Indicators	值 Values
铺放角/(°) Laying angle	10.82
上下层铺放角度差/(°) Laying angle difference between upper and lower layers	15.83
平均铺放宽度/mm Average laying width	810
平均铺放厚度/mm Average laying height	649
铺放宽度变异系数/% Variable coefficient of laying width	8.2
铺放厚度变异系数/% Variable coefficient of laying height	9.7

试验结果表明, 卧式油菜割晒机横向差速输送装置可实现侧向铺放功能, 输送稳定, 排禾顺畅、无堵塞, 能够满足油菜割晒作业需求。

6 结 论

基于油菜割晒作业过程中茎秆与铺放台分离不彻底、易拥堵以及铺放角度差异大等现实问题, 设计了一种卧式油菜割晒机横向差速输送装置, 作业过程能够实现顺畅切割, 稳定输送, 有序侧铺。

对割晒作业时油菜植株运动过程进行了运动学分析, 并基于 EDEM 开展了 Box-Behnken 仿真试验, 以最小铺放角为目标, 得出了卧式油菜割晒机差速输送装置的最佳作业参数组合为拨齿速比 1.12、铺放台倾角 22.38°、前进速度 1.09 m/s, 在最佳参数组合条件下、铺放角仿真值为 8.36°, 与理论最优值相对误差为 14.1%。

田间试验结果表明, 横向差速输送装置运行顺畅、无堵塞, 油菜铺放平均角度为 10.82°、与预测值的相对误差为 11.82%, 平均铺放宽度和平均铺放厚度为 810 mm、649 mm, 铺放宽度变异系数和铺放厚度变异系数为 8.2%、9.7%, 满足割晒机标准要求。

参考文献 References:

[1] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 613-617.
WAN H Z. NEW-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2018, 40(5): 613-617.

[2] 万星宇, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 24-44.
WAN X Y, LIAO Q X, LIAO Y T, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong agricultural university, 2021, 40(2): 24-44.

[3] 张青松, 张恺, 廖庆喜, 等. 油菜无人机飞播装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 138-147.
ZHANG Q S, ZHANG K, LIAO Q X, et al. Design and experiment of rapeseed aerial seeding device used for UAV[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(14): 138-147.

[4] 罗海峰, 汤楚宙, 官春云, 等. 油菜机械化收获研究进展[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 1-8.
LUO H F, TANG C Z, GUAN C Y, et al. Research progress in rapeseed mechanized harvest[J]. Journal of agricultural mech-

- anization research, 2015, 37(1):1-8.
- [5] 吴崇友,肖圣元,金梅.油菜联合收获与分段收获效果比较[J].农业工程学报,2014,30(17):10-16.
WU C Y, XIAO S Y, JIN M. Comparison on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(17):10-16.
- [6] WAN X Y, LIAO Q X, XU Y, et al. Design and evaluation of cyclone separation cleaning devices using a conical sieve for rape combine harvesters[J]. Applied engineering in agriculture, 2018, 34(4):677-686.
- [7] 陈红琳,陈尚洪,沈学善,等.不同收获方式对油菜子粒损失、含油量及种植效益的影响[J].作物杂志,2015(5):74-79.
CHEN H L, CHEN S H, SHEN X S, et al. Effects of harvest methods on yield loss rate, oil content and planting efficiency for rape[J]. Crops, 2015(5):74-79.
- [8] 金梅,陈旭,江涛,等.油菜收获时间及方法对籽粒性能的影响[J].中国农机化学报,2020,41(11):7-11.
JIN M, CHEN X, JIANG T, et al. Effect of different harvesting periods and methods on rapeseed characters[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2020, 41(11):7-11.
- [9] 刘德军,赵秀荣,高连兴,等.不同收获方式含水率对油菜收获物流损失的影响[J].农业工程学报,2011,27(10):339-342.
LIU D J, ZHAO X R, GAO L X, et al. Effect of moisture content on rape harvest logistics losses under different harvest methods[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2011, 27(10):339-342.
- [10] 江涛,关卓怀,梁苏宁,等.齿带式油菜捡拾器仿形减振装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(11):148-157.
JIANG T, GUAN Z H, LIANG S N, et al. Design and experiment of profiling and damping device for rapeseed tooth-belt pick-up[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(11):148-157.
- [11] 吴崇友,王积军,廖庆喜,等.油菜生产现状与问题分析[J].中国农机化学报,2017,38(1):124-131.
WU C Y, WANG J J, LIAO Q X, et al. Current status and problems of rapeseed production[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2017, 38(1):124-131.
- [12] 张敏,金梅,王刚,等.油菜割晒机双曲柄平面五杆拨禾轮设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(1):115-122.
ZHANG M, JIN M, WANG G, et al. Design and test of double crank planar five-bar reel in rape windrower[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2022, 53(1):115-122.
- [13] 廖宜涛,陈传节,舒彩霞,等.4SY-1.8型手扶式油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(增刊1):94-100.
LIAO Y T, CHEN C J, SHU C X, et al. Design and experiment of 4SY-1.8 rape walking windrower[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(Sup1):94-100.
- [14] 李平,廖庆喜,李磊,等.4SY-1.8改进型油菜割晒机主要装置设计与试验[J].农业机械学报,2014,45(1):53-58.
LI P, LIAO Q X, LI L, et al. Design and experiment of the main device of 4SY-1.8 modified rape windrower[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(1):53-58.
- [15] 关卓怀,江涛,李海同,等.倾斜输送式油菜割晒机铺放质量分析与试验[J].农业工程学报,2021,37(4):59-68.
GUAN Z H, JIANG T, LI H T, et al. Analysis and test of the laying quality of inclined transportation rape windrower[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(4):59-68.
- [16] 石增祥,谢伟,任述光,等.4SY-2.2型油菜割晒机设计与试验[J].中国农学通报,2017,33(10):140-145.
SHI Z X, XIE W, REN S G, et al. Design and experiment of 4SY-2.2 rape windrower[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2017, 33(10):140-145.
- [17] 王修善,刘大为,李旭,等.4SY-2.0型自走式油菜割晒机的设计与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(4):445-453.
WANG X S, LIU D W, LI X, et al. Design and experiment of 4SY-2.0 self-propelled rape windrower[J]. Journal of Hunan agricultural university(natural sciences), 2016, 42(4):445-453.
- [18] 万星宇,舒彩霞,廖庆喜,等.高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(9):109-121.
WAN X Y, SHU C X, LIAO Q X, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground clearance crawler[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2022, 53(9):109-121.

- [19] 蒋亚军, 廖宜涛, 秦川, 等. 4SY-2.9型油菜割晒机机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 53-60.
JIANG Y J, LIAO Y T, QIN C, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY-2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 33(9): 53-60.
- [20] 李海同, 吴崇友, 沐森林, 等. 基于 ANSYS-ADAMS 的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 96-105.
LI H T, WU C Y, MU S L, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS-ADAMS [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(14): 96-105.
- [21] 舒彩霞, 曹士川, 廖宜涛, 等. 基于 ADAMS 的油菜割晒机顺向侧铺装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S2): 11-19.
SHU C X, CAO S C, LIAO Y T, et al. Parameter optimization and experiment of forward laying device for rape windrower based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2022, 53(S2): 11-19.
- [22] 中国农业机械科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
China academy of agricultural machinery science. Agricultural machinery design manual [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.
- [23] 廖宜涛, 王在腾, 廖庆喜, 等. 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 236-243.
LIAO Y T, WANG Z T, LIAO Q X, et al. Calibration of discrete element model parameters of forage rape stalk at early pod stage[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(Sup1): 236-243.
- [24] 李自皓, 罗海峰, 谢伟, 等. 基于 ANSYS 的油菜分段收获适收期茎秆剪切力学特性分析[J]. 中国农机装备, 2024(2): 32-36.
LI Z H, LUO H F, XIE W, et al. Analysis of shear mechanical properties of rapeseed stems during the optimal harvest period for segmented harvesting based on ANSYS[J]. China agricultural machinery equipment, 2024(2): 32-36.
- [25] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73-82.
LIAO Y T, LIAO Q X, ZHOU Y, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(6): 73-82.
- [26] 谢伟, 彭磊, 蒋蘋, 等. 收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112-120.
XIE W, PENG L, JIANG P, et al. Discrete element model building and optimizing of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2023, 54(5): 112-120.
- [27] 杨文敏, 吴明亮, 石增祥, 等. 4SY-2.2型卧式油菜割晒机割台的设计试验[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(4): 22-26.
YANG W M, WU M L, SHI Z X, et al. Design and experiment for cut-table of the 4SY-2.2 type horizontal rape swather[J]. Mechanical research and application, 2017, 30(4): 22-26.