doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.09.011

高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验

万星宇[1]　舒彩霞[1,2]　廖庆喜[1,2]　樊　伟[1]　周启凡[1]　廖宜涛[1,2]

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对常规油菜割晒机结构复杂,对长江中下游地区油菜种植需开畦作沟、小田块间沟梗交错等适应性不足,作业参数对铺放质量的影响关系不明确,导致机具通过性和铺放质量有待提高等问题,设计了一种高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机,开展了高地隙履带式动力底盘、横向输送装置、切割系统、液压驱动系统等的设计与选型,结合油菜栽培农艺开展了中间植株与两侧植株的铺放过程分析,明确了直接与间接影响铺放质量的植株参数、割晒机技术参数与栽培农艺要求。为验证整机性能,开展了机具通过性能试验与田间试验。性能试验结果表明:割晒机在硬质路面与松软土壤条件下直行平均偏移程度分别为 0.73% 和 1.28%,单边制动条件下平均转弯半径分别为 1.91 m 和 2.03 m,上下斜坡、翻越田埂、跨越畦沟过程较为平稳。田间试验结果表明:当机组前进速度为 0.7 m/s、拨禾轮转速为 30 r/min、横向输送装置转速为 240 r/min、割刀曲柄转速为 320 r/min 时,收获绿熟期油菜的平均铺放宽度与平均铺放高度分别为 968.7 mm 和 389.4 mm,平均铺放角为 13.3°,上下层铺放角度差为 3.5°;收获黄熟期油菜的平均铺放宽度与平均铺放高度分别为 956.8 mm 和 468.3 mm,平均铺放角为 13.6°,上下层铺放角度差为 4.4°;收获不同成熟期油菜的铺放质量基本满足实际生产需求,履带式动力底盘左右两侧对厢面碾压程度基本一致,整机左右质量分配相对合理。

关键词: 油菜; 割晒机; 高地隙履带自走式

中图分类号: S225　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)09-0109-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Self-propelled Middle-placement Rape Windrower with High Ground Elearance Crawler

WAN Xingyu[1]　SHU Caixia[1,2]　LIAO Qingxi[1,2]　FAN Wei[1]　ZHOU Qifan[1]　LIAO Yitao[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Existing development of rape windrower, which could cut and windrow the plants, has the challenge to improve the trafficability and windrow quality to overcome the complicated field conditions, highlighting a need for exploration of the windrow equipment with simplified structure and stable trafficability. As a solution, the self-propelled middle-placement rape windrower with a high ground clearance crawler was designed. Except for the crawler, the transverse conveying device, cutting system, and hydraulic drive system were also designed and selected. Combined with the rapeseed cultivation agronomy, the laying process of plants was analyzed. The plant parameters, the technical parameters of the windrower and the cultivation agronomy requirements which directly and indirectly affected the quality of plants placement were determined. In order to verify the performance of the windrower, the trafficability test and field functional experiment were carried out. The trafficability test results showed that the average deviation degree of the windrower on hard road surface and soft soil was 0.73% and 1.28%, respectively, and the average turning radius of the windrower under unilateral braking condition was 1.91 m and 2.03 m, respectively. The windrower could work stable when driving uphill and downhill

收稿日期: 2021-09-13　修回日期: 2021-11-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075210)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系专项(CARS-12)、中国博士后科学基金项目(2020M682438)和湖北省丘陵山区主要农作物机械化生产关键技术装备研发与集成示范项目

作者简介: 万星宇(1991—),男,博士后,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: wanxy@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

or overcoming the field ridge and ditch. To verify the function of the windrower, the field experiment was carried out. Under the condition of the forward speed of the machine was 0.7 m/s, the reel rate was 30 r/min, transverse conveying device rate was 240 r/min, cutter crank rate was 320 r/min, the average windrowing width was 968.7 mm and the height was 389.4 mm when harvesting the plants at the mature green stage. Besides, the average laying angle was 13.3°, and the difference between the upper and lower laying angles was 3.5°. When harvesting the plants at the yellow ripeness stage, the average windrowing width and height were 956.8 mm and 468.3 mm, respectively, while the average laying angle was 13.6°, and the difference of laying angle between upper and lower layers was 4.4°. The placement quality of harvesting rape plants at different maturity stages could both meet the basic requirement of rapeseed production. Furthermore, the soil compaction of each side of the crawler was almost the same, indicating that the mass distribution of the windrower was relatively reasonable. The research result can provide a reference for the structural design and optimization of rape windrower.

Key words: rape; windrower; high ground clearance self-propelled crawler

0 引言

油菜机械化收获是保障油菜高质量生产的重要环节,对提高种植面积、产量、籽粒与菜籽油品质等有显著影响[1-3]。油菜机械化收获方式有分段收获和联合收获两种,其中分段收获是在油菜适收期提前将植株割倒、晾晒,充分利用后熟作用保证籽粒成熟度基本一致后,再进行捡拾脱粒清选作业,具有适收期长、籽粒饱满、收获损失小等优点[4-8]。

美国、加拿大、澳大利亚等农业发达国家已基本实现油菜规模化种植,形成了宽幅、大功率、专用化、智能化的油菜割晒装备[9-12],如 John Deere 公司 JD A400 系列割晒机、加拿大 MacDon 公司 M200 型割晒机等。为实现侧边条铺需在田间作业前提前人工收割让道,且机具需按特定路径行驶[13],这类机具主要采用高地隙轮式动力底盘,割晒后中间集中条铺。国内佳木斯联合收割机厂研制的 4SZ-4.0 型、4SZ-5.0 型宽幅割晒机也采用高地隙轮式动力底盘,在我国北方春油菜区应用较多。但由于我国长江流域冬油菜产区普遍采用稻-油轮作种植模式,受田块面积小、土壤黏湿松软、厢面不平整、厢间开有畦沟等客观条件制约,现有大型油菜割晒机存在作业行走、田间转移困难等问题,不适应该区域的油菜割晒作业。

近年来,国内学者针对长江中下游地区油菜机械化割晒技术与装备的迫切需求,开展了一系列研究。廖宜涛等[14]研制了与手扶轮式拖拉机动力配套的油菜割晒机,采用中间分禾,两侧铺放的割晒工艺;李海同等[15]以手扶履带式拖拉机为动力,设计了侧边铺放的手扶立式割台油菜割晒机;这类以手扶拖拉机为动力的割晒机操作劳动强度较大,主要依靠植株运动的惯性力被动铺放,对油菜植株间的相互牵连缺乏有效处理。曹震等[16]以高地隙轮式拖拉机为配套动力,设计了一种前悬挂作业中间条铺油菜割晒机;文献[17-22]对该割晒机的输送系统进行改进,通过两侧的横向输送装置和纵向输送装置相配合,主动有序铺放,但机具纵向尺寸大,前轮负载大,田间行走、转弯不便。联合收获机履带式动力底盘在田间具有较好通过性,文献[23-26]以联合收获机作为动力底盘,研制了侧边条铺油菜割晒机,并对油菜植株的输送和铺放过程开展了理论分析和试验验证,关卓怀等[27]研制的侧铺倾斜输送式油菜割晒机在多地的应用试验都表明具有较好的适应性并实现整齐侧边铺放,但需人工收割让道并按要求规划收获路径,增加了生产负担。

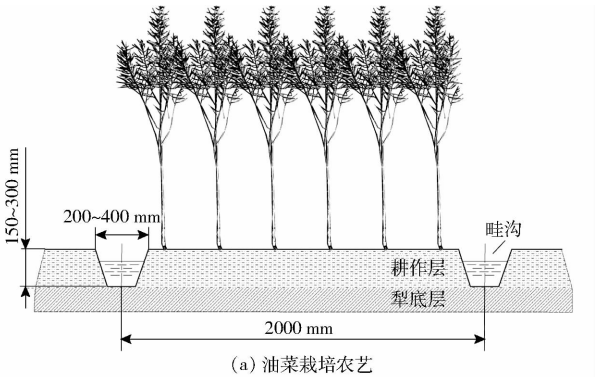
本文在前期研究基础上,基于长江中下游地区油菜作畦开沟农艺栽培模式,设计一种全液压驱动的履带自走式油菜割晒机,采用中间条铺、茬上晾晒的工艺方案,简化传统油菜割晒机结构,减少人工开道工序。对高地隙履带式动力底盘、横向输送装置、切割系统、液压驱动系统等进行设计与选型,结合重心分布开展高地隙履带式动力底盘通过性能分析与验证;分析中间植株与两侧植株的主动铺放过程,明确割晒机参数对铺放质量的影响,通过田间试验验证其铺放质量,为油菜割晒机结构设计与参数优化提供参考。

1 割晒机基本结构与工作过程

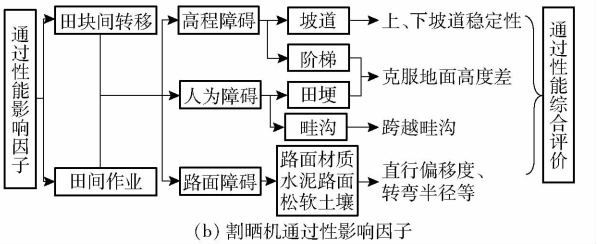
1.1 油菜栽培农艺与割晒机通过性影响因子

我国长江中下游地区油菜生长时期降水量较大,而油菜为根系忌水作物,种植时需要厢面平整并开好畦沟,以便雨水及时排出,避免雨水集于厢面低洼处,影响油菜种子生长发芽。因此,油菜种植耕整地机具作业后,细碎土层深度需达 80 mm 以上,地表平整度在 50 mm 之内,碎土率大于 50%,对于南方冬油菜主产区,畦沟的沟宽与沟深一般为 200~400 mm 和 150~300 mm[28](图 1a)。

割晒机通过性分析的过程实际为判断割晒机田



(a) 油菜栽培农艺



(b) 割晒机通过性影响因子

图 1　油菜栽培农艺与割晒机通过性影响因子

Fig. 1　Rape cultivation agronomy and factors that affected trafficability of windrower

块间转移和田间作业 2 个主要过程中能否顺利通过前方区域，即对行驶作业环境进行障碍判断。经调研分析可知，因田间耕作可消除大部分水系、杂余植被等自然障碍，影响收获机通过性的障碍因素按其性质可划分为高程障碍、人为障碍和路面障碍（图 1b）。高程障碍可分为割晒机田块间转移过程中的坡道障碍和阶梯障碍，人为障碍包括田间作业畦沟、田块间田埂等，路面障碍主要指地面性质（水泥路面、松软土壤等），直接影响行驶稳定性，可通过割晒机上下坡道稳定性、克服地面高度差、不同地面性质下的直行偏移度、转弯半径等综合考察割晒机的通过性。

1.2　割晒机基本结构

履带自走式中间条铺油菜割晒机采用中间条铺形式，主要由高地隙履带式动力底盘、割台、操纵台、三联泵多马达液压驱动系统等组成，如图 2 所示。

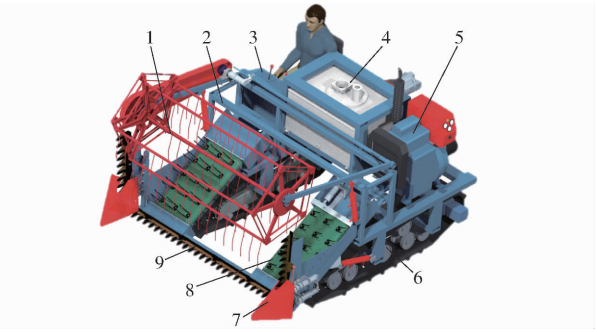


图 2　油菜割晒机结构简图

Fig. 2　Structure diagram of rape windrower

1. 拨禾轮　2. 机架　3. 操纵室　4. 三联泵多马达液压驱动系统　5. 柴油机　6. 高地隙履带式动力底盘　7. 分禾装置　8. 横向输送装置　9. 横向往复式切割器

高地隙履带式动力底盘采用龙门式结构以保证中间条铺输送通道，形成割茬未被碾压的铺放区，实现茬上架空晾晒；割台主要包括拨禾轮、横向往复式切割器、横向输送装置、两侧分禾装置、机架等。

1.3　工作过程

油菜割晒机采用中间输送、有序铺放、茬上晾晒的工艺方案，在充分晾晒的基础上利用离地高度差有效避渍水，其工作过程如图 3 所示。田间作业时，两侧分禾装置切断分枝并将油菜划分为收割区与待割区，收割区油菜在拨禾轮和机组前进推力的共同作用下，向割台内倾斜，被横向往复式切割器切断；正对输送通道的中间油菜植株直接向后倾倒铺放于割茬上；左右两侧植株则与横向倾斜输送装置接触并向中间输送，实现主动铺放；由于两侧植株横向输送与中间植株倾倒存在时间差，可将中间与两侧油菜依次铺放，实现首尾衔接的有序条铺，整机主要技术参数如表 1 所示。



图 3　油菜割晒机作业示意图

Fig. 3　Schematic of operation of rape windrower

表 1　油菜割晒机主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of rape windrower

参数	数值
整机尺寸（长 × 宽 × 高）/（mm × mm × mm）	3 150 × 2 300 × 2 080
割幅/mm	1800
整机质量/kg	2100
配套动力/kW	22
作业速度/（$m \cdot s^{-1}$）	0.6 ~ 0.9
纯工作生产率/（$hm^2 \cdot h^{-1}$）	0.43 ~ 0.65
割茬高度/mm	250 ~ 500
铺放通道高度/mm	960
铺放通道宽度/mm	920

割晒机作业过程中，行走系统与工作部件均由三联泵多马达液压驱动系统提供动力，液压原理图如图 4 所示。行走系统由三联泵中一对定量泵进行驱动，由两条开式回路分别对左右履带行走总成进行驱动。割晒机工作部件由三联泵中的变量泵进行驱动，由 6 条并联支路组成，分别为分禾装置、横向往复式切割器、横向输送装置、拨禾轮提供动力。各工作部件转速、割台高度、拨禾轮高度等均可通过对应阀块调节。

2　关键部件设计与参数分析

2.1　高地隙履带式动力底盘通过性能分析

2.1.1　动力底盘基本结构

为增加油菜中间条铺空间，高地隙履带式动力

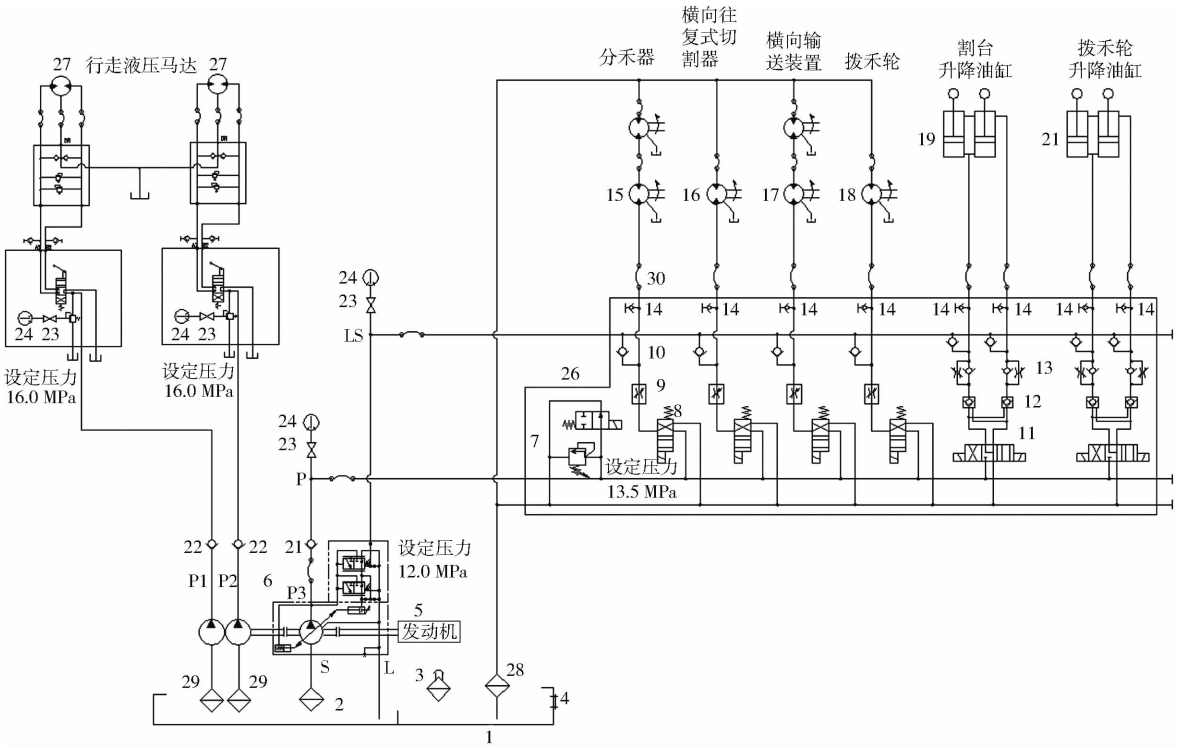


图 4 液压驱动系统原理图

Fig. 4 Schematic of hydraulic transmission system

底盘采用龙门架式结构,主要由机架、履带行走总成和行走液压马达等组成,其中履带行走总成采用四轮一带结构,包括橡胶履带、履带大梁、驱动轮、张紧轮装置和支重轮等,基本结构及结构参数如图 5 和表 2 所示。

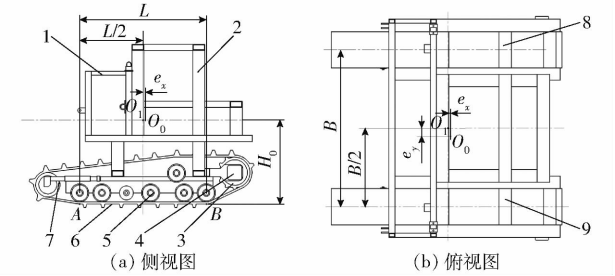


图 5 高地隙履带式动力底盘结构示意图

Fig. 5 Schematics of high ground clearance crawler

1. 前机架 2. 龙门架 3. 驱动轮 4. 行走液压马达 5. 支重轮 6. 橡胶履带 7. 张紧轮装置 8. 右载物平台 9. 左载物平台

表 2 高地隙履带式动力底盘结构参数

Tab. 2 Structural parameters of high ground clearance crawler mm

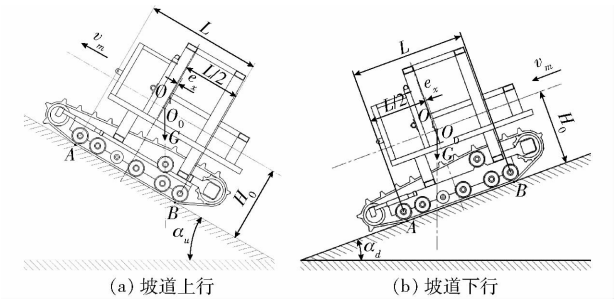
参数	数值
履带接地长度	1 250
履带宽度	350
履带几何中心高度	825
履带轮距	1 500
割晒机重心纵向偏移量	20
割晒机重心横向偏移量	80

割晒机重心是影响其田间作业和田块间转移通过性的关键。高地隙履带式动力底盘机架以高度较低的左右载物平台实现负载,中间连接枢纽龙门架以提供铺放通道,有效降低了重心的高度,使得在满足油菜中间条铺作业的同时,更好适应松软土壤条件下的小田块作业,高地隙履带式动力底盘相关结构参数如表 2 所示。基于 Creo 5.0 软件建立了油菜割晒机三维模型,赋予各零部件相应的材料属性,通过 Creo 5.0 软件分析功能的质量属性模块计算得到了履带自走式油菜割晒机的重心位置,进一步得到重心相对于高地隙履带式动力底盘接地区域几何中心的纵向和横向偏移量,由于偏移量相对较小,可认为割晒机重心与接地区域几何中心重合。

2.1.2 坡道稳定性分析

割晒机田块间转移和田间作业过程大多需正对坡道进出田块,坡道是主要高程障碍之一,对整机上、下坡行驶过程中的稳定性提出要求。坡道稳定性是指割晒机在坡道上正常行驶时不发生倾翻的能力,以割晒机在坡道上纵向上行或下行不发生倾翻的最大坡度角(纵向极限倾翻角)来衡量[29],纵向极限倾翻角越大,割晒机坡道稳定性越好,驾驶机具作业时的安全性和稳定性越高。

割晒机在坡道上纵向行驶过程如图 6 所示,当割晒机的重力延长线在履带接地长度范围内时,不会发生倾翻;当重力延长线位于履带接地范围外时,割晒机则会发生倾翻。因此当重力延长线与履带接



(a) 坡道上行　　(b) 坡道下行

图 6　割晒机坡道纵向行驶示意图

Fig. 6　Schematics of windrower when driving longitudinally on a ramp

地长度端点相交时，恰好不发生倾翻，此时的坡道角为纵向极限倾翻角，机具的纵向上行极限倾翻角 α_u 和纵向下行极限倾翻角 α_d 计算公式为

$$\alpha_u = \arctan\frac{L+2e_x}{2H_0} \tag{1}$$

$$\alpha_d = \arctan\frac{L-2e_x}{2H_0} \tag{2}$$

式中　L——履带接地长度，mm

e_x——割晒机重心与底盘中心的纵向偏移量，mm

H_0——履带式动力底盘中心高度，mm

计算得割晒机的纵向上、下行极限倾翻角分别为 36.25°和 38.02°，均在 35°以上，满足田块间转移过程中的上、下坡道需求。

2.1.3　克服地面高度差

割晒机在田块间转移与田间作业过程中可能需要克服阶跃障碍和田埂等人为障碍，完成翻越路面阶梯和田埂等动作，本质为克服地面高度差的过程，如图 7 所示。

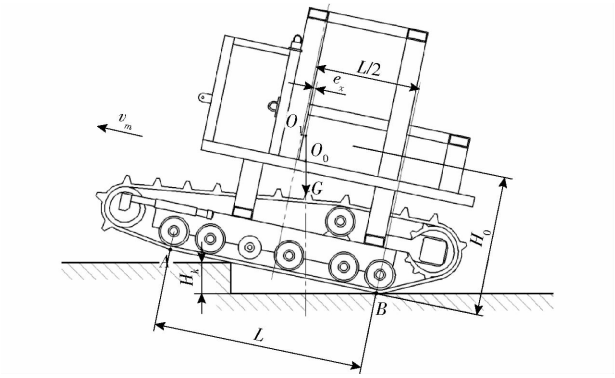


图 7　克服地面高度差过程示意图

Fig. 7　Schematic of overcoming ground height difference

当割晒机通过地面高度差形成的垂直阶梯时，若机具重力线能越过垂直阶梯的垂直面，则机具前部在重力作用下会恢复水平，实现翻越；若机具的重力线恰好无法越过垂直阶梯的垂直面，则机具无法翻越阶梯并恢复水平[29]，此时的阶梯高度为高地隙履带式动力底盘可克服的地面高度差 H_k，计算式为

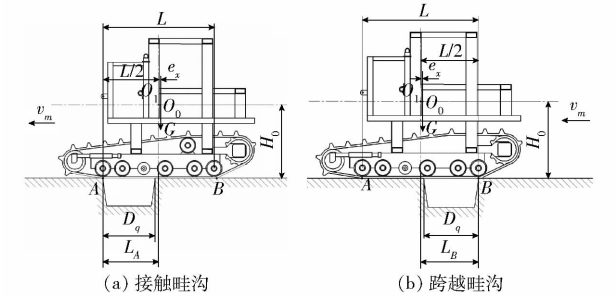
$$H_k \approx \left(\frac{L}{2} - e_x - H_0\tan\alpha_k\right)\sin\alpha_k \tag{3}$$

式中　α_k——不能翻越路面阶梯或田埂时机具临界倾斜角，(°)

α_k 应小于极限倾翻角，即 $\alpha_k \leqslant \alpha_u$。计算可得，割晒机可克服的最大地面高度差 $H_k \approx 104$ mm。

2.1.4　跨越畦沟

畦沟是油菜种植过程中为避免渍水在厢面聚集而人为形成的典型障碍，能够顺利跨越畦沟是割晒机田间作业越障能力的重要体现之一，根据履带式动力底盘的行驶方式及相关参数，割晒机跨越畦沟的过程如图 8 所示。割晒机匀速跨越畦沟时，应保证履带式动力底盘不坠入畦沟内，当履带式动力底盘前支重轮触碰到畦沟的另一侧时其重心应未越过近侧畦沟边界线(图 8a)；当履带式动力底盘后支重轮离开畦沟边界线时，其重心应已越过畦沟的近侧边界线(图 8b)，否则认定割晒机跨越畦沟失败[30]。



(a) 接触畦沟　　(b) 跨越畦沟

图 8　割晒机跨越畦沟过程

Fig. 8　Process of windrower when crossing furrow

根据以上分析，割晒机可跨越畦沟的最大壕沟宽度为 $\min(L_A, L_B)$[30]，其中 L_A 为割晒机接触畦沟时重心与畦沟前边缘的横向距离；L_B 为割晒机离开畦沟时重心与畦沟后边缘的横向距离。根据割晒机重心位置可知，可跨越畦沟的最大壕沟宽度为 625 mm，大于油菜种植农艺要求的畦沟宽度。

2.2　茎秆切割与分禾

茎秆的切割与分禾主要通过横向往复式切割器和分禾装置实现，是完成茎秆铺放的首要环节。横向往复式切割器包括割刀及其传动装置，采用谷物、油菜和玉米收获机械常用的单刀距行程型(图 9a)，割刀行程、动刀片节距、护刃器均为 76.2 mm；传动装置为曲柄滑块机构，曲柄长度约为割刀行程的一半，即 38 mm，由液压马达直接驱动。为降低油菜分枝牵扯导致的落粒损失，利用横向往复式切割器左右两侧的分禾装置区分待割区和收割区。分禾装置由被动分禾器、竖割刀和传动装置传动组成(图 9b)。

田间作业时,被动分禾器将待割区和收割区的油菜植株底部挤压分开,随后竖割刀切割未分开的油菜分枝。竖割刀采用往复式切割器,由液压马达通过曲柄滑块机构直接驱动;依据《农业机械设计手册》,动刀为 50 mm 宽的光刃刀片,曲柄长度为 25 mm;为满足先分禾再切割的作业要求,竖割刀需相对于切割装置水平适当前伸,前伸距离为 150 mm,依据割茬高度调节范围,竖割刀底部相对于地面的安装高度为 350 mm。

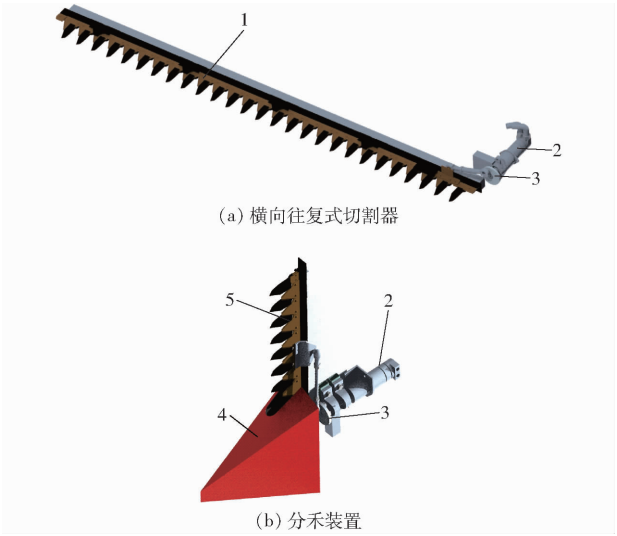


图 9 横向往复式切割器与分禾装置结构示意图

Fig. 9 Structure diagrams of transverse reciprocating cutter and plant separating device

1. 往复式割刀 2. 液压马达 3. 曲柄滑块机构 4. 被动分禾器 5. 竖割刀

前期研究表明,当横向往复式割刀平均切割速度为 0.8 ~ 1.6 m/s 时,可一次性割断油菜茎秆并避免拉扯,不平衡惯性力导致的振动相对较小;竖割刀主要是切割直径较小的分枝,可选取较小的平均切割速度,在保证切断分枝的基础上,减少割刀往复式运动冲击,进而降低损失。横向往复式割刀和竖割刀曲柄转速计算式为

$$n_1 = \frac{0.015 v_r}{r_1} \tag{4}$$

式中 n_1——曲柄转速,r/min

v_r——割刀平均切割速度,横向往复式割刀取 0.8 ~ 1.6 m/s,竖割刀取 0.5 ~ 1.0 m/s

r_1——曲柄长度,横向往复式割刀为 38 mm,竖割刀为 25 mm

计算得横向往复式割刀与竖割刀曲柄转速分别为 315 ~ 630 r/min 和 300 ~ 600 r/min。

2.3 中间植株铺放过程分析

油菜自然生长状态下,分枝及角果层集中于植株上部,植株及收获作业参数如图 10a 所示(图中 O 为未切割植株与地表交点;A 为植株主茎顶点;B 为切割后油菜主茎下端点;C 为切割后植株重心)。在忽略茎秆牵扯过程的理想条件下,中间植株铺放过程为纵轴向垂直面内的平面运动,如图 10b 所示,包括切断后的茎秆平抛过程和与地面碰撞之后绕下端点 B 的定轴转动过程,铺放时间与拨禾轮转速、安装位置、机组前进速度等有关。

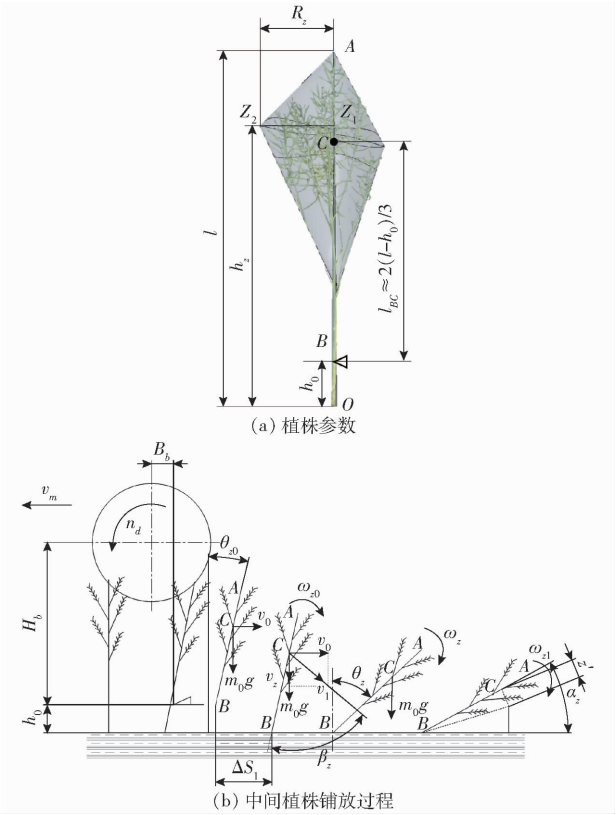


图 10 植株参数与中间植株铺放过程分析

Fig. 10 Plant parameters and analysis of intermediate plant windrowing process

拨禾轮无回带条件下,油菜植株被切断后脱离割晒机约束,以与拨禾轮拨齿线速度相同的速度作平抛运动,初速度为

$$v_0 = v_d = \frac{\pi R_d n_d}{30} \tag{5}$$

式中 v_0——中间植株平抛运动初速度,m/s

v_d——拨禾轮拨齿线速度,m/s

R_d——拨禾轮半径,取 0.45 m

n_d——拨禾轮转速,r/min

为保证偏心拨禾轮的有效推送[28],拨禾轮速比需满足 $\lambda_d > 1$,即

$$\lambda_d = \frac{v_d}{v_m} > 1 \tag{6}$$

式中 λ_d——拨禾轮速比,结合前期研究取 $\lambda_d = 2$ 计算可得 $v_0 = v_d$,为 1.12 ~ 1.68 m/s,则拨禾轮转速 n_d 为 23.7 ~ 35.6 r/min。

在垂直方向，植株下落时间、落地瞬时速度与茎秆夹角满足

$$\begin{cases} h_0 = \dfrac{1}{2} g t_1^2 \\ v_z = g t_1 \\ v_1 = \sqrt{v_0^2 + v_z^2} \\ \beta_z = \arctan(v_0 / v_z) + \theta_{z0} \end{cases} \tag{7}$$

式中　h_0——割茬高度，取 0.25 ~ 0.50 m

g——重力加速度，取 9.81 m²/s

t_1——下落时间，s

v_z——茎秆垂直方向分速度，m/s

v_1——茎秆速度，m/s

β_z——茎秆速度与茎秆夹角，(°)

θ_{z0}——茎秆初始相位角，(°)

茎秆初始相位角 θ_{z0}受拨禾轮轴的安装高度 H_b 和拨禾轮轴前后移动距离 B_b的影响，拨禾轮轴的安装高度需满足作业时拨齿垂直插入油菜植株，减少拨禾轮拨动对油菜角果的冲击，即

$$H_b = l - h_0 + \frac{R_d}{\lambda_d} \tag{8}$$

式中　l——油菜植株高度，一般为 1.5 ~ 2.0 m

计算得拨禾轮安装高度范围为 1.225 ~ 1.975 m。

拨禾轮轴前后移动距离 B_b影响着拨禾轮对油菜茎秆推送方向，为避免干扰倾斜配置的横向输送装置，拨禾轮相对于横向往复式切割器适当前置。

在水平方向上，茎秆落地前平移距离 ΔS_1为

$$\Delta S_1 = v_0 t_1 \tag{9}$$

由式(5)、(7)、(9)可得

$$\begin{cases} t_1 = \sqrt{2h_0 / g} \\ v_1 = \sqrt{(\pi R_d n_d / 30)^2 + 2gh_0} \\ \beta_z = \arctan(\pi R_d n_d / (30\sqrt{2gh_0})) + \theta_{z0} \\ \Delta S_1 = \pi R_d n_d \sqrt{2h_0 / g} / 30 \end{cases} \tag{10}$$

油菜下落至与地面土壤接触瞬间发生完全非弹性碰撞，碰撞后油菜植株由平抛运动变为绕茎秆下端 B 的定轴转动[14]。由植株的动量守恒可知

$$J\omega_{z0} - m_0 v_1 l_{BC} \cos\beta_z = 0 \tag{11}$$

式中　J——植株对点 B 的转动惯量，kg·m²

ω_{z0}——植株初始角速度，rad/s

m_0——单株油菜质量，kg

l_{BC}——植株重心高度，m

植株转动至与留茬接触过程中，由动能定理得

$$m_0 g h_C = \frac{1}{2} J\omega_{z1}^2 - \frac{1}{2} J\omega_{z0}^2 \tag{12}$$

式中　ω_{z1}——植株落地瞬时角速度，rad/s

h_C——植株重心下落高度，m

植株停止运动后，在角果层直径最大处落至割茬上的概率较大，在此状态下主茎与地面的夹角 α_z 为

$$\alpha_z = \arcsin(h_0 / \sqrt{(h_z - h_0)^2 + (\gamma R_z)^2}) + \arctan(\gamma R_z / (h_z - h_0)) \tag{13}$$

式中　h_z——角果层直径最大处离地高度，m

R_z——角果层半径，m

γ——油菜角果层压缩系数

重心下落高度为

$$h_C = l_{BC}(\cos\theta_{z0} - \sin\alpha_z) \tag{14}$$

由式(11) ~ (14)计算得

$$\begin{cases} \omega_{z0} = m_0 v_1 l_{BC} \cos\beta_z / J \\ \omega_{z1} = \sqrt{2m_0 g l_{BC}(\cos\theta_{z0} - \sin\alpha_z) + J\omega_{z0}^2} / J \end{cases} \tag{15}$$

由转动过程角动量定理得

$$m_0 g l_{BC} \sin\theta_z = J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{16}$$

式中　θ_z——茎秆转动过程相位角，(°)

由式(13)、(14)可得，植株定轴转动时间[14]为

$$t_2 = \frac{\omega_{z1} - \omega_{z0}}{J m_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{z0})} \tag{17}$$

由式(10)、(17)可知，中间油菜植株铺放至田间运动总时间 t_z为

$$t_z = t_1 + t_2 = \sqrt{\frac{2h_0}{g}} + \frac{\omega_{z1} - \omega_{z0}}{J m_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{z0})} \tag{18}$$

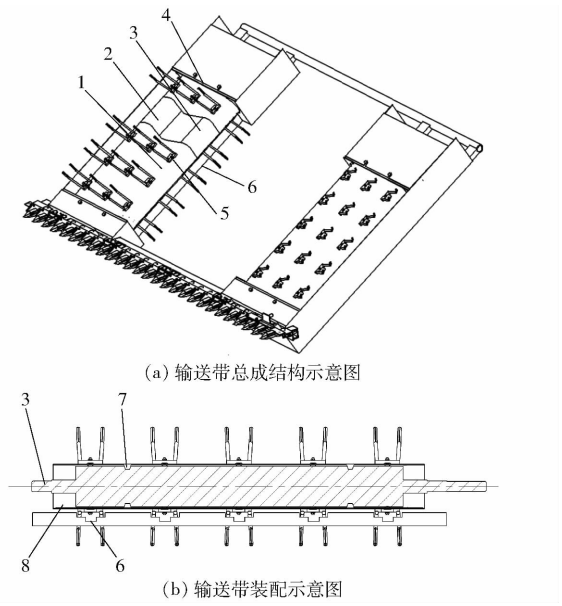
由上述分析可知，中间植株被切割后虽然脱离割晒机约束，但落地前平移距离受拨禾轮转速和留茬高度影响，因拨禾轮速比间接受机组前进速度影响；铺放姿态受留茬高度、植株高度、重心高度、角果层厚度等影响。

2.4　单侧植株铺放过程分析

对称布置的横向输送装置是实现两侧油菜植株向中间输送、主动铺放的关键，核心部件为左、右输送带总成。输送带总成由主动辊、输送带、弹性拨齿、从动辊、上下安装座和仿形防堵板等组成，如图 11a 所示。

结合油菜收割后晾晒的农艺要求与割台空间约束，主、从动辊筒体直径设计为 90 mm，输送带宽为 900 mm，有效工作带长 1 100 mm。输送带内侧装有一对 PVC 防脱轨条，与主、从动辊上的 V 型防脱轨槽(图 11b)配合可防止输送带跑偏；为提高油菜茎秆的输送能力，在输送带外侧间隔安装一定数量的弹齿，根据油菜种植的农艺要求(油菜行距 0.28 ~ 0.3 m)，取每行 5 个弹齿，间距为 0.2 m，纵向均布 5 行，共 25 个弹齿。

当单边履带宽度为 350 mm、履带轮距为 1 500 mm



(a) 输送带总成结构示意图

(b) 输送带装配示意图

图 11 横向输送装置结构示意图

Fig. 11 Structure schematics of transverse conveying device

1. 输送带总成 2. 从动辊 3. 主动辊 4. 安装座 5. 弹性拨齿 6. 仿形防堵板 7. V 型防脱轨槽 8. 输送带

时,铺放通道宽度不超过 1 150 mm;前期研究表明,当有效割幅为 1 800 mm,条铺最大横截面面积约为 0.66 m^2[16-17],履带离地高度为 960 mm 时,铺放通道宽度大于 687.5 mm,即可满足铺放要求,为保证输送顺畅,结合机架尺寸设定排禾口宽度为 920 mm。

两侧油菜植株铺放过程包括切断后随割晒机一同前进时绕点 B 的定轴转动过程、在横向输送装置作用下的横向运动、脱离横向输送装置后垂直平面的平抛运动、落地后绕点 B 的定轴转动,如图 12 所示。在横向输送装置约束下,两侧油菜主动向中间运动,降低了茎秆之间牵扯对铺放质量的影响,保证植株铺放姿态基本一致。

随机组前进转动倾倒过程中,由动量守恒可得

$$J\omega_{b0} - m_0 v_0 l_{BC}\sin\theta_{z0} = 0 \tag{19}$$

式中 ω_{b0}——侧边植株初始角速度,rad/s

植株转动至与输送带接触过程中,由动能定理得

$$m_0 g l_{BC}(\cos\theta_{z0} - \sin(\alpha_s + \arctan(\gamma R_z/h_z))) = \frac{1}{2}J\omega_{b1}^2 - \frac{1}{2}J\omega_{b0}^2 \tag{20}$$

式中 ω_{b1}——侧边植株与输送带接触瞬时角速度,rad/s

α_s——输送带倾角,(°)

同样由转动过程角动量定理得转动时间为

$$t_3 = \frac{\omega_{b1} - \omega_{b0}}{Jm_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{z0})} \tag{21}$$

转动过程中,植株随机组前进移动的距离为

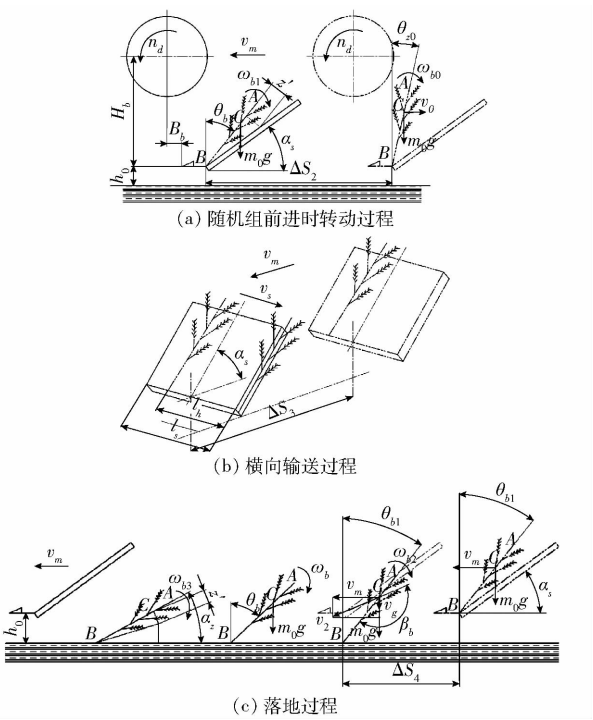


图 12 两侧植株铺放过程分析

Fig. 12 Analysis of lateral plant windrowing process

$$\Delta S_2 = v_m t_3 = \frac{v_m(\omega_{b1} - \omega_{b0})}{Jm_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{z0})} \tag{22}$$

转动停止后茎秆角度 θ_{b1} 为

$$\theta_{b1} = \pi/2 - \alpha_s - \arctan(\gamma R_z/h_z) \tag{23}$$

假设茎秆与输送带接触后即与输送带线速度同速运动,则植株横向输送时间为

$$t_4 = l_h/v_s \leqslant l_s/v_s \tag{24}$$

式中 v_s——输送带线速度,m/s

l_h——植株水平输送距离,m

l_s——输送带主、被动辊轴线距离,m

为保证输送带上的油菜可顺畅输送至中间条铺通道,输送带速比 β(输送带线速度和机具作业速度的比值)一般取 1.4 ~ 1.6[31],本文输送带速比 β 取 1.5。由

$$\beta = \frac{v_s}{v_m} = \frac{\pi R_s n_s}{30 v_m} \tag{25}$$

式中 n_s——横向输送装置转速,r/min

R_s——输送带主动辊半径,mm

计算可得横向输送装置转速 n_s 为 191.1 ~ 286.6 r/min。

植株随同机组前进的距离为

$$\Delta S_3 = v_m t_4 = \frac{l_h}{\beta} \leqslant \frac{l_s}{\beta} \tag{26}$$

式中 t_4——植株横向输送时间,s

侧边植株进入中间铺放通道后,在垂直平面内做平抛运动,即

$$\begin{cases} t_5 = t_1 = \sqrt{2h_0/g} \\ v_2 = \sqrt{v_m^2 + 2gh_0} \\ \beta_b = \arctan(\sqrt{2gh_0}/v_m) + \theta_{b1} + \pi/2 \\ \Delta S_4 = v_m\sqrt{2h_0/g} \end{cases} \tag{27}$$

式中　t_5——侧边茎秆下落时间，s

v_2——侧边茎秆速度，m/s

β_b——侧边茎秆速度与茎秆夹角，(°)

ΔS_4——侧边茎秆落地前平移距离，m

植株落地后，其运动同样转变为绕点 B 的定轴转动，由动量守恒与动能定理可知

$$\begin{cases} \omega_{b2} = (m_0 v_2 l_{BC}\cos(\pi - \beta_b))/J \\ \omega_{b3} = \sqrt{2m_0 g l_{BC}(\cos\theta_{b1} - \sin\alpha_z) + J\omega_{b2}^2}/J \end{cases} \tag{28}$$

式中　ω_{b2}——侧边茎秆落地后的定轴转动初始角速度，rad/s

ω_{b3}——侧边茎秆定轴转动至角果层触地的瞬时角速度，rad/s

转动时间 t_6 为

$$t_6 = \frac{\omega_{b3} - \omega_{b1}}{Jm_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{b1})} \tag{29}$$

综上所述，侧边植株铺放过程运动总时间 t_b 与落地后前进总距离 ΔS_z 分别为

$$\begin{cases} t_b = t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = \\ \quad \dfrac{\omega_{b1} - \omega_{b0}}{Jm_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{z0})} + \dfrac{l_h}{v_s} + \sqrt{\dfrac{2h_0}{g}} + \\ \quad \dfrac{\omega_{b3} - \omega_{b1}}{Jm_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{b1})} \\ \Delta S_z = \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4 = \\ \quad \dfrac{v_m(\omega_{b1} - \omega_{b0})}{Jm_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{z0})} + \dfrac{l_h}{\beta} + v_m\sqrt{\dfrac{2h_0}{g}} \end{cases} \tag{30}$$

由上述分析可知，两侧植株横向输送过程中处于与机组随动状态，植株前进方向位移和铺放完成时间存在差距，暂未考虑铺放角的情况下，同一时间切割的两侧植株与中间植株的位移差 ΔS_0 尽量保持为株距 s_0 的整数倍，以确保两种铺放过程结束后植株姿态基本一致，即

$$\Delta S_0 = \Delta S_1 + \Delta S_z = \frac{\pi R_d n_d\sqrt{\dfrac{2h_0}{g}}}{30} + \frac{v_m(\omega_{b1} - \omega_{b0})}{Jm_0 g l_{BC}(1 - \sin\theta_{z0})} + \frac{l_h}{\beta} + v_m\sqrt{\frac{2h_0}{g}} \approx ns_0 \tag{31}$$

由式(31)可知，直接影响铺放质量的植株参数主要为株高、重心高度、角果层半径、转动惯量、单株质量等，收获作业技术参数主要为拨禾轮转速、机组前进速度、留茬高度、横向输送装置转速等，部分植株参数、割晒机技术参数和农艺参数等则间接影响铺放质量，如拨禾轮安装位置主要影响植株切割时的姿态、农艺要求中种植行距主要影响两侧植株与横向输送装置的接触时间等。

3　通过性能试验

油菜割晒机田块间转移与田间作业过程中需要克服坡道和阶梯等高程障碍、田埂和畦沟等人为障碍与不同路面材质表征的路面障碍，在生产过程中常见的水泥或松软土壤路面条件下，通过开展坡道行驶、翻越阶梯与田埂、跨越畦沟等的稳定性分析和直行偏移度、转弯半径等的参数测试综合考察割晒机的通过性能。

3.1　上下坡道试验

割晒机运输装载、进出田块过程中存在上、下坡动作，以华中农业大学现代农业试验基地机具装卸平台坡道(坡度 12°)为载体，测试割晒机前进上坡、倒退下坡、倒退上坡、前进下坡 4 种常规上下坡姿态下的稳定性，如图 13 所示。



图 13　上下坡试验

Fig. 13　Uphill and downhill tests

参照试验前保持发动机处于额定工作转速范围，标记低速(0.1 ~ 0.2 m/s)前进或后退时的操纵杆开度范围，将割晒机正向停放于坡道起点处，履带前端与坡道起点保持 200 mm 的缓冲距离，在标记的操纵杆范围内启动割晒机并前进上坡，待割晒机前进至坡道终点水平平台处停止；前进上坡完成后调整割晒机位置，使履带后端与坡道终点保持 200 mm 的缓冲距离，随后启动割晒机倒退至坡道起点，完成倒退下坡；采用相同步骤完成倒退上坡和前进下坡过程，所有上下坡道测试开展 3 次。结果表明：4 种姿态下割晒机行驶速度较稳定，未出现急启急停、卡顿、抖动等现象，满足运输装载、进出田块等上下坡要求。

3.2　越障试验

以华中农业大学现代农业试验基地垂直阶梯、田埂、畦沟等为翻越对象，通过观察机具越障状态判断机具是否运行平稳，验证割晒机越障性能，如图 14 所示。


(a) 路面


(b) 田间

图 14 越障试验

Fig. 14 Obstacle tests

路面越障时,在同一高度的垂直阶梯间隔 10 m 取 3 个长 2.5 m 的测试区间,标记测试区间两侧边缘,在测试区间内随机选取 3 个测点测量垂直高度差,测得 2 种高度垂直阶梯的平均高度分别为 156.0 mm 与 98.0 mm;翻越前调整割晒机位置使其正对垂直阶梯并保持在测试区间内,履带前端与垂直阶梯起点之间预留 200 mm 缓冲距离,保持发动机转速在额定工作转速范围内并低速前进,机具翻越垂直阶梯恢复水平后即停止。结果表明:路面越障过程中,割晒机可轻松翻越地面高度差为 100 mm 左右的垂直阶梯,与理论计算结果基本一致,当地面高度差为156 mm 时,割晒机翻越过程中存在轻微打滑,恢复水平时机具存在轻微冲击感,但能完成垂直阶梯的翻越。

田间越障时,适度清理田埂与畦沟周边高大杂草以便观察和标记,采用相同方法选取 3 个测试区间,测得田埂平均高度与平均宽度分别为 133.2 mm 和 1 030.8 mm,畦沟平均沟深与平均沟宽分别为 160.75 mm 和 346.75 mm;当割晒机正向低速翻越田埂与畦沟后恢复水平姿态即完成越障过程,结果表明:田间越障过程中,跨越畦沟较为顺畅,且因土壤缓冲作用,割晒机翻越田埂时冲击不显著,可满足田间作业行驶基本要求。

3.3 直行偏移试验

根据 GB/T 15370.4—2012《农业拖拉机通用技术条件 第 4 部分 履带拖拉机》要求,履带拖拉机保持直线行驶能力由直行偏移程度表征,在坡度不大于 1% 的硬质地面上偏移程度要求不大于 6% 。

割晒机直行偏移试验于华中农业大学现代农业试验基地硬质路面和田间松软土壤进行,为准确控制割晒机直线行驶速度,保持发动机转速处于额定工作转速范围内,分别标记割晒机在硬质路面和田间松软土壤条件下保持常规作业速度 0.8 m/s 时的操纵杆位置;试验前将割晒机停放于测试起点处,与履带平行放置卷尺以作基准线,测量基准线与割晒机履带侧边的垂直距离 S_1,在起点前方 50 m 设置并标记直线行驶终点;试验时前推操纵杆于标记位置,割晒机以 0.8 m/s 速度前行至终点处停止,途中不对方向做出任何调整,测量终点处机具侧边与基线的垂直距离 S_2,S_1 和 S_2 的差值即为直行偏移量;试验重复 3 次取平均值,试验现场如图 15 所示。


(a) 硬质路面


(b) 田间松软土壤

图 15 直行偏移试验

Fig. 15 Straight travel tests

割晒机直行偏移度 γ_s 为

$$\gamma_s = \frac{|S_1 - S_2|}{50} \times 100\% \tag{32}$$

硬质路面和松软土壤的直行平均偏移量分别为 0.37 m 和 0.65 m,平均偏移度分别为 0.73% 和 1.30% ,小于许用要求的 6% ,表明双泵驱动双马达的驱动方式可保证高地隙履带式动力底盘的直行性能。

3.4 转向试验

割晒机转弯性能通过转弯半径表征,割晒机进行极限转向时,履带在硬质路面或田间松软土壤划出的最大圆形路径(最小转弯圆)的半径即为转弯半径。参照 GB/T 3871.5—2006《农业拖拉机试验规程 第 5 部分 转向圆和通过圆直径》选取在任何方向坡度均不大于 3% 且可清晰标记履带痕迹的硬质路面和田间松软土壤为试验场地,试验时保持割晒机发动机处于额定工作转速范围,前推单侧操纵杆至极限位置使割晒机以不超过 2 km/h 的速度向前转向行驶 360°并形成最小转向圆;转向完毕后记录转向时间,在转向圆上间隔 45°作标记,在对应标记处测量 4 次转向圆直径,计算转弯半径并取平均值,试验重复 3 次,如图 16 所示。


(a) 硬质路面


(b) 松软土壤

图 16 转弯半径测量

Fig. 16 Steering tests

试验结果表明:相同速度下机具单边制动转向时硬质路面与松软土壤条件下平均转弯半径分别为 1.91 m 和 2.03 m,满足油菜田间割晒作业时的转向要求。

4 田间试验

4.1 试验材料与方法

为检验油菜割晒机田间作业性能,于 2021 年 4

月在华中农业大学现代农业试验基地开展田间功能性试验，作业对象为机械直播“华油杂 62”油菜，平均种植密度为 29 株/m^2，平均株高 1 593.3 mm，土壤坚实度范围为 370.6 ~ 785.8 kPa。

试验前调节液压驱动系统，设置拨禾轮转速为 30 r/min、横向输送装置转速为 240 r/min、割刀曲柄转速为 320 r/min，割台高度为 300 mm，均保持在各部件运行参数范围内。试验过程中，控制机组前进速度为 0.7 m/s，每组试验行驶 25 m 后停止，选择中间 15 m 为测试区域，间隔 1 m 选定测点，累计共 15 个测点。

4.2　评价指标

以反映割晒机作业性能的铺放角、上下层铺放角度差、平均铺放宽度、铺放宽度变异系数、平均铺放高度、铺放高度变异系数等为铺放质量评价指标[26]，以收获后左、右两侧履带行走区域与厢面平均高度差表征割晒机履带式动力底盘的负载平衡性。

铺放角为铺放后油菜茎秆与机组前进方向的夹角，上下层铺放角度差为铺放后上、下层茎秆铺放角的最大差值，反映茎秆相互牵扯作用下的铺放效果一致性[31]。在测点处油菜铺放层上、下层各选一株油菜，角度尺测量上层铺放角 θ_{iu} 和下层铺放角 θ_{id}，则铺放角计算方法为

$$\theta = \frac{1}{15}\sum_{i=1}^{15}\left(\frac{\theta_{iu}+\theta_{id}}{2}\right) \tag{33}$$

式中　θ——铺放角，(°)

上下层铺放角度差计算方法为

$$\Delta\theta = \frac{1}{15}\sum_{i=1}^{15}\left|\bar{\theta}_{iu}-\bar{\theta}_{id}\right| \tag{34}$$

式中　$\Delta\theta$——上下层铺放角度差，(°)

$\bar{\theta}_{iu}$——上层茎秆平均铺放角，(°)

$\bar{\theta}_{id}$——下层茎秆平均铺放角，(°)

铺放宽度为油菜铺层的最大宽度，铺放高度为油菜铺层垂直于地面的最大高度，两者的一致性影响捡拾收获作业质量。测量各测点铺放宽度 l_i 和铺放厚度 h_i，铺放宽度与铺放高度的变异系数计算式为

$$C_l = \frac{\sqrt{\frac{1}{15}\sum_{i=1}^{15}(l_i-\bar{l})^2}}{\bar{l}}\times 100\% \tag{35}$$

$$C_h = \frac{\sqrt{\frac{1}{15}\sum_{i=1}^{15}(h_i-\bar{h})^2}}{\bar{h}}\times 100\% \tag{36}$$

式中　C_l——铺放宽度变异系数，%

$\bar{l}$——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

收获作业后，因履带式动力底盘对土壤的碾压，履带行走区域高度与收获前厢面高度存在落差，测量并计算左右两侧高度差（图 17）可反映割晒机两侧负载质量分布的均匀性。

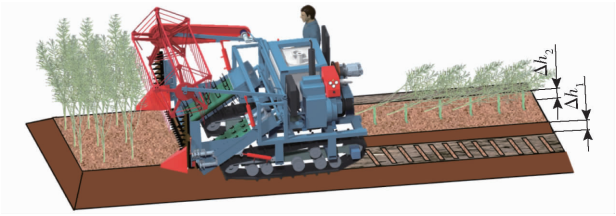
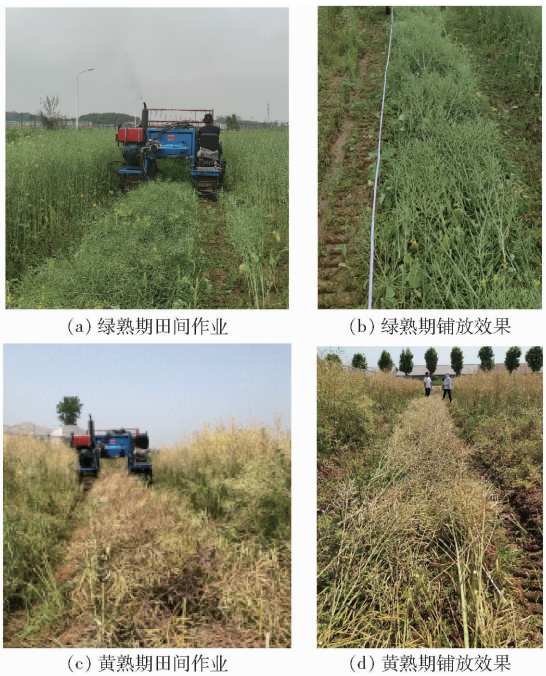


图 17　行走后厢面高度差

Fig. 17　Height difference after windrower working

4.3　试验结果与分析

试验过程与割晒效果如图 18 所示，试验结果表明：割晒机收获不同适收期油菜时作业顺畅，可满足不同工况下的油菜割晒作业要求；绿熟期油菜平均铺放宽度与宽度变异系数分别为 968.7 mm 和 6.35%，平均铺放高度与高度变异系数分别为 389.4 mm 和 16.97%，平均铺放角为 13.3°，上下层铺放角度差为 3.5°，收获后左、右侧履带行走区域与厢面平均高度差分别为 88.67 mm 和 91.33 mm；黄熟期油菜平均铺放宽度与宽度变异系数分别为 956.8 mm 和 4.78%，平均铺放高度与高度变异系数分别为 468.3 mm 和 12.19%，平均铺放角为 13.6°，上下层铺放角度差为 4.4°，收获后左、右侧履带行



(a) 绿熟期田间作业　(b) 绿熟期铺放效果

(c) 黄熟期田间作业　(d) 黄熟期铺放效果

图 18　油菜割晒机田间试验

Fig. 18　Field tests of rape windrower

走区域与厢面平均高度差分别为 62.50 mm 和 66.00 mm;收获不同成熟期油菜的铺放质量基本满足实际生产需求,履带式动力底盘左右两侧对厢面碾压程度基本一致,说明整机左右质量分配相对合理。

5 结论

(1)针对常规油菜割晒机结构复杂,机具通过性和铺放质量有待提高等问题,设计了一种全液压驱动的履带自走式中间条铺油菜割晒机,可实现油菜植株的中间条铺和茬上晾晒。

(2)结合油菜栽培农艺,开展了高地隙履带自走式割晒机克服高程障碍、人为障碍和路面障碍的通过性能试验,结果表明割晒机纵向上、下行极限倾翻角分别为 36.25°和 38.02°,可克服地面高度差约为 104 mm,硬质路面和松软土壤条件下直行平均偏移程度分别为 0.73% 和 1.28%,平均转弯半径分别为 1.91 m 和 2.03 m,田块间转移与田间作业上下坡道、翻越田埂、跨越畦沟等过程较为流畅,行走与工作部件未发现明显干涉。

(3)分析了中间植株与两侧植株的铺放过程,明确了直接影响铺放质量的因素主要为株高、重心高度、角果层半径、转动惯量、单株质量、拨禾轮转速、机组前进速度、留茬高度、横向输送装置转速等。

(4)割晒机田间试验结果表明,当机组前进速度为 0.7 m/s、拨禾轮转速为 30 r/min、横向输送装置转速为 240 r/min、割刀曲柄转速为 320 r/min 时,收获绿熟期、黄熟期油菜的平均铺放宽度分别为 968.7 mm 和 956.8 mm,平均铺放高度分别为 389.4 mm和 468.3 mm,平均铺放角分别为 13.3°和 13.6°,收获不同成熟期油菜的铺放质量基本满足实际生产需求,履带式动力底盘左右两侧对厢面碾压程度基本一致,整机左右质量分配相对合理。

参 考 文 献

[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.
WANG Hanzhong. New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 613 - 617. (in Chinese)

[2] 梁苏宁,沐森林,汤庆,等. 收获方式对油菜收获损失构成特征的影响[J]. 农机化研究,2018,40(3):134 - 140.
LIANG Suning, MU Senlin, TANG Qing, et al. The effect of different harvest methods on formation of rape harvest loss[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 134 - 140. (in Chinese)

[3] 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 Haifeng, TANG Chuzhou, GUAN Chunyun, et al. Research progress in rapeseed mechanized harvest[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 1 - 8. (in Chinese)

[4] WAN Xingyu, LIAO Qingxi, XU Yang, 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.

[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 Chongyou, XIAO Shengyuan, JIN Mei. Comparation on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 10 - 16. (in Chinese)

[6] 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,2015,30(5):74 - 79.
CHEN Honglin, CHEN Shanghong, SHEN Xueshan, et al. Effects of harvest methods on yield loss rate, oil content and planting efficiency for rape[J]. Crops, 2015, 30(5): 74 - 79. (in Chinese)

[7] 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 - 11,151.
JIN Mei, CHEN Xu, JIANG Tao, et al. Effect of different harvesting periods and methods on rapeseed characters[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 7 - 11, 151. (in Chinese)

[8] 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 Min, JIN Mei, WANG Gang, 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. (in Chinese)

[9] 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 Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, 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. (in Chinese)

[10] DODDS M E. A review of research on the use of the windrower for harvesting cereal crops[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1967(9): 23 - 26.

[11] FOSTER C A, STROSSER R P, PETERS J, et al. Automatic velocity control of a self-propelled windrower[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2005, 47(1): 41 - 58.

[12] DODDS M E. Observations of the performance of a self-propelled windrower[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1967(2): 70 - 75.

[13] 肖霄,罗海峰,张贝贝,等. 4SY - 1 型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),2022,48(2):222 - 226.

XIAO Xiao, LUO Haifeng, ZHANG Beibei, et al. Design and experimental study of 4SY－1 oilseed rape cutting and drying machine[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022,48(2):222－226. (in Chinese)

[14] 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):94－100.
LIAO Yitao, CHEN Chuanjie, SHU Caixia, et al. Design and experiment of 4SY－1.8 rape walking windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 94－100. (in Chinese)

[15] 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 Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS－ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 96－105. (in Chinese)

[16] 曹震,金鑫,黄海东,等.4SY－1.8 型油菜割晒机的设计[J].华中农业大学学报,2011,30(4):521－524.
CAO Zhen, JIN Xin, HUANG Haidong, et al. Design of 4SY－1.8 rape windrower[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2011, 30(4): 521－524. (in Chinese)

[17] 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 Ping, LIAO Qingxi, LI Lei, 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. (in Chinese)

[18] 李平,廖庆喜,舒彩霞,等.油菜割晒机茎秆铺放质量的故障成因分析与参数匹配研究[J].应用基础与工程科学学报, 2016,24(1):197－209.
LI Ping, LIAO Qingxi, SHU Caixia, et al. Fault analysis of stem windrowing quality and parameters match on the rape windrower[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(1): 197－209. (in Chinese)

[19] 韩彩锐,舒彩霞,李磊,等.4SY－1.8 型油菜割晒机液压驱动系统的设计[J].华中农业大学学报,2015,34(1):136－141.
HAN Cairui, SHU Caixia, LI Lei, et al. Design of the hydraulic driving system of 4SY－1.8 rape windrower[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(1): 136－141. (in Chinese)

[20] 舒彩霞,严磊,李磊,等.油菜割晒机液压驱动系统管道设计与仿真优化[J].系统仿真学报,2015,27(12):3087－3095.
SHU Caixia, YAN Lei, LI Lei, et al. Pipeline design and simulation optimization of hydraulic driving system for rape windrower[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(12): 3087－3095. (in Chinese)

[21] 舒彩霞,李磊,严磊,等.4SY－1.8 型自走式油菜割晒机机架振动特性的分析[J].华中农业大学学报,2015,34(6):119－124.
SHU Caixia, LI Lei, YAN Lei, et al. Analysis of vibration characteristic of 4SY－1.8 self-propelled rape windrower frame[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(6): 119－124. (in Chinese)

[22] 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 Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY－2.9 typed rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 53－60. (in Chinese)

[23] 金诚谦,吴崇友,金梅,等.4SY－2 型油菜割晒机设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(10):76－79.
JIN Chengqian, WU Chongyou, JIN Mei, et al. Design and experiment of 4SY－2 rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 76－79. (in Chinese)

[24] 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 Xiushan, LIU Dawei, LI Xu, 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. (in Chinese)

[25] 石增祥.4SY－2.2 型油菜割晒机的设计与试验研究[D].长沙:湖南农业大学,2017.
SHI Zengxiang. Design and experiment of 4SY－2.2 rapeseed windrower[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinees)

[26] 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 Wenmin, WU Mingliang, SHI Zengxiang, 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. (in Chinese)

[27] 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 Zhuohuai, JIANG Tao, LI Haitong, et al. Analysis and test of the laying quality of inclined transportation rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4): 59－68. (in Chinese)

[28] 张青松,廖庆喜,肖文立,等.油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J].中国油料作物学报,2018,40(5):702－711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018,40(5): 702－711. (in Chinese)

[29] 徐文轩.采伐联合机在山地林区的通过性研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
XU Wenxuan. Study on possibility of logging harvester in forest land[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011. (in Chinees)

[30] 孙术发,任春龙,李涛,等.基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性[J].农业工程学报,2018,34(17):61－67.
SUN Shufa, REN Chunlong, LI Tao, et al. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 61－67. (in Chinese)

[31] 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.