

自走式杂交狼尾草收获机切割输送装置设计与试验

王德成 胡云晟 马朋勃 胡鹏展 惠云婷 王天一 尤泳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对现有自走式杂交狼尾草收获机作业易堵塞、损失率高等技术问题,依据杂交狼尾草生长特征,试验分析了茎秆基本物理特性,提出了“锥形辊导流收割+回转耙齿输送”的整机切割输送技术方案;基于圆盘切割,设计了锥形辊与导流板,实现了切割后长茎秆集拢喂入;设计了齿板螺旋推送与链耙拖拽组配机构,实现了簇生硬质长茎秆防堵防缠顺序输送。通过整机搭载,进行了切割输送装置的田间验证试验,结果表明,该切割输送装置可一次性完成切割、喂入和输送作业,关键部件运行稳定,无漏割现象,留茬高度合格率97.52%、割台残留率3.27%、收获损失率10.37%、作业生产率0.12 hm²/h,技术指标满足相关国家及行业标准要求,能够为杂交狼尾草等簇生硬质茎秆机械化收获提供技术支持和装备支撑。

关键词: 杂交狼尾草收获机;簇生长茎秆;锥形辊导流切割装置;回转耙齿输送装置

中图分类号: S225.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)19-0269-10

OSID:



Design and Testing of Cutting and Conveying Device for Self-propelled Hybrid *Pennisetum* Harvester

Wang Decheng Hu Yunsheng Ma Pengbo Hu Pengzhan Hui Yunting Wang Tianyi You Yong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to address the technical challenges of easy clogging and high loss rate in existing self-propelled hybrid *Pennisetum* harvesters, the growth characteristics of hybrid *Pennisetum* were investigated and the fundamental physical properties of its stalks were experimentally analyzed. A technical solution for the whole-machine cutting and conveying system was proposed, integrating “tapered-roller guided harvesting + rotating rake conveying”. Based on disc cutting, a tapered roller and a guide plate were designed to achieve the gathering and feeding of long cut stalks. Furthermore, a combined mechanism comprising auger with tooth plates and chain rake dragging was developed to enable anti-clogging and anti-tangling sequential conveying of clustered hard long stalks. Field validation of the cutting and conveying device was conducted through whole-machine implementation. The results demonstrated that the proposed device could complete cutting, feeding, and conveying in a single pass. Key components operated stably without missing any cutting. The stubble height qualification rate reached 97.52%, the header residue rate was 3.27%, the harvest loss rate was 10.37%, and the operational productivity was 0.12 hm²/h. All technical indicators met the requirements of relevant national and industry standards. The research result can provide technical and equipment support for the mechanized harvesting of clustered hard stalks such as hybrid *Pennisetum*.

Key words: hybrid *Pennisetum* grass harvester; tufted stems; conical roller flow guiding cutting device; rotating rake conveyor

收稿日期: 2026-03-30 修回日期: 2026-05-07

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)、国家重点研发计划项目(2022YFD2001905)和中国农业大学2115人才工程项目

作者简介: 王德成(1965—),男,教授,博士,主要从事饲草生产机械化技术与装备研究,E-mail: Wdc@cau.edu.cn

通信作者: 尤泳(1980—),男,副教授,博士,主要从事牧草机械化研究,E-mail: youyong@cau.edu.cn

0 引言

杂交狼尾草是由美洲狼尾草与象草杂交而成的草本植物,喜温暖湿润,广泛种植于我国南方地区。该品种兼具双亲适口性好、营养价值高的优点,是当地主要的青饲料来源^[1-2]。杂交狼尾草植株草株高2.0~2.5 m,高大品种可达4 m,成熟期茎基部直径18~20 mm,具有抗逆性强、含水率高、分蘖能力强等特性,单株分蘖8~15个,年可收获4~6次,再生能力突出,可在冬春季青饲料短缺期为畜禽提供稳定供给^[3]。然而,由于茎秆硬度高、丛生分蘖的生物学特性,现有青饲料收获机普遍存在收获阻力大,不易切断,喂入不畅、茎秆缠绕、故障率高等问题^[4-7],适应性差,尚无专用收获机械与装置,人工收获运输效率低、资源浪费严重,已成为制约该产业发展的核心瓶颈^[8]。

近年来,钱君等^[9]在甘蔗切根装置上采用了“滑切+剪切”组合方式,通过滑剪组合可有效降低硬质茎秆的弯曲阻力和惯性力,保证了硬质茎秆的顺畅切割;王昱潭等^[10]结合柠条的簇状丛生生长特点设计了一种针对柠条群体茎秆的液压剪式平茬机,优化改进了单支撑切割器,有效降低了柠条收获机的破茬率与漏割率;郇晓龙等^[11]设计了一种针对刈割牧草平茬切割的装置,可降低机械在切割作业时的功耗,降低切割后的茬口破损率。现有研究在解决硬质茎秆割铺、不对行作物收割以及平茬切割等方面取得了成果,但在簇生高秆切割输送连续作业等方面研究较少。

针对杂交狼尾草机械化切割输送技术与装备目前还处于空白阶段,本文从作物生物学特性和农艺两方面入手,针对杂交狼尾草簇生分蘖^[12],茎秆高大粗壮,在收获中易缠绕壅堵的问题,设计一种杂交狼尾草切割输送装置,完成簇生硬质茎秆低损切割与顺畅输送作业^[13-14],并通过样机田间作业进行装置的验证试验。

1 杂交狼尾草切割输送技术方案

1.1 杂交狼尾草基本物理特性

杂交狼尾草作为一种簇生高大禾本科饲草,在收获过程中主要受茎秆物理特性(茎秆长度、韧性等)、生长特性(分蘖、多年生等)和收获中切割输送方式的影响。为探究杂交狼尾草茎秆物料特性,分别采用 INSTRON 3367 型万能试验机、DHG-9240A 型电热鼓风干燥箱、UTP-313 型电子天平,于中国农业大学工学院实验室进行了茎秆物料特性测定,主要物理参数见表1。

表 1 杂交狼尾草茎秆物理特性参数
Tab.1 Physical parameters of hybrid *Pennisetum* stem

参数	数值
平均直径/mm	18~20
含水率/%	83
剪切模量/MPa	25.6
密度/(kg·m ⁻³)	1 085
动摩擦因数	0.36

根据杂交狼尾草生长特征和物理特性参数可知,杂交狼尾草切割输送主要技术问题为:簇生密植带来的非均匀切割与漏切、压倒和高秆高韧性交织导致的缠绕、打结、堵塞。

1.2 切割输送装置技术方案设计

现有杂交狼尾草收获机包括割台、输送喂入装置、切碎抛送装置、储料装置、成捆缠网装置、行走系统、传动系统以及控制系统^[14]。行走系统为履带式底盘,采用液压驱动,无级变速,最小转弯半径1 400 mm;整机由风冷式柴油机提供动力,整机工作步骤包括切割、输送、喂入、切碎、抛送、打捆、缠网等。自走式杂交狼尾草收获机结构如图1所示,主要技术参数见表2。



图 1 自走式杂交狼尾草收获机结构示意图
Fig.1 Schematic of self-propelled hybrid *Pennisetum* harvester

1. 割台 2. 输送喂入装置 3. 切碎抛送装置 4. 储料装置 5. 成捆缠网装置 6. 行走系统

表 2 自走式杂交狼尾草收获机主要技术参数
Tab.2 Main technical parameters of self-propelled hybrid *Pennisetum* harvester

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 300×2 000×2 600
整机质量/kg	6 150
配套功率/kW	88.2
行驶速度/(km·h ⁻¹)	3~5
割茬高度/cm	10
割台转速/(r·min ⁻¹)	1 500
工作幅宽/mm	1 800

基于现有自走式杂交狼尾草整机结构(图1),

提出了“锥形辊导流收割 + 回转耙齿输送”的整机切割输送技术方案,实现簇生杂交狼尾草稳态切割与锥形辊扶禾导流,长茎秆强抓取推送的顺畅输送。

1.3 切割输送装置结构与原理

切割输送装置主要由割台与输送装置两部分组成,其中割台采用“锥形辊 + 导流板 + 螺旋输送机”协同防堵设计,包括扶禾器、导流板、切割器^[15]、塔轮输送机、锥形喂入辊、螺旋输送机^[16];输送喂入系统采用“梯形输送”增强对茎秆的抓取和输送能力,主要包括链耙式输送机、张紧装置、观察窗与对向夹持喂入辊;切割输送装置结构示意图如图 2 所示。

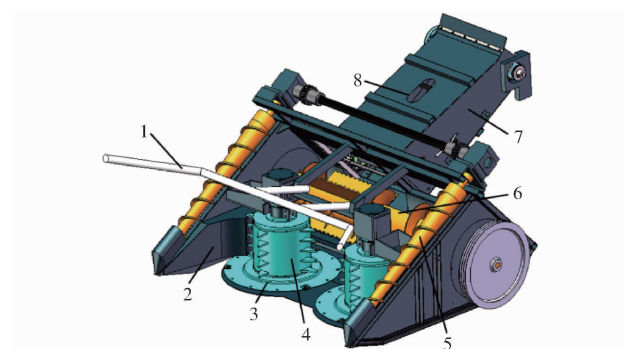


图 2 切割输送装置结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of cutting and conveying device

1. 扶禾器 2. 侧向导流板 3. 切割器 4. 塔轮输送机 5. 锥形喂入辊 6. 螺旋输送机 7. 链耙式输送机 8. 观察窗

作业开始时,扶禾器将杂交狼尾草茎秆聚拢扶正,切割器将杂交狼尾草茎秆底部切断并由塔轮输送机将切断的杂交狼尾草茎秆由两侧向中间输送,同时割台左右两侧的锥形辊与导流板将外侧的杂交狼尾草茎秆与叶片集拢至中部,由塔轮输送机辅助茎秆顺向进入割台内部的螺旋输送机^[17],由螺旋输送机将进入割台的茎秆推送至一侧,在螺旋输送机拨板的作用下,茎秆被送入输送机^[18],输送机上的 U 形链板使茎秆沿输送通道有序通过输送机最终抵达喂入辊进入切碎系统,完成切割与输送喂入^[19]。

2 关键装置设计与分析

2.1 切割器设计

杂交狼尾草具有不对行收获、簇状生长、茎秆粗壮易分蘖的生长特性,且茎秆纤维素质含量高,为保证切割器具备足够切割强度和切削力,避免切割过程中出现卡刀、断刀现象;同时切割后需实现茎秆有序抛送,便于后续收集,结合其茎秆特点,优先采用线速度较大的圆盘式切割器。切割器转速需满足切割速度大于茎秆进给速度,确保切割彻底,避免拖拽茎秆,即

$$n = \frac{60v_c}{\pi D} \quad (1)$$

式中 n ——切割器转速, r/min

v_c ——刀片线速度, m/s

D ——切割器直径, m

切割器在切割过程中,刀片运动平面与水平面呈一定的夹角 φ_g (此夹角为割台倾角),茎秆受到刀片的切割力可以分解成两个相互垂直方向上的力。一个为垂直刀刃线方向的力,另一个为平行于刀刃线方向上的力,平行于刀刃线方向上的力 F_t 有利于打破茎秆表面较硬的纤维组织,也使得切割茎秆的刀片实际楔角小于刀片横向正切时的楔角,可有效提高作业效果;因此圆盘切割器在作业时,应与水平面保持一定夹角,如图 3 所示。

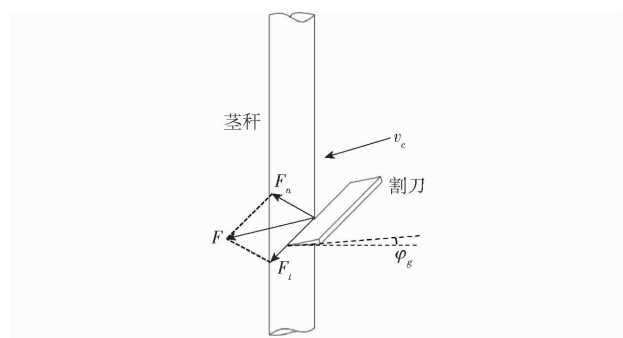


图 3 割刀切割茎秆受力简图

Fig. 3 Force diagram of cutter cutting stalks

刀具对茎秆施加力的同时,茎秆会对刀刃楔面、刀具上下表面产生正压力 N_1 、 N_2 、 N_3 ,同时还会受到与已切茎秆表面接触产生的摩擦阻力 f_1 、 f_2 、 f_3 ,刀片所需的切割力 F 计算式为

$$F = N_1 \sin(\tau_d + \varphi_g) + f_1 \cos(\tau_d + \varphi_g) + f_2 + f_3 \quad (2)$$

式中 τ_d ——动态滑切角, ($^\circ$)

切割力与割刀厚度呈正比关系,相同刃角下割刀越厚,切断所需的切割力越大;同时切割力矩随刀具切割深度 l_n 的增加而增加,切割力也随之增加,割刀受力如图 4 所示,割刀切割深度如图 4b 所示。因此对于割刀而言,相同刃角下刀具厚度决定了其在切割过程中的切割阻力、切割效果和耐用性。厚度过大时,切割阻力剧增,茎秆破坏严重,切割器动平衡下降,功耗明显上升;厚度过小则会导致刀具耐磨性差,强度不足,易崩刃、卷刃。

区别于传统青贮玉米的切割方式,杂交狼尾草簇生分蘖,每簇茎秆分布密度大,这种密集丛生的形态使得切割器在作业时,极易形成切割盲区;第 1 刀切割到茎秆以后未能完全切断,在第 2 刀未能接触到茎秆时刀盘已撞击到植株茎秆并且发生碾压,对茎秆造成损伤且切割效果差,如图 5 所示。通过前期相关试验发现刀盘撞击碾压茎秆问题与割刀有效

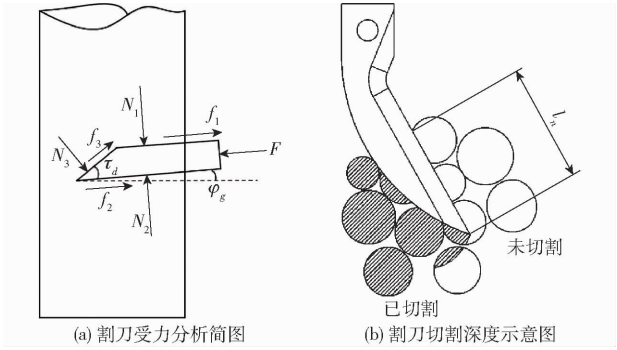


图 4 割刀切割受力示意图

Fig. 4 Force analysis diagrams of cutter cutting

切割长度 l 、杂交狼尾草根茎秆直径 d 、机器前进速度 V 等参数有关。

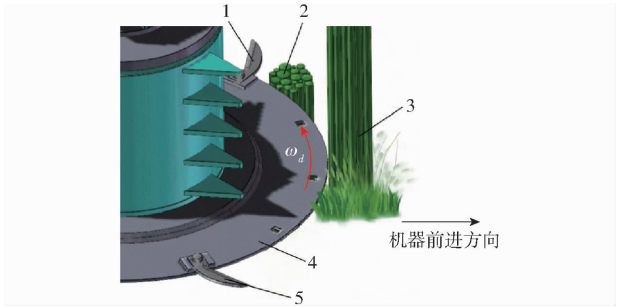


图 5 切割刀盘碰撞茎秆示意图

Fig. 5 Schematic showing cutting disc colliding with stalk

1. 刀片 2. 已切断茎秆 3. 未切断茎秆 4. 刀盘 5. 刀片

割刀有效切割长度偏小,无法完全切断整簇茎秆,使得刀盘碰撞碾压茎秆,影响收获效率;割刀切割长度偏长,刀刃与另一端切割刀盘易发生撞刀,不仅损坏割刀且易发生安全事故。因此为不发生撞击碾压茎秆和撞刀现象,顺利完成切割作业,当机器在前进时,需满足被切割茎秆的切割断面在水平面上的投影没有被相邻两个割刀先后切割时所覆盖的水平投影范围完全包含进去。因此割刀的水平长度要大于等于杂交狼尾草底部茎秆直径 d 的两倍与刀盘回转角内机组前进的距离之和。即割刀长度需满足

$$l\cos\varphi_g \geq 2d + V \frac{\alpha_d}{\omega_d} \tag{3}$$

其中 $\alpha_d = \frac{2\pi}{k}$ (4)

式中 α_d ——刀片间隔角,rad
 ω_d ——刀盘角速度,rad/s
 k ——均布割刀数量

割刀在刀架上旋转作业时,刀刃曲线上任意一点形成的切割轨迹为余摆线,每一条余摆线之间形成了一条割刀余摆带,形成的余摆带宽度趋近于割刀长度 l ,如图 6 所示,为确保在作业时不会产生漏割,因此在机器作业时割刀余摆带的宽度总和应与

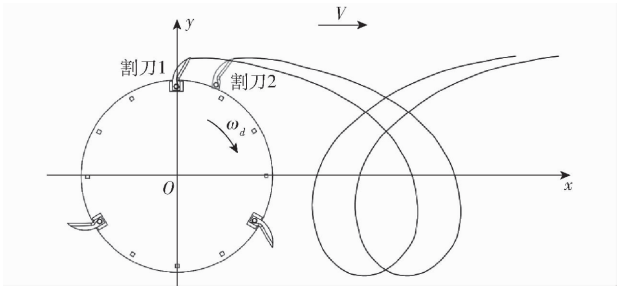


图 6 刀刃切割轨迹

Fig. 6 Blade cutting path diagram

机器前进距离 L 相等,即

$$L = kl = \frac{2\pi V}{\omega_d} \tag{5}$$

因此,通过公式(5),割刀数量的计算式为

$$k = \frac{2\pi V}{l\omega_d} \tag{6}$$

综上分析,当割刀有效作业长度为 12 mm,割刀厚度为 4 mm,单个刀盘上割刀数量为 3 把时能保证茎秆不被压断,完整切割且取得较优抛送效果。

2.2 割台喂入导流装置设计

目前传统的青饲料收获机割台由切割与喂入两部分组成,以圆盘式切割器切割和中间输送的方式为主,而受功率和结构紧凑性的限制,中间输送喂入的方式会使输送器部分横向体积变大、轴距变长,且中置方式输送装置位于驾驶室下方,不利于驾驶员的观察,因此采用一侧偏置输送方式。

通过前期试验研究发现,圆盘切割器上方的塔轮与割台两侧形成了一个封闭空间,当机器在作业过程中遇到分蘖能力强、团簇大的茎秆时,一部分茎秆会进入圆盘切割器上方塔轮与割台两侧,在机器前进时没有外部装置对进入封闭空间的茎秆施加横向作用力,一段时间后作物茎秆在封闭空间内出现堆积现象,且茎秆中上部大量叶片会缠绕螺旋输送器与圆盘切割器,造成杂交狼尾草物料流的积压与滞留,影响茎秆后续输送。随着杂交狼尾草进料量不断增加,单位时间内割台的物料不断增加,在割台内与喂入口处,极易造成堵塞,如图 7 所示。

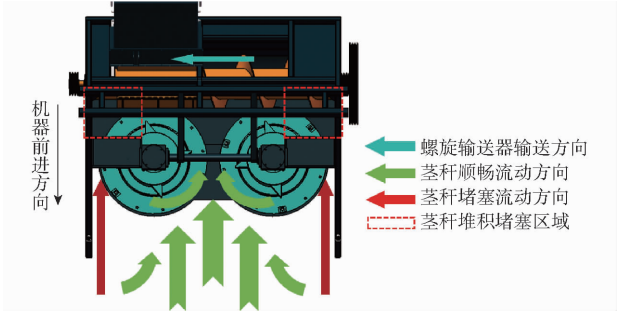


图 7 无导流板时茎秆运动方向示意图

Fig. 7 Schematic of stalk movement direction without deflector

割刀最内侧端点 A 的速度方程为

$$\begin{cases} v_{xA} = V + r\omega_d \cos(\omega_d t) \\ v_{yA} = r\omega_d \sin(\omega_d t) \end{cases} \tag{13}$$

合速度 v_b 为

$$v_b = \sqrt{v_{xB}^2 + v_{yB}^2} = \sqrt{R^2 \omega_d^2 + 2R\omega_d V \cos(\omega_d t) + V^2} \tag{14}$$

对割刀旋转过程中的速度进行分析,不同位置的旋转速度不同,当旋转角 $\omega_d t$ 为 0 时,割刀达到最大速度,即

$$v_b = V + R\omega_d \tag{15}$$

结合两侧锥形辊的扶禾辅助喂入与导流板的引流作用,茎秆运动合速度方向由两侧向中间运动,形成顺畅物料流。

2.3 螺旋输送器的设计

螺旋输送机作为输送系统的关键部件主要由螺旋叶片、轴和外壳组成,在先前的试验中发现使用其他收获机的螺旋输送机进行输送时,杂交狼尾草由于其茎秆粗壮较硬、含水率高、韧性强等特性容易出现打滑拥堵等现象,因此,本文对输送杂交狼尾草的螺旋输送机进行了设计。

螺旋输送器的轴向速度 v_1 为

$$v_1 = t_0 n_0 \mu \tag{16}$$

式中 t_0 ——叶片螺距,mm

n_0 ——螺旋输送机转速,r/s

μ ——物料填充系数

由于杂交狼尾草茎秆含水量大、茎秆粗细程度差异大、簇生分蘖的特点使得其填充系数变化较大,因此通过其摩擦角与螺旋升角进行推算,如图 11 所示。

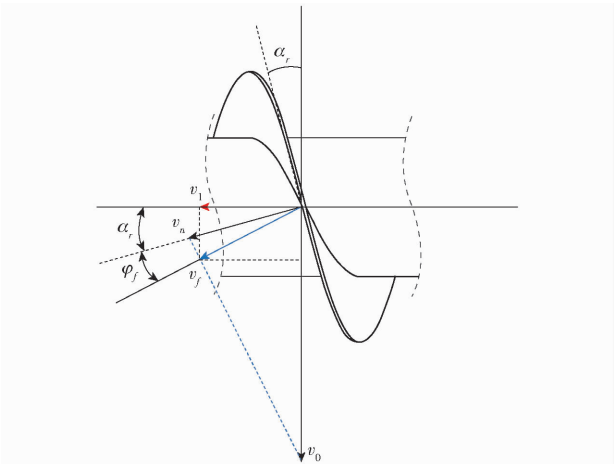


图 11 螺旋输送机轴向速度分析图

Fig. 11 Graph of axial velocity analysis for screw conveyor

对螺旋输送机进行速度分析,有

$$\begin{cases} v_1 = v_f \cos(\alpha_r + \varphi_f) \\ v_f = \frac{v_n}{\cos \varphi_f} \\ v_n = v_0 \sin \alpha_r \\ v_0 = \omega_l r = \frac{n \pi}{30} \frac{t_0}{2 \pi \tan \alpha_r} = \frac{t_0 n}{60 \tan \alpha_r} \end{cases} \tag{17}$$

$$v_1 = \frac{t_0 n}{60} \cos^2 \alpha_r (1 - \tan \varphi_f \tan \alpha_r) \tag{18}$$

式中 v_f ——物料运动速度,m/s

v_n ——物料挤压叶片表面的速度分量,m/s

α_r ——螺旋输送机内径螺旋角,(°)

φ_f ——杂交狼尾草与金属的摩擦角,(°)

v_0 ——螺旋输送机圆周速度,m/s

ω_l ——螺旋输送机角速度,rad/s

螺旋叶片同一元线个点半径不同,因此各个点位螺旋角度也不同,外径螺旋角 α_R 最小,内径螺旋角 α_r 最大。螺旋角越大,输送能力越强,螺旋角太小会影响运输,甚至出现空转无法运输的现象。

为使得物料能够顺利输送,由螺旋输送器的轴向速度 v_1 可知,螺旋输送器的内径螺旋角 α_r 和外径螺旋角 α_R 应满足

$$\begin{cases} \alpha_r \leq 90^\circ - \varphi_f \\ \alpha_R \approx 45^\circ - \frac{\varphi_f}{2} \end{cases} \tag{19}$$

根据《农业机械设计手册》得螺旋输送机主要参数,外径 $D_l = 410$ mm,螺距 $t_0 = 380$ mm,轴径 $d_0 = 220$ mm,叶片厚度 $s = 4$ mm。由前人所做研究可知,杂交狼尾草与钢板的物料角为 20.5° 。根据设计参数,在 Solidworks 建模软件中进行建模得到螺旋输送器的模型,并测得螺旋输送器的内径螺旋角 α_r 为 65.49° ,外径螺旋角 α_R 为 34.38° ,圆整后内径螺旋角 α_r 为 66° ,外径螺旋角 α_R 为 34° ,符合螺旋输送机轴向输送的基本条件,如图 12 所示。

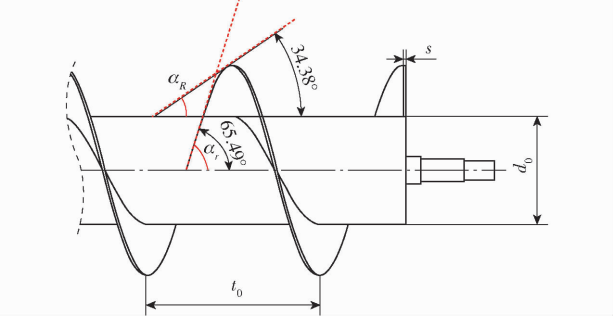


图 12 螺旋输送机轴向输送条件示意图

Fig. 12 Schematic of axial conveying conditions for screw conveyor

喂入拨板安装在螺旋输送机输送末端,功能在于将螺旋叶片推送过来的茎秆抓取拨送至链耙式输

送器中,使得链耙能够抓取茎秆进行输送,防止硬质茎秆打滑,重新回到螺旋输送机中造成堵塞。拨板相对于拨指表面更加光滑,减少了叶片缠绕的可能性,同时,为增大拨板对茎秆抓取能力的同时不会将茎秆压裂,拨板末端开有梯形槽,槽底长度应不大于茎秆根部平均直径,槽底长度取 18 mm,拨板长度应不小于喂入通道开口长度,拨板长度 L_b 取 500 mm;在拨板转动方向对侧设有加强肋板,增强拨板使用强度,如图 13 所示。

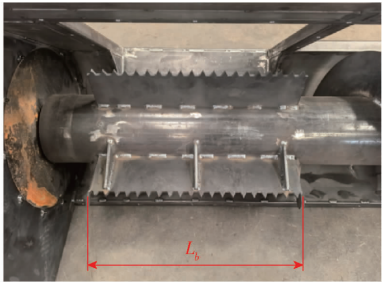


图 13 螺旋输送机拨板结构示意图

Fig. 13 Schematic of screw conveyor scraper structure

2.4 输送装置设计

物料从割台进入切碎抛送装置过程中的顺畅流动是整机稳定收获的重要因素之一^[20-21]。杂交狼尾草茎秆被割断后经螺旋输送机转运至输送装置中,再经输送装置输送至喂入辊,由喂入辊夹持作物进入切碎抛送装置。现有联合收获机输送装置采用对辊式输送和链耙式输送两种方式,通过前期研究发现,青贮玉米收获机常采用的对辊式喂入,适用于茎秆整齐、叶片少的作物;而杂交狼尾草使用单层多喂入辊的输送方式。在收获过程中,作物茎秆顶端的大量叶片进入输送机以后极易使喂入辊发生缠绕进而堵塞输送机,如图 14 所示,严重影响整机持续稳定作业,因此本文采用链耙式输送方式进行输送。



图 14 单层多辊结构输送缠绕图

Fig. 14 Schematic of single-layer multi-roller conveyor system

输送装置主要由主动链轮、被动链轮、输送链条、链耙、张紧装置、盖板和壳体组成,如图 15 所示。主要功能是通过主动链轮和被动链轮的转动,带动链耙将割断的杂交狼尾草茎秆输送至切碎抛送装置,完成杂交狼尾草割断后的输送过程。

链耙式输送机链耙高度一般为 30 ~ 40 mm,厚度约为 4 mm,采用 U 形齿齿板,杂交狼尾草茎秆平

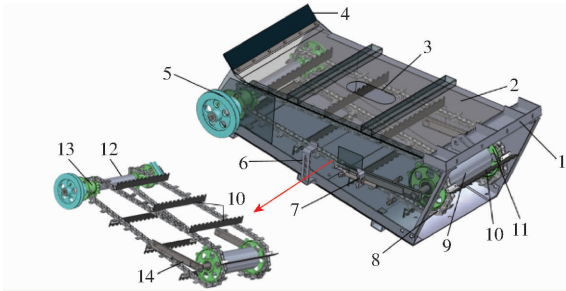


图 15 输送装置结构示意图

Fig. 15 Schematic of conveyor system

1. 割台挂接机构 2. 壳体 3. 观察窗口 4. 橡胶挡板 5. 主动带轮 6. 挂接耳 7. 张紧装置 8. 输送链条 9. 被动辊 10. 刮板 11. 被动链轮 12. 主动辊 13. 主动链轮 14. 伸缩臂

均直径一般为 10 ~ 15 mm,成熟期杂交狼尾草底部茎秆直径为 20 ~ 30 mm,在运输过程中,直径最大的茎秆末端先进入输送装置,为能顺利将茎秆进行输送,需将链耙与底板之间的间距控制在 30 mm 以内。

输送机主动链轮与被动链轮采用不同大小的链轮,在安装中链轮尺寸较大的一段为从动端,靠近于螺旋输送机拨板处,杂交狼尾草茎秆由割台进入输送机时茎秆根部与耙片顶端运动路径接触面更大,能有效收集各种姿态的茎秆,防止茎秆因未被抓取掉落引起的堵塞。

茎秆进入输送装置以后,被输送链耙沿输送装置底部向上输送,对链耙输送过程中的杂交狼尾草茎秆进行分析,如图 16 所示。

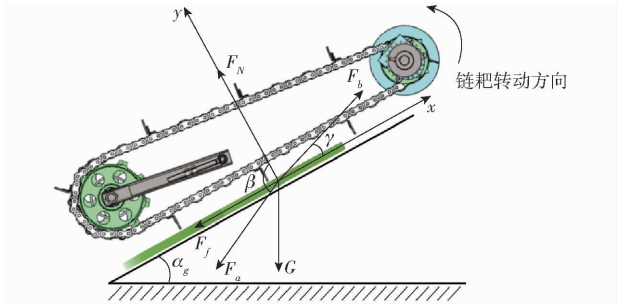


图 16 杂交狼尾草茎秆受链耙作用受力分析图

Fig. 16 Force analysis diagram of hybrid *Pennisetum* grass stems under chain harrow action

对单根茎秆进行动力学分析,得

$$m_0 a_x = F_b \cos \gamma - F_a \cos \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) - G \sin \alpha_g - F_f \tag{20}$$

$$m_0 a_y = F_N + F_b \sin \gamma - F_a \sin \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) - G \cos \alpha_g \tag{21}$$

式中 m_0 ——茎秆质量,kg
 G ——茎秆重力,N
 a_x —— x 轴上的加速度, m/s^2

a_y —— y 轴上的加速度, m/s^2
 F_a ——茎秆受到物料流的合力, N
 F_f ——茎秆与输送装置底板的摩擦力, N
 F_N ——底板对茎秆的支持力, N
 F_b ——链耙对茎秆的推力, N
 α_g ——输送装置与地面的夹角, $(^\circ)$
 β ——其他物料对茎秆的作用力与支持力的夹角, $(^\circ)$
 γ ——链耙推动茎秆的作用角, $(^\circ)$

通过以上运动学分析可知, 输送过程中茎秆在运动方向上的加速度为

$$a_x = \frac{F_b \cos \gamma}{m_0} - \frac{F_a \cos \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right)}{m_0} - g \sin \alpha_g - \frac{F_f}{m_0}$$

(22)

通过加速度表达式可知, 其主要与链耙推动茎秆的作用角度、茎秆受到物料流合力和输送装置与地面的夹角有关。

3 田间验证试验

3.1 试验条件

将自走式杂交狼尾草收获机切割喂入装置装机并于云南省曲靖市马龙区马鸣乡饲草高效生产重大技术集成示范区试验田开展田间试验。试验田坡度 5° , 最大爬升角度不超过 15° , 杂交狼尾草品种为云牧 2 号象草, 生长期一年, 平均株距 65 cm , 平均行距 83 cm , 平均团簇半径约为 20 cm , 株高约为 4 m , 每株平均直径约为 18.6 cm 。在试验地块中选取 5 块 $2\text{ m} \times 10\text{ m}$ 生长期一致的杂交狼尾草试验田, 共进行 5 次重复试验。试验前, 预先清除试验区域内杂物、石块异物、生长地形位置异常等影响作业的杂交狼尾草植株。

试验前, 预先将样机停放至试验田, 检查样机情况确保试验时运行无误, 控制手柄将割台降低至合适高度。为兼顾作业连续性、生产效率、驾驶员调节对行准确性及安全性, 样机作业速度控制在 $1.0 \sim 1.5\text{ km/h}$, 同时根据设计要求, 待割台圆盘切割器转速至 $1\,500\text{ r/min}$ 左右, 喂入输送系统、切碎抛送系统和储料与缠网打捆系统运行稳定后开始试验。

3.2 试验方法

参照相关标准, 以留茬高度合格率、割台残留率、收获损失率、作业生产率等试验指标^[22-23]作为杂交狼尾草收获机切割输送的性能评价指标。

(1) 留茬高度合格率

留茬高度影响杂交狼尾草后续的生长与收获, 杂交狼尾草收获农艺最佳留茬高度为 $15 \sim 25\text{ cm}$,

最大不超过 30 cm , 统计每组试验后地面茬口高度数据, 并统计在范围内的合格数量, 留茬高度合格率计算式为

$$H_g = \frac{N_h}{N_z} \times 100\%$$

(23)

式中 H_g ——留茬高度合格率, %
 N_h ——茎秆茬口高度合格数
 N_z ——茎秆茬口总数

(2) 割台残留率

割台茎秆残留影响物料输送喂入的流畅程度, 残留率较高使得能耗增加甚至发生堵塞。分别统计估算每组试验后割台内物料残留的质量与收获前试验区域内作物总质量, 割台残留率计算式为

$$W_g = \frac{M_g}{M_z} \times 100\%$$

(24)

式中 W_g ——割台残留率, %
 M_g ——割台内残留物料总质量, kg
 M_z ——每组试验区域内作物总质量, kg

(3) 收获损失率

杂交狼尾草收获机损失率包括掉落损失、残留损失和压倒损失, 统计估算每组测试区内杂交狼尾草物料总质量、掉落在割台中物料总质量以及被压倒的杂交狼尾草茎秆总质量, 计算式为

$$S_z = \frac{M_g + M_d + M_y}{M_z} \times 100\%$$

(25)

式中 S_z ——总损失率, %
 M_d ——每组试验过程掉落的茎秆总质量, kg
 M_y ——每组试验中被压倒的茎秆总质量, kg

(4) 作业生产率

作业生产率反映的是杂交狼尾草收获机单位时间内收获一定区域面积的能力, 可通过种植行距和行走速度确定, 计算式为

$$E_c = \frac{3\,600ZV}{10\,000}$$

(26)

式中 E_c ——作业生产率, hm^2/h
 Z ——平均种植行距, m

3.3 试验结果与分析

田间试验现场与作业效果如图 17 所示。样机在田间试验过程当中, 整机行驶性能和作业稳定性较好, 切割输送装置运行良好, 能够一次性完成切割、喂入和输送作业。对样机田间试验方案和指标评价方法进行设计与规定, 分别计算留茬高度合格率、割台残留率、收获损失率、作业生产率, 取 5 次试验结果的平均值, 留茬高度合格率为 97.52% 、割台残留率为 3.27% 、收获损失率为 10.37% 、作业生产率为 $0.12\text{ hm}^2/\text{h}$ 。



图 17 现场试验与作业效果图

Fig. 17 Field tests and operational results

田间试验过程中,试验区域内杂交狼尾草均被有效切割,无漏割,割台残留率为 3.27%,都是由于茎秆断裂造成,其主要原因为切割瞬间喂入量过大使得茎秆被折断打碎而掉落在割台中。收获损失率为 10.37%,由压倒损失和割台残留损失造成,试验田内被切断茎秆底部茬口将履带垫高,极易将茎秆压倒。造成留茬高度差距较大的原因是切割后团簇留茬高度波动大,如图 18 所示,在行进过程中跨越团簇茬口时割台倾斜严重,因此地形与地面无规则的起伏变化是造成切割茬口差异大的主要原因。

4 结论

(1)基于现有自走式杂交狼尾草整机结构,提出了“锥形辊导流收割+回转耙齿输送”的整机切割输送技术方案,实现簇生杂交狼尾草稳态切割与

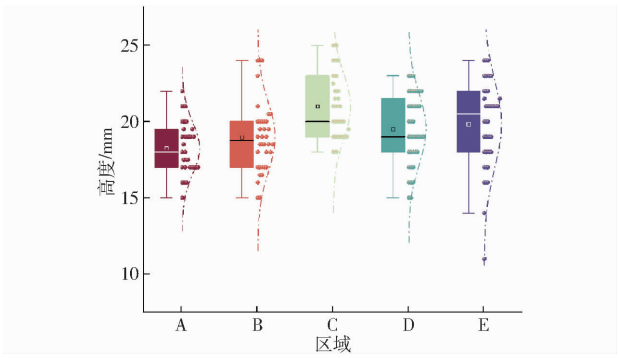


图 18 不同区域切割后留茬高度图

Fig. 18 Stubble height diagram after cutting in different areas

锥形辊扶禾导流,长茎秆强抓取推送的顺畅输送。
(2)基于杂交狼尾草簇生分蘖、木质素含量高的特性,设计了高效低损切割器;基于圆盘切割,设计了锥形辊与导流板,实现了切割后长茎秆集拢喂入;设计了齿板螺旋推送与链耙拖拽组配机构,实现了簇生硬质长茎秆防堵防缠顺序输送。
(3)田间试验结果显示,杂交狼尾草收获机留茬高度合格率为 97.52%、割台残留率为 3.27%、收获损失率为 10.37%、作业生产率为 0.12 hm²/h;技术指标满足相关国家及行业标准要求,能够为杂交狼尾草等簇生硬质茎秆机械化收获提供技术支持和装备支撑。

参 考 文 献

[1] 侯新村,滕珂,郭强,等. 狼尾草属牧草研究进展[J]. 植物学报, 2022, 57(6): 814-825.
Hou Xincun, Teng Ke, Guo Qiang, et al. Research advances in forage *Pennisetum* resource[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 814-825. (in Chinese)

[2] Zheng Xuefang, Wang Mingkuang, Che Jianmei, et al. A novel microbial fertilizer derived from *Pennisetum giganteum* juice for drip-fertigation of solanaceous fruit vegetables[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 235: 121668.

[3] Ojediran O J, Dahunsi S O, Aderibigbe V, et al. Valorization of *Pennisetum purpureum* (Elephant grass) and piggery manure for energy generation[J]. Fuel, 2021, 302: 121209.

[4] 刘国道,杨虎彪. 中国南方牧草志:第2卷[M]. 北京:科学出版社, 2022.

[5] Cao Qingqiu, Yuan Hongfang, Zhang Shengwei, et al. Low-damage cutting mechanism and optimisation experiments of operating parameters of *Caragana korshinskii* Kom. Stems based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 110948.

[6] Corredo L D, Canata T F, Maldaner L F, et al. Sugarcane harvester for in-field data collection: state of the art, its applicability and future perspectives[J]. Sugar Tech, 2021, 23(1): 1-4.

[7] 王德成,李思标,尤泳,等. 饲草生产与加工机械化技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 1-20.
Wang Decheng, Li Sibiao, You Yong, et al. Review and prospect of full-process mechanization technology in forage production and processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 1-20. (in Chinese)

[8] 刘鹏伟,杨敏丽,张小军,等. 基于高质高效的西南丘陵山区机械化生产模式评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 140-149.
Liu Pengwei, Yang Minli, Zhang Xiaojun, et al. Evaluation of mechanized production model based on high quality and high efficiency in southwest hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 140-149. (in Chinese)

[9] 钱君,马少春,徐杨,等. 滑剪组合式甘蔗根切装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 37-47.
Qian Jun, Ma Shaochun, Xu Yang, et al. Design and test of sliding shear combined sugarcane basecutter[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 37-47. (in Chinese)

- [10] 王昱潭, 张加欣, 高垚垚, 等. 液压剪式柠条平茬机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(14): 71–81.
Wang Yutan, Zhang Jiaxin, Gao Yaoyao, et al. Design and test of the hydraulic shear-type *Caragana korshinskii* Kom. coppicing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(14): 71–81. (in Chinese)
- [11] 郇晓龙, 尤泳, 王德成, 等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 112–124.
Huan Xiaolong, You Yong, Wang Decheng, et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 112–124. (in Chinese)
- [12] 王德成, 贺长彬, 武红剑, 等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1–25.
Wang Decheng, He Changbin, Wu Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1–25. (in Chinese)
- [13] 赵一鸣, 戴飞, 史瑞杰, 等. 自走式制种玉米联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 121–134.
Zhao Yiming, Dai Fei, Shi Ruijie, et al. Design and experiment of self-propelled seed corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 121–134. (in Chinese)
- [14] 尤泳, 王红达, 郇晓龙, 等. 王草收获机滚筒破碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 134–142.
You Yong, Wang Hongda, Huan Xiaolong, et al. Design and experiment of roller crushing device of king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 134–142. (in Chinese)
- [15] 尤泳, 胡鹏展, 王德成, 等. 青饲料收获技术与装备研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 21–41.
You Yong, Hu Pengzhan, Wang Decheng, et al. Review of research on green forage harvesting technologies and equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 21–41. (in Chinese)
- [16] 赖晓, 陈佩钟, 李尚平, 等. 整秆式甘蔗收获机输送调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 121–128.
Lai Xiao, Chen Peizhong, Li Shangping, et al. Design and experiment of conveying control system for whole rod sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 121–128. (in Chinese)
- [17] Xie Luxin, Wang Jun, Cheng Shaoming, et al. Optimisation and dynamic simulation of a conveying and top breaking system for whole-stalk sugarcane harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2020, 197: 156–169.
- [18] 李海同, 万星宇, 徐阳, 等. 油菜收获机割台螺旋输送器间隙自适应调节机构研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 115–122.
Li Haitong, Wan Xingyu, Xu Yang, et al. Clearance adaptive adjusting mechanism for header screw conveyor of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 115–122. (in Chinese)
- [19] 何晓宁, 张方焱, 尚书旗, 等. 油莎豆联合收获机合页筛片式升运装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 148–157.
He Xiaoning, Zhang Fangyan, Shang Shuqi, et al. Design and experiment of hinge lifting device of *Cyperus esculentus* combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 148–157. (in Chinese)
- [20] 靳范, 杨世航, 张俊三, 等. 玉米籽粒收获机可变间隙式过桥设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 349–360.
Jin Fan, Yang Shihang, Zhang Junsan, et al. Design and experiment of variable gap conveying device for corn kernel harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 349–360. (in Chinese)
- [21] 汪凤珠, 赵博, 刘阳春, 等. 玉米青贮收获机多参数检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 127–136.
Wang Fengzhu, Zhao Bo, Liu Yangchun, et al. Design and experiment of multi-parameter detection system for corn silage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 127–136. (in Chinese)
- [22] 王立军, 李义博, 郑招辉, 等. 玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 124–136.
Wang Lijun, Li Yibo, Zheng Zhaohui, et al. Design and experiment of mechanism of throwing impurity in cleaning device of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 124–136. (in Chinese)
- [23] 费焱, 王涛, 李怡鹏, 等. 履带自走式单行茭白收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 403–410.
Fei Yan, Wang Tao, Li Yipeng, et al. Design and experiment of crawler self-propelled single-row harvester for *Zizania latifolia* [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 403–410. (in Chinese)