

高秆作物双限位滑轨抑振机构式链轨割台设计与试验

刘天宏^{1,2} 李洪迁^{3,4} 田富洋^{1,4} 闫云鹏^{1,4} 殷晏娇¹ 宋占华^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018;

2. 山东省设施园艺智慧生产技术装备重点实验室(筹), 泰安 271018;

3. 山东五征集团有限公司, 日照 262399; 4. 农业装备智能化山东省工程研究中心, 泰安 271018)

摘要: 针对现有往复式和圆盘锯式割台在收获作物时存在振动剧烈、功耗高及适应性差等问题,设计了一种带有双限位滑轨抑振机构的链轨式割台。通过运动学分析,确立了实现先割后输且无漏割的理论切割速比范围为 $3.75 < \lambda \leq 5$ 。针对链传动引起的非线性振动,研究所引入的双限位滑轨机构使动刀在竖直方向的振幅显著下降44%,并基本消除了水平横向的周期性波动。基于刚柔耦合模型进行响应面优化分析,结果表明,各因素对切割性能影响的显著性主次顺序为:切割速度、前进速度、切割倾角。仿真寻优得出的最佳作业参数为:前进速度3.0 m/s、切割速度13.5 m/s、切割倾角8°。在此条件下,甜高粱单位直径最大切割力为9.5 N/mm,单位面积切割功耗为0.09 J/mm²。台架试验进一步验证了实际最优参数为:前进速度3.3 m/s、切割速度12.5 m/s、切割倾角7.5°,此工况下单位直径最大切割力实测值为(8.8±0.3) N/mm,与仿真值的相对误差稳定在6.3%~13.2%之间。该结果充分证实了设计的割台结构对作物具有优异的低阻、高效切割性能与广泛的适用性。

关键词: 链轨式割台; 滑轨机构; 动力学仿真; 参数优化; 高秆作物收获机

中图分类号: S225.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)19-0249-10

OSID:



Design and Experiment of Chain-track Header with Dual-limiting Slide-rail Vibration Suppression Mechanism for Tall-stalk Crops

Liu Tianhong^{1,2} Li Hongqian^{3,4} Tian Fuyang^{1,4} Yan Yunpeng^{1,4} Yin Yanjiao¹ Song Zhanhua^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Shandong Key Laboratory of Intelligent Production Technology and Equipment for Facility Horticulture, Tai'an 271018, China

3. Shandong Wuzheng Group Co., Ltd., Rizhao 262399, China

4. Shandong Engineering Research Center of Agricultural Equipment Intelligentization, Tai'an 271018, China)

Abstract: Aiming to address the severe vibration, high power consumption, and poor adaptability of existing reciprocating and disc-saw headers during crop harvesting, a chain-track header equipped with a dual-limit slide-rail vibration damping mechanism was designed. Kinematic analysis established the theoretical cutting speed ratio range of $3.75 < \lambda \leq 5$ to achieve a zero-miss “cut-and-convey” sequence. To mitigate nonlinear chain drive vibrations, the introduced slide-rail mechanism significantly reduced the vertical amplitude of the moving blade by 44% and essentially eliminated periodic horizontal fluctuations. Response surface optimization based on a rigid-flexible coupled model revealed that the factors influencing cutting performance ranked in significance as follows: cutting speed, forward speed, and cutting tilt angle. Simulation optimization identified the optimal operating parameters as forward speed of 3.0 m/s, cutting speed of 13.5 m/s, and cutting tilt angle of 8°. Under these conditions, the maximum cutting force per unit diameter for sweet sorghum was 9.5 N/mm, with a cutting energy consumption per unit area was 0.09 J/mm². Bench tests further verified the actual optimal parameters as forward speed of 3.3 m/s, cutting speed of 12.5 m/s, and cutting tilt angle of 7.5°. Under this state, the measured maximum cutting force was (8.8±0.3) N/mm per unit diameter, with a relative error of 6.3%~

收稿日期: 2026-03-30 修回日期: 2026-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001905)、山东省自然科学基金项目(ZR2022ME049)和山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202316)

作者简介: 刘天宏(1999—),男,博士生,主要从事农业机械化与智能装备工程研究,E-mail: 2021110432@sdau.edu.cn

通信作者: 宋占华(1984—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械设计及理论研究,E-mail: songzh@sdau.edu.cn

13.2% compared with the simulated values. These results fully demonstrated that the designed header possessed excellent low-resistance, high-efficiency cutting performance and broad crop applicability.

Key words: chain-track header; slide rail mechanism; dynamic simulation; parameter optimization; tall-stalk crop harvester

0 引言

我国作物秸秆资源丰富,实现高秆作物(如甜高粱、青贮玉米、王草和饲料桑等)的高效收获,对农业可持续发展具有重要意义^[1-4]。当前,割台装备研发面临着作业效率与运行稳定性相互制约的共性技术难题:追求高速切割往往伴随剧烈的机械振动与能耗激增,而兼顾平稳运行则难以突破作业效率的瓶颈^[5-8]。

目前主流的往复式和圆盘锯式割台在复杂田间工况下均存在明显的技术局限:往复式受剪切原理制约^[9],高速进给时交变惯性力激增导致振动加剧且极易堵塞^[10-11];圆盘锯式虽利用高速回转解决了堵塞问题^[12-13],但多盘组合诱发的陀螺效应使得整机振动难以控制且无效能耗高^[14]。相比之下,链轨式切割装置兼具往复式的宽幅适应性与圆盘式的连续回转特性,结构紧凑且冲击小,被视为解决上述矛盾的理想方案^[15-16]。然而,现有链式割台受链传动固有多边形效应制约,链条在高速回转时极易诱发周期性的横向抖动与速度波动。这种缺乏有效运动约束的非线性振动,不仅会导致切割轨迹偏移引发漏割与重割,更会剧增机械磨损,成为制约该类装备在高速重载工况下作业可靠性的核心瓶颈^[17]。目前,国内外针对链式割台的研究多聚焦于切割轨迹分析与常规刀具改良,在应对高速作业下链条多边形效应引发的非线性振动方面,仍普遍缺乏有效的刚性约束机制与专门的抑振理论研究。

针对这一关键难点,本文系统设计一种带有双限位滑轨抑振机构的链轨式割台。该设计利用滑轨施加双向刚性约束,强制消除链传动的附加自由度,从根本上抑制多边形效应激发的轴、径向跳动,保障切割平面的高稳定性。本研究遵循“机理建模—仿真寻优—台架验证”的研究路径:首先解析满足“先割后输”且无漏割的临界运动学速比区间;其次构建整机刚柔耦合多体动力学模型,以最小化切割力与功耗为目标进行多参数联合优化;最后通过台架试验验证该设计在多工况下的减振性能与作业可靠性,以期高秆作物低损收获装备的研发提供理论支撑。

1 链轨式割台整体结构和工作原理

1.1 整体结构

为实现高秆作物高速低振动收获,整机采用模

块化设计,主要包含分禾引入、切割输送、滑轨抑振及动力传动四大核心单元(图1)。作业时,细长锥体分禾器(图1a中的I)负责梳理倒伏作物并界定收割幅宽;链式锯齿动刀与拨指协同作业(图1a中的II),在高速切削的同时,通过拨指对秸秆根部的侧向支撑与推移,精准实现“先割后输”的时序配合。针对链传动固有的多边形效应,本设计在链条回转轨迹上下侧布置双向限位滑轨(图1a中的III),利用刚性约束消除链节附加自由度,从物理层面保障动刀切割平面的高稳定性。主要技术参数见表1。

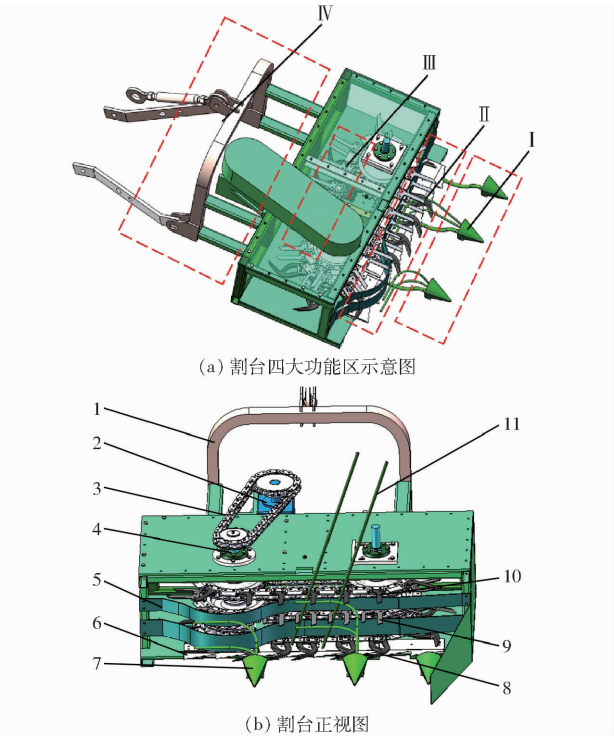


图1 割台整体结构示意图

Fig. 1 Schematics of header structure

- I. 分禾引入区 II. 切割输送耦合区 III. 运动约束区 IV. 动力传动区
1. 悬挂装置 2. 齿轮箱 3. 传动链条 4. 主动轴
5. 导禾板 6. 波形刃定刀片 7. 分禾器 8. 动刀 9. 下拨齿
10. 上拨齿 11. 秸秆

表1 割台设计技术参数

Tab. 1 Header design technical parameters

参数	数值
收获幅宽/mm	670
割茬高度/mm	120 ~ 130
切割倾角/(°)	0 ~ 15
配套功率/kW	50
切割器线速度/(m·s ⁻¹)	0 ~ 15

1.2 工作原理

动力经传动系统输入主动轴,驱动切割链携动刀做连续回转运动。田间作业时,秸秆经分禾器梳理喂入,由回转动刀与波形刃定刀联合完成滑切断离;随后,断秆在压禾杆与上、下拨齿的联合夹持下,沿切割链回转方向横向平稳输送,最终经导禾板定向侧抛,实现秸秆的有序铺放。

2 关键部件设计及运动学分析

2.1 链式切割器设计

设计的链式切割器结构如图 2 所示,核心部件包括优化的锯齿动刀与滑轨机构。锯齿动刀如图 3 所示(注: h_1 为动刀片总高度; h_2 为定刀片总高度; d_1 为安装孔中心距; d_2 为直线段刃口长度; d_3 为定刀片总宽度; d_4 为定刀片两侧安装孔中心距; α_1 为动刀背弯折角; α_2 为动刀刃口滑切角; α_3 为动刀刃磨角; α_4 为定刀侧边避让角; α_5 为定刀齿底连线倾角; α_6 为定刀齿顶连线倾角; α_7 为定刀波形齿单侧刃角; α_8 为定刀刃磨角; R_1 为动刀刃尖圆角半径; R_2 为定刀波形齿底圆角半径)。

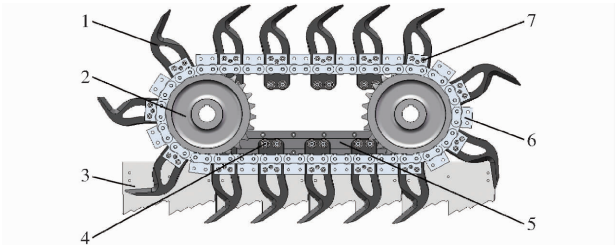


图 2 链式切割器整体结构图

Fig. 2 Overall structure of chain-track cutter

1. 动刀 2. 双排链轮 3. 波形刃定刀片 4. 滑轨机构 5. 滑轨
6. 切割链 7. 沉头螺栓

为解决链式切割器动刀片的双向振动问题,本研究设计了滑轨稳定机构,其作用机理如图 4 所示,在水平面内,切割阻力 F_1 会触发动刀片摆动,而滑轨机构通过轴承施加的约束力 F_2 与 F_3 构成一个稳定力偶,从而有效抑制此水平运动。在铅垂面内,动刀片因自身重力产生倾覆力矩 M_1 ,引发上下抖动;滑轨机构则通过在刀片后部施加反向平衡扭矩 M_2 予以抵消。

为实现上述动力学稳定机理,滑轨抑振机构采用“U 形刚性导轨 + 限位轴承”组合设计。U 形导轨沿切割链直线段通长布置,并通过高强沉头螺栓与主框架刚性固接,提供绝对位移约束基准;动刀对应链节处对称加装双列微型深沟球轴承作为限位滚轮,以单侧 0.5 ~ 1.0 mm 的微间隙嵌入导轨槽内。此微间隙配合既避免了链条平稳运行时的额外摩擦损耗,又能在切割阻力突变致使链节偏移的瞬间,通

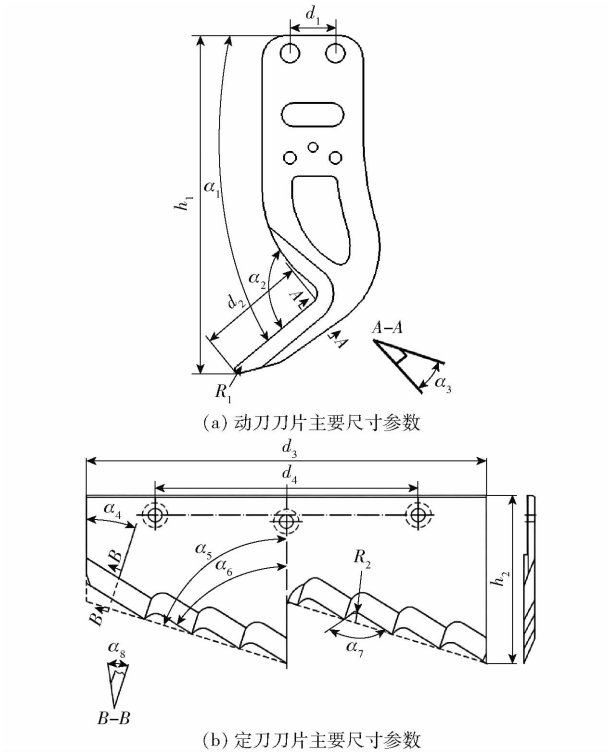


图 3 动定刀片形状尺寸参数示意图

Fig. 3 Moving and fixed blade shape size

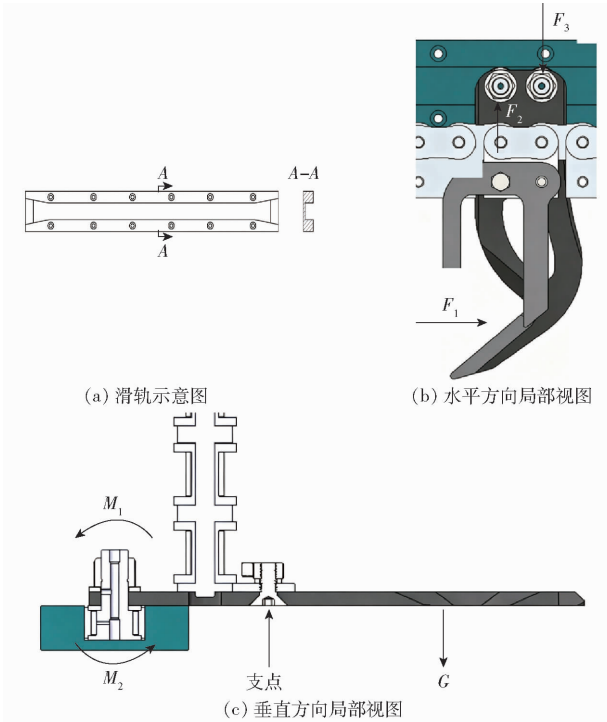


图 4 链式切割器局部视图

Fig. 4 Detail views of flexible chain cutter

过轴承外圈与导轨壁的刚性接触迅速形成有效约束力矩。

2.2 输送装置设计

输送装置由上、下输送链构成,上部分为带拨齿的单排链,下部分为带拨齿的三排切割链,如图 5 所示。

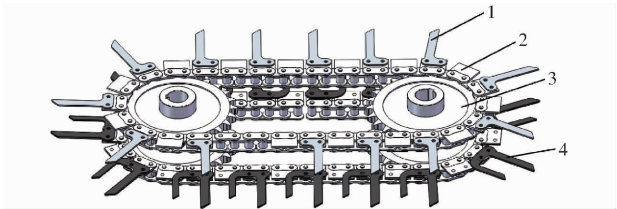


图5 输送装置结构图

Fig.5 Structure diagram of conveying device

1. 上拨齿 2. 链条 3. 链轮 4. 下拨齿

采用上下配合的U形拨齿结构,以确保对切断秸秆的稳定夹持。其中,动刀前伸量 l (动刀片齿尖超出上拨齿齿尖的距离,位置关系如图6所示)是决定先割后输作业时序的关键参数。为实现无干涉的平稳输送,动刀前伸量 l 的设计应满足运动学条件

$$l \geq \frac{D_{\max}}{\sin \alpha_2} + \Delta L \tag{1}$$

式中 $D_{\max}$ ——目标作物最大秸秆直径,综合考虑实际工况,取25 mm

α_2 ——动刀刃口滑切角,取 100°

ΔL ——安全裕量,主要用于补偿切割瞬间秸秆的弹性弯曲变形以及链传动可能存在的微小迟滞,通常取15~25 mm,本文取24 mm

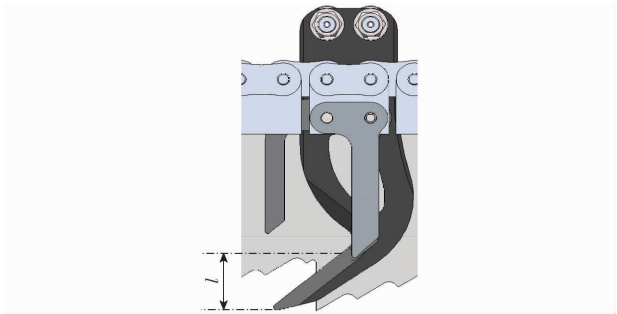


图6 拨齿与动刀位置示意图

Fig.6 Schematic of position of teeth and moving knife

将上述参数代入计算得: $l \geq 49.39$ mm,对计算结果进行圆整,确定 $l = 50$ mm,可确保动刀完成切削的瞬间,拨齿恰好切入秸秆根部区域,实现无干涉的平稳输送。动刀顶部与拨齿顶部的间距为25~50 mm,拨齿结构示意图如图7所示,其具体结构参数为:下拨齿宽度 $d_6 = 58$ mm,上、下拨齿长度 $d_7 = d_8 = 125$ mm。

2.3 输送装置与链式切割器配合关系

输送装置与链式切割器的装配关系如图8所示。动刀与下拨齿同轴安装于切割链的上下直板型外链板,并与垂直对应的上拨齿、波形刃定刀片协同实现秸秆的切割与输送。

切割后,秸秆向割台斜后方倾倒(图9),需由上

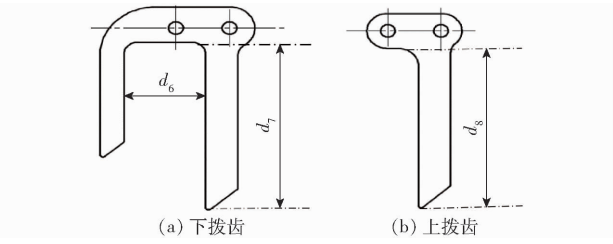


图7 拨齿示意图

Fig.7 Schematic of pulling teeth

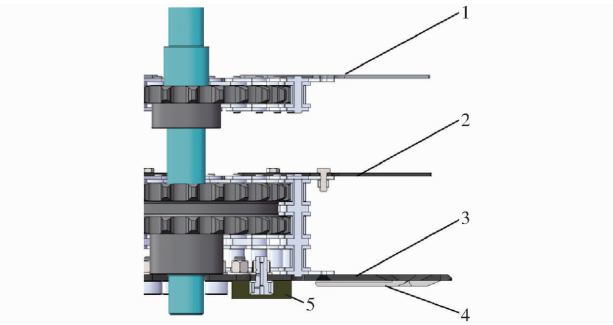


图8 单排链与切割链相对位置示意图

Fig.8 Schematic of relative position of single-row chain and chain-track cutting chain

1. 上拨齿 2. 下拨齿 3. 波形刃定刀片 4. 动刀 5. 滑轨

下拨齿夹持稳定输送。为防止秸秆在侧方输出时发生反向倒伏,必须保证其在割台上的倾斜角 α_9 足够大。为此,在拨齿宽度 d_6 和三排链高度 d_{10} 固定的前提下,通过最大化拨齿安装高度 d_9 来增大倾斜角 α_9 ,是实现秸秆有序输出与铺放的关键。

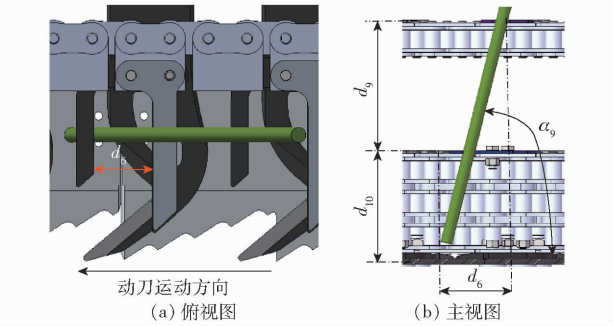


图9 秸秆与拨齿相互作用示意图

Fig.9 Schematic of interaction between straw and teeth

同时考虑到该割台在工作过程中会有一倾角 α_{10} ,如图10所示,该倾斜角度在 $0^\circ \sim 12^\circ$ 范围内可调,因此 d_9 不宜过大,否则秸秆在未被切割前就会先与上拨齿相撞发生倾斜,导致切割失效,因此 d_9 应满足

$$d_9 \leq l \tan(90^\circ - \alpha_{10}) - d_{10} \tag{2}$$

式中 α_{10} ——割台工作时与地面的倾角, $(^\circ)$

根据分析,最终确定上拨齿与下拨齿之间的距离 $d_9 = 100$ mm。

2.4 切割器速比分析

链轨式割台的作业质量主要取决于动刀切割速

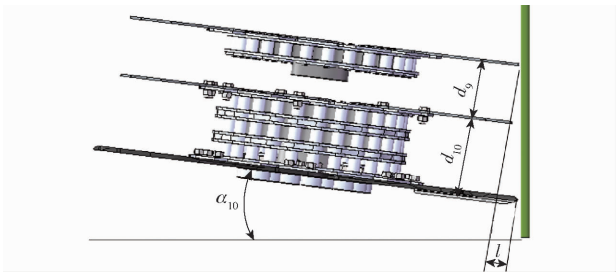


图 10 割台倾斜时与秸秆作用示意图

Fig. 10 Schematic of interaction between header and straw when header was tilted

度 v_c 与机器前进速度 v_m 的匹配关系,定义切割速比 λ 为

$$\lambda = \frac{v_c}{v_m} \tag{3}$$

为确保切割轨迹连续、实现先割后输且无漏割现象,需满足相邻动刀运动轨迹在作业幅宽内的全覆盖约束。经运动学解析,当速比满足如图 11 所示(图中, S_1 为前把动刀刀尖点 b 与后把动刀刀根点 c 水平距离,取 245 mm; S_2 为相邻两动刀间距,mm; h_3 为刀刃高度,取 65 mm; α_{11} 为刀片切割角, ($^\circ$); α_{12} 为动刀片的绝对运动方向与动刀片相对割台运动方向的夹角, ($^\circ$))的前把动刀刀尖点 b 与后把动刀刀跟点 c 运动轨迹重合的临界状态时,零漏割临界速比 λ 计算式为

$$\lambda = \frac{v_c}{v_m} = \frac{S_1}{h_3} = \frac{1}{\tan \alpha_{12}} \tag{4}$$

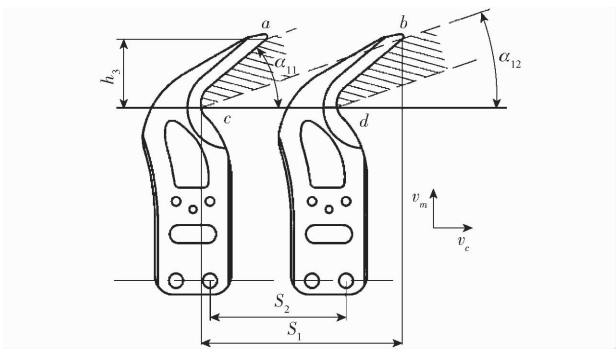


图 11 切割器临界状态切割示意图

Fig. 11 Cutter critical state cutting diagram

为避免漏割,切割速比需满足 $\lambda > 3.75$ 。结合图 12 分析可知, λ 过大将导致相邻动刀运动轨迹高度重叠,使切割路径宽度 f 急剧变窄;若 f 低于临界值,刀背会硬性推挤秸秆引发喂入干涉,故 f 需满足

$$f = L \sin(\alpha_{11} - \alpha_{12}) \geq D_{\max} + \Delta L \tag{5}$$

其中 $\alpha_{11} + \alpha_{12} \geq 50^\circ$ (6)

式中 L ——刀刃长度,取 85 mm

$D_{\max}$ ——作物最大直径,取 25 mm

为确保顺畅滑切而不推倒秸秆,动刀绝对滑切角(即 $\alpha_{11} + \alpha_{12}$)不仅需大于高含水率秸秆的临界摩擦

角^[18]($26^\circ \sim 38^\circ$),还必须叠加 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的安全裕量,以应对田间作业时汁液粘附与刀片磨损引起的摩擦因数激增。

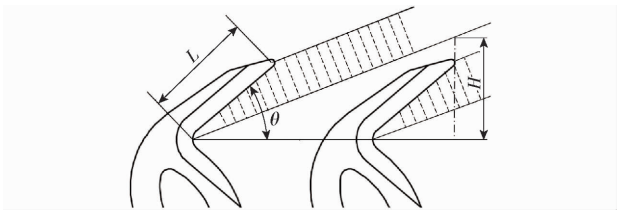


图 12 切割器切割示意图

Fig. 12 Cutter cutting diagram

根据公式(4)~(6)得出,为保证秸秆顺利喂入且不发生漏割,切割器的理论速比区间初步确定为 $3.75 < \lambda \leq 5$ 。

3 割台作业动力学仿真与参数优化

3.1 链式切割器的振动仿真分析

对链式切割器模型开展动力学仿真分析,在动刀尖端与滑轨轴承中心处设定标记点。设定机器切割速度为 5 m/s,模拟单株秸秆切割工况,对比分析引入滑轨机构前后动刀尖端的位移响应特征。

链节质心位移响应(图 13)表明:无约束状态下,受多边形效应激扰,链节在 y 轴(横向)存在约 12 mm 的周期性振荡。引入滑轨刚性约束后,链条横向自由度被有效锁定, y 轴波动趋于零;同时, z 轴(垂向)振幅由 0.57 mm 衰减至 0.32 mm(降幅达 44%)。该数据直观验证了滑轨机构对非线性振动的强抑制机理,有效保障了动刀的高平稳进给。

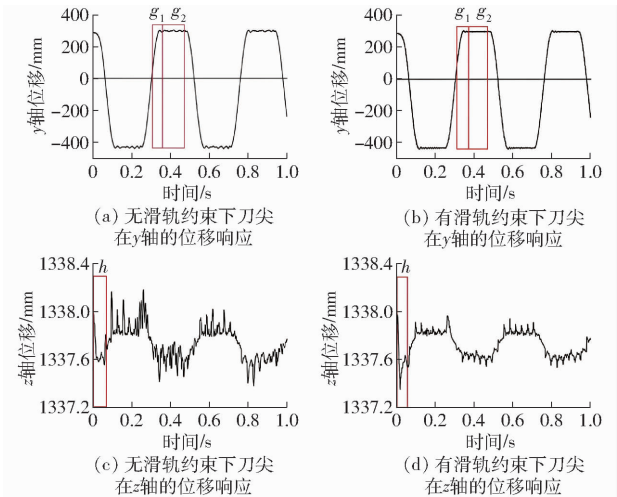


图 13 切割速度为 5 m/s 时刀尖点在 y 、 z 轴的位移-时间曲线

Fig. 13 Displacement-time curves of tool tip point on the y and z axes at cutting speed of 5 m/s

3.2 割台切割扭矩仿真分析

为确定割台驱动系统的动力选型依据,利用 ADAMS 软件建立整机刚柔耦合动力学模型,对不同

速度工况下的空载与负载驱动扭矩进行仿真求解。仿真设置切割对象为甜高粱,仿真提取了不同链条运行速度(5~15 m/s)下的扭矩数据,仿真模型如图 14 所示。

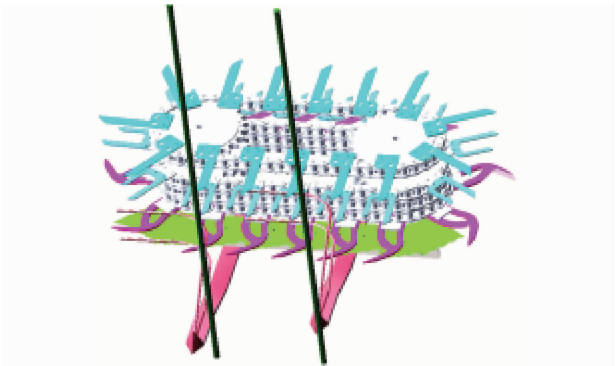


图 14 ADAMS 切割模型
Fig. 14 ADAMS cutting model

仿真结果显示,在动刀切入秸秆的瞬时,驱动链轮承受的阻力矩出现显著峰值。基于仿真提取的驱动轴(驱动链轮)平均负载扭矩与转速数据,将其与空载驱动扭矩进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 不同切割速度下的扭矩
Tab.2 Torque at different cutting speeds

切割速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	空载扭矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	秸秆切割时扭矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)
5.0	10.2	32.5
7.5	12.5	38.6
10.0	14.8	45.2
12.5	17.6	51.4
15.0	20.3	58.7

3.3 秸秆铺放分析

如图 15 所示,输送速度大小不同,秸秆抛送距离及抛送角度也会有所不同,以秸秆铺放方向与割台前进方向之间的夹角作为铺放倾角 θ ,以秸秆根部与引导板端部之间的距离作为抛送距离 d 。对铺放倾角和抛送距离进行分析,试验结果如表 3 所示。

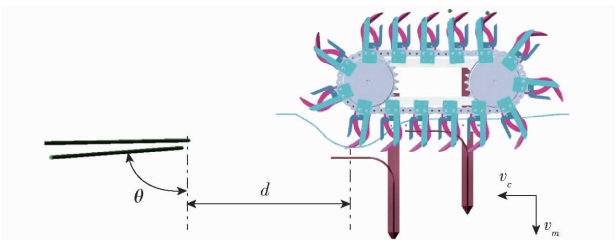


图 15 秸秆铺放示意图
Fig. 15 Schematic of stalk placement

通过表 3 可知,随着切割速比的增大,秸秆被抛送的距离增大,秸秆的铺放倾角减小。当切割速比 λ 为 4.25~4.50 时,铺放倾角接近 90° ,抛送效果较好。

表 3 不同切割速比下的抛送距离与铺放倾角
Tab.3 Throwing distance and windrow inclination angle at different cutting-to-feeding speed ratios

切割速比	抛送距离 d/mm	铺放倾角 $\theta/(\circ)$
3.75	200	102.0
4.00	527	96.5
4.25	750	92.7
4.50	957	87.0
4.75	1245	84.0
5.00	1504	75.0

3.4 链轨式割台切割性能仿真

3.4.1 模型建立

建立该切割器切割简化模型,如图 16 所示,所建秸秆为甜高粱秸秆,秸秆直径为 15 mm,秸秆高度为 1 500 mm。甜高粱秸秆定义为非线性柔性体,其剪切强度为 3.5 MPa,轴向抗压强度为 14 MPa,径向抗压强度为 0.5 MPa,径向压缩弹性模量为 7 MPa,轴向压缩弹性模量为 180 MPa^[19-20]。刀片采用 65Mn 钢,其密度为 7 820 kg/m³,弹性模量为 210 GPa,屈服强度为 430 MPa,泊松比为 0.3,剪切模量为 80 GPa。

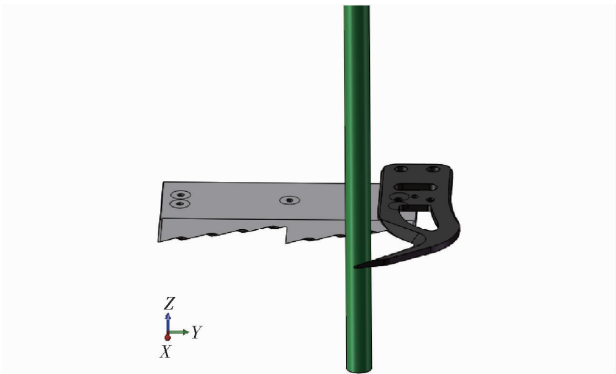


图 16 切割器切割简化模型
Fig. 16 Cutter cut simplified model

3.4.2 单因素试验

为探究各运动参数对割台动力学特性的影响规律,以最大切割力 F_{max} 和功耗 P 为评价指标,分别对切割速度 v_c 、机器前进速度 v_m 及切割倾角 α 进行了单因素仿真试验,结果如图 17 所示。

(1) 机器前进速度的负载效应:最大切割力与功耗随前进速度递增呈先降后升趋势。在 1~3 m/s 区间内,前进速度的提升有效缩短了刀刃对秸秆的挤压前移滑移量,显著降低了该阶段的无效摩擦能耗;而当速度突破 3 m/s 后,定刀对秸秆的法向冲击加剧,导致秸秆过度挠曲变形,引发切割阻力骤增。由此确定兼顾低阻与高效的最优进给速度为 3 m/s。

(2) 切割速度的影响机理:最大切割力与功耗随切割速度提升显著下降,甜高粱秸秆具粘弹性,高

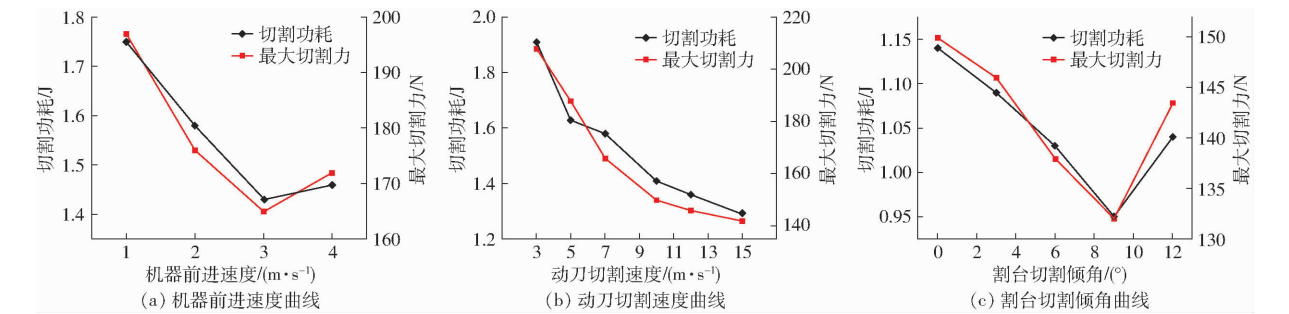


图 17 不同工作参数对切割性能的影响

Fig. 17 Influence of different working parameters on cutting performance

速冲击使其变形高度集中于刃口微区,大幅削减了有效挤压层厚度,从而切割阻力骤降。当速度超过 10 m/s 后,减阻边际效应虽递减,但高速切削仍能维持低耗的作业稳态。

(3)切割倾角 α 的滑切增益:最大切割力与功耗随倾角增大呈先降后升趋势。在 $0^{\circ} \sim 9^{\circ}$ 区间,切向滑移分量增大有效降低了法向切割阻力;但倾角大于 9° 后,刀面接触面积激增引发的摩擦耗散迅速抵消了滑切增益。因此, 9° 是平衡滑切省力与摩擦损耗的最佳临界角。

3.4.3 正交试验

根据单因素试验选取合适的因素水平设计正交试验。BBD 试验因素编码如表 4 所示。得到的仿真试验方案及结果如表 5 所示,表中 A 、 B 、 C 分别为前进速度、切割速度、切割倾角的编码值, Y_1 、 Y_2 分别是目标值最大切割力(N)和切割功耗(J)。对各项进行方差分析,结果如表 6 所示。

表 4 BBD 试验因素编码

Tab. 4 BBD experimental factors and coding			
编码	前进速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	切割速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	切割倾角/ ($^{\circ}$)
-1	2	6	5
0	3	10	9
1	4	14	13

采用响应面法对表 5 中数据进行分析,分别建立切割性能目标(最大切割力、切割功耗)与影响因素(切割速度、前进速度、切割倾角)之间的数学模型,模型公式为

$$Y_1 = 153 + 12.75A - 29.25B + 8.25C + 12AC + 15.75A^2 + 21.25B^2 + 23.75C^2 \quad (7)$$

$$Y_2 = 1.47 - 0.135A - 0.3125B - 0.04C + 0.1025BC + 0.1137A^2 + 0.1737B^2 + 0.1238C^2 \quad (8)$$

从表 6 中可知,前进速度和切割速度的一次项,以及切割速度和切割倾角的二次项对秸秆最大切割力具有极显著影响($P < 0.01$)。切割速度和前进速度的一次项与切割速度的二次项对秸秆的切割功耗

表 5 试验方案及结果

Tab. 5 Experimental design and results

序号	因素			Y_1/N	Y_2/J
	A	B	C		
1	0	-1	1	230	1.98
2	0	-1	-1	210	2.31
3	0	0	0	153	1.47
4	1	0	-1	185	1.67
5	0	0	0	153	1.47
6	-1	0	1	176	1.89
7	-1	0	-1	192	1.78
8	-1	-1	0	204	2.23
9	0	0	0	153	1.47
10	0	1	1	191	1.43
11	1	-1	0	249	1.78
12	0	0	0	153	1.47
13	0	0	0	153	1.47
14	0	1	-1	161	1.35
15	1	1	0	165	1.45
16	-1	1	0	142	1.57
17	1	0	1	217	1.49

表 6 方差分析

Tab. 6 ANOVA results

来源	Y_1		Y_2	
	F	P	F	P
模型	16.81	0.000 6	26.47	0.000 1
A	12.83	0.009 0	26.65	0.001 3
B	67.53	<0.000 1	142.79	<0.000 1
C	5.37	0.053 6	2.34	0.170 0
AB	1.19	0.310 7	4.98	0.060 9
AC	5.68	0.048 6	3.84	0.090 8
BC	0.24	0.634 7	7.68	0.027 6
A^2	10.30	0.014 9	9.96	0.016 0
B^2	18.76	0.003 4	23.23	0.001 9
C^2	23.43	0.001 9	11.78	0.010 9

的影响极显著($P < 0.01$)。综合分析,各因素对秸秆最大切割力和切割功耗影响的主次顺序是切割速度、前进速度、切割倾角。各影响因素交互作用对最大切割力和切割功耗影响的响应面如图 18 所示。

以最小化切割力与功耗为目标,寻优获取的最佳

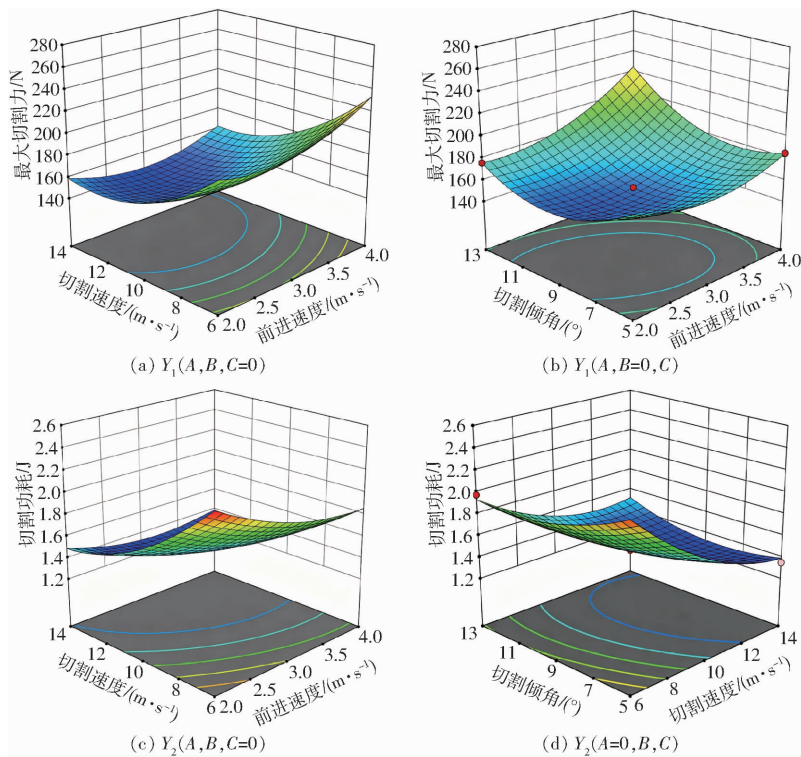


图 18 因素交互作用对最大切割力和切割功耗影响的响应面图

Fig. 18 Response surface plots of factor interactions on maximum cutting force and cutting power consumption

参数组合为:前进速度 3.0 m/s、切割速度 13.5 m/s(对应速比 $\lambda = 4.45$)、切割倾角 8° 。该工况下,单位直径最大切割力低至 9.5 N/mm,单位面积切割功耗仅为 0.09 J/mm^2 。值得注意的是,响应面最优倾角(8°)略小于单因素最优值(9°),揭示了参数间的非线性耦合机制:在 13.5 m/s 的高速状态下,高冲击动能显著削弱了系统对大滑切角的依赖;若仍选择 9° 倾角,激增的刀面接触面积反而会加剧侧面摩擦耗散。因此, 8° 是平衡滑切增益与侧摩阻耗的全局最优解。

4 链轨式割台台架试验

台架试验(图 19)选用含水率为 $(67.95 \pm 5)\%$ 的甜高粱为对象。为消除茎秆力学梯度特性的影响,通过夹具刚性固定,统一界定实际切割基准高度为 100 mm。测试系统在齿轮箱输出轴端串联扭矩传感器(北京世通 TQ 600 型,量程 $0 \sim 500 \text{ N}\cdot\text{m}$),以实现切割负载阻力矩的实时动态采集。

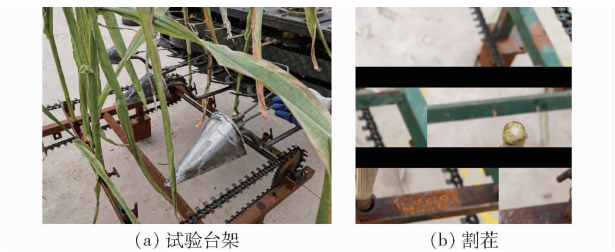


图 19 甜高粱秸秆切割试验

Fig. 19 Sweet sorghum stalk cutting tests

所采集的扭矩曲线如图 20 所示。将该曲线进行峰值处理,得到对应的最大切割力,将所得最大切割力与仿真最大切割力对比,试验结果如表 7 所示。方差分析结果如表 8 所示。

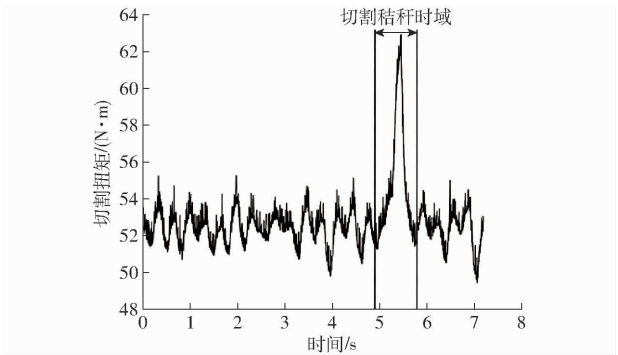


图 20 扭矩曲线

Fig. 20 Torque curve

由表 7 可知,最大切割力的仿真值和实测值误差在 6.3% ~ 13.2% 之间,对表 7 中数据进行分析,分别建立最大切割力与影响因素(切割速度、前进速度、切割倾角)之间的数学模型

$$Y_1 = 141.6 + 10.5A - 25.75B + 9.5C + 18.32B^2 + 19.33C^2 \tag{9}$$

方差分析表明,各因素对最大切割力的影响显著性由大到小依次为:切割速度、前进速度、切割倾角。台架寻优确定的最佳参数组合为:前进速度 3.3 m/s、切割速度 12.5 m/s、切割倾角 7.5° 。该工况下实测单位直径最大切割力为 $(8.8 \pm 0.3) \text{ N/mm}$,

表 7 最大切割力仿真与台架试验结果对比

Tab.7 Comparison of simulated and bench test maximum cutting force results

序号	因素			仿真	实测	相对
	前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	切割速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	切割倾角/ ($^{\circ}$)	值/ N	值/ N	误差/ %
1	3	6	13	230	212	7.8
2	3	6	5	210	189	10.0
3	3	10	9	153	142	7.2
4	4	10	5	185	163	11.9
5	3	10	9	153	141	7.8
6	2	10	13	176	160	9.1
7	2	10	5	192	171	10.9
8	2	6	9	204	177	13.2
9	3	10	9	153	143	6.5
10	3	14	13	191	176	7.9
11	4	6	9	249	224	10.0
12	3	10	9	153	142	7.2
13	3	10	9	153	140	8.5
14	3	14	5	161	140	13.0
15	4	14	9	165	147	10.9
16	2	14	9	142	133	6.3
17	4	10	13	217	191	12.0

表 8 最大切割力台架试验方差分析

Tab.8 ANOVA results of maximum cutting force bench tests

来源	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	15.62	0.000 8
<i>A</i>	10.87	0.013 2
<i>B</i>	65.35	<0.000 1
<i>C</i>	8.89	0.020 4
<i>AB</i>	3.35	0.109 7
<i>AC</i>	4.68	0.067 2
<i>BC</i>	0.52	0.494 0
<i>A</i> ²	5.53	0.051 0
<i>B</i> ²	17.42	0.004 2
<i>C</i> ²	19.37	0.003 2

与仿真值的相对误差稳定在 6.3% ~ 13.2% 之间。此合理偏差主要源于秸秆天然的各向异性(维管束分布与含水率的随机变异),以及仿真模型对系统高频微振与非线性摩擦耗散的理想化假设。该结果有效验证了刚柔耦合模型的预测精度与优化参数的工程可靠性。

设置仿真试验下所求得的最佳切割速比 $\lambda = 4.45$,所形成的序列图如图 21 所示,由图可知,此切割速比下,正常切割过程,甜高粱秸秆在与动刀接触后被顺利切割。因此验证了此割台的最佳切割

速比。

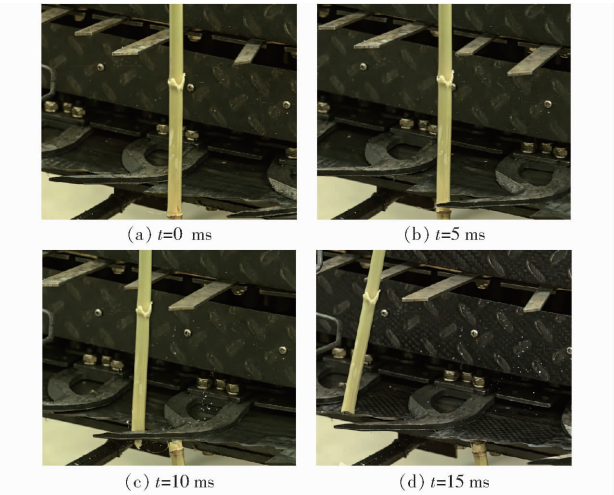


图 21 $\lambda = 4.45$ 时切割过程序列图

Fig. 21 Sequence diagrams of cutting process at $\lambda = 4.45$

5 结论

(1)针对高秆作物收获时割台振动剧烈、功耗高等难题,设计了带有双限位滑轨抑振机构的链轨式割台,并进行了动力学仿真与台架试验验证。

(2)阐明了割台运动学参数边界并验证了滑轨机构的抑振性能。理论解析确立了实现“先割后输”且无漏割的切割速比区间为 $3.75 < \lambda \leq 5$ 。引入双限位滑轨机构后,动刀垂向(z 轴)振幅由 0.57 mm 降至 0.32 mm(降幅 44%),并基本消除水平横向(y 轴)周期性波动,有效抑制了链传动多边形效应激发的非线性振动。

(3)揭示了工作参数对切割性能的影响规律并获取了最优参数组合。仿真表明,各参数对最大切割力与切割功耗的显著性影响主次顺序依次均为:切割速度、前进速度、切割倾角。寻优得出最佳作业参数为:前进速度 3.0 m/s、切割速度 13.5 m/s、切割倾角 8° 。此时甜高粱单位直径最大切割力为 9.5 N/mm,单位面积切割功耗为 0.09 J/mm²。

(4)验证了割台的实际低阻高效作业性能与模型的准确性。台架试验确定实际最优参数为:前进速度 3.3 m/s、切割速度 12.5 m/s、切割倾角 7.5° 。此工况下,单位直径最大切割力为 (8.8 ± 0.3) N/mm,与仿真值相对误差稳定在 6.3% ~ 13.2% 之间。试验表明割台运行平稳且割茬整齐,验证了该新型链轨式结构对高秆作物的广泛适用性。

参 考 文 献

[1] Cao L, Liu B, Zhang Y, et al. The role of energy crops in China's energy strategy: economic and sustainability impacts of phasing out biomass[J]. Energy, 2025, 341: 139340.

[2] Shahbazi F, Shahbazi S, Nadimi M, et al. Losses in agricultural produce: a review of causes and solutions, with a specific

- focus on grain crops[J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 111: 102547.
- [3] Bellone Y, Santangelo E, Assirelli A, et al. Agricultural mechanization in agrivoltaic systems: challenges, adaptation, and possible advancements[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 229: 116661.
- [4] Ang S, Li B, Chen S, et al. Design and performance test of soybean profiling header suitable for harvesting bottom pods on film[J]. Agriculture, 2024, 14(7):1058.
- [5] He Q, Tian L, Qian P, et al. Vibration characteristics analysis of the header assembly of combine harvester under multi-source coupled excitation[J]. Agriculture, 2025, 15(23):2488.
- [6] Liu W, Yu Z, Aorigele, et al. Mechanism analysis and performance optimization of corn stalk cutting and throwing based on CFD-DEM coupling approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110731.
- [7] Ren J, Bao D, Liang Z, et al. Parameter optimization design and experimental validation of a header for electric rice reaper binders employed in hilly regions[J]. Agriculture, 2025, 15(12):1242.
- [8] 施印炎,陈满,汪小岳,等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(2):110-116.
- Shi Yinyan, Chen Man, Wang Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 110-116. (in Chinese)
- [9] 辛尚龙,赵武云,石林榕,等. 立辊式玉米收获割台夹持输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 34-43.
- Xin Shanglong, Zhao Wuyun, Shi Linrong, et al. Design and experiments of the clamping and conveying device for the vertical roller type corn harvesting head[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 34-43. (in Chinese)
- [10] 单伊尹,廖庆喜,万星宇,等. 油菜薹对行自走式收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 93-104.
- Shan Yiyin, Liao Qingxi, Wan Xingyu, et al. Design and experiment of self-propelled six-row harvester for oilseed rape shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 93-104. (in Chinese)
- [11] Gao Y, Wang Y, Kang F, et al. Multi-objective optimization of cross-section integrity rate and sawing power consumption in sawing *Caragana korshinskii* Kom. branches[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 193: 116244.
- [12] Cao Q, Yuan H, Zhang S, 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.
- [13] 贺长彬,景红伟,特宾古日布,等. 沙生灌木机械化生产技术装备研究现状与发展展望[J]. 农业机械学报,2024, 55(9):21-41.
- He Changbin, Jing Hongwei, Tebinguribu, et al. Review of key technologies for mechanized production of sandy shrubs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 21-41. (in Chinese)
- [14] 刘羊,黄小毛,马丽娜,等. 拨禾链式油菜割台静态滑切角恒定切割器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 99-108.
- Liu Yang, Huang Xiaomao, Ma Li'na, et al. Design and test of static sliding cut angle constant cutting machine for chain oil sunflower harvester header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 99-108. (in Chinese)
- [15] 张贝贝,罗海峰,肖霄,等. 油菜循环链式切割器的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 440-443.
- Zhang Beibei, Luo Haifeng, Xiao Xiao, et al. Design and experiment of rapeseed circulation chain cutter[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 2019, 45(4): 440-443. (in Chinese)
- [16] Bian X, Shi Z, Mo N, et al. Rejection of synchronous vibrations of AMB system using nonlinear adaptive control algorithm with a novel frequency estimator[J]. Machines, 2023, 11(2):188.
- [17] 王立宗,廖庆喜,李蒙良,等. 油菜高速免耕直播机驱动型开畦沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 15-26.
- Wang Lizong, Liao Qingxi, Li Mengliang, et al. Drive-type ditching device of the high-speed no-tillage direct seeder for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(19): 15-26. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 刘晓东,王春光,郭文斌,等. 甜高粱弯曲力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(7): 180-185.
- Liu Xiaodong, Wang Chunguang, Guo Wenbin, et al. Experiments on bending mechanical properties of sweet sorghum[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7): 180-185. (in Chinese)
- [20] 杜晓雪,郭文斌,王春光,等. 饲用甜高粱秸秆压缩松弛试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(8): 164-168, 174.
- Du Xiaoxue, Guo Wenbin, Wang Chunguang, et al. Study on compression relaxation of feeding forage sorghum straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(8): 164-168, 174. (in Chinese)