

面向草原地上生物量监测的滚刀式刈割集草装置设计与试验

王天一^{1,2} 张星山¹ 路梦源¹ 胡鹏展¹ 李思标¹ 胡欣越¹ 刘刚³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 四川省草原科学研究院, 成都 611130)

摘要: 为解决草原地上生物量监测中存在人工刈割效率低与割茬高度稳定性差的问题,设计了一种滚刀式刈割集草装置。通过技术要求分析和理论分析,设计了装置的整体结构,并确定了滚刀式切割器的主要结构参数和工作参数。以推挤角、滚刀转速和前进速度为试验因素,平均切割力和割茬高度稳定性系数为试验指标,结合三因素三水平的仿真试验和NSGA-II算法,得到最佳参数组合为:推挤角 2.95°、滚刀转速 603 r/min、前进速度 0.11 m/s。设置推挤角为 3°进行样机加工,并以滚刀转速和前进速度为试验因素,割茬高度稳定性系数为试验指标,进行二因素三水平田间试验,得到最佳作业参数组合为:滚刀转速 606 r/min、前进速度 0.10 m/s。以人工刈割的方式作为对照,进行最佳参数组合下的样机性能试验,结果表明,所设计装置的割茬高度稳定性系数比人工组高 16%~21%,作业效率是人工效率的 18~24 倍,且其他误差均符合相关标准。装置能代替人工进行草原地上生物量监测工作。

关键词: 草原地上生物量; 滚刀式切割器; 草原调查监测; 针茅

中图分类号: S225.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)15-0224-11

OSID:



Design and Experiment of Roll-type Harvesting and Grass Collection Device for Aboveground Biomass Monitoring in Grasslands

Wang Tianyi^{1,2} Zhang Xingshan¹ Lu Mengyuan¹ Hu Pengzhan¹ Li Sibiao¹ Hu Xinyue¹ Liu Gang³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Sichuan Academy of Grassland Sciences, Chengdu 611130, China)

Abstract: Aiming to address the issues of low manual mowing efficiency and poor stubble height stability in the monitoring of aboveground biomass in grasslands, a rolling knife-type mowing and grass-collecting device was designed. Through technical requirement analysis and theoretical analysis, the overall structure of the device was developed, and the main structural and operational parameters of the rolling knife cutter were determined. Using push angle, rolling knife rotation speed, and forward speed as experimental factors, and average cutting force and stubble height stability coefficient as experimental indicators, an optimal parameter combination was obtained through a three-factor three-level simulation experiment and the NSGA-II algorithm. The optimal parameters were found to be a push angle of 2.95°, rolling knife rotation speed of 603 r/min, and forward speed of 0.11 m/s. With the push angle set to be 3°, a prototype was manufactured, and a two-factor three-level field experiment was conducted with rolling knife rotation speed and forward speed as factors, and stubble height stability coefficient as the experimental indicator. The optimal operational parameter combination from this experiment was with rolling knife rotation speed of 606 r/min and forward speed of 0.10 m/s. Furthermore, with manual mowing as the control, a performance test of the prototype under the optimal parameter combination was conducted. The results showed that the stubble height stability coefficient of the designed device was 16%~21% higher than that of the manual group, and its operational efficiency was 18~24 times that of manual work. In addition, all other errors met the relevant standards. This device can replace manual

收稿日期: 2025-03-09 修回日期: 2025-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1300503)、国家自然科学基金项目(42401395)、北京“高创计划”青年人才托举工程项目(20251010)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(中国农业大学 2026TC058)和中国农业大学 2115 人才工程项目

作者简介: 王天一(1990—),男,副教授,博士,主要从事智慧草业与草原巡检装备技术研究,E-mail: tianyi.wang@cau.edu.cn

labor in grassland aboveground biomass monitoring, and provide a reference for the design of mechanized mowing and grass-collecting equipment for grassland aboveground biomass monitoring.

Key words: grassland aboveground biomass; roller cutter; grassland survey and monitoring; Stipa

0 引言

草原是中国重要的生态系统^[1],其空间异质性强、年际变化大。近年来,由于过度放牧、农业扩张等因素影响,草原生态系统退化严重^[2]。因此,准确、高效、高标准地进行草地资源调查,对于生态保护、草地修复,以及草地资源的合理利用具有重要意义^[3]。

地上生物量是评价草原生产力、衡量草蓄平衡状况和草原退化程度的重要监测指标之一,同时也是草原定量遥感重要的地表真值数据来源^[4-5]。目前,地上生物量监测方法主要为直接刈割法和间接估算法^[6-7]。

根据《草原资源与生态监测技术规程》^[8],直接刈割法是指在样地中随机框选样方,在保证牧草割茬高度一致的前提下,人工刈割样方内全部牧草并称量。该方法可直接获取地上生物量真值数据,但全过程依赖人工,存在效率低、劳动强度大和数据时效性差等问题。针对上述问题,一些学者通过机械刈割结合气流收集技术提高了地上生物量的采样效率,但仍存在装置移动灵活性差、人工参与步骤多,以及牧草割茬稳定性差等问题^[9-11]。

间接估算法是基于地上生物量真值与遥感波谱数据之间的映射关系,建立数学反演模型,进而完成对地上生物量的高通量估算^[12-13]。虽然该方法可高效、大尺度地采集地上生物量数据,但草原植被品种多,难以通过单一反演模型准确估算地上生物量,且用于反演模型的地上生物量真值数据仍需通过直接刈割法获取。

上述地上生物量监测装置的相关研究大多停留在原理设计阶段,并未进行生产或应用,而且针对装置工作原理的分析不够深入,缺乏参数设计。本文设计一种用于草原地上生物量监测的滚刀式刈割集草装置,其生物量监测技术原理是通过齐地刈割并收集特定范围内的牧草,并将割取的鲜草经烘干称量后获得单位面积(g/m^2)的生物量数据。该装置采用滚刀与定刀相结合的刈割方式,设计切割器结构和整机结构。运用 ANSYS 软件并结合 Box - Behnken 试验设计进行仿真分析,确定滚刀式切割器的最佳工作参数,进而通过田间试验验证装置作业效果。

1 整体结构和工作原理

1.1 刈割技术要求与方案设计

参考《农业机械设计手册》,牧草收获机械常用切割器为往复式和旋转式。往复式切割器适用于直立生长而密度不高的牧草,但牧草稠密时易造成堵塞。旋转式切割器工作平稳,适用于稠密、倒伏的牧草,但其结构复杂,单位割幅功耗大。在草坪割草机械领域,常用的切割器为旋刀式^[14]和滚刀式^[15]。旋刀式切割器的旋刀片固定在割草机立轴上,靠刀片高速旋转刈割牧草,但旋刀回转中心转速过低,易出现牧草漏割的问题。滚刀式切割器由一组旋转刀片和一个固定定刀组成,滚刀旋转时与定刀产生相对运动,从而剪断牧草。此种切割器对密集的牧草适应性强,且割茬稳定性系数较好。根据《草原资源与生态监测技术规程》,为保证样方内牧草割茬高度一致,人工刈割时使用剪刀进行齐地刈割,且牧草留茬高度通常保持在 $1 \sim 2 \text{ cm}$ 。因此,本研究采用可以保证割茬高度一致的滚刀式切割器,滚刀片安装在滚刀轴上组成滚刀,定刀安装在滚刀正下方,两者配合刈割牧草。为减少牧草损失,采用风机将落在切割器上的牧草段吹送至集草箱。为便于操作,通过无线遥控器控制装置行走、滚刀旋转和风机工作等。

1.2 装置整体结构

装置主要由行走底盘、滚刀式切割器、伺服电机、升降机构、集草系统、丝杠、电气控制箱、风机和风管等部件组成,如图 1 所示。滚刀式切割器主要包括滚刀、定刀和伺服电机,通过升降机构悬挂于装

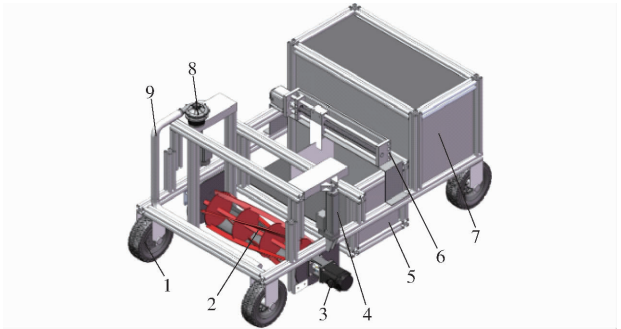


图 1 草原地上生物量监测刈割集草装置结构图

Fig.1 Structure diagram of grassland biomass monitoring and harvesting device

1. 行走底盘 2. 滚刀式切割器 3. 伺服电机 4. 升降机构
5. 集草系统 6. 丝杠 7. 配电箱 8. 风机 9. 风管

置中部,并由伺服电机驱动滚刀旋转;集草系统位于切割器后方,包括集草箱、丝杠和推板;电气控制箱位于装置后端,作为供电源和驱动源,包括移动电源、变压器、电机驱动器、GNSS (Global navigation satellite system) 模块及控制器等组件;风机与风管安装于切割器前方,用于提供辅助气流将牧草吹送至集草箱。

1.3 工作原理

装置前进时,滚刀旋转,牧草被旋转的滚刀压倒并喂入滚刀与定刀之间,并在滚刀与定刀的剪切作用下被切断,进而牧草段在滚刀离心力及风机提供的辅助气流作用下被抛送至集草箱内,刈割抛送示意图如图 2 所示。刈割完样方牧草后,集草箱底部的压力传感器 (HX711 芯片) 测量集草箱内牧草质量,GNSS 模块 (ATK - MO1218) 采集样点经纬度。进而丝杠推动推板作直线运动,将集草箱内牧草推送至侧边的集草袋,从而完成牧草的刈割与相关信息的采集。

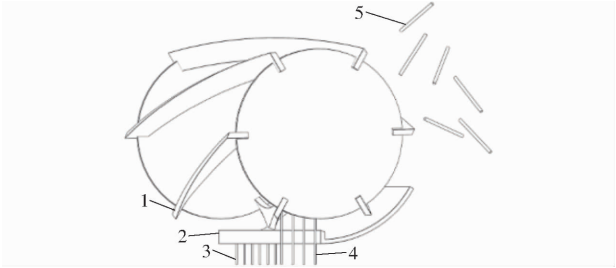


图 2 牧草刈割抛送示意图

Fig.2 Schematic of cutting and throwing grass

1. 滚刀 2. 定刀 3. 牧草留茬 4. 未刈割牧草 5. 牧草段

2 关键部件结构设计与运动分析

2.1 关键部件结构设计

滚刀式切割器是该装置的关键部件,其结构如图 3a 所示,主要由伺服电机、电机支座、联轴器、侧板、滚刀、定刀和调节弹簧组成。滚刀与定刀均由侧板支撑,伺服电机通过电机支座固定于侧板上,其输出轴通过联轴器与滚刀轴连接,为滚刀提供旋转动力。定刀在滚刀下方,滚刀转动使两者产生速度差,从而刈割牧草。为防止滚刀与定刀发生碰撞,将调节弹簧通过螺栓和螺母固定在滚刀与定刀之间,通过调整螺母松紧可调节滚刀与定刀间隙。定刀后部设计为弧形面,如图 3b 所示,用于承载因抛送速度不足而掉落的牧草,进而牧草在风机提供的气流作用下被吹送至集草箱内。

集草系统是该装置的重要部分,包括集草箱、丝杠、推板、压力传感器、无线射频识别 (Radio frequency identification, RFID) 读写器及支架,如图 4

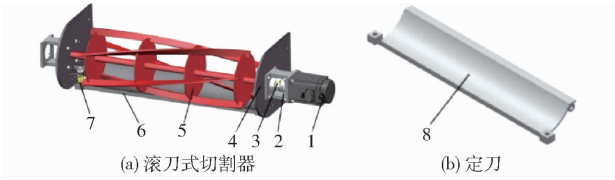


图 3 滚刀式切割器结构图

Fig.3 Structural diagrams of rotary blade cutting mechanism

1. 伺服电机 2. 电机支座 3. 联轴器 4. 侧板 5. 滚刀 6. 定刀 7. 调节弹簧 8. 定刀后弧面

所示。集草箱的底部由上下两层薄板构成,下层薄板用于承载压力传感器,上层薄板置于压力传感器之上,用于承载牧草段。丝杠通过支架固定于集草箱上端,其侧面与推板连接。当传感器采集完牧草质量和样点经纬度坐标后,丝杠会将草段推至集草箱侧面的集草袋,RFID 读写器将质量与坐标数据写入集草袋的电子标签。

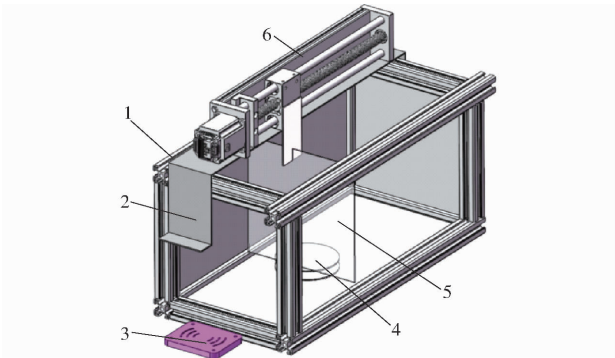


图 4 侧向丝杠推式集草系统结构图

Fig.4 Side screw push grass collecting system

1. 集草箱 2. 支架 3. RFID 读写器 4. 压力传感器 5. 推板 6. 丝杠

2.2 切割器主要参数确定

2.2.1 滚刀推挤角

为有效刈割牧草,首先需确保牧草的稳固夹持^[16]。图 5a 为滚刀与定刀刈割牧草茎秆示意图,AB 为定刀刃,CD 为滚刀刃,圆为牧草茎秆,虚线为牧草茎秆与滚刀刃的公切线;图 5b 为牧草茎秆的受力分析图,定义公切线与线 AB 交点形成的锐角 α 为滚刀推挤角。设滚刀和定刀对牧草施加的法向压力分别为 N_1 和 N_2 ,对应的摩擦力分别为 $f_1 N_1$ 和 $f_2 N_2$ 。为避免牧草在刈割过程中沿定刀水平方向发生滑动,需满足刀片与牧草之间的摩擦力在水平方向上的合力大于或等于刀片对牧草施加的水平方向推力,即

$$f_1 N_1 \cos \alpha + f_2 N_2 \geq N_1 \sin \alpha \tag{1}$$

式中 f_1 ——牧草与滚刀之间的摩擦因数

f_2 ——牧草与定刀之间的摩擦因数

2.2.2 滚刀片数量

为防止漏割,即作业过程中滚刀始终切割茎秆,

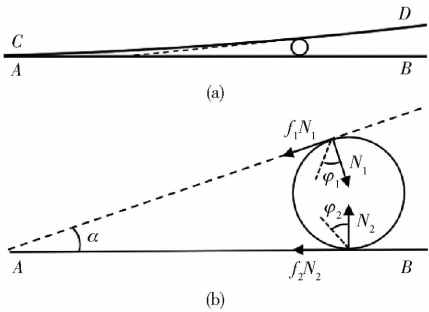


图 5 刈割茎秆与茎秆受力示意图

Fig. 5 Schematics of cutting stem and stem force analysis

需根据切割回转角^[17]合理设计滚刀片的数量。切割回转角为单个滚刀片从进入切割状态到切割结束过程中,主轴所转过的角度。如图 6 所示,AB 为定刀刃线,CD 为滚刀刃线,滚刀于点 D 接触定刀刃线开始切割,至点 C 离开定刀刃线结束切割,此时滚刀刃线 CD 旋转至 C'D',点 D 所划过的弧线 DD'对应的圆心角 ϕ 即为切割回转角。根据上述滚刀推挤角分析,推挤角与滚刀片的形状相关联,因此,由公式(1)所得推挤角范围,选择切割回转角分别为 60° 、 72° 和 90° 的刀型,对应的刀片数量分别为 6 片、5 片和 4 片。

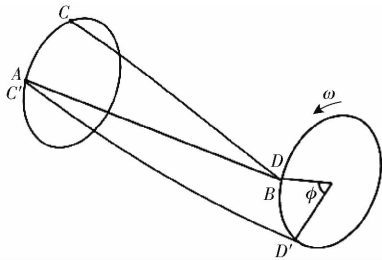


图 6 切割回转角示意图

Fig. 6 Cutting rotation angles

2.3 切割器运动分析

2.3.1 滚刀运动轨迹

装置作业时,滚刀随装置前进方向做直线运动,同时自身做回转运动。设点 A 为滚刀刃上某点,其运动轨迹形状取决于滚刀刃旋转速度 v_r 与滚刀前进速度 v_0 的比值 λ ,称为切割速比^[18]。

当 $\lambda = 0$ 时,滚刀不旋转,点 A 运动轨迹呈直线;当 $0 < \lambda < 1$ 时,点 A 运动轨迹为短幅摆线,曲线上任意一点的水平分速度与滚刀前进方向一致,滚刀与定刀无法形成与前进方向相反的速度差,导致切割器向前推挤牧草而无法正常工作;当 $\lambda = 1$ 时,点 A 运动轨迹为普通摆线,曲线上任意一点的水平分速度仍不具有向后的分量,因此仍无法正常刈割牧草;当 $\lambda > 1$ 时,点 A 的运动轨迹为余摆线,如图 7 所示。最大横弦 AA'下方任意一点,其水平分速度 v_x 与滚刀前进方向相反,此时滚刀能正常刈割牧草。参考《农业机械设计手册》,对于有支撑的切割器,

刈割牧草的割刀平均线速度应为 $1.6 \sim 2.0 \text{ m/s}$ 或更高。鉴于本文所设计的切割器为有支撑切割,初步选择滚刀最低转速为 300 r/min ,且滚刀的前进速度控制在 2 m/s 以下。

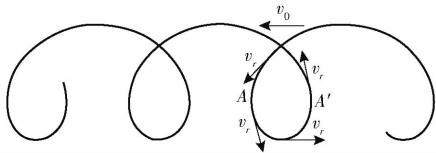


图 7 余摆线运动轨迹

Fig. 7 Trajectory of trochoidal motion

2.3.2 滚刀抛送牧草运动学分析

牧草被刈割后随滚刀运动一段距离,并在定刀弧形末端被甩出。此过程中,牧草主要受重力、离心力和空气阻力的作用,可看作是带有初速度的斜上抛运动^[19]。设滚刀轴回转中心为坐标原点,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴,构建牧草抛送过程的示意图,如图 8 所示。

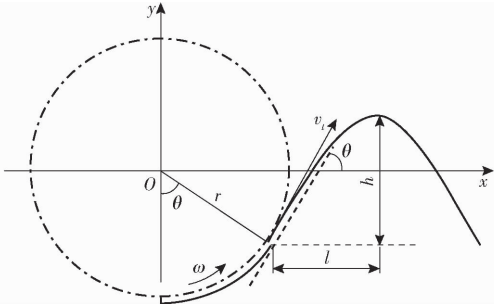


图 8 牧草抛送过程示意图

Fig. 8 Schematic of grass throwing

根据相关研究,当抛送物料的速度低于 200 m/s 时,空气阻力与物料速度呈线性关系,可以建立牧草抛送轨迹的方程^[20]

$$\begin{cases} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -k \frac{\partial x}{\partial t} \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -k \frac{\partial y}{\partial t} - mg \\ x|_{t=0} = r \sin \theta \\ v_{fx}|_{t=0} = v_t \cos \theta \\ y|_{t=0} = r \cos \theta \\ v_{fy}|_{t=0} = v_t \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

- 式中
- m ——牧草质量,kg
 - x ——牧草横坐标,m
 - y ——牧草纵坐标,m
 - t ——牧草运动时间,s
 - k ——牧草空气阻力系数
 - v_{fx} ——牧草在 x 方向分速度,m/s
 - v_{fy} ——牧草在 y 方向分速度,m/s
 - v_t ——牧草抛出时初速度,m/s

θ ——牧草抛出时速度与水平面夹角, ($^{\circ}$)
 g ——重力加速度, m/s^2
 r ——滚刀回转半径, m

由上述公式可知,影响牧草运动轨迹的关键因素有牧草质量 m 、牧草抛出初速度 v_i 、牧草抛出角度 θ 和空气阻力系数 k 。其中,空气阻力系数 k 与牧草的形状和体积密切相关。鉴于本文研究对象为针茅这一草本植物,其茎秆和叶片未木质化,因此可假设其空气阻力系数相同。因此,牧草的初速度 v_i 与抛出角度 θ 被认为是影响牧草位移的主要因素。当 v_i 固定时,抛出角度 θ 越大, y 方向分速度越大,而 x 方向分速度则越小。若 θ 过大会将导致牧草 x 方向位移过小,可能无法将牧草抛入集草箱;若 θ 过小,则会导致 y 方向位移过小,进而出现横向抛送现象。反之,当 θ 固定时,初速度 v_i 越大,牧草的抛送距离越远。

为确保装置具备良好的通过性能,不宜将集草箱的离地间隙设计得过低,结合切割器的尺寸参数,取抛出角度 θ 为 60° , 横向抛送的位移 l 变化范围为 $100 \sim 200 \text{ mm}$, 纵向抛送的位移 h_i 变化范围为 $0 \sim 200 \text{ mm}$, 要将牧草抛送到集草箱内,需要满足条件^[21]

$$\begin{cases} l_i = \frac{1}{2} v_i t_f \cos \theta \\ h_i = v_i t_f \sin \theta - \frac{1}{2} g t_f^2 \\ v_i = (1 - \mu_a - \mu_b) v_s \end{cases} \quad (3)$$

式中 l_i ——牧草抛送最高点与抛出点水平距离, m
 h_i ——牧草抛送最高点与抛送点垂直距离, m
 t_f ——牧草到达最高点所用时间, s
 μ_a ——切割器与牧草间阻力系数
 μ_b ——牧草碰撞损失系数
 v_s ——滚刀刃的旋转速度

设计抛出角度 θ 为 60° , l 为 150 mm , h 为 $20 \sim 150 \text{ mm}$, μ_a 为 0.1 , μ_b 为 0.2 , 计算得牧草抛出速度 v_i 为 $1.90 \sim 2.59 \text{ m/s}$, 则滚刀刃的旋转速度 v_s 为 $3.58 \sim 5.77 \text{ m/s}$, 滚刀转速为 $455 \sim 734 \text{ r/min}$ 。

3 基于 ANSYS/LS-DYNA 的仿真试验

3.1 试验方法

构建切割器刈割针茅的仿真模型,并对各模型赋予相应的材料属性,包括弹性模量、泊松比和密度。滚刀与定刀均使用 65Mn 钢材料,其材料属性可以通过查阅相关资料获得,针茅的物料性能参数通过万能试验机 (INSTRON-3367, 30 kN) 进行试验测试得到。

通过万能试验机对针茅茎秆进行轴向拉伸试验,如图 9 所示,用夹具将试样固定于试验台,并设定加载速率为 3 mm/min , 计算弹性模量 E

$$E = \frac{F}{S_0} \frac{l_0}{\Delta l} \quad (4)$$

式中 F ——拉伸力, N
 S_0 ——针茅茎秆横截面积, mm^2
 Δl ——拉伸力作用下针茅茎秆横向形变量, mm
 l_0 ——针茅茎秆初始长度, mm

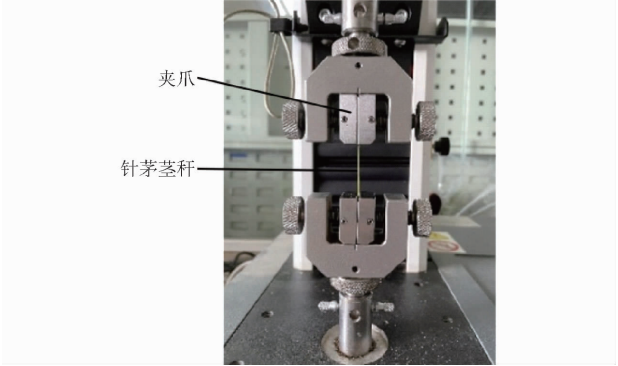


图 9 轴向拉伸试验
Fig. 9 Axial tension test

采用定义法^[22]计算针茅茎秆泊松比

$$\mu = \frac{\Delta s}{s} \frac{h}{\Delta h} \quad (5)$$

式中 μ ——泊松比
 Δs ——针茅茎秆径向绝对变形量, mm
 s ——针茅茎秆初始直径, mm
 Δh ——针茅茎秆轴向绝对变形量, mm
 h ——针茅茎秆初始长度, mm

计算得到针茅茎秆材料的属性,并查阅切割器材料属性^[21],如表 1 所示。

表 1 针茅茎秆和切割器材料属性参数
Tab.1 Material properties of Stipa stems and cutting tools

材料	参数	数值
针茅茎秆	弹性模量/Pa	3.57×10^9
	泊松比	0.34
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	985
切割器	弹性模量/Pa	2.10×10^{11}
	泊松比	0.28
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 810

3.2 仿真设计

利用 Solidworks 软件建立切割器与针茅的三维模型,并将其另存为 .X_t 格式导入 ANSYS Workbench (2022R1) 进行仿真前处理。为提高运算效率,切割器仅保留滚刀和定刀两个核心工作部件,忽略

侧板、调节弹簧等非重要部件。针茅具备独特的植物特性,其茎秆相较于针茅其他分支部分难以刈割,因此将针茅模型进行简化,只保留针茅的茎秆部分。设置切割器与针茅茎秆模型材料特性,定义切割器为刚性体、针茅茎秆为柔性体;设置切割器与针茅连接类型为几何体交互,接触特性为侵蚀。采用自动网格划分方式对切割器进行网格划分,并对针茅进行网格细化。在实际作业场景中,针茅根部与根茎部被土壤夹持固定。因此,在仿真过程中,对针茅底部施加固定支撑约束,对定刀施加水平移动速度,对滚刀施加水平移动速度与转速。通过 LS-DYNA 求解器进行求解,利用 LS-PrePost 后处理软件观察仿真效果并输出切割力数据。在 LS-DYNA 中切割器与针茅茎秆的仿真模型如图 10 所示。

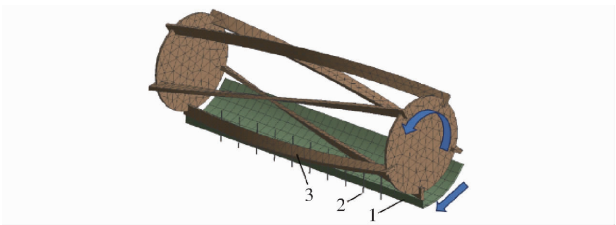


图 10 切割器-针茅仿真模型
Fig. 10 Cutter-Stipa simulation model
1. 定刀 2. 针茅 3. 滚刀

根据前述分析,牧草割茬高度稳定性系数是地上生物量监测的重要条件,参考相关研究^[23],本文割茬高度稳定性采用割茬高度稳定性系数 C_0 进行评估,系数越大,表明割茬高度稳定性系数越高,相关计算公式为

$$C_0 = \left(1 - \frac{S_a}{H_a}\right) \times 100\% \tag{6}$$

其中

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum (H_i - H_a)^2}{n - 1}} \tag{7}$$

式中 S_a ——割茬高度标准差,mm
 H_i ——单点测量割茬高度,mm
 H_a ——平均割茬高度,mm
 n ——总测量次数

为尽量减小刈割时的功率损失,切割力满足针茅被切断的条件即可,定义切割器与针茅茎秆接触瞬间的相互作用力为切割器对针茅的切割力^[24],将一组试验中峰值切割力的平均值作为此组仿真试验的平均切割力。由前文分析,推挤角、滚刀转速和前进速度是影响刈割质量的重要因素,因此将此三因素作为自变量,平均切割力和割茬高度稳定性系数作为响应变量,开展三因素三水平的 Box-Behnken 仿真试验,以探究各影响因素及其交互作用对响应

变量的影响,并求解最佳参数组合。设置滚刀推挤角 $2^\circ \sim 4^\circ$,滚刀转速 $500 \sim 700 \text{ r/min}$,前进速度 $0.05 \sim 0.15 \text{ m/s}$ 。共进行 17 组试验。

试验因素编码如表 2 所示。

表 2 Box- Behnken 试验因素编码
Tab. 2 Box- Behnken experimental factors and coding

编码	因素		
	推挤角 $A/(^\circ)$	滚刀转速 $B/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	前进速度 $C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
-1	2	500	0.05
0	3	600	0.10
1	4	700	0.15

3.3 试验结果与分析

根据上述试验设计方案及 Box- Behnken 试验因素编码表,开展切割器刈割针茅茎秆的仿真试验,得到不同因素组合下的平均切割力与割茬高度稳定性系数数据。试验结果如表 3 所示,其中 x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值, Y_1 和 Y_2 分别为平均切割力和割茬高度稳定性系数。采用 Design-Expert 13.0 Trial 软件分别建立平均切割力 Y_1 和割茬高度稳定性系数 Y_2 的回归模型,并进行方差分析^[25]。

表 3 仿真试验方案与结果
Tab. 3 Simulation trial protocol and results

试验 序号	因素			Y_1/N	$Y_2/\%$
	x_1	x_2	x_3		
1	-1	-1	0	10.21	75
2	1	-1	0	13.06	87
3	-1	1	0	12.74	88
4	1	1	0	15.29	83
5	-1	0	-1	12.25	73
6	1	0	-1	17.91	85
7	-1	0	1	11.05	80
8	1	0	1	12.30	83
9	0	-1	-1	12.07	75
10	0	1	-1	14.86	87
11	0	-1	1	9.11	89
12	0	1	1	8.01	81
13	0	0	0	6.63	94
14	0	0	0	7.21	96
15	0	0	0	5.95	93
16	0	0	0	7.28	95
17	0	0	0	6.79	93

3.4 回归模型建立和方差分析

3.4.1 平均切割力回归模型建立和方差分析

各试验因素对平均切割力 Y_1 影响的回归模型为

$$Y_1 = 6.77 + 1.54x_1 + 0.8062x_2 - 2.08x_3 - 0.075x_1x_2 - 1.1x_1x_3 - 0.9725x_2x_3 + 4.21x_1^2 + 1.84x_2^2 + 2.4x_3^2 \tag{8}$$

进行方差分析,回归模型 P 值小于 0.000 1,表明回归方程极显著,失拟项 P 值大于 0.05,说明失拟项不显著,回归模型拟合度较好。推挤角、前进速度、推挤角的平方项、滚刀转速的平方项及前进速度平方项的 P 值均小于 0.01,对平均切割力影响极显著,且存在二次关系;滚刀转速、推挤角与滚刀转速的交互项、滚刀转速与前进速度交互项的 P 值均小于 0.05,对平均切割力的影响显著,相关试验因素对响应值的影响存在二次关系;推挤角与滚刀转速交互项的 P 值大于 0.05,表明其影响不显著。

3.4.2 割茬高度稳定性系数回归模型建立和方差分析

各试验因素对割茬高度稳定性系数 Y_2 影响的回归模型为

$$Y_2 = 94.2 + 2.75x_1 + 1.63x_2 + 1.62x_3 - 4.25x_1x_2 - 2.25x_1x_3 - 5x_2x_3 - 6.85x_1^2 - 4.1x_2^2 - 7.1x_3^2$$

(9)

进行方差分析,回归模型 P 值小于 0.000 1,表

明回归方程极显著,失拟项 P 值大于 0.05,说明失拟项不显著,回归模型拟合度较好。推挤角、推挤角与滚刀转速的交互项、滚刀转速与前进速度交互项、推挤角平方项、滚刀转速平方项、前进速度平方项的 P 值均小于 0.01,表明上述因素对割茬高度稳定性系数影响极显著,且因素之间存在二次关系;滚刀转速、前进速度、推挤角与前进速度的交互项 P 值均小于 0.05,表明上述因素对割茬高度稳定性系数的影响显著。

3.5 单因素响应分析

3.5.1 单因素对平均切割力响应分析

回归方程中单因素的系数代表了因素对评价指标的影响,由回归模型 Y_1 可知,各因素对平均切割力的影响由大到小依次为前进速度、推挤角、滚刀转速。图 11 为各影响因素对平均切割力的影响曲线,从曲线图可以看出,平均切割力均随 3 个因素呈现先减少后增加的规律,且平均切割力分别在推挤角为 2.8° 、滚刀转速为 579 r/min、前进速度为 0.12 m/s 取得最小值。

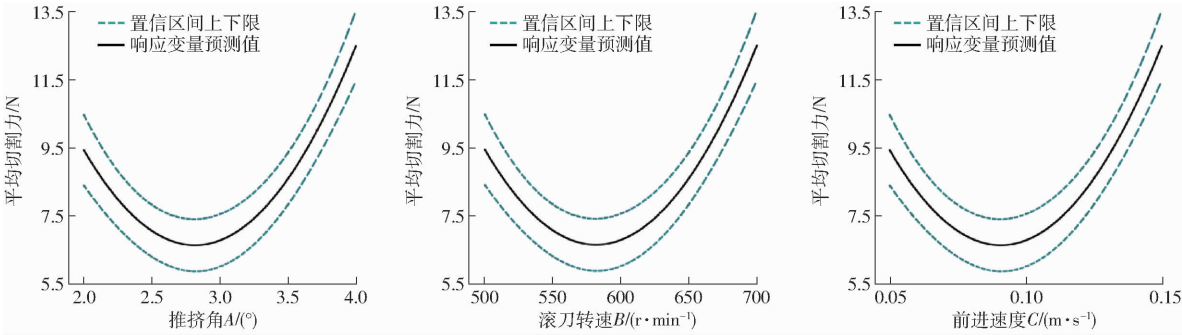


图 11 单因素对平均切割力的影响曲线
Fig. 11 Influence curves of single factor on average cutting force

3.5.2 单因素对割茬高度稳定性系数响应分析

由回归模型 Y_2 可知,各因素对割茬高度稳定性系数的影响由大到小依次为推挤角、滚刀转速、前进速度。图 12 为各影响因素对割茬高度稳定性系数

的影响曲线,由曲线可以看出,割茬高度稳定性系数均随 3 个因素呈现先增加后减小的趋势,且割茬高度稳定性系数分别在推挤角为 3.2° 、滚刀转速为 622 r/min、前进速度为 0.105 m/s 时取得最大值。

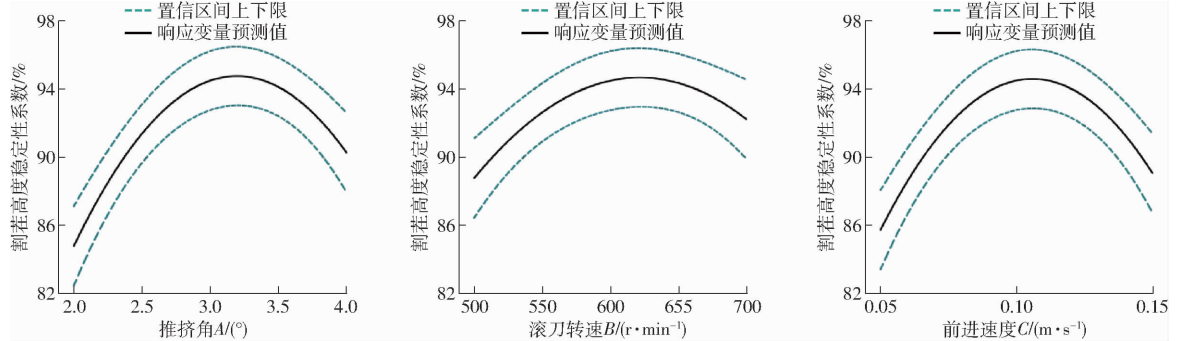


图 12 单因素对割茬高度稳定性系数的影响曲线
Fig. 12 Influence curves of single factor on cutting height uniformity

3.6 因素交互作用对评价指标的影响效应分析

因素交互作用对平均切割力影响的响应面如

图 13 所示,当前进速度处于中心水平值 0.1 m/s 时,推挤角为 2.88° 、滚刀转速为 583 r/min 时,平均

切割力最小；当推挤角处于中心水平值 3°时，滚刀转速为 577 r/min、前进速度为 0.117 m/s 时，平均切割力最小。

因素交互作用对割茬高度稳定性系数影响的响应面如图 14 所示，各因素交互作用对试验指标较为显著。当前进速度处于中心水平值 0.1 m/s 时，推挤角为 3.24°、滚刀转速为 629 r/min 时，割茬高度稳定性系数最高；当滚刀转速处于中心水平值 600 r/min 时，推挤角为 3.25°、前进速度为 0.098 m/s，

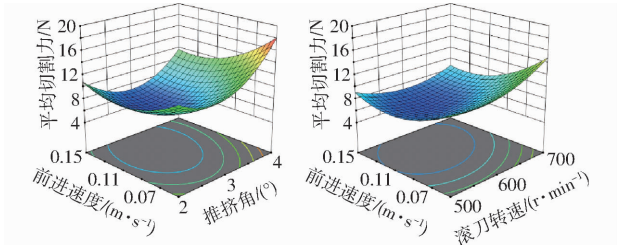


图 13 因素交互作用对平均切割力影响的响应面

Fig. 13 Response surface analysis of interaction effects on average cutting force

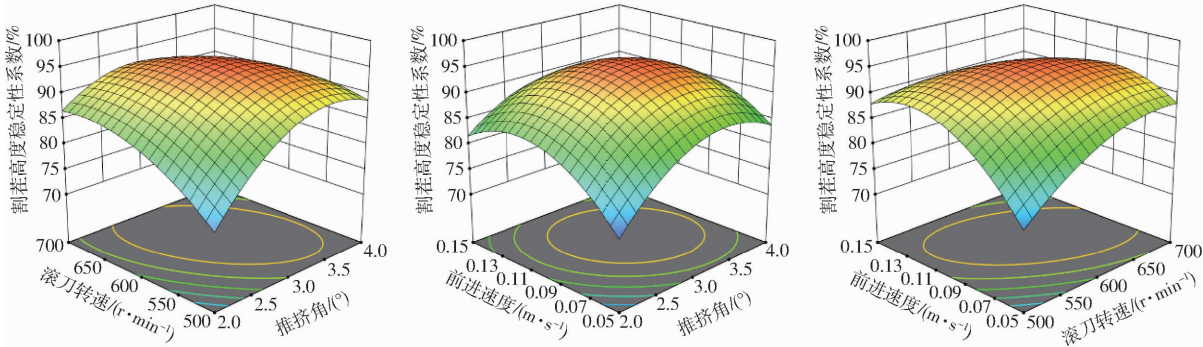


图 14 因素交互作用对割茬高度稳定性影响的响应面

Fig. 14 Response surface of the effect of factor interaction on stubble height stability

割茬高度稳定性系数最高；当推挤角处于中心水平值 3°时，滚刀转速为 623 r/min、前进速度为 0.106 m/s 时，割茬高度稳定性系数最高。

3.7 参数组合优化

以最小化平均切割力和最大化割茬高度稳定性系数为优化目标,选取推挤角、滚刀转速和前进速度作为优化变量,基于回归方程进行求解,进一步分析响应曲面并对回归模型进行优化。优化目标及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \max Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

使用 NSGA-Ⅱ 算法^[26]求解回归模型最优解，在综合考虑割茬高度稳定性优先的原则下，最佳参数组合为：推挤角 2.95°，滚刀转速 603 r/min，前进速度 0.11 m/s。在该参数组合下，平均切割力为 8.78 N，割茬高度稳定性系数为 92%。为了验证优化结果的准确性，基于上述参数组合进行仿真验证试验，试验重复 3 次计算其平均值。试验结果显示，平均切割力为 8.97 N，割茬高度稳定性系数为 93%，与回归模型预测值的差异较小，验证了最佳参数组合的准确性。

4 田间试验

根据上述试验分析，得出了三因素的最佳参数

组合，即：推挤角 2.95°，滚刀转速 603 r/min，前进速度 0.11 m/s。为减少加工和试验成本，将滚刀推挤角取整为 3°进行加工。将推挤角作为本试验的一个固定因素，将滚刀转速 (B) 与前进速度 (C) 作为试验因素，开展二因素三水平的 CCD (Central composite design) 试验。基于前文的最佳参数组合，缩小本试验因素的范围，选取 570、600、630 r/min 作为试验因素 B 的 3 个水平，选取 0.1、0.11、0.12 m/s 作为试验因素 C 的 3 个水平。由于装置刈割牧草过程中切割力难以直接测量，只选择割茬高度稳定性系数作为试验指标。

试验样地在锡林郭勒盟锡林浩特市的白音锡勒牧场(44°01'24"N, 116°26'04"E,海拔约 1 144.2 m)。在此牧场随机选取了 100 个 0.5 m×0.5 m 的方形样方，统计各样方内牧草的植被覆盖度及种类。对样方内的牧草进行人工刈割，记录其鲜质量后，放置于 65℃烘干箱中烘干至恒质量，最后称量干质量。结果显示，该区域牧草的平均含水率为 64.2%，平均覆盖度为 71%，其中针茅的相对覆盖度为 95%，羊草为 3%，其他牧草种类为 2%。田间试验于 2024 年 8 月 14 日开展，现场如图 15 所示。

CCD 试验结果如表 4 所示，各试验因素对割茬高度稳定性系数影响的回归模型 Y_2 为

$$Y_2 = 89.17 + 1.33x_2 - 1.50x_3 + 1.00x_2x_3 - 3.10x_2^2 - 5.60x_3^2 \quad (11)$$

进行方差分析，失拟项 P 值大于 0.05，表明失



图 15 装置牧草刈割采集试验

Fig. 15 Experimental evaluation of equipment for forage harvesting and collection

表 4 CCD 试验结果

Tab.4 CCD experimental results

序号	因素		割茬高度稳定性系数/%	序号	因素		割茬高度稳定性系数/%
	x_2	x_3			x_2	x_3	
1	-1	-1	82	8	0	1	81
2	1	-1	83	9	0	0	92
3	-1	1	77	10	0	0	90
4	1	1	80	11	0	0	89
5	-1	0	84	12	0	0	91
6	1	0	85	13	0	0	93
7	0	-1	86				

拟项不显著,该回归模型拟合度较好,可用于各项试验因素对评价指标的影响分析。对于割茬高度稳定性系数这一评价指标,滚刀转速与前进速度都是显著影响因素。绘制试验结果的响应面如图 16 所示。

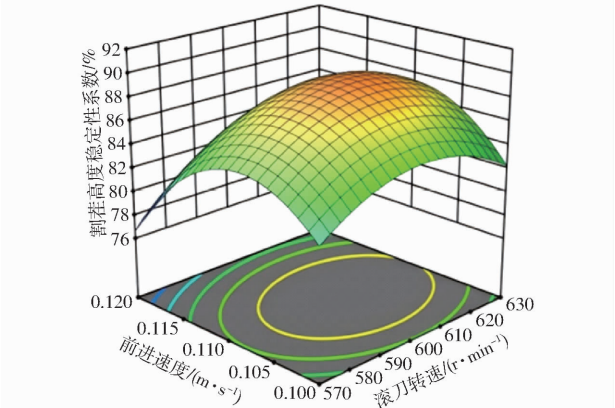


图 16 割茬高度稳定性系数响应面

Fig. 16 Response surface of cutting height uniformity

从图中可以看出,当转速为 570 r/min 时,前进越接近 0.12 m/s,曲面下降的越快,说明前进速度对割茬高度稳定性系数的影响较大。观察割茬发现,当装置前进速度较高、滚刀转速较低时,牧草有一部分被切割器底端压倒而导致滚刀刈割牧草根部靠上的位置,因此会造成这一部分牧草割茬高度较大;当装置前进速度较低、滚刀转速较高时,滚刀会对一部分割茬造成重割,从而降低了割茬高度稳定性系数。为获得最大割茬高度稳定性系数,由 Design-Expert 软件设置目标函数 $\max Y_3$,经过计算得出最

佳参数组合为滚刀转速 605.873 r/min,前进速度 0.10 m/s,预测割茬高度稳定性系数为 89.39%。将滚刀转速圆整为 606 r/min,以前进速度 0.10 m/s 进行田间试验验证,结果为滚刀转速 606 r/min,前进速度 0.10 m/s,预测割茬高度稳定性系数为 91%。对比试验结果与预测结果,割茬高度稳定性系数误差较小,说明预测结果准确,该装置刈割效果较好。进而使用最佳参数组合进行装置性能试验,在装置刈割点邻近位置设置人工刈割对照组,共计 5 组重复试验。需测试的装置性能包括牧草漏割率、牧草损失率、装置称量误差、定位误差和刈割时间。

人工刈割组在 0.4 m × 1.0 m 的长方形样方框内使用剪刀进行刈割,装置组在割幅为 0.4 m、滚刀转速为 606 r/min、前进速度为 0.10 m/s 条件下,刈割 1 m 长样方的牧草。进行每组试验时,对装置试验组和对照组分别计时,同时使用手持 GNSS 采集装置组的样点经纬度数据,以便为装置定位误差的计算提供参考。当装置组与人工组完成一组试验后,分别使用自封袋收集遗落在样方内的牧草,记为损失的牧草;分别将样方内未被刈割的牧草按照理论割茬高度进行人工刈割并装入自封袋,作为漏割的牧草。使用电子天平分别称量装置作业和对照组刈割的牧草、损失的牧草、漏割的牧草,记作 m_1 、 m_2 、 m_3 ,总和为 m_s 。

牧草损失率 L 计算公式为

$$L = \frac{m_2}{m_s} \times 100\%$$

(12)

牧草漏割率 M 计算公式为

$$M = \frac{m_3}{m_s} \times 100\%$$

(13)

统计装置采集的牧草质量和样点经纬度坐标数据并计算误差,所有试验指标结果如表 5 所示。

表 5 装置组与人工组试验对比

Tab.5 Comparison of device group and manual group experiments

组别	损失率/ %	漏割 率/%	割茬高度 稳定性系 数/%	称量	定位	刈割 时间/ s
				误差/ g	误差/ m	
1	人工组	2.90	2.63	73		232.56
	装置组	2.24	5.57	89	1.03 0.95	11.78
2	人工组	4.72	3.75	70		269.14
	装置组	5.51	7.34	91	1.32 1.33	10.93
3	人工组	3.40	4.14	74		227.64
	装置组	3.28	5.35	90	1.21 1.79	11.45
4	人工组	4.97	4.46	75		210.86
	装置组	3.32	4.48	92	1.16 0.56	11.33
5	人工组	5.08	4.76	72		246.57
	装置组	5.25	5.06	93	1.09 1.17	12.15

由表 5 数据可知,对于牧草损失率,装置组为 2.24% ~ 5.51%,人工组为 2.90% ~ 5.08%,装置组牧草损失主要为速度过大的牧草段飞溅出集草箱,而人工组的牧草损失为落在地上难以收集的碎草屑。对于牧草漏割率,装置作业为 4.48% ~ 7.34%,人工组为 2.63% ~ 4.76%,装置组牧草漏割主要为贴地生长的低矮牧草和硬度较大的牧草,而人工漏割主要为贴地生长不易刈割的牧草。装置显著提升了割茬高度稳定性系数,装置作业的割茬高度稳定性系数比人工组高 16% ~ 21%。装置称量误差为 1.03 ~ 1.32 g,定位误差为 0.56 ~ 1.79 m,均在标准范围内。刈割长 × 宽为 1.0 m × 0.4 m 的样方,装置组用时 11.33 ~ 12.15 s,人工组用时 210.86 ~ 269.14 s,装置效率是人工效率的 18 ~ 24 倍。综合装置与人工的刈割效果,装置能代替人工进行地上生物量的监测工作。

5 结论

(1)根据草原地上生物量的监测技术要求,设

计了一种面向草原地上生物量监测的滚刀式刈割集草装置,通过理论分析确定了滚刀推挤角、滚刀转速和前进速度等关键参数。

(2)通过仿真试验结合 Box - Behnken 响应面试验,构建了平均切割力、割茬高度稳定性系数与推挤角、滚刀转速、前进速度 3 个试验因素之间的数学模型。以最小化平均切割力和最大化割茬高度稳定性系数为优化目标,得到最佳参数组合为:推挤角为 2.95°、滚刀转速为 603 r/min、前进速度为 0.11 m/s。在该参数组合下,仿真测得平均切割力为 8.97 N,割茬高度稳定性系数为 92%。

(3)开展以滚刀转速和前进速度为试验因素,割茬高度稳定性系数为试验指标的二因素三水平田间试验,并采用 Design-Expert 软件计算得最佳参数组合:滚刀转速 606 r/min,前进速度 0.10 m/s。

(4)进行装置性能试验,并以人工组作为对照。试验表明:装置组的割茬高度稳定性系数比人工组高 16% ~ 21%,作业效率是人工效率的 18 ~ 24 倍,且其他方面误差均符合标准。

参 考 文 献

[1] Li Zhidong, Su Boru, Liu Moucheng. Research progress on the theory and practice of grassland eco-compensation in China[J]. Agriculture, 2022, 12(5): 721.

[2] Ma Rong, Shen Xiangjin, Zhang Jiaqi, et al. Variation of vegetation autumn phenology and its climatic drivers in temperate grasslands of China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 114:103064.

[3] 张雅娴,樊江文,王穗子,等. 草原调查、监测与评价的国际经验和启示[J]. 草业学报, 2023, 32(6): 203 - 213.

Zhang Yaxian, Fan Jiangwen, Wang Suizi, et al. Grassland investigation, monitoring and evaluation: international experience and insight[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(6): 203 - 213. (in Chinese)

[4] 张勇辉,冯琦胜,梁天刚,等. 草地资源调查与智能分析系统简介[J]. 草业科学, 2023, 40(8): 2171 - 2178.

Zhang Yonghui, Feng Qisheng, Liang Tiangang, et al. Introducing a grassland resource survey and intelligent analysis system [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(8): 2171 - 2178. (in Chinese)

[5] Liang Tiangang, Yang Shuxia, Feng Qisheng, et al. Multi-factor modeling of above-ground biomass in alpine grassland: a case study in the three-river headwaters region, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186:164 - 172.

[6] 周景乐,徐志高,何旭升,等. 草地上生物量测量方法综述[J]. 中南林业调查规划, 2022, 41(2): 36 - 40.

Zhou Jingle, Xu Zhigao, He Xusheng, et al. Review on methods of measuring grassland above-ground biomass[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2022, 41(2): 36 - 40. (in Chinese)

[7] Zhang Yuxin, Huang Jianxi, Huang Hai, et al. Grassland aboveground biomass estimation through assimilating remote sensing data into a grass simulation model[J]. Remote Sensing, 2022, 14(13): 3194.

[8] NY/T 1233—2006 草原资源与生态监测技术规程[S].

[9] 唐晓鹿. 一种用于采集高寒草原地上生物量的装置: 221178483U[P]. 2024 - 06 - 21.

[10] 庞晓攀. 一种便携式野外草地采样收集装置: 215004389U[P]. 2021 - 12 - 03.

[11] 李彬. 一种草本植物样方地上生物量取样装置: 219474979U[P]. 2023 - 08 - 04.

[12] Munyati C. Detecting the distribution of grass aboveground biomass on a rangeland using Sentinel - 2 MSI vegetation indices [J]. Advances in Space Research, 2022, 69(2): 1130 - 1145.

[13] Zhou Yajun, Liu Tingxi, Batelaan O, et al. Spatiotemporal fusion of multi-source remote sensing data for estimating aboveground biomass of grassland[J]. Ecological Indicators, 2023, 146:109892.

[14] 任兴涛,唐灵飞,仲建军. 小型多功能旋转割刀式割草机设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(10): 99 - 103.

Ren Xingtao, Tang Lingfei, Zhong Jianjun. Design of small multi-function rotary cutter mower[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 99 - 103. (in Chinese)

[15] 王伟,王远,孟堃,等. 无人智能滚刀式草坪修剪机的研制[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(2): 32 - 36.

Wang Wei, Wang Yuan, Meng Kun, et al. Development of unmanned intelligent hob-type lawn trimmers[J]. Forestry

Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(2): 32 – 36. (in Chinese)

[16] 黄婉媛, 任德志, 宫元娟, 等. 基于 Abaqus 的耦合式玉米秸秆皮糠分离仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 124 – 133.
Huang Wanyuan, Ren Dezhi, Gong Yuanjuan, et al. Coupling separation simulation analysis and test of corn stalk rind-pith based on Abaqus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 124 – 133. (in Chinese)

[17] 刘佳杰, 马兰, 向伟, 等. 4QM-4.0 型麻类青饲料联合收获机研制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(12): 3039 – 3048.
Liu Jiajie, Ma Lan, Xiang Wei, et al. Design of 4QM-4.0 fibre crops green fodder combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(12): 3039 – 3048. (in Chinese)

[18] 许静, 刘宝伟, 陈平录, 等. 油茶林立式螺旋松土除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 79 – 87.
Xu Jing, Liu Baowei, Chen Pinglu, et al. Development and experiment of vertical spiral cutter for soil loosening and weeding in camellia oleifera forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 79 – 87. (in Chinese)

[19] 连国党, 宗望远, 封伟, 等. 食葵联合收获割脱一体式割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 122 – 131.
Lian Guodang, Zong Wangyuan, Feng Wei, et al. Design and experiment of cutting threshing integrated type header for harvesting of edible sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 122 – 131. (in Chinese)

[20] 蒋亚军, 廖宜涛, 廖庆喜. 冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 102 – 111.
Jiang Yajun, Liao Yitao, Liao Qingxi. Design and experiment on cylinder-type chopping device of harvester for fodder rapeseed in winter and spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 102 – 111. (in Chinese)

[21] 方梅, 郁志宏, 张文杰, 等. 盘刀式铡草机粉碎物料运动过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 76 – 84.
Fang Mei, Yu Zhihong, Zhang Wenjie, et al. Analysis and experiments of the movement process for the shredded material of disc knife chaff cutter[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 76 – 84. (in Chinese)

[22] 别琼, 颜华, 赵翔烽, 等. 漂浮穴盘苗取苗爪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊1): 230 – 236.
Bie Qiong, Yan Hua, Zhao Xiangfeng, et al. Design and experimentation of seedling gripper for floating tray seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 230 – 236. (in Chinese)

[23] 郭备, 王德成, 王光辉, 等. 小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 123 – 129.
Wu Bei, Wang Decheng, Wang Guanghui, et al. Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 123 – 129. (in Chinese)

[24] 陈涛, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 91 – 100.
Chen Tao, Yi Shujuan, Li Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91 – 100. (in Chinese)

[25] 廖庆喜, 王乾祥, 万星宇, 等. 自走式油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 126 – 138.
Liao Qingxi, Wang Qianxiang, Wan Xingyu, et al. Design and experiment of self-propelled rapeseed stalks harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 126 – 138. (in Chinese)

[26] 马文鹏, 尤泳, 王德成, 等. 基于 RSM 和 NSGA-II 的苜蓿种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 136 – 144.
Ma Wenpeng, You Yong, Wang Decheng, et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA-II[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 136 – 144. (in Chinese)