

多自由度沙柳平茬收割机切割装置设计与试验

贺长彬^{1,2} 景红伟¹ 赵陈成¹ 特宾古日布³ 石磊³ 图娜拉³

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 牧草饲料生产全程智能化装备内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010018;

3. 杭锦旗农牧技术推广中心, 鄂尔多斯 017400)

摘要: 为解决复杂沙地地形下、零散分布状态下沙柳平茬收割作业过程中存在的人工收割劳动强度大、效率低、缺乏机械装备等问题,通过理论分析、正交试验和响应面分析,设计了具有7个自由度的沙柳平茬收割机具和相向双旋式双锯片切割装置,并进行了样机试制与田间性能试验。机具采用液压系统驱动,主要由机架、行走机构、切割装置、伸缩装置和旋转装置等部分组成。正交试验和响应面分析结果表明,锯切转速、进给速度和锯片齿数为影响沙柳茎秆锯切合力和锯切功率的关键因素,锯片齿数和锯切转速是锯切合力和锯切功率的显著影响因素,且锯片齿数和锯切转速、锯片齿数和锯片进给速度的交互作用影响显著。田间试验结果表明,当切割装置作业参数组合为锯片齿数120、进给速度10 mm/s、锯切转速1400 r/min时,沙柳平茬作业平均破茬率、漏割率、重割率和茬高合格率分别为4.02%、4.19%、0和94.33%,能够满足沙柳机械化平茬生产作业技术要求。

关键词: 沙柳; 平茬收割机; 切割装置; 多自由度

中图分类号: S-1; S22

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)11-0320-09

OSID:



Design and Experiment of Cutting Device of Multi-degree-of-freedom Sandy Willow Harvester

HE Changbin^{1,2} JING Hongwei¹ ZHAO Chencheng¹ TE Binguribu³ SHI Lei³ TU Nala³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Intelligent Equipment for

the Entire Process of Forage and Feed Production, Hohhot 010018, China

3. Hangjinqi Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Ordos 017400, China)

Abstract: To address the issues of high labor intensity, low efficiency, and lack of mechanical equipment in the harvesting of sandy willow growing in complex sandy terrains and dispersed distributions, the theoretical analysis, orthogonal experiments, response surface analysis, and field test methods were used, a sandy willow cutting harvester with seven degrees of freedom and a counter-rotating dual saw blade cutting device were designed. Subsequently, the prototype was fabricated and subjected to field performance tests. The harvester was driven by a hydraulic system, and it mainly comprised a frame, a walking mechanism, a cutting device, a telescopic device, and a rotating device, etc. The orthogonal experiments results and response surface analysis indicated that the saw blade rotate speed, feed rate, and number of saw blade teeth were key factors affecting the cutting force and power. The number of saw blade teeth and saw blade rotate speed significantly influenced the cutting force and power, as well as the notable interactions between the saw blade teeth and rotate speed, saw blade teeth and feed rate. The field test results showed that, when the cutting device operating parameters were saw blade tooth number of 120, feeding speed of 10 mm/s, and sawing speed of 1400 r/min the average stubble breakage rate, missed cut rate, re-cut rate, and stubble height qualification rate of the sandy willow harvester were 4.02%, 4.19%, 0, and 94.33%, respectively, meeting the technical requirements for mechanized sandy willow cutting operations.

Key words: sandy willow; harvester; cutting device; multi-degree-of-freedom

收稿日期: 2024-07-28 修回日期: 2024-08-25

基金项目: 鄂尔多斯市科技计划项目(2022YY022)和内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT24046)

作者简介: 贺长彬(1991—),男,副教授,博士,主要从事草业生产机械化研究,E-mail: changbin_he@imau.edu.cn

0 引言

土地沙漠化导致生态环境恶化,直接威胁生态系统完整性和生物多样性,制约经济社会的可持续发展。第六次全国荒漠化和沙化调查结果表明,全国沙化土地面积 $1.6878 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1]。虽然沙区生态系统呈“整体好转、改善加速,功能增强、稳中向好”的发展态势,但未达到有效治理程度的沙化土地仍需持续巩固并提升治理成效,综合防治任务仍艰巨。

沙柳是沙区特有的灌木树种,常被用作固沙先锋树种。因其具有生命力顽强,且具有根系发达、耐旱耐风沙和萌芽能力强等特点,在防风固沙方面有重要作用^[2-3]。根据沙柳生物特性,每 3~5 年需要对其进行平茬复壮。

沙生灌木平茬是推进重点区域沙化土地综合治理主要修复措施之一^[4]。国外通过种植以柳树等为代表的灌木林,用于制作燃料、饲料、工艺品以及控制土壤侵蚀等。此类灌木多种植在平整土地上^[5-6],灌木切割平茬作业时,一方面采用大型联合作业机械,采用通用式机身搭配不同割台,实现灌木枝条切割和切碎功能,大多采用大型自走式青饲料收获机械机身,如 Claas、New Holland、John Deer 等。另一方面采用悬挂式作业机械,机具挂接在拖拉机后方、前方或侧方,由拖拉机提供动力,通过割台将灌木进行平茬切割或切碎^[7-13]。国内近些年多沙生灌木收获机型有 4GM-200A 型自走式柠条联合收获机、4QZ-30 型自走式收获机、9ZFD-2.0 型自走式灌木收割粉碎打捆一体机等^[14-18]。此类机器主要应用于生长在地面较结实、相对平坦地面的灌木林平茬收获作业,而对于作业环境复杂的沙区坡地和农牧户小型灌木林区,难以保证地形适应性和留茬高度^[19],大多仍通过人工平茬或使用小型背负式微小型割灌机进行机械化平茬作业,劳动强度大且效率低,亟需研发适应沙区地势复杂环境和结构紧凑的沙生灌木平茬复壮收割机具。

本文设计一种多自由度沙柳平茬收割机具,并对切割装置开展优化设计与试验,以期解决现有大型收割机具对于沙地地形复杂情况且分布较为分散的沙柳平茬作业存在应用局限性、人工收割劳动强度大、效率低等问题。

1 整机结构与工作原理

沙柳平茬收割机主要由机架、行走机构、切割装置、伸缩装置、旋转装置、动力传递装置构成,整机结构如图 1 所示,整机参数如表 1 所示。

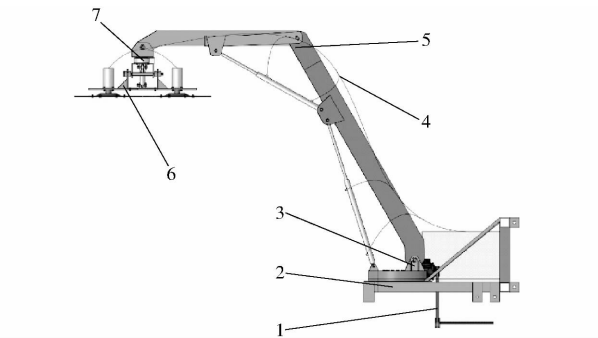


图 1 沙柳平茬收割机整机关键结构示意图
Fig. 1 Overall structure of sandy willow harvester
1. 动力传递装置 2. 机架 3、7. 旋转装置 4. 液压油管 5. 伸缩装置 6. 切割装置

表 1 整机参数	
Tab. 1 Parameters of whole machine	
参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 300×1 400×700
工作幅宽/mm	1 400
整机质量/kg	825
配套动力/kW	≤70
机具作业自由度	7
挂接方式	三点悬挂
驱动方式	液压驱动

为了实现沙柳平茬收割机灵活作业,将其设计成多自由度平茬收割机,整机自由度计算式为

$$N = 3n - (2P_l + P_h) \tag{1}$$

式中 N ——整机自由度

n ——活动构件数量

P_l ——低副数量

P_h ——高副数量

由图 1 可知,活动构件为 7 个,低副为 7 个,高副为 0 个,计算可得,沙柳平茬收割机自由度 N 为 7,该机具原动件数目为 7,等于自由度数,所以机构具有确定运动。

机具工作时,拖拉机将沙柳平茬收割机具牵引至作业区域,通过操控液压系统,控制液压油缸和回转液压马达,操控机械臂将切割装置移动到沙柳丛旁,并使切割装置的割台距离地面 2~8 cm,通过锯切回转液压马达和仿形液压油缸控制割台,使割台前端正对沙柳丛,且割台与沙柳底部沙丘平行。通过后置动力传递装置减小整机转动惯量,臂展长,工作空间大,运动时灌木枝干扰小^[20]。启动锯切液压马达,同时控制机械臂移动切割装置,实现沙柳切割平茬作业。在作业过程中,通过控制锯切回转液压马达和仿形液压油缸,实时根据沙柳丛形态调整割台方向及倾角,从而实现对沙柳仿形平茬收割。该机具液压系统原理图如图 2 所示。

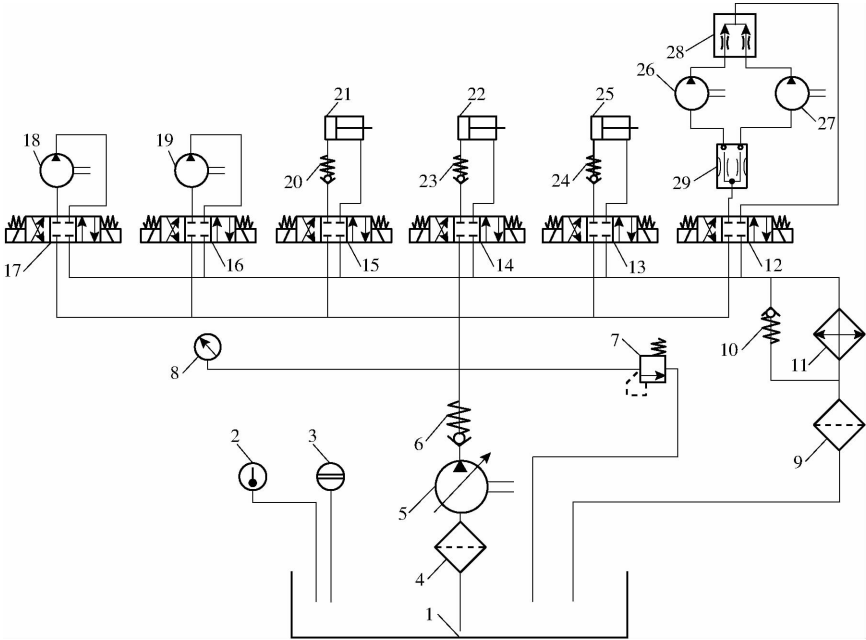


图 2 液压系统回路图

Fig. 2 Hydraulic system diagram

1. 液压油箱 2. 温度表 3. 液位计 4, 9. 过滤器 5. 液压泵 6, 10, 20, 23, 24. 单向阀 7. 溢流阀 8. 压力计 11. 冷却器
12 ~ 17. 三位四通电磁换向阀 18, 19. 回转液压马达 21, 22, 25. 液压油缸 26, 27. 锯切液压马达 28. 集流阀 29. 分流阀

2 沙柳平茬切割装置设计

2.1 切割过程理论分析

切割装置在平茬过程中,同时存在旋转运动和进给运动,圆锯片一方面以角速度 ω 绕主轴高速旋转,另一方面以前进速度 v 向沙柳丛方向做进给运动。以锯片某一齿尖点 a 为研究对象,分析其相对运动,如图 3a 所示。其中, a' 为锯片向沙柳植株靠近过程中齿尖 a 位置, a'' 为齿尖 a 接触沙柳植株时位置。

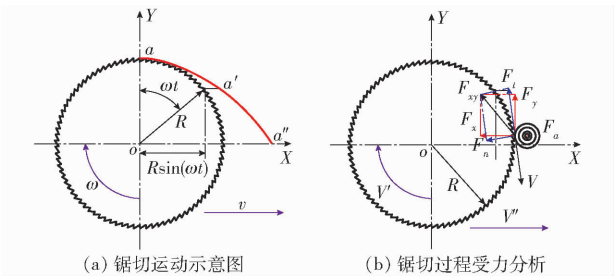


图 3 圆锯片锯切运动和锯切过程受力分析

Fig. 3 Motion and cutting forces analysis of circular saw blade during working

在同一时间内,锯片中某一齿尖点 a 的相对运动可以看作是圆周运动齿尖位移与锯片进给位移矢量和。因此,锯片上某一齿尖运动轨迹则为一条余摆线。

锯片齿尖点 a 位移方程为

$$\begin{cases} x_a = vt + R\sin(\omega t) \\ y_a = R\cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 t ——时间, s

R ——锯片半径, m
 x_a ——锯片齿尖点 a 在 X 方向位移, m
 y_a ——锯片齿尖点 a 在 Y 方向位移, m
对式(2)求导,得到锯片速度为

$$\begin{cases} V_x = \frac{dx_a}{dt} = v + \omega R\cos(\omega t) \\ V_y = \frac{dy_a}{dt} = -\omega R\sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

$$V_a^2 = V_x^2 + V_y^2 = v^2 + \omega^2 R^2 + 2v\omega R\cos(\omega t) \quad (4)$$

$$\text{则} \quad V_a = \sqrt{v^2 + \omega^2 R^2 + 2v\omega R\cos(\omega t)} \quad (5)$$

式中 V_x ——齿尖点 a 在 X 方向速度, m/s
 V_y ——齿尖点 a 在 Y 方向速度, m/s
 V_a ——齿尖点 a 绝对速度, m/s

由于圆锯片在锯切沙柳时受力较为复杂,为方便分析,简化圆锯片锯切工作情况,设定一齿尖点 a 位移至 a'' 时开始锯切单根沙柳,如图 3b 所示。

在图 3b 中, V' 为锯片锯切转速, V'' 为锯片进给速度 ($V'' = V_x$)。锯片切削力 F 可以分解为轴向力 F_a 、径向力 F_n 以及锯切力 F_t , 其中, 轴向力 F_a 主要由加工误差、安装误差以及倾斜沙柳对锯片挤压和冲击所产生, 其轴向力方向是沿着锯切主轴和垂直于锯片表面; 径向力 F_n 主要由沙柳对锯片冲击和沙柳弯曲变形对锯片的反作用力产生; 锯切力 F_t 主要由沙柳对锯片锯切过程中的反作用力所产生。可以看出, 通过圆锯片切割沙柳茎秆时, 轴向力、径向力以及锯切力是影响其锯切阻力的主要因素, 且沿着

圆锯片切面平面为主要受力平面,锯切力方向与锯片齿线速度平行且方向相反。

在理想条件下,锯片切割沙柳单个茎杆只产生径向力 F_n 以及锯切力 F_t ,若将沙柳茎杆截面取近似为圆形,则其径向力 F_n 以及锯切力 F_t 计算式为^[21]

$$F_n = \frac{\pi \sigma D^3}{8W} \tag{6}$$

$$F_t = \tau \frac{S}{\sin \theta} \tag{7}$$

式中 τ ——抗剪强度,MPa
 S ——切割面积,m²
 θ ——切割角,(°)
 σ ——抗弯强度,MPa
 W ——弯曲跨度,mm
 D ——茎杆直径,mm

锯片在锯切过程中,锯齿刃口须先切断沙柳茎杆纤维,锯齿进给量直接影响沙柳茎杆切削面积,每齿进给量表征锯片单个齿切割面积,切削量过大,则导致沙柳茎杆被锯片压倒、不能完全切断、断面不平整等现象,切削量太小则会降低工作效率^[22]。由于沙柳茎杆直径较小,因此可将锯片切割沙柳时的切割面积简化为锯片切削厚度和切削宽度乘积,其中,每个锯齿切削厚度可近似等于每齿进给量,切削宽度可近似等于锯切沙柳茎杆形成的轨迹弦长^[23],如图 4 所示。

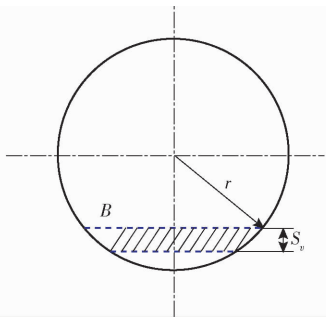


图 4 圆锯片每齿切割面积示意图

Fig. 4 Diagram of cutting area of one sawtooth

则锯片切割沙柳切割面积为

$$S \approx S_v B \tag{8}$$

其中 $B = 2 \sqrt{r^2 - (r - S_v k_i)^2}$ (9)

$$S_v = \frac{S_n}{Z} = \frac{60V''}{ZV'} \tag{10}$$

式中 S_v ——锯齿每齿进给量,m
 B ——锯切沙柳茎杆形成的轨迹弦长,m
 r ——沙柳茎杆半径,m
 k_i ——开始切割后锯齿数量
 S_n ——锯片每转进给量,m
 Z ——锯片锯齿数

由式(6)~(10)可知,锯片每齿进给量与进给速度成正比,与锯切转速和齿数成反比。锯片切割沙柳锯切力受锯切转速、进给速度和齿数直接影响。

将径向力 F_n 与锯切力 F_t 的合力 F_{xy} 等效分解为沿进给方向的力 F_x 和垂直水平方向的力 F_y 来分析, F_a 等价于 F_z ,根据空间力学关系可得,单齿尖 a 锯切单根沙柳的锯切合力 F_T 计算式为

$$F_T = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \tag{11}$$

式中 F_z ——轴向力,N

锯片锯切单根沙柳茎杆扭矩 T 计算式为

$$T = F_T R \tag{12}$$

则锯片锯切单根沙柳茎杆所消耗的功率 P 计算式为

$$P = \frac{TV'}{9\,550} = \frac{F_T RV'}{9\,550} \tag{13}$$

可以看出,影响锯切功率消耗的主要因素为锯切合力和锯切转速,通过优化工作参数,得出最佳锯切参数组合,可降低锯切功耗。

2.2 切割装置结构设计

切割装置作用是将沙柳割断,是沙柳平茬收割机核心部件。所设计的切割装置主要由割台、液压马达、锯片、锯盘和刀片组成,如图 5 所示。两个液压马达和刀片通过螺栓固结在割台上,液压马达直接驱动锯片实现切割平茬,两个锯盘通过液压马达的轴与之相连,两个锯片通过螺栓与锯盘固结。为了避免平茬过程中割倒的沙柳堵塞割台,影响平茬作业,采用向外旋转方式。

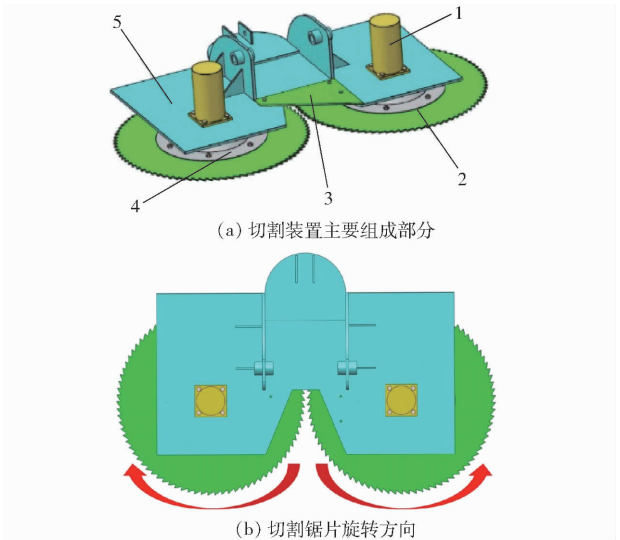


图 5 切割装置主要结构示意图

Fig. 5 Structure of cutting device

1. 液压马达 2. 锯片 3. 刀片 4. 锯盘 5. 割台

为实现良好的切割仿形作业效果,增加吊盘和液压油缸,如图 6 所示。吊盘通过螺栓与割台连接,

液压油缸两端分别与第 1 吊盘和割台连接,通过控制液压油缸的伸缩,可实现切割仿形。仿形机构转动角由沙柳丛地形决定,由于沙柳具有防风固沙功能,多年后根部会形成一个 1.5 m 左右的半球形沙包^[24],其倾角为 30°~50°不等,故仿形机构转动角应大于等于 30°。

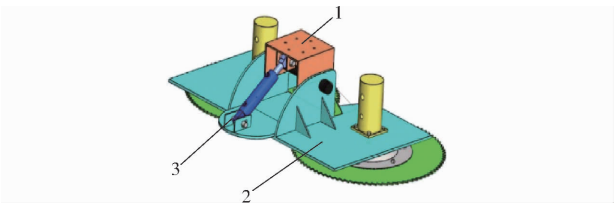


图 6 切割仿形机构结构图

Fig. 6 Structure of cutting profiling device

1. 第 1 吊盘 2. 割台 3. 液压油缸

锯盘设计采用梯形设计,其直径为 400 mm,坡度为 30°,平面阵列 6 个 $\phi 8$ 的孔,通过螺栓固定锯片。锯片直径及切割幅度,根据沙柳丛实际形态来确定,结合圆盘式切割器结构特点,计算式为

$$L \geq \frac{L_1}{2} \tag{14}$$

$$L' = 2L + b \tag{15}$$

式中 L ——锯片直径, m
 L_1 ——切割平面内单丛沙柳最大宽度, m
 L' ——割幅宽度, m b ——锯片间距, m

锯盘结构示意图及切割装置关键参数简图如图 7 所示。

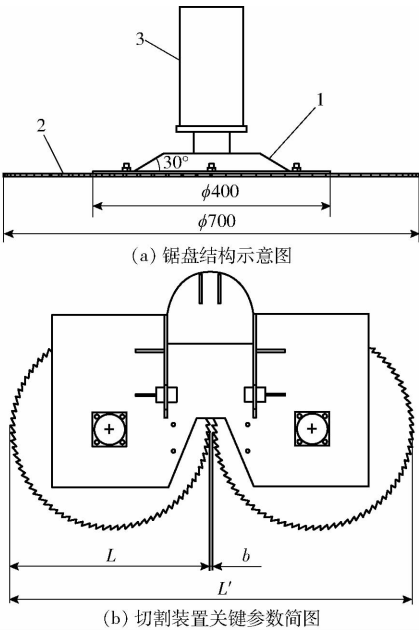


图 7 锯盘结构示意图及切割装置关键参数简图

Fig. 7 Schematics of saw disk structure and sketch of key parameter marking of cutting device

1. 锯盘 2. 锯片 3. 液压马达

通过实地调研沙柳丛形态,测得切割平面内单

丛沙柳最大宽度约为 1.4 m,代入式(14),确定取锯盘直径 L 为 0.7 m;锯片间距设计太小会发生两锯片碰撞现象,若间距过大,又会造成漏割,故结合实际锯片间距 b 为 0.01 m;将相关数据代入式(15),可以确定割幅宽度 L' 为 1.41 m。

2.3 切割作业参数设计

为进一步确定切割装置的适宜作业参数,设计并进行了正交试验。结合现有研究情况以及沙生灌木的切割机理,选择锯片齿数、进给速度和锯切转速为试验因素,锯切合力和锯切功率为锯切性能评价指标。

2.3.1 试验材料与仪器

试验选取鄂尔多斯市杭锦旗地区的沙柳,多为 3~5 年生,含水率为 20% 左右,沙柳试样直径为 40 mm。

使用锯切试验装置^[25]进行试验,该试验装置采用伺服电机模拟沙柳平茬收割机切割装置在平茬过程中的锯切速度以及进给速度,通过调节锯切伺服电机(ECMA-EA830RS 型,额定转速 2 000 r/min)转速和进给伺服电机(MHMF082L1U2M 型,额定转速 3 000 r/min)转速,获得不同的锯片速度和进给速度。试验所用的锯片直径为 400 mm,材质为 65Mn 钢。在锯切伺服电机与锯片之间安装扭矩转速测量仪(JN338100A 型),并利用数据采集系统实时记录沙柳切割作业过程中的转速与扭矩数据。锯切试验台及数据采集界面如图 8 所示。

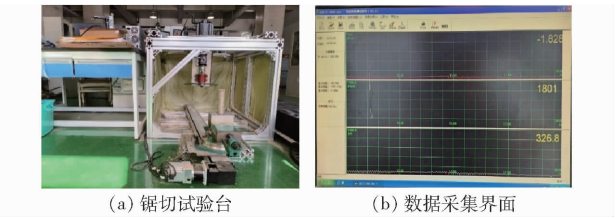


图 8 沙柳锯切试验台及数据采集界面

Fig. 8 Sandy willow shrub cutting device and data acquisition interface

2.3.2 正交试验设计及结果分析

为研究锯片齿数、进给速度、锯切转速对锯切力、锯切功率的影响,进行三水平三因素的正交试验。通过上述扭矩转速传感器所记录的数据,可以根据式(11)~(13)计算出试验过程中锯切合力及锯切功率。

结合文献[26-27]和实际作业工作场景,考虑试验条件和人员安全,设置正交试验因素如表 2 所示。

采用 Box-Benhnken 中心组合试验方法,根据沙柳正交试验方案进行试验,得到锯切合力和锯切功率结果,如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码。

用 Design-Expert 13 软件进行数据分析处理,将各因素对锯切合力和锯切功率的影响进行二项式方

表 2 正交试验因素编码

Tab.2 Code of orthogonal test factors			
编码	因素		
	锯片	进给速度 $V''/$	锯切转速 $V'/$
	齿数 Z	($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
-1	80	5	1 400
0	100	10	1 600
1	120	15	1 800

表 3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal test results					
序号	因素			锯切合力 F_T/N	锯切功率 P/kW
	锯片	进给速度	锯切转速		
	齿数 X_1	X_2	X_3		
1	1	0	-1	11.70	0.343
2	0	0	0	11.95	0.400
3	0	0	0	11.75	0.394
4	-1	-1	0	11.70	0.392
5	1	0	1	12.65	0.477
6	0	1	-1	12.15	0.356
7	-1	0	1	12.00	0.452
8	0	0	0	11.85	0.397
9	1	1	0	12.10	0.405
10	0	1	1	12.45	0.469
11	1	-1	0	12.30	0.412
12	-1	0	-1	11.95	0.350
13	0	0	0	11.90	0.399
14	0	0	0	12.00	0.402
15	0	-1	-1	12.15	0.356
16	0	-1	1	12.40	0.468
17	-1	1	0	12.05	0.403

程拟合,得到二次多项式回归方程分别为

$$F_T=11.89+0.131\,3X_1+0.025X_2+0.193\,8X_3-0.137\,5X_1X_2+0.225X_1X_3+0.012\,5X_2X_3-0.032\,5X_1^2+0.18X_2^2+0.217\,5X_3^2$$

(16)

$$P=0.398\,4+0.005X_1+0.000\,6X_2+0.057\,6X_3-0.004\,5X_1X_2+0.008X_1X_3+0.000\,2X_2X_3-0.001\,1X_1^2+0.005\,7X_2^2+0.008\,2X_3^2$$

(17)

对模型进行方差分析,结果如表 4、5 所示。由表 4、5 可知, X_1 、 X_3 、交互项 X_1X_3 以及二次项 X_2^2 和 X_3^2 对锯切合力和锯切功率的影响均为极显著($P<0.01$),交互项 X_1X_2 对锯切合力和锯切功率的影响均为显著($0.01\leq P<0.05$),其余均不显著($P>0.05$)。3 个因素对锯切合力和锯切功率影响由大到小为:锯切转速、锯片齿数、进给速度。

由表 4、5 可看出,沙柳锯切合力和锯切功率二次多项式模型的 P 均小于 0.01,表明回归模型极其

表 4 沙柳锯切力二次多项式模型方差分析

Tab.4 Analysis of variance of quadratic polynomial model of sawing force					
方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.08	9	0.119 6	11.73	0.001 9 **
X_1	0.137 8	1	0.137 8	13.52	0.007 9 **
X_2	0.005 0	1	0.005 0	0.490 4	0.506 4
X_3	0.300 3	1	0.300 3	29.45	0.001 0 **
X_1X_2	0.075 6	1	0.075 6	7.42	0.029 6 *
X_1X_3	0.202 5	1	0.202 5	19.86	0.002 9 **
X_2X_3	0.000 6	1	0.000 6	0.061 3	0.811 6
X_1^2	0.004 4	1	0.004 4	0.436 2	0.530 1
X_2^2	0.136 4	1	0.136 4	13.38	0.008 1 **
X_3^2	0.199 2	1	0.199 2	19.53	0.003 1 **
残差	0.071 4	7	0.010 2		
失拟项	0.034 4	3	0.011 5	1.24	0.405 9
误差项	0.037 0	4	0.009 2		
总和	1.15	16			

注:*表示显著($0.01\leq P<0.05$),**表示极显著($P<0.01$),下同。

表 5 沙柳锯切功率二次多项式模型方差分析

Tab.5 Analysis of variance of quadratic polynomial model of sawing power					
方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.027 5	9	0.003 1	386.36	<0.000 1 **
X_1	0.000 2	1	0.000 2	25.25	0.001 5 **
X_2	3.125×10^{-6}	1	3.125×10^{-6}	0.394 5	0.549 9
X_3	0.026 6	1	0.026 6	3 353.58	<0.000 1 **
X_1X_2	0.000 1	1	0.000 1	10.23	0.015 1 *
X_1X_3	0.000 3	1	0.000 3	32.32	0.000 7 **
X_2X_3	2.500×10^{-7}	1	2.500×10^{-7}	0.031 6	0.864 0
X_1^2	4.866×10^{-6}	1	4.866×10^{-6}	0.614 3	0.458 9
X_2^2	0.000 1	1	0.000 1	17.12	0.004 4 **
X_3^2	0.000 3	1	0.000 3	35.52	0.000 6 **
残差	0.000 1	7	7.921×10^{-6}		
失拟项	<0.000 1	3	6.083×10^{-6}	0.654 1	0.621 2
误差项	<0.000 1	4	9.300×10^{-6}		
总和	0.027 6	16			

显著。两个模型失拟项 P 均大于 0.05,说明模型失拟性不显著,回归模型拟合程度高。因此,两个模型可以较好地反映锯切过程中各因素与响应值的关系并预测最佳切割作业参数。

2.3.3 响应面分析

根据以上回归模型,采用 Design-Expert 13 软件,绘制响应面和等高线图,如图 9、10 所示,分析各因素交互作用对锯切合力和锯切功率的影响,同时确定最优参数组合。

从图 9、10 可看出,3 个因素对锯切合力和锯切功率均有影响,其中锯片齿数和锯切转速、锯片齿数和锯片进给速度的交互作用存在显著影响。从获得

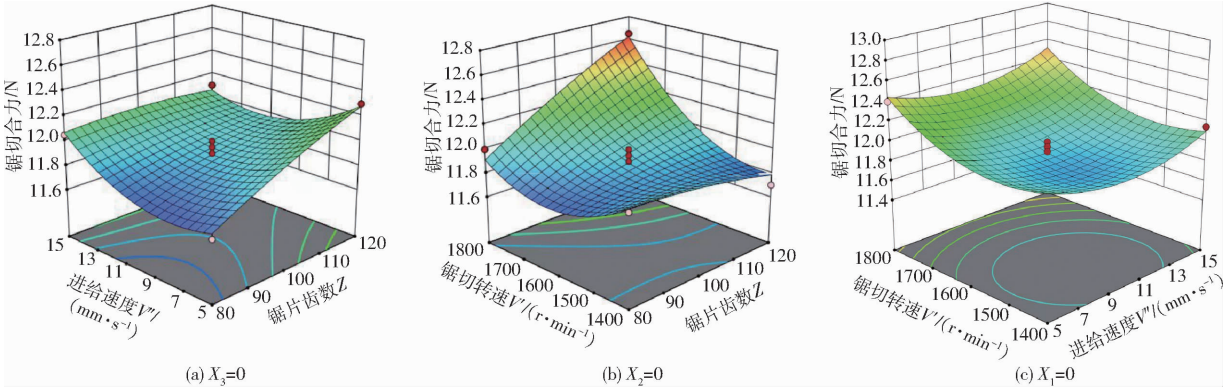


图9 因素交互作用对锯切合力影响的响面曲面
Fig. 9 Impact diagrams of factor interaction on sawing force

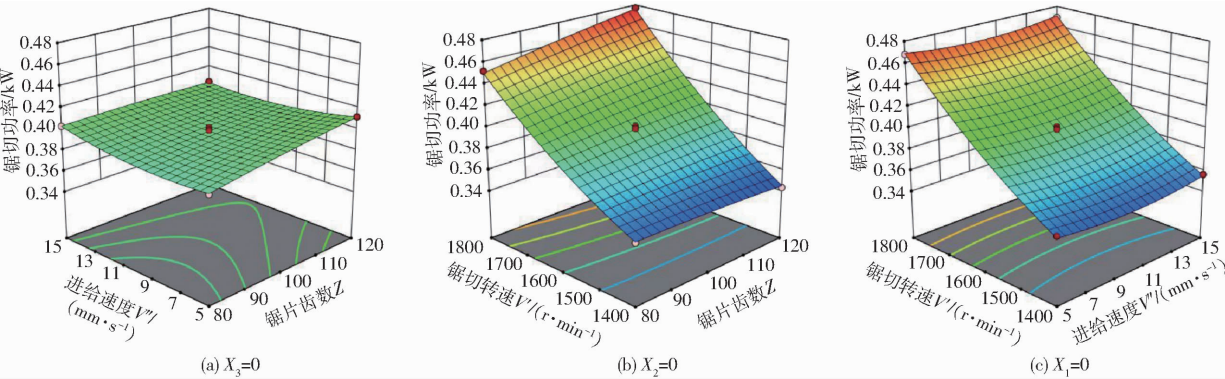


图10 因素交互作用对锯切功率影响的响应曲面
Fig. 10 Response diagrams of influence of factor interaction on sawing power

最小锯切合力来看,最优参数组合有2组,分别为:锯片齿数80、进给速度5 mm/s、锯切转速1 600 r/min,锯片齿数120、进给速度10 mm/s、锯切转速1 400 r/min。从获得最小锯切功率的角度来看,最优参数组合为:锯片齿数120、进给速度10 mm/s、锯切转速1 400 r/min。

3 田间试验

为进一步验证设计方案的可行性,对样机进行了试制加工,如图11a所示。同时为进一步检测样机的主要性能以及各技术参数是否达标,并对整机的可靠性进行验证,通过拖拉机挂接样机进行了沙柳平茬收割试验,如图11b所示。试验地点位于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗沙区坡地,试验对象为3~5年生沙柳。

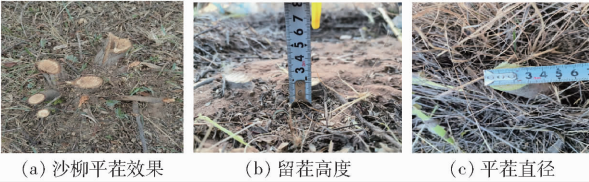
参考文献[28-31],选择破茬率、漏割率、重割率和茬高合格率作为沙柳平茬质量和样机作业性能的评价指标,试验选取沙柳丛20株,沙柳直径为30~50 mm,株高500~3 000 mm,作业后,随机标定3处沙柳丛,并计算平茬切割作业后沙柳破茬率、漏割率、重割率以及茬高合格率。

作业后沙柳平茬效果如图12所示。可以看出,平茬作业后沙柳的地上留茬高度为3 cm左右,平茬



(a) 沙柳平茬收割机 (b) 作业现场

图11 沙柳平茬收割机
Fig. 11 Salix harvester



(a) 沙柳平茬效果 (b) 留茬高度 (c) 平茬直径

图12 沙柳平茬作业效果
Fig. 12 Results of salix harvesting

沙柳直径为30 mm左右,作业后沙柳切面较为平整。所设计的多自由度沙柳平茬收割机能够较好地适应沙区复杂地形,沙柳平茬作业破茬率、漏割率、重割率和茬高合格率分别为 $(4.02 \pm 0.33)\%$ 、 $(4.19 \pm 0.35)\%$ 、0、 $(94.33 \pm 2.08)\%$,平均值分别为4.02%、4.19%、0和94.33%,符合沙柳平茬生产作业技术要求。

4 结论

(1) 设计了多自由度沙柳平茬收割机和相向外旋式双锯片切割装置, 机具主要包括机架、行走机构、切割装置、伸缩装置和旋转装置等, 由液压系统驱动, 实现了复杂沙地地形下、零散分布状态下沙柳平茬收割作业。

(2) 沙柳切割过程空间受力复杂, 锯切转速、进给速度和锯片齿数对锯片切割沙柳茎秆时的锯切合力有直接影响, 也是影响锯切功耗的关键

因素。

(3) 锯片齿数和锯片转速是影响锯切合力和锯切功率的显著因素, 锯片齿数和锯片进给速度交互作用也存在显著影响。切割装置最优作业参数组合为锯片齿数 120、进给速度 10 mm/s、锯切转速 1 400 r/min。

(4) 田间试验结果表明, 沙柳平茬作业平均破茬率、漏割率、重割率和茬高合格率分别为 4.02%、4.19%、0 和 94.33%, 满足沙柳机械化平茬生产作业的技术要求。

参 考 文 献

[1] 国家林业和草原局政府网.《第六次全国荒漠化和沙化调查结果》[EB/OL]. (2022-12-30)[2024-05-06]. <https://www.forestry.gov.cn/main/5906/20221230/201705747872944.html>.

[2] 肖克,陈飞卫,单继程,等.新恩陶铁路沙柳沙障防风固沙效益研究[J].林业实用技术,2014(1):9-12.
XIAO Ke, CHEN Feiwei, SHAN Jicheng, et al. Study on wind prevention and sand fixing benefit of sand willow barrier in Xinentao Railway[J]. Practical Forestry Technology, 2014(1):9-12. (in Chinese)

[3] 路东晔,张国盛,张磊,等.北沙柳研究进展[J].分子植物育种,2020,18(10):3427-3432.
LU Dongye, ZHANG Guosheng, ZHANG Lei, et al. Research progress of salix boreal[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 18(10):3427-3432. (in Chinese)

[4] 国家林业和草原局政府网.关于印发《全国防沙治沙规划(2021—2030年)》的通知[EB/OL]. (2023-09-07)[2024-01-06]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/521554.jhtml>.

[5] PECENKA R, HOFFMANN T. Harvest technology for short rotation coppices and costs of harvest, transport and storage[J]. Agronomy Research, 2015, 13(2):361-371.

[6] VERWIJST T, LUNDKVIST A, EDELFELDT S, et al. Development of sustainable willow short rotation forestry in northern Europe[J]. Biomass Now-sustainable Growth and Use, 2013(20):634.

[7] VOLK T A, EISENBIES M H, HALLEN K. The development of harvesting systems in woody biomass supply chains: a case study of short rotation woody crops[M]. Woodhead Publishing, 2024: 43-63.

[8] SCHWEIER J, BECKER G. New Holland forage harvester's productivity in short rotation coppice: evaluation of field studies from a German perspective[J]. International Journal of Forest Engineering, 2012, 23(2):82-88.

[9] HSAB. HSAB fully hydraulic head on John Deere[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://salixab.se/machines/>.

[10] VANBEVEREN S P P, SPINELLI R, EISENBIES M, et al. Mechanized harvesting of short-rotation coppices[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76:90-104.

[11] LAZDINS A, MAKOVSKIS K, ZIMELIS A, et al. Productivity of new harvester prototype in willow plantations with different growing stock[C]//22nd International Scientific Conference, Engineering for Rural Development, 2023.

[12] HOFFMANN T, EHLERT D, PECENKA R, et al. An efficient harvest line for short rotation coppices with a new mower-chipper[J]. Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources, 2015, 61(3):3-5

[13] Baecut. Der Stembundler[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://www.baecut.de/produkte/stembundler/>.

[14] 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, TE Binguribu, 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)

[15] 五征高北.4QZ-30 自走式青饲料收获机[EB/OL]. [2024-05-06]. <https://nyzb.wuzheng.com.cn/webProduction/showDetail?id=4028e58b7a752074017ce4832a630056>.

[16] 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司.饲草饲料收获装备[EB/OL]. [2024-05-06]. http://www.caamshb.org.cn/qyry_56/.

[17] 刘志刚,王德成,翟改霞,等.往复式双动刀灌木收割机设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):102-106.
LIU Zhigang, WANG Decheng, ZHAI Gaixia, et al. Design and experiment on reciprocating double knife shrub harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.2):102-106. (in Chinese)

[18] 刘志刚,王德成,翟改霞,等.自走式沙柳平茬机参数设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):107-110.
LIU Zhigang, WANG Decheng, ZHAI Gaixia, et al. Parameters design and experiment on self-propelled Salix psammophila stumping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.2):107-110. (in Chinese)

[19] 惠云婷,张国锐,马海明,等. 自走式青饲料收获机仿形系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊2):1-9.
HUI Yunting, ZHANG Guorui, MA Haiming, et al. Header profiling system of self-propelled green fodder harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp.2):1-9. (in Chinese)

[20] 赵雄,曹功豪,张鹏飞,等. 三自由度苹果采摘机械臂动力学分析与轻量化设计[J]. 农业机械学报,2023,54(7):88-98.
ZHAO Xiong, CAO Gonghao, ZHANG Pengfei, et al. Dynamic analysis and lightweight design of 3-DOF apple picking manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):88-98. (in Chinese)

[21] 陈燕,蔡伟亮,向和平,等. 面向机器人采摘的荔枝果梗力学特性[J]. 农业工程学报,2012,28(21):53-58.
CHEN Yan, CAI Weiliang, XIANG Heping, et al. Mechanical properties of litchi stem for harvesting robots[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 53-58. (in Chinese)

[22] 赵润茂,王红军,唐之富,等. 荔枝收获切割器果梗锯切功耗影响因素试验[J]. 农业工程学报,2016,32(9):16-21.
ZHAO Runmao, WANG Hongjun, TANG Zhifu, et al. Experiment on influencing factors of power consumption for sawing stem in cutting device of litchi harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 16-21. (in Chinese)

[23] 常涛涛. 基于磨损量预测的平茬圆锯片齿形结构优化设计[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2023.
CHANG Taotao. Optimal design of tooth profile structure of flat stubble circular saw blade based on wear prediction[D]. Hohhot:Inner Mongolia University of Technology,2023. (in Chinese)

[24] 刘志刚. 典型沙生灌木平茬技术与机具研究[D]. 北京:中国农业大学,2013.
LIU Zhigang. Study on typical sandy shrub stumping technology and equipment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[25] 马中祥. 沙生灌木圆盘锯切试验台的设计与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2021.
MA Zhongxiang. Design and experimental study of a disc sawing test bench for sandy shrubs[D]. Hohhot:Inner Mongolia University of Technology,2021. (in Chinese)

[26] 刘金南. 灌木平茬机的设计及试验研究[D]. 南京:南京林业大学,2014.
LIU Jinnan. Design and experimental study of the shrub stumping machine[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014. (in Chinese)

[27] 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院. 多功能自走式灌木平茬收割机:JB/T 11917—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[28] 榆林市林业工作站,榆林市榆阳区林业和种苗工作站. 沙柳灌木林平茬复壮技术规程:DB 6108/T49—2023[S]. 榆林:榆林市市场监督管理局,2023.

[29] 陈叶叶. 小型履带式灌木平茬机的设计与研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2019.
CHEN Yeye. Design and study of small crawler shrub stumping machine[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2019. (in Chinese)

[30] 任子超. 沙棘收获机剪切装置设计与试验研究[D]. 石河子:石河子大学,2023.
REN Zichao. Design and experimental research on the shearing device of seabuckthorn harvester[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. (in Chinese)

[31] 内蒙古自治区林业科学研究院,内蒙古农业大学,内蒙古黄河生态研究院,等. 主要树种人工灌木林平茬复壮技术规程:DB 15/T557—2024[S]. 呼和浩特:内蒙古自治区市场监督管理局,2024.