

履带式林间草带收割机设计与试验

祝露¹ 王德成¹ 尤泳¹ 邬备² 马文鹏¹ 郇晓龙¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410323)

摘要: 林下种草是近年来人工林普遍采用的林下经济模式。针对林草种植模式中因林木间距小、植被茂盛、地表不平、视野受限而带来的牧草收获困难等问题,设计了一款履带式林间草带收割机,该机主要特点是幅宽小、转弯灵活,适合林间牧草收获作业和硬杂草、稀疏灌木的切割作业。根据实地调研提出基于林间作业环境的割草机设计要求,通过对割草机行走系统、切割系统进行分析计算,确定了履带、圆盘式切割器的主要结构参数,分析了圆盘式切割器的运动轨迹和牧草被割断后的运动状态,并采用力学计算和仿真模拟的方式计算了机架的受力情况。试制样机,并进行了林间牧草收获试验,结果表明,收割机的平均作业速度为 0.42 m/s,割茬高度 7.6 cm,割幅利用系数为 0.94。说明所设计的履带式林间草带收割机能够适应人工林作业环境,满足林间牧草收获作业要求。

关键词: 林间草带收割机; 履带式; 圆盘式切割器

中图分类号: S225.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0126-08 OSID: 

Design and Experiment of Crawler-type Grass Belt Harvester in Forest

ZHU Lu¹ WANG Decheng¹ YOU Yong¹ WU Bei² MA Wenpeng¹ HUAN Xiaolong¹

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

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410323, China)

Abstract: Planting grass under forest is an under-forest economic model commonly used in plantations in recent years. In the forest and grass planting model, it is difficult to harvest forages and labor intensity caused by narrow tree spacing, lush vegetation, uneven ground, and limited visibility. A crawler-type forest grass belt harvester was developed. Its main features were small width, flexible turning, strong ground surface adaptability and low ground pressure. It was suitable for harvesting forest grass and cutting hard weeds and sparse shrubs. Through literature analysis and field investigation, four design requirements based on the working environment in the forest was put forward, so as to analyze the walking system, cutting system and supporting frame of the harvester. The specific ground pressure of the harvester was calculated, the cutting trajectory of the cutter and the motion state of the forage after being cut was analyzed, and the force state and deformation of the frame under special working conditions was analyzed through a combination of theoretical calculation and simulation analysis. And the dangerous section of the frame was found and the structure of the frame was strengthened to ensure the safety and reliability of the harvester. According to the standard arrangement test of the forage harvester, the operating speed of the harvester was 0.42 m/s, the cutting height was 7.6 cm, and the cutting width utilization factor was 0.94. The results show that the crawler-type inter-forest grass belt harvester can adapt to the operating environment under the artificial forest, and it can be used for forage harvesting in the small-distance forest and grass planting mode, which can reduce the labor intensity of artificially harvesting forage.

Key words: grass belt harvester in forest; crawler-type; disc cutter

收稿日期: 2020-07-20 修回日期: 2020-08-20

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-34)

作者简介: 祝露(1995—),男,博士生,主要从事牧草收获机械研究,E-mail: zhulu365@126.com

通信作者: 王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事牧草机械化研究,E-mail: wdc@cau.edu.cn

0 引言

近年来,各地区大力发展以林下种植、林下养殖、相关产品采集加工和森林景观利用等为主要形式的林下经济,其中,林草种植模式是依托森林、林地及其生态环境,在林内或林地边缘开展饲草或绿肥植物等种植或利用的复合经营模式。发展林草种植模式能保护生态环境,避免在发展经济过程中产生单一的植物群落,有利于改善林地小气候、提高土壤理化性质,有助于林木生长^[1-3]。例如杨树-紫花苜蓿的林草复合系统能更充分利用资源,获得较高的组合产量和土地利用效率。林间种草是能同时产生生态效益与经济效益的一种发展模式,值得研究和推广。

林草模式中的饲草或杂草需要适时刈割,否则一方面会影响牧草的质量和产量^[4],另一方面,未被刈割的植被在秋冬季节燃点很低,极易引发森林火灾,刈割清理林间牧草或杂草是一种有效的森林防火手段^[5]。即使是单一模式的人工林,秋冬季节前收割林间杂草植被也很有必要。但是,人工收割林间牧草杂草劳动强度大、效率低。因此,研制一款适用于林间的牧草收获机具有重要意义。

针对平原大地块牧草种植区,我国引进和研制了多种大幅宽、高效率的收割机,但仍存在性能不稳定和可靠性差等问题^[6-8]。已有收割机适用于优质天然打草场和大地块的人工草场,但无法满足林间牧草收获的技术要求。邬备等^[9-10]根据我国苜蓿种植特点研制了9GYZ-1.2型苜蓿刈割压扁机,该机能适应丘陵山区作业,为自走式牧草收获机械的研制积累了经验。但林间割草作业环境更为复杂,其可靠性与安全性还需要进行试验验证。人工林作业间距狭小、土壤坚实度差异大,除饲草之外还有一些硬质杂草,切割难度较大,本文根据实地调研提出林间草带收割机的设计要求,并据此设计一款针对林下牧草的自走式林间饲草收割机。

1 整机结构与技术要求

1.1 林间割草作业特点与技术要求

通过文献分析以及对人工林情况的实地调研,得到林草种植模式中林间割草作业环境特点及技术要求如下:

(1)我国林草发展模式中的林木种类繁多,林下可种植的牧草有菊苣、苜蓿、鸭茅、黑麦草等,其中紫花苜蓿是应用较广的一种牧草品种^[11-12]。林草模式中的行距株距并不统一,同一类型的林木株距行距也会因地区不同存在差异^[13],如北京苹果林株

行距3 m×4 m,陕西幼龄苹果树株行距2 m×4 m。对于行距为2 m的小行距林木品种,需要有较为灵活的自走式牧草收割机来完成林间牧草与杂草的收割。本文设计的收割机主要是为了适应小株距的林草种植模式,在此条件下收割机的幅宽应小于2 m。履带式林间草带收割机的作业情况如图1所示。

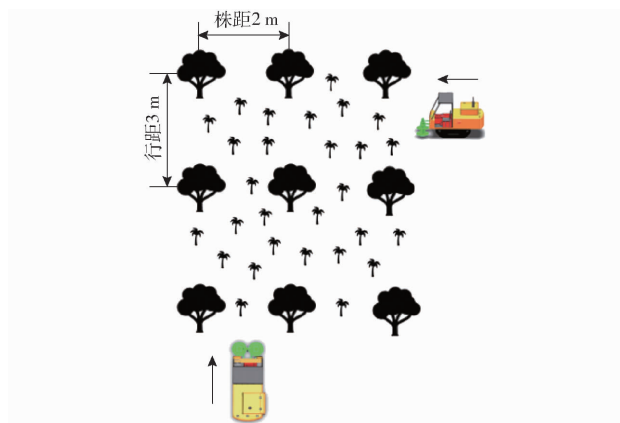


图1 小株距人工林间牧草收获示意图

Fig.1 Illustration of forage harvest in small-belt planted forest

(2)人工林间植被类型较为丰富,除了种植的饲草外还有杂草或稀疏灌木,这对收割机的切割器形式与参数要求较高。对于旋转式切割器,割刀线速度应满足旋转式切割器的设计要求,大小在60~90 m/s之间^[14]。

(3)相对于农田和人工草地,人工林间的地面平整性更差,土壤坚实度差异大,收割机行走系统应具备良好的接地性及转弯性能^[15-16]。

(4)对于林间草带收割机,需要一套灵敏的起落机构,遇到石块或树桩等障碍物前在1~2 s内将切割器提到一定高度^[14],在林区工作的收割机,分割器提升高度应大于40 cm,保证收割机在林区具备良好的通过性。

1.2 整机结构

履带式林间草带收割机由动力装置、机架、履带底盘、前置式双圆盘切割器、齿轮箱、液压系统及操纵系统等组成,基本结构如图2所示。

整机有高速、低速、倒挡3个挡位,作业幅宽1.5 m,转弯半径0.4 m,在遇到障碍物时能在1.5 s内将切割器向上提升40 cm,在狭窄的环境中具备良好的通过性。

在割草作业时,圆盘式切割器高速旋转,带动割刀以较大的线速度无支撑切割牧草。相较于往复式切割器,旋转式切割器对于生长茂密的牧草及硬质杂草具有更好的适应性,一般不会发生缠草现象。

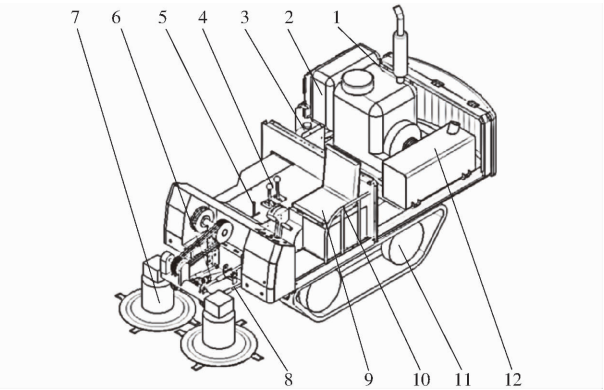


图2 履带式林间草带收割机结构示意图
Fig.2 Internal structure diagram of crawler-type
grass belt harvester in forest

1. 发动机 2. 水箱 3. 液压油箱 4. 挡位操纵杆 5. 液压控制
阀 6. 液压缸 7. 圆盘式切割器 8. 割台支撑杆 9. 座椅
10. 扶手 11. 履带 12. 油箱

2 关键部件设计

2.1 行走系统计算与分析

在人工林区,土壤坚实度差异较大^[17],当地面质地松软时,接地比压是衡量机具通过性能的重要指标。接地比压过大时,行走系统容易沉陷在土壤里,不仅影响效率,还可能使机具发生前后倾斜,使切割器接触地面,影响割草效果。故选择接地比压小的行走系统,能减小对土壤的压实,更适应人工林的作业环境^[18-21]。履带式主要特点是接地比压小,爬坡能力强。

假设收割机的重心位置与几何中心相重合,履带接地压力呈均匀分布状态,则接地压力的表达式为

$$p_b = \frac{G}{2BL} \tag{1}$$

- 式中 p_b ——履带平均接地压力,Pa
 B ——履带接地宽度,m
 L ——履带接地长度,m
 G ——收割机整机重力,N

履带与地面摩擦力时刻与履带的运动速度相反,在转向运动的每一个瞬间,履带上各点的摩擦力方向始终垂直于该点到转向轴的连线,大小与该点在竖直方向的载荷成正比,向右转向时受力示意图如图3所示。则收割机在转弯时左右两侧履带上受到的阻力矩分别为

$$M_1 = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \mu \frac{G}{2L} \sqrt{b^2 + l^2} dl \tag{2}$$

$$M_2 = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \mu \frac{G}{2L} l dl \tag{3}$$

- 式中 M_1 ——左侧履带所受阻矩,N·m

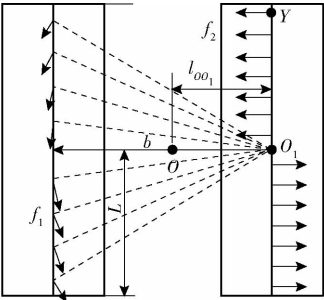


图3 履带向右转向受力图
Fig.3 Track turns to right

- M_2 ——右侧履带所受阻矩,N·m
 μ ——履带与地面的动摩擦因数
 l ——两侧履带上点到中心线 OO_1 的距离,m
 b ——左侧履带中轴线到点 O_1 的距离,m

履带底盘的驱动力位于左侧履带的最前端,收割机缓慢转弯的过程中,驱动力产生的力矩应当和摩擦阻力矩大致相等,即

$$M_0 = M_1 + M_2 \tag{4}$$

式中 M_0 ——履带向右转向时驱动力矩,N·m

本文基于小幅宽、小转弯半径、低功耗的设计原则选用履带的参数,履带接地长度1 m,履带宽度0.35 m,左右两侧履带的中心距为0.75 m,在此条件下,履带接地比压为8.47 kPa,转弯半径0.4 m,履带总宽度1.1 m。

2.2 切割系统结构分析

圆盘式切割器是整个收割机的核心部件,也是决定收割机切割效果的关键^[22],其结构如图4所示。

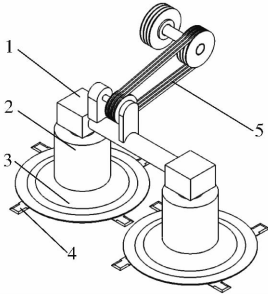


图4 圆盘式切割器结构简图

Fig.4 Structure diagram of disc cutter

1. 锥齿轮箱 2. 滚筒 3. 圆盘 4. 矩形割刀 5. 传动带

旋转式切割器为圆盘式结构,主要由锥齿轮箱、滚筒、圆盘、割刀等构成,高度可以调节。切割器通过支撑连杆及液压缸固接在收割机的前方,方便拆卸维修,其动力输入来自带轮,当圆盘与凸起的地面接触使载荷过大时,传动带即在轮上打滑,可防止啮合齿轮与动力系统受到损坏。

圆盘直径为630 mm,采用矩形光刃刀片,刃角为15°,切割器的幅宽为150 cm,左边圆盘与右边圆

盘旋转方向相反,都朝向内侧,割刀线速度的计算公式为

$$v_l = \frac{n\pi D}{60} \tag{5}$$

式中 v_l ——切割器割刀线速度, m/s
 n ——旋转式切割器的额定转速, r/min
 D ——圆盘直径, m

计算出当圆盘以额定角速度旋转时,切割线速度为 72.6 m/s,满足旋转式切割器的线速度要求^[14]。

以切割器的右圆盘为例,当圆盘带动割刀割草作业时,切割区域即为刀刃扫过的区域^[23]。

对于刀片 1,其刀刃上 a 、 b 两点的运动方程为

$$\begin{cases} x_a = r_a \cos(\omega t + \theta_a) \\ y_a = vt + r_a \sin(\omega t + \theta_a) \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} x_b = r_b \cos(\omega t + \theta_b) \\ y_b = vt + r_b \sin(\omega t + \theta_b) \end{cases} \tag{7}$$

式中 x_a 、 x_b ——刀片 1 内外端点在横坐标轴上的值, mm

y_a 、 y_b ——刀片 1 内外端点在纵坐标轴上的值, mm

r_a ——刀片 1 刀刃内端点旋转半径, mm
 r_b ——刀片 1 刀刃外端点旋转半径, mm
 θ_a ——内端点与盘心连线与 x 轴夹角, rad
 θ_b ——外端点与盘心连线与 x 轴夹角, rad
 ω ——切割器旋转角速度, rad/s
 v ——机器作业速度, mm/s
 t ——刀盘转过的时间, s

a 、 b 两点的运动轨迹之间的区域就是刀片 1 的切割区域。

同理,刀片 2 的刀刃 c 、 d 两点运动方程与 a 、 b 两点振幅及频率均相同,相位滞后 $\frac{\pi}{2}$,其切割区域如图 5 所示,刀片 1 与刀片 2 都扫过的区域为切割器的重割区,重割区的大小与速比(切割器切割线速度与机器前进速度之比)有关,随着速比的减小而减小,当重割区将完全消失时会出现漏割区域。根据文中切割器的各项参数绘制出刀片切割轨迹图如图 5,可以看到尚未出现漏割区域。

当圆盘式切割器割刀以足够大的线速度与牧草接触,并在瞬间使牧草下端茎秆达到应力极限被切断,此时的牧草茎秆会获得一个沿着割刀速度切线方向的初始速度,并沿着初速度的水平方向继续运动,直到接触滚筒或地面后停下来,最终平铺在切割器的中间位置,可避免牧草散落在两侧,被履带碾压污染。

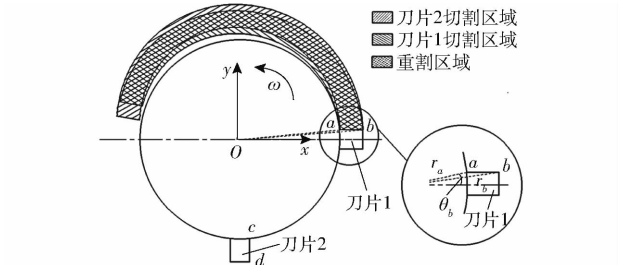


图 5 刀片运动轨迹图
Fig.5 Blade trajectory chart

2.3 动力和传动系统设计

柴油机作为动力装置,需要为履带驱动轮、液压提升装置、切割器 3 处带轮提供动力。

柴油机输出带轮的动力分 2 部分传输,第 1 部分通过传送带传输到履带底盘驱动带轮,第 2 部分通过齿轮箱传输至提升割台的液压系统以及切割器处。

在忽略带轮打滑的情况下,柴油机额定转速为 2 200 r/min,履带驱动带轮转速为 1 650 r/min,液压泵转速为 1 467 r/min,切割器转速达 2 357 r/min。

2.4 机架设计与优化

2.4.1 机架设计

机架支撑了整机的零部件,承载了动力系统、切割系统、传动系统、操纵系统以及外罩等零部件,其在作业过程中除了受压力外还会受到扭矩的作用。收割机机架的设计应当在满足强度要求的基础上尽可能结构简单,兼具优异的减振性能特点^[24-25]。

收割机机架由 Q235 结构钢焊接而成,作为重要的承载部件需要达到足够的强度。对机架的变形以及应力分布进行综合分析,对应力集中的部位进行加固。

收割机机架设计如图 6 所示,其中履带底盘前横梁和履带底盘后横梁为履带底盘上自带承重部分,材料也为 Q235 结构钢,虽不属于机架的结构范围,但承受了机架以及机架所承载的所有零件的总重量,因此需要和机架一起进行结构强度分析计算。

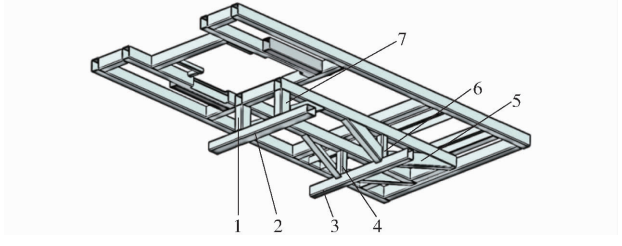


图 6 机架三维模型
Fig.6 Rack 3D model

1. 主左前立柱 2. 履带底盘前横梁 3. 履带底盘后横梁 4. 主左后立柱 5. 后支撑筋板 6. 主右后立柱 7. 主右前立柱

2.4.2 机架受力分析

收割机上质量较大的部件有柴油机(240 kg)、收割机前置割台(220 kg)、变速箱(30 kg)、驾驶员(取 70 kg),机架还受自身重力作用,忽略收割机外罩以及液压元件的重量对其进行受力分析,机架在水平面工作时,其受力情况如图 7 所示。

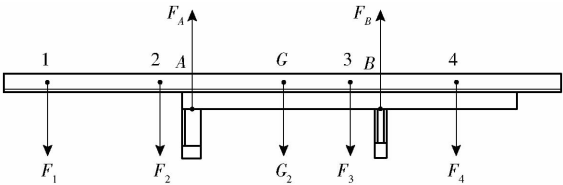


图 7 机架受力图
Fig.7 Frame force diagram

1. 切割器位置 2. 驾驶员位置 G. 机架重心位置 3. 齿轮箱位置 4. 柴油机位置

在不考虑支撑筋板的情况下,由力学平衡得

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + G_2 + F_A + F_B = 0 \tag{8}$$

以点 B 为原点,由力矩平衡条件得

$$F_1 x_{1B} + F_2 x_{2B} + F_A x_{AB} + G_2 x_{G2B} + F_3 x_{3B} - F_4 x_{4B} = 0 \tag{9}$$

式中 F_A ——机架前端所受支持力,N
 F_B ——机架后端所受支持力,N
 x_{AB} ——受力点 A 与受力点 B 的垂直距离,m
根据式(8)、(9)计算得出机架在支撑点 A 处受到的压力为 4.13 kN,在支撑点 B 处受到的压力为 2.10 kN,机架各个位置处的弯矩如图 8 所示。

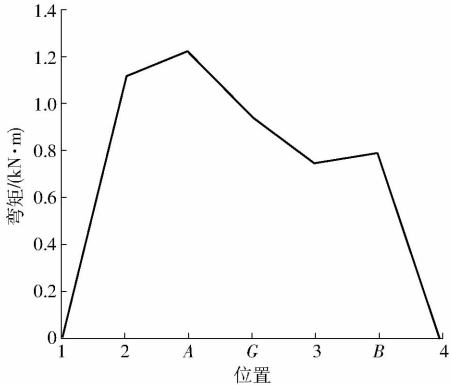


图 8 机架弯矩变化曲线
Fig. 8 Rack moment diagram

机架的前支撑立柱位置的截面 A 在整个机架结构中弯矩最大,为 1.22 kN·m,故 A 处是机架的危险截面,是否达到了强度要求还需要计算整个机架的应力大小以及分布情况。

2.4.3 机架工况分析

支撑机架主要有 3 种不同情况的负载工况:正常行驶情况下的机架负载;在斜坡上工作时所受的重力载荷;在转弯时所承受的扭矩以及重力载荷。这 3 种工况当中,正常行驶情况下的机架是应力最

小的一种,机架在转弯时所产生的扭矩也远小于各零件产生的压力。故仅需对收割机在斜坡工况下机架的受力与变形情况进行分析,即可保证机架满足强度要求。

2.4.4 机架仿真分析

收割机在斜坡上工作时,支撑机架的位置形态发生了变化,机架支撑立柱受到切向力和压力的共同作用。在 Workbench 软件中仿真模拟这一工况下的机架受力与固定约束情况,假设斜坡的角度为 30°,载荷设置如图 9。

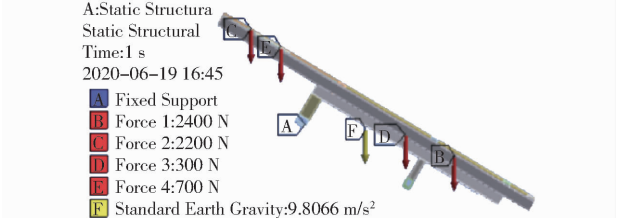


图 9 机架仿真初始条件设置

Fig.9 Setting of initial conditions for rack simulation

根据仿真结果,最大应力发生在驾驶员座椅位置的中间梁和横梁处,与上述机架水平时计算的危险截面位置一致,验证了计算结果的正确性。且最大应力为 125.37 MPa,小于材料屈服极限(235 MPa),考虑收割机外罩、水箱等其他部件的额外压力,以及收割机工作过程中的冲击载荷作用下应力峰值较大,机架的前端部分仍存在强度风险。

为了减少机架前端变形量和中间部位应力集中,对机架的结构进行强度加强,保证收割机的作业安全。需在机架前横梁上焊接支撑梁,以支撑前割台的压力,减小变形和机架中间部位的应力集中。

3 试验

3.1 样机试制

履带式林间草带收割机在沧州市盛邦农业机械有限公司加工制造,整机尺寸为 3 380 mm × 1 520 mm × 2 010 mm,外形结构如图 10 所示,其尺寸和作业幅宽满足在小株距林草模式中作业的基本条件。

整机配套动力 34 kW,幅宽为 1.5 m,转弯半径 40 cm。割刀的旋转线速度为 72.6 m/s。能够通过液压缸将切割器向上提升至最大 40 cm,保证了收割机在复杂地形下的通过性。

3.2 林间牧草收获试验

为了验证收割机的实际作业效果与整机性能,对收割机进行性能试验。



图 10 履带式林间草带收割机样机

Fig. 10 Test prototype of crawler-type grass belt harvester in forest

3.2.1 试验条件与材料

试验于 2019 年 7 月 20 日在张家口牧草体系综合试验站附近的人工林区进行,图 11 为试验场地的环境情况,人工林间的植被主要为自然条件下生长的针茅类牧草及蒿类杂草,种植林木为不同生长阶段的杨树,当天试验地天气晴朗,气温 15 ~ 28℃。



图 11 野外试验环境

Fig. 11 Field test environment

在人工林区选取树木排列规整,林下杂草生长旺盛的 5 个 50 m 的单程作业区域。作业前,测量标定进行试验的区域,便于测量作业速度,将林间收割机调试到最佳状态,调整好切割器的高度。试验区域的饲草是林间天然生长的牧草,且地面的平整性和地面视野情况较差,为了保障安全,试验全程采用低速挡位作业。

田间性能试验所用试验仪器及材料有: 100 m 卷尺、标杆、40 cm 钢尺、2 m 卷尺、马克笔、秒表,图 12 为履带式林间草带收割机现场割草作业情况。



图 12 履带式林间草带收割机作业试验

Fig. 12 Crawler-type forest grass belt harvester in test operation

3.2.2 试验方法

收割机作业速度计算式为

$$v = \frac{L'}{T}$$

式中 L' ——试验测定区域的长度, m
 T ——通过测定区时间的平均值, s

取 5 次测量结果的平均值。

割幅的测定:每个行程每 5 m 测量一次割幅,取为一组数据,每 1 个行程测量 10 次,取平均值,得到林间割草机实际割幅。

割幅利用系数是试验中的实际割幅与收割机割台设计割草幅宽的比值,计算公式为

$$K_f = \frac{A_s}{A_L}$$

式中 K_f ——割幅利用系数
 A_s ——平均实际割幅, m
 A_L ——理论割幅, m

每个工作行程等间隔 5 m 选取两个测量点,以钢直尺测量割茬高度。每个行程的平均割茬高度为

$$\bar{h} = \frac{\sum h}{n}$$

式中 $\sum h$ ——一个行程中测量 n 次割茬高度的总和, cm
 n ——每个行程中割茬高度的测量次数

3.2.3 试验结果与分析

所有试验指标均在当天测量完成,测得履带式林间草带收割机试验结果如表 1 所示,并用式(11)计算出割幅利用系数为 0.94。测得 5 个 50 m 单行程的平均作业速度为 0.42 m/s,实际割幅的均值为 1.41 m,整个试验区域的平均割茬高度为 7.6 cm,在试验区的平坦区域,割茬高度为 4 ~ 5 cm,满足旋转收割机在平坦地区割茬高度小于等于 7 cm 的技术要求。收割机安全性良好,在提起切割器的条件下能顺利通过人工林的复杂地形,爬坡性能良好,机架的强度能够保证正常工作。

表 1 履带式林间草带收割机试验结果

Tab. 1 Test results of crawler forage harvester

统计量	作业速度/(m·s ⁻¹)	割茬高度/cm	实际割幅/m
均值	0.420	7.6	1.410 6
标准差	0.008	1.1	0.034 2
变异系数/%	1.9	5.3	2.4
稳定系数/%	98.1	86.9	97.6

由图 13 可以看出,经切割器刈割后的饲草能够较好地平铺在路径中间,避免牧草被两侧的履带碾压污染,保证了天然牧草收割后的质量,可以被收集利用。结果表明履带式林间草带收割机具备在小型带距的林草种植模式中收获林间牧草的

能力。



图 13 单程切割作业后的饲草

Fig. 13 Forage after a single cut operation

4 结论

(1) 基于人工林割草作业环境特点, 提出了林间草带收割机的设计要求: 收割机幅宽小于 2 m, 切割线速度为 60 ~ 90 m/s, 切割器提升高度大于

40 cm, 选用接地压力和转弯半径较小的履带作为行走系统。

(2) 设计了履带式林间草带收割机, 其配套动力为 34 kW、幅宽为 1.5 m、转弯半径为 0.4 m、割刀的旋转线速度为 72.6 m/s, 该机通过液压缸可将切割器向上提升, 最大可达 0.4 m, 在复杂地形下具有较好的通过性。通过仿真确定收割机支撑部件机架的最大应力位置, 以此对机架的特定部位进行强化, 保证了机架在复杂环境下的作业安全性。

(3) 人工林间牧草收获试验表明, 履带式林间草带收割机平均作业速度为 0.42 m/s, 割草高度为 7.6 cm, 割幅利用系数为 0.94。说明履带式林间草带收割机能够适应人工林作业环境, 可用于收获小带距的林草种植模式下的牧草, 大大降低了人工收获牧草的劳动强度。

参 考 文 献

- [1] 杜令慧. 紫花苜蓿不同种植模式及应用探索[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
DU Linghui. The exploration of medicago sativa in different planting mode and application[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [2] 白岗栓, 邹超煜, 杜社妮. 渭北旱塬果园自然生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 151 - 158.
BAI Gangshuan, ZOU Chaoyu, DU Shen. Effects of self-sown grass on soil moisture and tree growth in apple orchard on Weiwei dry plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 151 - 158. (in Chinese)
- [3] 张雷一, 张静茹, 刘方, 等. 林草复合系统的生态效益[J]. 草业科学, 2014, 31(9): 1789 - 1797.
ZHANG Leiyi, ZHANG Jingru, LIU Fang, et al. A review of ecological benefits of silvopasture systems[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(9): 1789 - 1797. (in Chinese)
- [4] 杨世昆. 饲草生产机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [5] 冯召营, 孙迎春. 浅谈林下清理在森林防火工作中的作用[J]. 现代园艺, 2019(7): 191 - 192.
- [6] 邬备. 苜蓿刈割压扁收获机械系统的优化和试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
WU Bei. Optimization and experimental study on mechanical system of alfalfa mower conditioner[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [7] HAUN R D. Quick attach rotary mower blade system; U. S. P 805310[P]. 2015-07-21.
- [8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1 - 25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170801&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.001. (in Chinese)
- [9] 邬备, 王德成, 王光辉, 等. 割草机切割压扁装置运行参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 76 - 83.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Optimization and experiments of cut-condition device working parameter on mower conditioner[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 76 - 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.009. (in Chinese)
- [10] 邬备, 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 123 - 129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150719&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.019. (in Chinese)
- [11] 胡举伟. 桑树/大豆、桑树/苜蓿间作对其生长及土地和光资源利用能力的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
HU Juwei. Effects of mulberry/alfalfa intercropping on their growth, the utilization of land and light resource[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [12] 杨涛. 新疆林草复合系统中杨树/紫花苜蓿根系分布及生长发育特性[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
YANG Tao. Root distribution and characteristics of growth and development in a poplar tree/alfalfa silvopastoral system in

Xinjiang Province[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019. (in Chinese)

[13] 王林娜. 枣林间作牧草品种筛选及综合评价[D]. 塔里木:塔里木大学, 2017.
WANG Linna. Screening and evaluating forages under jujube forest [D]. Tarim:Tarim University, 2017. (in Chinese)

[14] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:1141 – 1144.

[15] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(9):374 – 383.
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374 – 383. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200943&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.043. (in Chinese)

[16] 刘志刚,王德成,郝兴玉,等. 自走式灌木平茬机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 95 – 98.
LIU Zhigang, WANG Decheng, HAO Xingyu, et al. Design and experiment on self-propelled shrub cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 95 – 98. (in Chinese)

[17] 祝强. 林地履带底盘动力传动系统参数匹配与性能分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017.
ZHU Qiang. Parameters matching and performance analysis of the power transmission system of forestry machines track chassis [D]. Changsha:Central South University of Forestry and Technology, 2017. (in Chinese)

[18] 于庆有,司俊山,陆怀民. 森林消防车沼泽地通过性研究[J]. 农业机械学报,1996,27(1):80 – 85.

[19] 唐升武. 轮胎下沉量理论计算方法在结构设计中的应用[J]. 轮胎工业, 2004,24(1):16 – 17.

[20] 张卓. 基于玉米大豆轮作模式的大豆精密播种技术研究及配套耕播机设计[D]. 长春:吉林大学,2019.
ZHANG Zhuo. Research on the soybean precision seeding technology and till-planter design under corn and soybean rotation model [D]. Changchun:Jilin University, 2019. (in Chinese)

[21] 高爱民,韩正晟,吴劲锋. 割草机对苜蓿地土壤压实的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):101 – 105.
GAO Aimin, HAN Zhengsheng, WU Jinfeng. Experimental research on alfalfa soil compaction by mowing machine [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 101 – 105. (in Chinese)

[22] 付作立,王德成,李卫,等. 双圆盘式苜蓿旋转切割器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):214 – 220.
FU Zuoli, WANG Decheng, LI Wei, et al. Design and experiment of two-disc rotary mower of alfalfa [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 214 – 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s028&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.028. (in Chinese)

[23] 卿上乐,颖刚华,刘庆庭. 甘蔗收割机单圆盘切割器运动学分析[J]. 农业机械学报,2006,37(1):51 – 54.
QING Shangle, YING Ganghua, LIU Qingting. Kinematics of single disc basecutter of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 51 – 54. (in Chinese)

[24] 李耀明,李有为,徐立章,等. 联合收获机割台机架结构参数优化[J]. 农业工程学报,2014,30(18):30 – 37.
LI Yaoming, LI Youwei, XU Lizhang, et al. Structural parameter optimization of combine harvester cutting bench [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 30 – 37. (in Chinese)

[25] 吴伟斌,廖劲威,洪添胜,等. 山地果园轮式运输机车架结构分析与优化[J]. 农业工程学报,2016,32(11):39 – 47.
WU Weibin, LIAO Jinwei, HONG Tiansheng, et al. Analysis and optimization of frame structure of wheeled transport locomotive in mountain orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 39 – 47. (in Chinese)

(上接第 61 页)

[21] 李飞雄,何东健. 种子在气流管道中运动规律的研究[J]. 西北农业大学学报,1986,14(1):12 – 24.
LI Feixiong, HE Dongjian. Research on the moving regularity of seeds in pneumatic pipes[J]. Act. Univ. Sept. Occi. Agri., 1986, 14(1): 12 – 24. (in Chinese)

[22] 费学通. 基于 DEM – CFD 耦合的气吹式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2011.
FEI Xuetong. Simulation analysis of working process of air blown corn precision seed-metering device based on DEM – CFD coupling method [D]. Changchun:Jilin University, 2011. (in Chinese)

[23] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):57 – 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 – 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170307&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007. (in Chinese)

[24] 胡明国. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.

[25] 陈兵旗. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.