doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.012

# 丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机设计与试验

张克平[1]　李升升[1]　李晓康[2]　安　晶[1]

(1.甘肃农业大学机电工程学院,兰州 730070;2.甘肃省机械科学研究院有限责任公司,兰州 730030)

**摘要**:针对丘陵山区苜蓿田间机械化裹包青贮收获难度大、成捆损失率高等问题,基于甘肃省丘陵山区地形特征和苜蓿青贮收获农艺要求,设计了苜蓿捡拾打捆裹包一体机。该机可对田间铺条苜蓿一次性完成捡拾、切碎、打捆、缠网及缠膜作业,捡拾装置以摆动滚子推杆盘形凸轮机构为关键部件,工作幅宽 0.7 m、弹齿间距 58 mm、转速 124 r/min;切碎装置动刀片与定刀片配合完成苜蓿切碎与强制喂入,滑切角 40°,定刀数量 13,喂料辊转速 300 r/min;打捆装置主要由开仓油缸、滚筒、间隙传感装置和前、后仓机架组成,10 个滚筒按涡状线排列组成打捆室,卷制草捆尺寸为 $\Phi$500 mm×700 mm;缠膜装置的支撑辊与缠膜臂转速比为 0.55,导膜组件差速齿轮传动比为 1.5,膜拉伸率为 50%。在起伏坡度为 0°~15°的丘陵山区苜蓿地开展整机田间性能试验,结果表明:当作业速度为 1.3~1.4 m/s,铺放苜蓿草条密度约 1.5 kg/m 时,成捆密度为 566.02 kg/m$^3$,总损失率为 3.67%,满足苜蓿裹包青贮要求。

**关键词**:丘陵山区;苜蓿;打捆裹包;捡拾装置;缠膜装置

**中图分类号**:S225.8;S817.11$^+$7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)11-0135-11　　**OSID**:

# Design and Experiment of Alfalfa Picking, Baling and Wrapping Integrated Machine in Hilly and Mountainous Areas

ZHANG Keping[1]　LI Shengsheng[1]　LI Xiaokang[2]　AN Jing[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*
2. *Gansu Academy of Mechanical Sciences Co., Ltd., Lanzhou* 730030, *China*)

**Abstract**: Aiming to address the issue of high difficulty in mechanical silage harvesting of alfalfa and high loss rate of bales in hilly and mountainous areas, an alfalfa picking, baling and wrapping integrated machine was designed, based on the topography of hilly and mountainous areas in Gansu Province and the agronomic requirements for alfalfa silage. The machine simultaneously performed picking, shredding, baling, net wrapping, and film wrapping operations on windrowed alfalfa. The pickup device, utilizing a swing roller and pusher disc cam mechanism as its key component, featured a working width of 0.7 m, a tine spacing of 58 mm, and a rotational speed of 124 r/min. The fixed blades and moving blades of the shredding device collaboratively achieved alfalfa shredding and forced feeding, the sliding shredding angle was 40°, the number of fixed blades was 13, and the feeding roller speed was 300 r/min. The baling device was mainly composed of the opening cylinder, drum, gap sensing device and frame, the alfalfa was rolled into a cylindrical bale with a diameter of 500 mm and a height of 700 mm by the baling chamber formed with 10 drums arranged in a vortex pattern. The speed ratio of the support roller and the wrapping arm in the film wrapping device was set at 0.55, the gear ratio of the film-guide differential unit was 1.5, and the film stretch ratio was 50%. The whole machine field performance experiment was conducted on alfalfa fields in hilly and mountainous areas with an undulating slope ranging from 0° to 15°, the results showed that when the operating speed was 1.3~1.4 m/s and the density of windrowed alfalfa was approximately 1.5 kg/m, the bale density was 566.02 kg/m$^3$, with a total loss rate of 3.67%, meeting the requirements of alfalfa wrapping silage.

**Key words**: hilly and mountainous areas; alfalfa; baling and wrapping; pickup device; film-wrapping device

收稿日期:2025-08-25　修回日期:2025-09-20

**基金项目**:甘肃省科技重大专项计划项目(23ZDNA004)、甘肃省科技计划项目(25CXNA028)、甘肃省现代寒旱特色农业牛产业技术体系建设专项(GSARS-01)和甘肃旱作农业装备产业研究院建设项目

**作者简介**:张克平(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事饲草机械及生物质复合材料研究,E-mail:zhangkp@gsau.edu.cn

## 0 引言

苜蓿富含多糖、大豆黄酮、异黄酮等多种生物活性物质,营养价值高[1],产量高且畜禽适口性优良,被赋予“牧草之王”的美誉[2-3]。近年来,随着我国畜牧业的快速发展,苜蓿的需求逐年增加,主要种植在西北、华北和东北等地[4],其中,甘肃省种植面积和产量居全国之首,占苜蓿总产量的 40% 左右[5-6]。然而,甘肃省地形大多为丘陵山区,较为成熟的中大型饲草机械适用性差,苜蓿田间收获受地形地貌的严重制约[7]。

青贮作为一种有效保存和利用苜蓿饲草的方式,逐渐受到关注。其中,裹包青贮具有保存时间长、营养流失少、存取方便、利于产品化等优点[8]。国内外针对打捆裹包机械的相关研究主要集中在结构设计与优化、多功能集成及自动化控制作业等方面。MICHAL 等[9]创建了饲草打捆机自动控制系统,实现了更安全高效的打捆作业;SHINNERS 等[10]研究得出:与扎绳相比,缠网青贮草捆外层的养分保留率更高;高东明等[11]设计了一种适用于中大型圆捆机的自动缠网装置;曹珣[12]对钢辊式圆捆机芯捆成型过程进行了离散元仿真分析与台架试验研究;杨然兵等[13]将打捆包膜机集成在花生联合收获机上,一次性完成花生收获和青贮秧蔓打捆包膜作业;WANG 等[14]开发了一套适应性强、集成度高的大型圆捆机性能参数数据采集系统,为智能化滚筒圆捆机的研究提供支撑。然而,针对丘陵山区打捆裹包作业的小型轻简化、苜蓿收获农艺适应性等方面的研究较少,适用于丘陵山区苜蓿田间裹包青贮的机具短缺,现有田间分段式作业机和固定场地联合作业机人工干预大、劳动强度高且工作效率低。

本研究基于甘肃省丘陵山区地形特征和苜蓿青贮收获农艺要求,设计一款苜蓿捡拾打捆裹包一体机,实现一次性完成田间铺条苜蓿的捡拾、切碎、打捆、缠网、缠膜等作业,并通过田间试验对整机的作业性能进行验证。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机主要由机架、控制系统、捡拾装置、切碎装置、缠网装置、打捆装置、缠膜装置、液压系统和传动系统组成。捡拾装置、切碎装置、打捆装置、缠膜装置从前向后依次安装在机架上,缠网装置安装于打捆装置的前上方,整机结构如图 1 所示。整机由拖拉机牵引作业,传动采用机械、液压与电驱动相结合的方式,基于 PLC 的控制系统控制打捆、缠网、缠膜等功能的自动运行,如图 2 所示,可一次性对铺放在田间的苜蓿草条完成捡拾、切碎、打捆、缠网和缠膜作业。

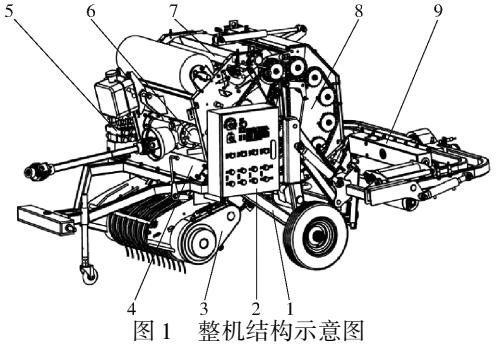



图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Schematic of machine

1. 机架 2. 控制系统 3. 捡拾装置 4. 切碎装置 5. 液压系统 6. 传动系统 7. 缠网装置 8. 打捆装置 9. 缠膜装置

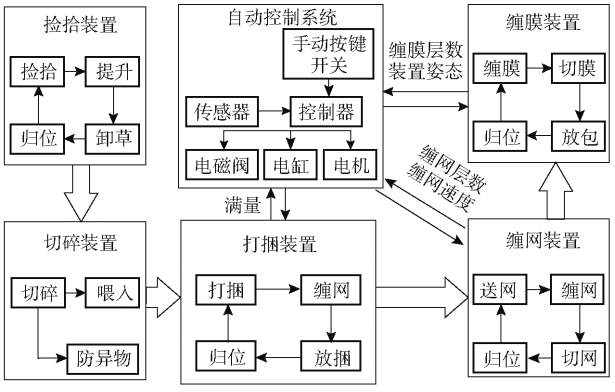



图 2 整机功能框图

Fig. 2 Function block diagram of machine

### 1.2 工作原理

作业时,捡拾装置捡拾铺放在田间的苜蓿草条并向后输送至切碎装置,苜蓿经切碎装置切碎后被连续输送至打捆装置,在打捆室内被层层卷制形成圆柱形草捆。当挤压密度达到设定值时,控制系统给出停机信号,整机停止前进,缠网装置开始送网、缠网,当丝网缠至设定层数时自动断网。随后,控制系统打开打捆装置后仓门并给出整机前进信号,整机继续前进,开始下一个循环捡拾、切碎等作业,之前完成缠网的草捆落入缠膜装置,缠膜装置在草捆外侧缠绕设定层数拉伸膜后释放草捆至田间。

### 1.3 技术参数

丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机技术参数如表 1 所示。

## 2 关键部件设计

### 2.1 捡拾装置

捡拾装置主要由挡草装置、防护装置、摆动滚子推杆盘形凸轮机构和过载保护组件组成,其中摆动滚子推杆盘形凸轮机构主要由滚筒圆盘、曲柄轴、滚

**表 1　整机技术参数**

**Tab. 1　Technical parameters of machine**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m) | 2.33×1.85×1.38(折叠)<br>3.00×1.85×1.83(作业) |
| 配套功率/kW | ≥29.4 |
| 纯生产率/(捆·$h^{-1}$) | ≥60 |
| 工作幅宽/mm | 700 |
| 切碎长度/mm | ≤70 |
| 草捆密度/(kg·$m^{-3}$) | ≥550 |
| 缠膜重叠度/% | ≥50 |
| 缠膜层数/层 | ≥4(偶数,可调) |

轮等零部件组成,防护装置主要由防护栅板、内侧护板和两侧滚筒护板等组成。整体结构如图 3 所示。

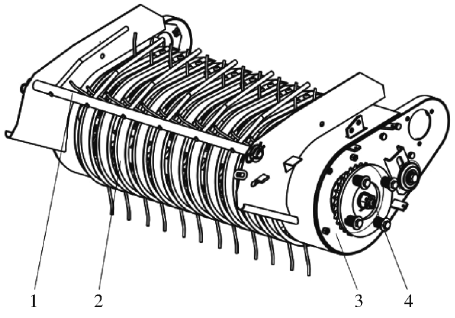



图 3　捡拾装置结构示意图

Fig. 3　Pickup device structure diagram

1. 挡草装置　2. 防护装置　3. 摆动滚子推杆盘形凸轮机构　4. 过载保护组件

该装置整体铰接在切碎装置前下方,通过拉簧对其施加向上的拉力,作业时,遇到障碍物可向上浮动,避免装置损坏。摆动滚子推杆盘形凸轮机构的功能是捡拾收集铺放在地面的苜蓿草条[15],并将苜蓿不断输送至切碎装置。动力经过载保护组件传递至主轴,带动滚筒圆盘转动,弹齿随之旋转,弹齿的运动是由滚筒圆盘转动和曲柄摆动共同驱动且轨迹确定的平面运动,该运动由 4 个阶段组成:①捡拾阶段:当弹齿从滚筒圆盘正下方运动至正前方时,随着滚筒圆盘转动,弹齿向上转动,将苜蓿捡拾起,完成捡拾动作。②提升阶段:弹齿继续随滚筒圆盘向上转动,并将捡拾的苜蓿提升至滚筒圆盘的正上方,完成提升动作。③卸草阶段:苜蓿运动至正上方后,被弹齿继续向后方推行,弹齿受凸轮滑道控制从苜蓿中迅速抽出,缩回至防护栅板内部,苜蓿沿防护栅板外侧继续向后运动,完成卸草动作。④空行阶段:卸草动作完成后,弹齿继续运动,其末端从防护栅板之间的缝隙伸出,接着开始下一个捡拾动作。

因丘陵山区作业幅宽受限,草条宽度通常较小。为便于本机在丘陵山区作业,选取 0.7 m 作为捡拾幅宽。为保证捡拾作业效果,该装置采用 4 根曲柄轴,每根曲柄轴均布安装 6 个弹齿,弹齿间距为 58 mm。

捡拾过程中,为防止机具前进过快导致捡拾效率不足,造成苜蓿在捡拾装置前方堆积现象,弹齿端点的线速度应大于机具的前进速度[16-17],进而确定其角速度和相关参数的关系式为

$$v_j = \omega_j R_{j\max} > \frac{5v_t}{18} \tag{1}$$

其中

$$\omega_j = \pi n_j / 30 \tag{2}$$

式中　$v_j$——弹齿端点线速度,m/s

$\omega_j$——捡拾装置的滚筒圆盘角速度,rad/s

$R_{j\max}$——弹齿端点的最大回转半径,m

$n_j$——捡拾装置的滚筒圆盘转速,r/min

$v_t$——机具前进速度,km/h

将式(2)代入式(1)化简得

$$n_j > \frac{25v_t}{3\pi R_{j\max}} \tag{3}$$

机具前进速度直接影响作业效率,既要满足丘陵山区低速作业以保证作业安全,也要满足平坦地带高速作业以提高作业效率,选定机具前进速度范围为 3.2 ~ 9.0 km/h。代入式(3)得 $n_j > 114.77$ r/min,最终取滚筒圆盘转速 $n_j$ 为 124 r/min。

## 2.2　切碎装置

切碎装置将捡拾后的苜蓿切碎并采用断续螺旋喂料辊强制喂入打捆装置,主要由切碎机架、喂入机构和定刀总成组成,其中,切碎机架包含切碎侧板、切碎盖板和捡拾装置连接轴;喂入机构包含挡板、喂入轴、动刀片和切碎链轮;定刀总成包含切碎底板、切碎定刀、调节螺杆、定刀转轴、切碎拉簧、定刀顶杆、顶杆转轴和顶杆卡柱,加强对苜蓿茎秆的切碎作用[18]。切碎装置结构如图 4 所示。

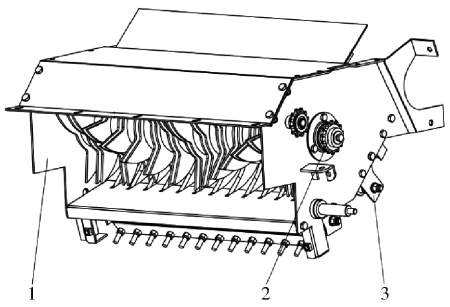



图 4　切碎装置结构示意图

Fig. 4　Shredding device structure diagram

1. 切碎机架　2. 喂入机构　3. 定刀总成

### 2.2.1　切碎过程分析

动刀片 2 个一组,焊接在喂入轴上构成断续螺旋喂料辊。作业时,通过链传动带动喂入辊逆时针转动,将苜蓿向后输送,在动刀片与定刀片的配合下完成切碎,需保证在完成切碎作业的同时功耗尽可

能小,而切割功耗与切割方式有关。切割方式有正切和滑切两种,其中,滑切具有切割阻力小、功耗低的特点。因此,本研究切碎机构采用滑切方式,滑切角设计如图 5 所示。

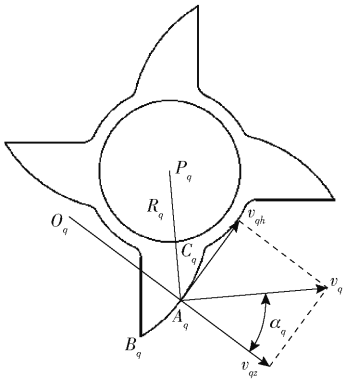



图 5 滑切角示意图

Fig. 5 Schematic of sliding shredding angle

图 5 中,$B_qC_q$为动刀片刀刃,$O_q$为刀刃刃口曲线的圆心,$A_q$为刀刃中点,该点的回转半径为 $R_q$。当进行切碎作业时,点 $A_q$的切割速度为 $v_q$,其方向与 $P_qA_q$垂直,将 $v_q$沿点 $A_q$的切线和法线两方向进行分解,$v_{qh}$为滑切速度,$v_{qz}$为正切速度。$v_{qz}$与 $v_q$之间的夹角 $\alpha_q$为滑切角。滑切速度不为零的切割方式即为滑切。根据相关研究,当滑切角为 40°时,切割功耗最小[19]。然而,动刀片刃口各个工作点的滑切角均不同,故将刃口中点的滑切角设为 40°,以保证其余位置接近 40°。挡板固定安装在切碎盖板上,能够阻止苜蓿被带回前方,使得切碎装置具有强制喂入功能。

### 2.2.2 断续螺旋喂料辊转速设计

切碎作业时,为避免苜蓿在切碎装置前段发生堵塞,喂料辊的喂入效率需大于捡拾装置的捡拾效率,即

$$Q_w > Q_j \tag{4}$$

式中 $Q_w$——喂入效率,kg/h

$Q_j$——捡拾效率,kg/h

喂入效率与喂料辊转速及喂料辊每转动一圈的喂入量有关。设定喂入系数 $k_q$表示单圈喂入体积与喂料辊内外圆间体积的百分比,测量得喂入系数 $k_q = 79.8\%$。喂入效率计算式为

$$Q_w = 6\pi(R_q^2 - r_q^2) l_q k_q \rho_q n_q \times 10^{-8} \tag{5}$$

式中 $r_q$——喂料辊内圆半径,mm

$l_q$——喂料辊长度,mm

$\rho_q$——捡拾苜蓿草条密度,kg/m$^3$

$n_q$——喂料辊转速,r/min

喂料辊转速 $n_q$ 计算式为

$$n_q > \frac{Q_j \times 10^8}{6\pi(R_q^2 - r_q^2) l_q k_q \rho_q} \tag{6}$$

机具作业过程中,捡拾后的苜蓿经捡拾装置和切碎装置聚拢挤压作用,形成一定的密度,故捡拾后的苜蓿密度大于田间苜蓿草条的堆积密度,根据预试验,取 $\rho_q = 27$ kg/m$^3$。设计的切碎装置中,$R_q = 145$ mm,$r_q = 72.5$ mm,代入式(6)得喂料辊转速 $n_q > 270.9$ r/min。为避免因草条堆积不均导致喂料辊堵塞,取喂料辊转速为计算值的 1.1 倍,圆整后为 300 r/min。

### 2.2.3 切碎长度与定刀数量确定

苜蓿的切碎长度是影响成捆密度的关键因素,苜蓿长度越大,成捆密度越小;苜蓿长度越小,成捆密度越大,但会增加成捆过程中的漏料量。为提高草捆密度并减小漏料量,苜蓿茎秆理论切碎长度取 50 mm,则切碎装置定刀数量计算式为

$$z_d = \frac{l_q}{l_s} - 1 \tag{7}$$

式中 $z_d$——定刀片数量,个

$l_s$——理论切碎长度,mm

经计算,$z_d = 13$ 个。但当苜蓿茎秆与喂料辊存在一定角度时,实际切碎长度将大于理论切碎长度。

## 2.3 打捆装置设计

打捆装置将喂入的苜蓿卷制成圆柱形草捆,主要由开仓油缸、后仓机架、间隙传感装置、前仓机架和滚筒组成,如图 6 所示。

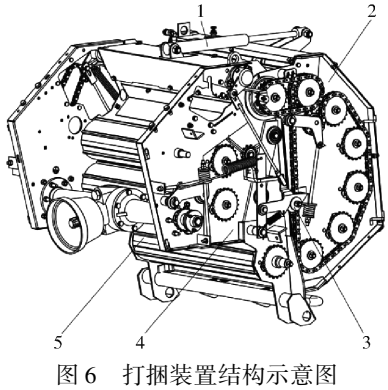



图 6 打捆装置结构示意图

Fig. 6 Baling device structure diagram

1. 开仓油缸 2. 后仓机架 3. 间隙传感装置 4. 前仓机架 5. 滚筒

### 2.3.1 工作原理

如图 7 所示,打捆室由 10 个滚筒按涡状线排列而成,从 1 号滚筒开始,逆时针依次向打捆室中心偏移一定距离,形成涡状打捆室,此排列方式可将草捆压的更加紧实[20]。滚筒直径 $d$ 设定为 150 mm,为尽量避免苜蓿从滚筒间漏出,取滚筒间隙为 2 mm。

切碎装置将苜蓿切碎后以速度 $v$ 连续送入打捆室,滚筒以角速度 $\omega_1$ 顺时针转动,并带动苜蓿以角速度 $\omega_2$ 逆时针转动,形成一个涡状线的运动轨迹。

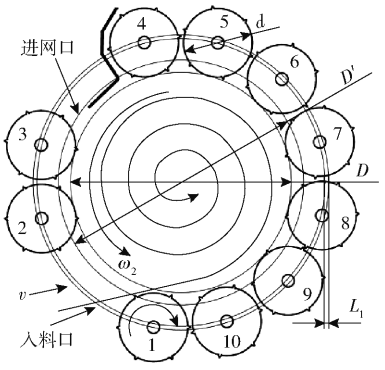



图 7　打捆装置工作原理图

Fig. 7　Working principle of baling device

随着草捆直径逐渐增大，滚筒会对其形成一个朝向圆心的挤压力，苜蓿的持续加入使草捆不断被压实，后仓将被撑开，连板向后摆动，撑开到设定角度时，满量传感器被触发，向控制系统传输信号。控制系统发出缠网指令，缠网机构开始工作，缠网结束后，控制器控制开仓油缸收缩，后仓向上摆动打开，草捆在自身重力作用下掉落至缠膜装置。

### 2.3.2　打捆室直径设计

拟设成型草捆尺寸为 $\Phi$500 mm × 700 mm，由于草捆被压缩时，部分苜蓿会被挤压到相邻滚筒间的凹槽中，且后仓打开后，草捆外侧只有丝网捆扎，缺少了滚筒对其约束，体积会发生膨胀。因此，设计时，打捆室的直径需小于草捆直径，即

$$D = D' - \Delta D \tag{8}$$

式中　$D$——打捆室直径，mm

$D'$——草捆输出后实际直径，mm

$\Delta D$——打捆室直径与草捆直径的差值，mm

$\Delta D$ 与滚筒直径有关，滚筒越大，$\Delta D$ 越大，一般取 $\Delta D = d/3 = 50$ mm，故打捆室直径 $D$ 为 450 mm。

### 2.3.3　打捆成型力学分析

对打捆室内草捆与滚筒间作用力进行分析，设草捆质量为 $m$，滚筒对草捆的径向压缩力为 $N$，则打捆室内草捆受力如图 8 所示。

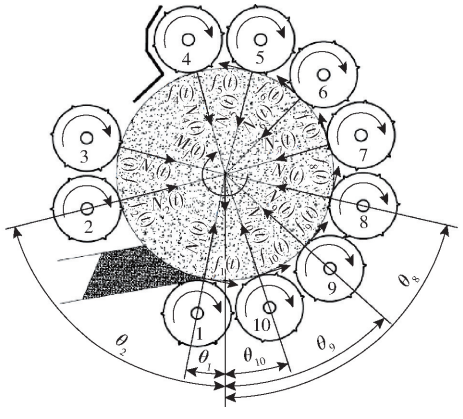



图 8　成捆过程力学分析

Fig. 8　Force analysis diagram of bale in forming process

在成捆过程中，草捆受到打捆室侧壁摩擦力矩、滚筒径向压缩力与摩擦力的共同作用。草捆在滚筒摩擦力作用下做旋转运动，并受径向压缩力而发生压缩变形，在变形后，草捆会产生压缩变形恢复力施加于滚筒，二者为一对相互作用力。假设各个滚筒受到草捆的压缩变形恢复力相等，因此，滚筒对草捆的径向压缩力为

$$N_i(t) = \begin{cases} \dfrac{m(t)g\cos\theta_i}{5} + N(t) & (i = 1,2,8,9,10) \\ N(t) & (i = 3,4,5,6,7) \end{cases} \tag{9}$$

式中　$N_i(t)$——$t$ 时刻 $i$ 号滚筒对草捆的径向压缩力，N

$m(t)$——$t$ 时刻草捆质量，kg

$N(t)$——$t$ 时刻草捆压缩变形恢复力，N

$\theta_i$——竖直方向与 $i$ 号滚筒-草捆中心连线夹角，(°)

分析可知，在成捆过程中，草捆压缩变形恢复力随着苜蓿的喂入逐渐增大，故滚筒压缩力将随苜蓿喂入量的增加而增加，不断增大的滚筒压缩力保障了草捆成型及成捆密度。

## 2.4　缠网装置

缠网装置包含送网机构、切网机构和检测机构，其结构如图 9 所示。其中，送网机构由棘轮组件、主动送网辊、从动送网辊、缠网机架和送网辊压簧组成；切网机构由橡胶条固定板、橡胶条、切网刀、切网电缸和电缸固定座组成；检测机构由数据检测板和光电接近开关组成。此外，网卷固定轴端部设有摩擦限矩组件，在缠网过程中为丝网提供拉伸力。

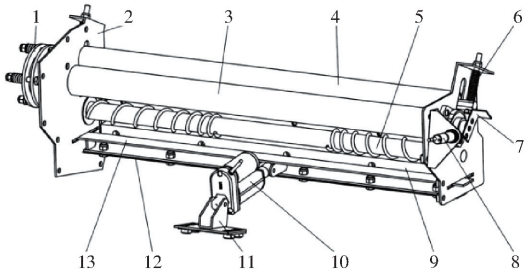



图 9　缠网装置结构示意图

Fig. 9　Net wrapping device structure diagram

1. 棘轮组件　2. 缠网机架　3. 主动送网辊　4. 从动送网辊　5. 展网辊　6. 送网辊压簧　7. 数据检测板　8. 光电接近开关　9. 压网橡胶条　10. 切网电缸　11. 电缸固定架　12. 切网刀　13. 切网刀杆

缠网装置作业过程分为送网、缠网和切网 3 个阶段，送网阶段：主动送网辊转动连续输送丝网，直至丝网被草捆卷入打捆室；缠网阶段：启动棘轮组件，丝网被持续输送并缠绕在草捆外圆表面，直至达到预设缠网层数；切网阶段：切网电缸伸出，丝网被

切网刀杆向前推进与切网刀片接触,下方丝网在草捆的拉力作用下被切断。

检测机构通过光电接近开关检测丝网是否被卷入打捆室、丝网是否被切断以及是否达到设定缠网层数等。缠网时,缠绕在草捆上的丝网总长度等于缠网装置输出的丝网总长度,即

$$N_1\pi d_1 = N_2\pi d_2 \tag{10}$$

有

$$N_2 = \frac{d_1}{d_2}N_1$$

式中 $N_1$——缠网层数

$N_2$——主动送网辊旋转圈数

$d_1$——主动送网辊直径,mm

$d_2$——草捆直径,mm

缠网作业过程中,缠网层数 $N_1$ 被输入至 PLC 控制器,PLC 计算得出主动送网辊旋转圈数 $N_2$,通过计数器指令记录光电接近开关激活次数,当激活次数达到 $N_2$ 时,即可判定缠网层数已达到设定值。

## 2.5 缠膜装置

### 2.5.1 拉伸膜特性试验

拉伸膜的拉伸特性对缠膜效果及缠膜装置作业参数具有较大影响,如拉伸膜横向收缩率影响缠膜重叠度,拉伸膜最大拉伸力和拉伸率影响缠膜后草捆外膜强度[21]。选用市面常用的宽 25 cm、厚 25 mm 的聚乙烯拉伸膜作为缠膜材料,测定拉伸膜的拉伸特性,为缠膜装置的设计提供参考[22]。

拉伸膜的拉伸性能测定分别为拉伸力随拉伸率的变化、横向收缩率随拉伸率的变化以及断裂伸长率共 3 个指标,参照 GB/T 1040.3—2006《塑料拉伸性能的测定第 3 部分(薄塑和薄片的试验条件)》利用 MTSE43.104 型电子万能试验机进行测试,设置加载速度为 100 mm/min。测定过程如图 10 所示。

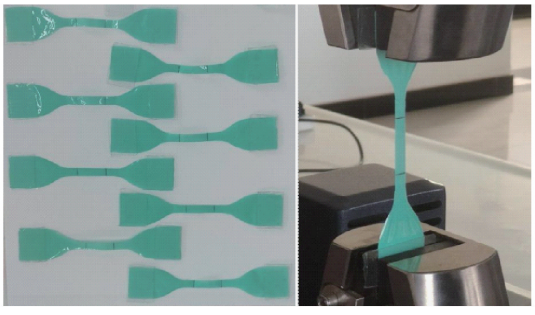


图 10 拉伸膜拉伸试验

Fig. 10 Tensile film tensile test

拉伸试验重复 5 次,拉伸力和横向收缩率随拉伸率的变化如图 11 所示。

通过拉伸力-拉伸率曲线可知,拉伸膜在拉伸率 20% 之内近似弹性变形,此范围内,拉伸力随拉伸率的增加迅速增加,在达到屈服点后,随着拉伸率的增加,拉伸力增加缓慢。通过横向收缩率-拉伸率曲线可知,拉伸膜在拉长过程中其宽度逐渐变窄,在拉伸率为 30% 后,横向收缩率变化减缓。通过拉伸膜拉伸试验及相关技术规范要求,选择以拉伸率 50% 作为缠膜装置作业标准,此时,拉伸膜的拉伸力为 79.18 N,横向收缩率为 18.4%,宽度为 20.4 cm,断裂伸长率满足技术规范要求。

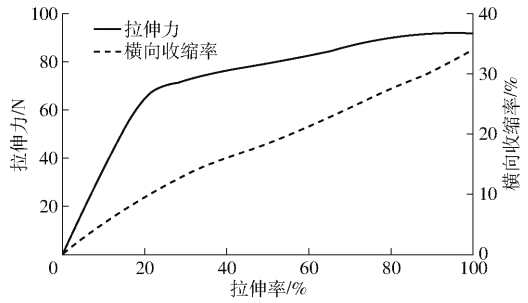


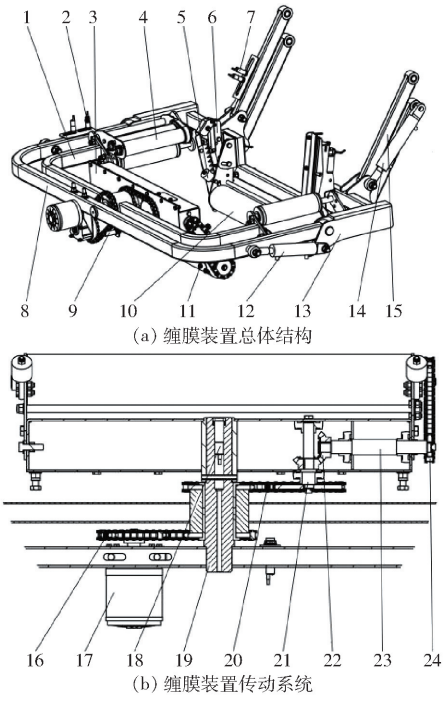

图 11 拉伸膜拉伸性能试验结果

Fig. 11 Test results of tensile properties of tensile film

### 2.5.2 缠膜装置结构及工作原理

缠膜装置主要包括升降机构、放包机构、缠膜机构和缠膜传动系统,通过平行四杆机构链接于整机机架后方,由液压油缸控制其升降。升降机构主要由缠膜前机架、平行四杆机构、升降油缸、升降传感器等组成;放包机构主要由缠膜后机架、放包油缸、放包传感器等组成;缠膜机构主要由缠膜臂、齿轮箱、导膜组件、限位轮、计数传感器、从动支撑辊、主动支撑辊、放捆传感器、缠膜臂转轴、切膜组件等组成;缠膜传动系统主要由缠膜电机、缠膜臂链传动、齿轮箱链传动、齿轮箱输入轴、锥齿轮传动、齿轮箱输出轴、支撑辊链传动等组成。缠膜装置结构如图 12 所示。

作业前,将拉伸膜卷固定在导膜组件,并将拉伸膜端部夹在切膜组件。在草捆成型后,放包油缸收缩,升降油缸也处于收缩状态,缠膜装置处于图 12a 所示状态,以便草捆顺利落到缠膜装置上。草捆落入缠膜装置后,限位轮卡在草捆两端限定其轴向移动,升降油缸伸长,缠膜装置被提升起,为缠膜臂转动留出空间;随后缠膜电机通过链传动带动缠膜臂转动,缠膜臂将动力依次输送至齿轮箱输入轴、锥齿轮传动、齿轮箱输出轴,最终带动主动支撑辊旋转和草捆自转,结合缠膜臂带动导膜组件绕草捆转动,共同完成缠膜作业。在缠膜作业进行至最后一圈时,切膜组件张开,缠膜臂继续转动至拉伸膜绕在切膜刀上,随后切膜组件闭合,拉伸膜被切断,同时将拉伸膜端部夹在切膜组件上,缠膜电机带动缠膜臂倒转返回水平状态,切膜作业完成。随后升降油缸伸长、放包油缸收缩,缠膜装置降落,机架绕铰链向上




(a) 缠膜装置总体结构

(b) 缠膜装置传动系统

图 12　缠膜装置结构示意图

Fig. 12　Structure diagrams of film-wrapping device

1. 缠膜臂　2. 放包传感器　3. 齿轮箱　4. 导膜组件　5. 限位轮　6. 切膜组件　7. 升降传感器　8. 缠膜后机架　9. 计数传感器　10. 从动支撑辊　11. 主动支撑辊　12. 放包油缸　13. 缠膜前机架　14. 升降油缸　15. 平行四杆机构　16. 缠膜臂链传动机构　17. 缠膜电机　18. 放捆传感器　19. 缠膜臂转轴　20. 齿轮箱链传动机构　21. 齿轮箱输入轴　22. 锥齿轮传动机构　23. 齿轮箱输出轴　24. 支撑辊链传动机构

转动，完成放捆动作，已缠膜的草捆被放置于田间。

### 2.5.3　缠膜装置运动分析

缠膜装置作业时，支撑辊带动草捆转动配合缠膜臂旋转完成缠膜动作，缠膜臂与支撑辊转速比决定缠膜重叠度，且与草捆规格、拉伸膜横向收缩率有关[23]。缠膜臂每旋转一周，第 2 层膜对第 1 层膜的覆盖面积需满足技术要求的缠膜重叠度，缠膜臂旋转一周时主动支撑辊转动角度为

$$\beta = \frac{B_m(1-k_s)a_d\gamma}{R_z} \tag{11}$$

式中　$\beta$——主动支撑辊转动角度，rad

$B_m$——拉伸膜宽度，mm

$k_s$——横向收缩率，%

$\gamma$——缠膜重叠度，%

$R_z$——支撑辊半径，mm

$a_d$——导膜组件数量，个

支撑辊旋转与缠膜臂围绕圆草捆旋转的转速比为

$$i_c = \frac{\beta}{2\pi} = \frac{B_m(1-k_s)a_d\gamma}{2\pi R_z} \tag{12}$$

式中　$i_c$——支撑辊与缠膜臂的转速比

缠膜重叠度 $\gamma$ 取 50%，计算得 $i_c = 0.6$。为使草捆具有更好的密封性，实际缠膜重叠度 $\gamma$ 需大于 50%，故取 $i_c = 0.55$。为防止缠膜圈数出现非整数造成缠膜不完全现象，理论计算结果需向上取整；为防止在第一圈拉伸膜出现较大的褶皱变形而影响最终的缠膜效果，缠膜臂实际转动圈数需比理论计算值多 1 圈，故缠膜臂转动圈数计算式为

$$z_b = \left\lceil \frac{z_c D'}{4R_z i_c} \right\rceil + 1 \tag{13}$$

式中　$z_b$——缠膜臂转动圈数，圈

$z_c$——缠膜层数，层

经计算，缠 2 层膜时，缠膜臂需转动 5 圈；缠 4 层膜时，缠膜臂需转动 10 圈；缠 6 层膜时，缠膜臂需转动 14 圈。

### 2.5.4　导膜组件

导膜组件在缠膜臂的带动下围绕圆草捆旋转，并为拉伸膜提供有效的拉伸力，使拉伸膜达到 50% 拉伸率，紧密缠绕在草捆外侧，完成草捆密封[24]。其主要由导膜固定板、支撑管、导膜辊连接板、转套、导膜辊固定螺栓、压膜扭簧、差速齿轮、拉伸膜卷、膜卷端盖和两规格相同的拉伸导膜辊(导膜辊Ⅰ和导膜辊Ⅱ)组成，具体结构如图 13 所示。

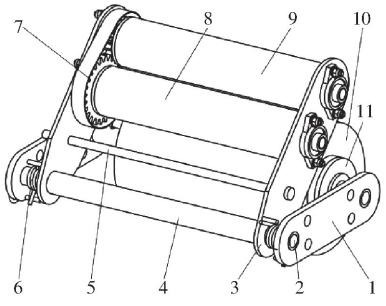



图 13　导膜组件结构示意图

Fig. 13　Schematic structure of film guiding assembly

1. 导膜固定板　2. 支撑管　3. 导膜辊连接板　4. 转套　5. 导膜辊固定螺栓　6. 压膜扭簧　7. 差速齿轮　8. 导膜辊Ⅰ　9. 导膜辊Ⅱ　10. 拉伸膜卷　11. 膜卷端盖

缠膜臂旋转将拉伸膜拉出，同时带动导膜辊Ⅱ转动，导膜辊Ⅱ通过差速齿轮带动导膜辊Ⅰ转动，当两个导膜辊与拉伸膜之间只存在静摩擦力作用，在不发生打滑现象且不考虑其他阻力作用的情况下，拉伸膜的拉伸率取决于两个导膜辊的传动比。导膜辊Ⅰ因转速低于导膜辊Ⅱ，而对拉伸膜释放产生阻碍作用，故拉伸膜实际的释放量应为导膜辊Ⅰ转过的量，而拉伸膜拉伸后的量应为导膜辊Ⅱ转过的量，由于两导膜辊直径相同，故拉伸膜拉伸率为

$$\psi = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \times 100\% = (i_d - 1) \times 100\% \tag{14}$$

式中　$\psi$——拉伸膜拉伸率，%

$n_1$——导膜辊Ⅰ转速,r/min

$n_2$——导膜辊Ⅱ转速,r/min

$i_d$——差速齿轮传动比

本设计确定拉伸膜拉伸率为 50%,代入式(14)得差速齿轮传动比 $i_d = 1.5$。

## 2.6 传动及控制系统

### 2.6.1 传动系统设计

#### 2.6.1.1 整机传动系统设计

丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机结构及功能较为复杂,故整机传动采用机械、液压与电驱动相结合的方式,机械传动主要用于捡拾、滚筒、切碎等转速恒定且运动连续的部件,或用于 2 个及 2 个以上运动状态为线性关系的运动组件;液压传动主要用于运动不连续、需配合控制系统才能实现运动的部件;电驱动主要用于功率小,机械传动无法实现的送网、切网、缠膜、切膜等运动部件。

#### 2.6.1.2 液压系统设计

为实现传动系统中液压油缸的动作,保证液压油缸作业精准可靠,且配合控制系统完成整机作业自动化控制,设计适配于丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机的独立液压系统,如图 14 所示。为保证良好的散热性能且便于维护,采用开式回路设计,齿轮泵为液压系统提供作业压力,电磁溢流阀作为安全保护阀保证系统压力不会超过设定值。电磁换向阀

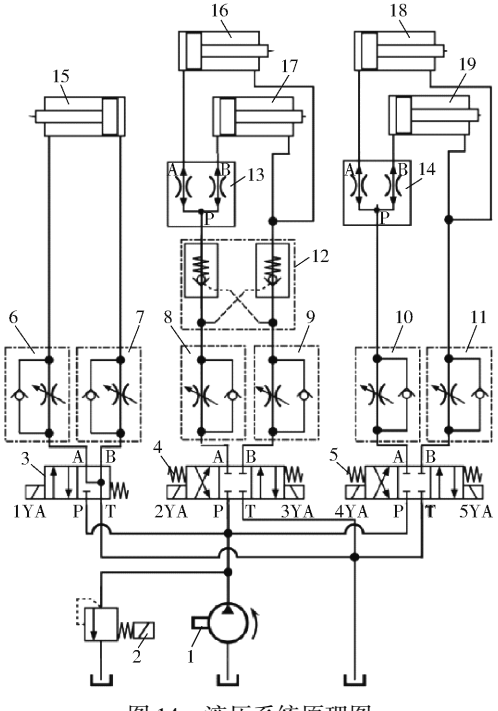



图 14 液压系统原理图

Fig. 14 Hydraulic system schematic diagram

1. 齿轮泵 2. 电磁溢流阀 3. 二位四通 Y 型电磁换向阀 4、5. 三位四通 O 型电磁换向阀 6、7、8、9、10、11. 调速阀 12. 液压锁 13、14. 同步阀 15. 开仓油缸 16、17. 升降油缸 18、19. 放包油缸

能改变液压油的流动方向,从而控制液压油缸的运动方向。为控制液压油缸的作业速度稳定,在各液压油缸进出油口设置调速阀。考虑到缠膜装置会因重力作用导致油液泄漏现象,采用液压锁避免缠膜装置下降。为保证两升降油缸和两放包油缸动作同步,在两回路中各加一同步阀,使同一组油缸运动同步。

### 2.6.2 控制系统设计

控制系统主要是控制缠网装置和缠膜装置的自动运行,根据各零部件中传感器采集的信号,结合手动开关的操作信号,由 PLC 做出相应的判断,控制传动系统中的电机和电缸以及液压系统中的电磁阀执行相应的动作[24-25]。

具体控制流程如图 15 所示,主要由 4 个模块组成:

(1)成捆检测及停机:控制系统调至“自动”挡,拖拉机前进开始作业,捡拾装置不断将苜蓿捡起并向后输送,经切碎装置切碎后喂入打捆室,草捆卷成型后,满量传感器被激活,控制器输出鸣笛、送网和落平信号,驾驶员在鸣笛时停止整机前进。

(2)送网及缠网:送网电机带动主动送网辊送网,丝网被卷入打捆室后,送网电机停止,进入缠网阶段。当缠网层数达到设定值时,切网电缸伸出切断丝网,切网电机收缩并归位切网刀,缠网作业完成。同时,放包油缸收缩,放平缠膜装置后机架,等待完成缠网的草捆落入缠膜装置。

(3)放捆及整机前进:控制器发出开仓指令,开仓电磁阀得电,开仓油缸打开打捆装置后仓,草捆掉落至缠膜装置,放捆传感器激活,控制器控制开仓电磁阀失电,后仓关闭,整机前进开始下一个打捆作业。同时,控制器发出提升信号,升降油缸提升缠膜装置。

(4)缠膜及放包:缠膜装置提升到位后,提升传感器被激活,控制器发出提升停止与缠膜信号,升降油缸停止运行,缠膜电机带动缠膜臂做旋转运动,带动支撑辊使草捆转动开始缠网。当缠膜圈数达到设定值时,切膜电缸先收缩后伸出,使切膜装置迅速张开后闭合,释放拉伸膜端部,避免拉伸膜端部固定导致草捆旋转打滑。当缠膜圈数达到预设值前一圈时,切膜电缸收缩,切膜刀张开,当缠膜圈数达到预设值时,切膜电缸伸出,切膜刀闭合,完成切膜动作。同时控制器发出回位信号,缠膜电机带动缠膜臂做反向旋转运动,回正传感器被激活,缠膜电机停止,完成缠膜作业。同时升降油缸收缩,带动缠膜装置下降,降落传感器被激活,控制器发出降落停止与放

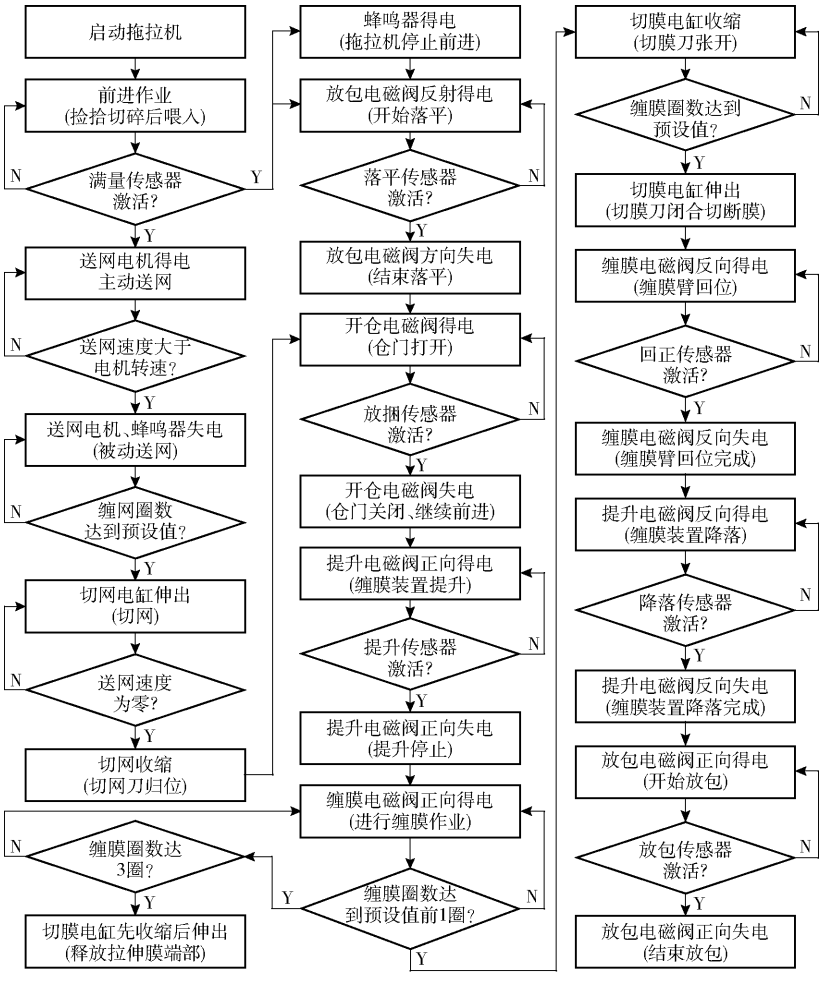



图 15　控制流程图

Fig. 15　Control flowchart

包信号,放包油缸伸长,折叠并收起缠膜装置后机架,草捆输出。

## 3　田间试验

### 3.1　试验条件

试验于 2024 年 7 月在甘肃省兰州市皋兰县西岔镇进行。在起伏坡度为 0° ~ 15°的丘陵山区第 2 茬紫花苜蓿地进行,试验现场如图 16 所示。根据苜蓿青贮要求,刈割压扁后的苜蓿在田间晾晒至含水率为 40% ~45%,铺条堆积密度约 1.5 kg/m。根据农艺技术要求,前序收割作业对苜蓿进行均匀连续铺条,拖拉机前进速度为 1.3 ~ 1.4 m/s。试验设备及仪器主要有丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机样机、TJSD - 750 - II 型土壤坚实度仪、电子秤和干燥箱等。

### 3.2　试验方法

丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机样机由拖拉机牵引,保持恒定的前进速度进行苜蓿捡拾打捆裹包试验。根据 GB/T 14290—2021《圆草捆打捆机》、GB/T 37924—2019《圆草捆缠膜机》和 JB/T 5160—2010《牧草捡拾器》等标准,结合前文设计要求,对丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机的切碎长度、成捆密度、缠膜重叠度、缠膜层数、性能稳定性、损失率和纯工作小时生产率等性能指标进行测定。



图 16　田间性能试验

Fig. 16　Field performance test

### 3.3　试验结果及分析

#### 3.3.1　性能试验结果及分析

样机调试稳定后,连续进行 60 次捡拾打捆裹包试验。根据性能测定方法对各项性能指标进行测定,并按测定方法求取试验值,结果如表 2 所示。由表 2 可知,各项试验指标均满足相关要求。其中,实际成捆密度为 566.02 kg/m$^3$,总损失率为 3.67%,满足相关技术要求[26]。

表 2 性能试验结果

Tab. 2 Performance test results

| 参数 | | 试验值 | 技术标准值 |
|---|---|---|---|
| 切碎长度/mm | | 6.2 | ≤7 |
| 成捆密度/(kg·m$^{-3}$) | | 566.02 | ≥550 |
| 缠膜重叠度/% | | 53.1 | ≥50 |
| 缠膜层数/层 | | 4、6、8(可调) | ≥3 |
| 纯工作小时生产率/(包·h$^{-1}$) | | 60 | |
| 适应坡度范围/(°) | | 0~15 | |
| 损失率 | 总损失率/% | 3.67 | ≤4 |
| | 捡拾损失率/% | 1.18 | |
| | 成捆损失率/% | 2.49 | |
| 性能稳定性 | 成捆率/% | 100 | ≥99 |
| | 成包率/% | 100 | ≥99 |

### 3.3.2 草捆紧实度分析

打捆完成后,采用土壤坚实度测量仪对草捆内部不同位置的紧实度进行测量,做等高线图如图 17 所示。草捆内部紧实度在草捆径向呈现较为明显的中间低边缘高的分布状态,因先喂入打捆室的苜蓿处于自然蓬松状态,直至形成草芯后,喂入的苜蓿被均匀缠绕在草芯外侧并逐层压实,且滚筒压力逐渐增加,越靠近草捆外侧的苜蓿受到的压力更大,草层更紧实;捡拾的草条呈中间多两侧少的分布状态,故草捆紧实度沿轴向呈现较为明显的中间高边缘低的分布状态。

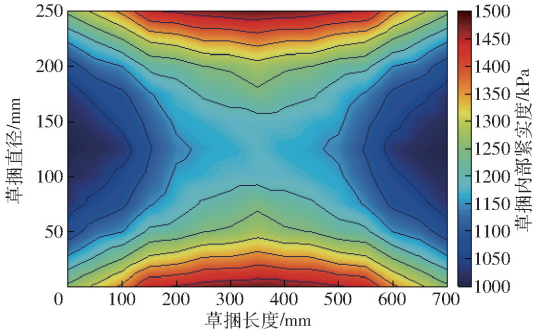



图 17 草捆内部压力分布图

Fig. 17 Distribution diagram of bale internal pressure

## 4 结论

(1)设计了一种适用于丘陵山区的苜蓿捡拾打捆裹包一体机,能够一次性完成捡拾、切碎、打捆、缠网与缠膜作业。

(2)以摆动滚子推杆盘形凸轮机构为关键部件的捡拾装置,捡拾幅宽 0.7 m、弹齿间距 58 mm、转速 124 r/min,能够确保苜蓿草条被高效、连续地拾取并输送至切碎装置;切碎装置采用“人”字形断续螺旋喂料方式,动刀结合定刀的切碎机构,完成苜蓿的切碎和强制喂入;打捆装置主要由开仓油缸、滚筒、间隙传感装置和前、后仓机架组成,10 个滚筒按涡状线排列组成的打捆室将喂入的苜蓿卷制成圆柱形草捆。

(3)缠网装置具有送网、切网与检测等功能,摩擦限矩组件为丝网提供拉伸力;缠膜装置具有缠膜、切膜与放包等功能,支撑辊与缠膜臂的转速比为 0.55,导膜组件差速齿轮传动比为 1.5;传动系统采用机械、液压和电驱动相结合的综合传动方案,控制系统采用 PLC 原理,通过光电开关等检测元件采集信号,由液压电磁阀、电机及电缸执行动作,实现自动化作业。

(4)田间试验表明,各项试验指标均满足相关标准要求,实际成捆密度为 566.02 kg/m$^3$,总损失率为 3.67%,草捆内部紧实度在草捆径向呈中间低边缘高的分布状态。

## 参 考 文 献

[1] 乔治豪, 陈哲, 王鸣潮, 等. 苜蓿的营养价值及在饼干加工中的应用研究[J]. 农产品加工, 2024(17): 120-124.
QIAO Zhihao, CHEN Zhe, WANG Mingchao, et al. Nutritive value of alfalfa and application in biscuit processing [J]. Farm Products Processing, 2024(17): 120-124. (in Chinese)

[2] 哈丽代·热合木江,王加亭,郭江鹏,等. 盐碱地苜蓿饲料特性及在牛羊饲粮中的应用[J]. 草业科学,2025,42(3):795-810.
HALIDAI Rehemujiang, WANG Jiating, GUO Jiangpeng, et al. Characteristics of alfalfa grown in saline-alkali land and its utilization in the diet of ruminants [J]. Pratacultural Science, 2025, 42(3): 795-810. (in Chinese)

[3] 乌日拉嘎. 苜蓿不同品种生产性能及品质比较研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
WURILAGA. Comparative study on the production performance and quality of different alfalfa varieties [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[4] 聂正英, 王娟, 高月红, 等. 浅析中外苜蓿产业及标准化现状[J]. 中国标准化, 2024(18): 72-76,81.
NIE Zhengying, WANG Juan, GAO Yuehong, et al. Analysis of the alfalfa industry and standardization status at home and abroad [J]. China Standardization, 2024(18): 72-76,81. (in Chinese)

[5] 王瑞港, 徐伟平. 我国苜蓿产业发展特征与趋势分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(12): 7-12.
WANG Ruigang, XU Weiping. Development characteristics and trend of alfalfa industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021,23(12):7-12. (in Chinese)

[6] 罗丹琦. 甘肃省苜蓿种植企业的生产效率和生态效率研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
LUO Danqi. A study on production efficiency and eco-efficiency of alfalfa planting enterprises in Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023. (in Chinese)

[7] 杨金龙, 张克平, 王久鑫, 等. 丘陵山地悬挂折叠式割草压扁机设计与试验[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(6):

1543 – 1558.
YANG Jinlong, ZHANG Keping, WANG Jiuxin, et al. Design and experiment of folding mowing and flattening machine working in hilly and mountainous areas [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(6): 1543 – 1558. (in Chinese)
[8] 李智燕, 王延, 王汝富, 等. 甘肃中东部地区山地苜蓿机械化收获现状及建议[J]. 甘肃畜牧兽医, 2020, 50(11): 16 – 18.
[9] MICHAL Z, MATEUSZ N, JAROSLAW M, et al. Control and measurement systems supporting the production of haylage in baler-wrapper machines[J]. Sensors, 2023, 23(6): 2992.
[10] SHINNERS K J, HUENINK B M, MUCK R E, et al. Storage characteristics of large round and square alfalfa bales: dry hay [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(409 – 418): 409 – 418.
[11] 高东明, 王德成, 王光辉, 等. 圆草捆自动缠网装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 99 – 104.
GAO Dongming, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Self-wrapping net mechanism for round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 99 – 104. (in Chinese)
[12] 曹珣. 钢辊式圆捆机芯捆成型过程分析与试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
CAO Xun. Analysis and experimental study on the baling process of the steel-roll round baler [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[13] 杨然兵, 王政增, 尚书旗, 等. 花生联合收获青贮机秧捆包膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 109 – 117.
YANG Ranbing, WANG Zhengzeng, SHANG Shuqi, et al. Design and test of straw coating device for peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 109 – 117. (in Chinese)
[14] WANG J, LI X, HUANG W, et al. Mathematical model for bale-density prediction in large steel roller-type round balers during bale rolling[J]. Bioresource Technology, 2024, 396:130445.
[15] 王文明, 王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 82 – 89.
WANG Wenming, WANG Chunguang. Parameter analysis and simulation of spring-finger cylinder pickup collector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 82 – 89. (in Chinese)
[16] 成铖. 自走式捡拾、高留茬切割装置的设计与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
CHENG Cheng. Design and experiment of self-propelled pickup, high stubble cutting device [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
[17] 王莹. 新型弹齿式玉米秸秆捡拾装置与国内外同类技术对比分析报告[J]. 农村牧区机械化, 2016(4): 34 – 35.
[18] 李普, 张云, 季邦, 等. 打捆机旋转切割喂入装置设计研究与优化[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 9 – 13,52.
LI Pu, ZHANG Yun, JI Bang, et al. Design and optimization of rotary cutting feeding device for baler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 9 – 13,52. (in Chinese)
[19] 徐易恒, 张亚振, 王家忠, 等. 苜蓿打捆机捡拾喂入机构设计[J]. 江苏农机化,2018(5): 26 – 30.
[20] 王春光, 敖恩查, 邢冀辉, 等. 钢辊外卷式圆捆打捆机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊1): 103 – 106,102.
WANG Chunguang, AO Encha, XING Jihui, et al. Design and experiment on round baler with revolute steel roller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp. 1): 103 – 106,102. (in Chinese)
[21] 安晶, 张克平, 李晓康, 等. 丘陵山地小型圆捆机自动缠网装置设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(2): 61 – 69.
AN Jing, ZHANG Keping, LI Xiaokang, et al. Design and test of automatic net-wrapping mechanism for small round baler in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 61 – 69. (in Chinese)
[22] 杨星. 转臂式圆草捆包膜机的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
YANG Xing. Design and experimental of jib type coated machine for round bale [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[23] 宋育国. 转臂式圆草捆包膜机试验[J]. 现代农业科技, 2018(4): 144 – 145.
[24] 张艺. 基于 PLC 的圆捆机试验台控制监测系统设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
ZHANG Yi. Design of control and monitoring system for round baler test bench based on PLC[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[25] 刘旋. 基于 PLC 的牧草打捆机控制系统设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
LIU Xuan. Design of control system forage baling machine based on PLC[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[26] 张艳宜, 王季, 李晓康, 等. 紫花苜蓿拉伸膜裹包青贮饲料制作技术要点[C]//第六届中国苜蓿发展大会暨国际苜蓿会议, 2015: 212 – 216.