DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.02.007

丘陵山地小型圆捆机自动缠网装置设计与试验

安晶[1]，张克平[1*]，李晓康[2]，杨智凯[1]

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

摘要：随着农业科技发展，农作物秸秆利用更加多元化，其需求量也随之增加。为解决丘陵山地小型圆捆机存在的草捆易散落、缠网层数不可调、自动化程度低等缺点，对圆捆机的缠网装置进行了模块化设计，包括送网机构、切网机构、检测机构以及控制电路的设计，对送网机构进行了力学分析，加工制造样机并完成试验验证。该装置通过检测机构检测运行参数，经控制器处理后向送网机构和切网机构发出相应的执行指令，从而实现了送网、缠网和切网的自动化作业，并实现了缠网层数可调。在缠网时，其摩擦限矩组件对丝网施加拉力，使丝网缠绕更加紧实，经力学分析得出丝网拉力大小取决于压紧弹簧弹力，可通过调节压紧弹簧改变丝网拉力大小，并提供了相应的调节方法。性能试验结果表明：该装置性能稳定，工作可靠，可对Φ 500 mm×700 mm的干草捆进行自动缠网作业，丝网布满草捆侧面，无漏缠现象；在缠网层数为3层时，缠网成功率为95%，抗摔率为83.3%；在缠网层数为4层时，缠网成功率为100%，抗摔率为90%；在缠网层数为5层时，缠网成功率和草捆抗摔率均为100%。设计了一种丘陵山地小型圆捆机自动缠网装置，经试验验证，作业机性能稳定可靠，满足设计要求。在缠网层数为3层时，平地作业性价比最高，丘陵山地作业时，需根据作业坡度，调至4～5层。

关键词：丘陵山地；圆捆机；缠网装置；自动控制；摩擦限矩

中图分类号：S225.8；S817.11+5　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-7217(2024)02-0061-09

安晶，张克平，李晓康，杨智凯. 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, YANG Zhikai. 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

0 引言

我国是农业大国，每年都有大量农作物秸秆产生，据中国科学院地理科学与资源研究所二级研究员董锁成向中国经济时报记者展示的数据，目前，农作物秸秆总量约7.9×10^5 kt。据统计，2021年全国农作物秸秆综合利用量为6.47×10^5 kt，利用率为88.1%，利用方式主要分为肥料化、饲料化、燃料化、原料化和基料化，分别占比7.8%，76.9%，8.9%，2.6%，3.8%[1]。近年来，随着农业科技发展，农作物秸秆的利用方式也更加多元化，如：压缩制粒、制备木塑复合材料等，随着相关技术的推广，秸秆的需求量随之增大，而我国丘陵山区的秸秆田间机械化收集难度较大，尚未普及[2-3]。

圆捆机是收集田间秸秆的重要机具，可将铺放在田间的秸秆捡起并压成圆柱形草捆。其中草捆捆扎装置是圆捆机的关键部件之一，主要有扎绳装置和缠网装置两种。相比之下，缠网装置耗时更短，捆扎更牢固[4]。在丘陵山地作业时，草捆输出后会随地形向低处滚动，滚动过程中草捆散落的概率也随之增大，故捆扎更牢固的缠网装置更适合丘陵山地小型圆捆机。

目前，国外对相关技术的研究主要集中在两个方面：(1) 提高自动化水平，ZAWADA等[5]创建了自动化程度较高的打捆机控制系统；(2) 研究机器作业效果，SHINNERS等[6]研究得出：与扎绳相比，缠网青贮草捆在外层的养分保留率更好；TAYLOR等[7]证明了在恶劣天气条件下，缠网草捆风化损失更少。国内干草圆草捆捆扎主要采用扎绳装置，青贮圆草捆捆扎主要采用缠网装置[8-10]，王德福等[11]对捆绳机构进行了优化，高东明等[12]设计了一种适用于中大型圆捆机的自动缠网装置。

本文针对丘陵山地小型圆捆机存在的草捆易散落、缠网层数不可调、自动化程度低等缺点，设计一种

收稿日期：2024-04-01　　修回日期：2024-04-30

基金项目：甘肃省科技重大专项计划项目(23ZDNA004)；甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-29)

第一作者：安晶，男，2000年生，甘肃渭源人，硕士研究生；研究方向为农业机械化工程。E-mail：anjng312@163.com

*通信作者：张克平，男，1981年生，甘肃陇西人，博士，教授；研究方向为饲草机械及生物质复合材料。E-mail：zhangkp@gsau.edu.cn

丘陵山地小型圆捆机自动缠网装置。

1 总体设计

1.1 总体设计要求

自动缠网装置需要在草捆成型后,将丝网送入打捆室内,随着草捆的旋转,丝网被卷入打捆室,缠绕在草捆外,最后切断丝网。草捆输出后,在丝网的包裹下不会散落。其具体设计要求为:

1) 丝网必须布满整个草捆圆柱表面,不能漏缠[13]。

2) 在丝网被卷入打捆室后,需要给丝网施加一定阻力,使丝网缠绕更加紧实[14]。

3) 需实现缠网层数可调,可根据不同作业要求和作业环境选择不同的缠网层数;

4) 需实现全过程自动控制。

1.2 自动缠网装置构成

根据设计要求,该装置需包含检测机构、控制电路、送网机构和切网机构。检测机构检测运行参数,控制电路用来接收信号并控制送网机构和切网机构运行,各个机构共同协作完成缠网作业。功能框图如图1所示。

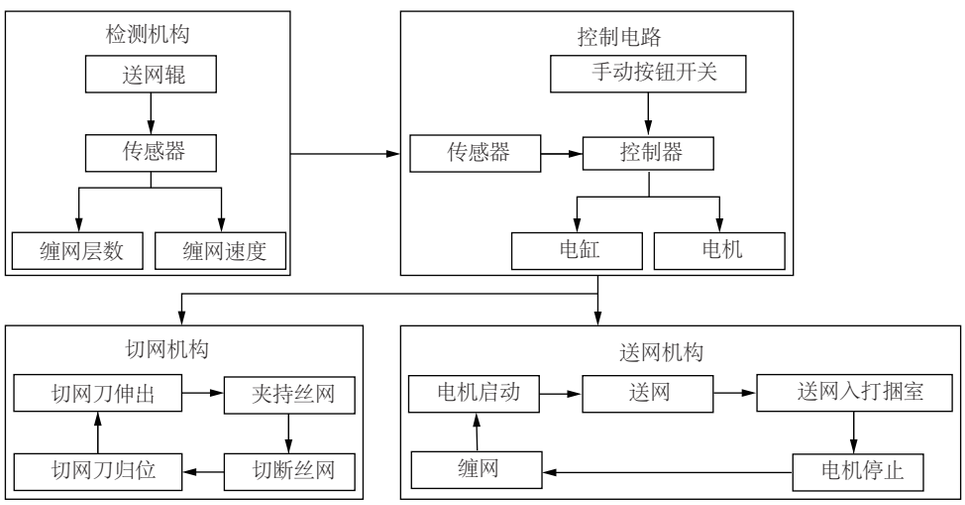


图1 自动缠网装置功能框图

Figure 1 Functional block diagram of automatic net-wrapping mechanism

1.3 整机结构及工作原理

自动缠网装置包含送网机构、切网机构、检测机构和控制电路,其结构如图2所示。其中,送网机构由摩擦限矩组件、主动送网辊、从动送网辊、机架和压簧组成;切网机构由压网橡胶条、刀杆、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。

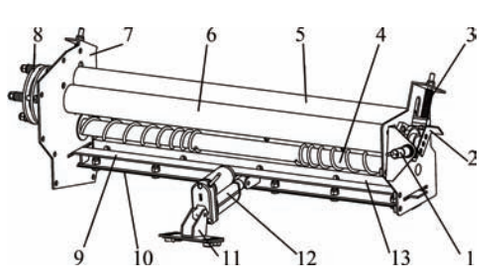


图2 自动缠网装置结构示意图

Figure 2 Structure diagram of automatic net-wrapping mechanism

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

由图2可知,主动送网辊安装在机架上,一端连接摩擦限矩组件,在送网阶段为主动送网辊提供动力,在缠网阶段为主动送网辊施加阻力,最终转换为送网辊对丝网的拉力;从动送网辊安装在机架滑槽内,通过压簧向从动送网辊施加压力,使丝网被紧紧夹持在两送网辊之间。

数据检测板连接在主动送网辊另一端,接近开关安装在数据检测板一旁,数据检测板随主动送网辊每旋转一圈,接近开关通电一次,并将电信号传输至控制电路。

展网辊安装在送网辊下方,展网辊两端设有螺旋钢条,在丝网被卷入打捆室内后,展网辊被丝网带动旋转,螺旋钢条将丝网向外侧输送,将丝网展开,使丝网布满整个草捆侧面。

刀杆两端安装在机架滑槽内,切网刀安装在其下方,压网橡胶条安装在刀杆前方机架上,用于夹持丝网;电缸固定架固定在打捆机机架上,切网电缸一端与电缸固定架连接,一端与刀杆连接,控制刀杆前后移动。装置作业过程如图3所示。

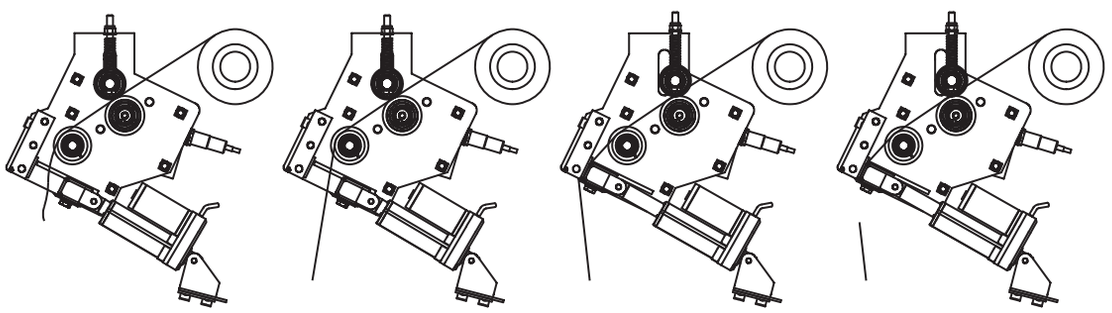
作业前,将从动送网辊抬起,将丝网端部从两送网辊之间穿出,绕过展网辊,放在刀杆与压网橡胶条之间,最后放下从动送网辊,将丝网夹紧。装置作业过程

分为送网、缠网和切网3个阶段。

1）送网阶段如图3(a)所示：随着主动送网辊旋转，丝网被不断送入打捆室内，直至丝网被卷入打捆室。

2）缠网阶段如图3(b)所示：送网电机停止，摩擦限矩组件被固定；丝网被不断卷入打捆室，送网辊与展网辊被丝网拉动旋转。

3）切网阶段如图3(c)所示：切网电缸伸出，丝网被刀杆向前推进，夹持在刀杆与压网橡胶条之间，此时，丝网与切网刀片接触，接触位置上方丝网被夹持固定，下方丝网受到草捆的拉力，在拉力的作用下丝网被切断，如图3(d)所示；丝网切断后，切网电缸收缩，切网刀归位。



(a) 送网　(b) 缠网　(c) 切网　(d) 切断

图3　自动缠网装置作业过程

Figure 3　Automatic net-wrapping mechanism operation process

1.4　技术参数

本文设计的丘陵山地小型圆捆机自动缠网装置技术参数如表1所示。

表1　自动缠网装置技术参数

Table 1　Technical parameters of automatic winding device

项目	参数
适用草捆长度/mm	700
缠网层数/层	2～8层(可调)
送网速度/(m·s^{-1})	0.25
驱动方式	电动
所需功率/W	300
质量/kg	22

1.5　控制系统与信号处理

1.5.1　控制系统设计

控制系统以PLC作为控制器，光电接近开关作为检测元件，送网电机、切网电缸和蜂鸣器作为执行元件[15-16]，并且可通过手动开关实现手动控制，通过选择开关调节缠网层数。具体控制结构如图4所示。

其中，由于拖拉机自带12 V直流电源，故PLC选用西门子S7－200smart ST20 PLC，晶体管型，输入电压24 V，输入点位12个，输出点位8个；光电接近开关选用温州龙璞电气有限公司的E3F－DS5P1型光电开关，PNP常开，检测距离1～5 cm；电机选用森邦12－600直流电机，电压12 V，功率600 W，转速100 r/min；电缸选用普菲德直流电动推杆，电压为12 V，行程为50 mm，速度45 mm/s，最大推力200 N；其余元器件均为常用元件。

作业时，由手动开关、光电接近开关和选择开关将信号传入PLC，经PLC处理后将信号输出至继电器，从而控制执行元件动作，完成缠网作业，具体控制流程如图5所示。

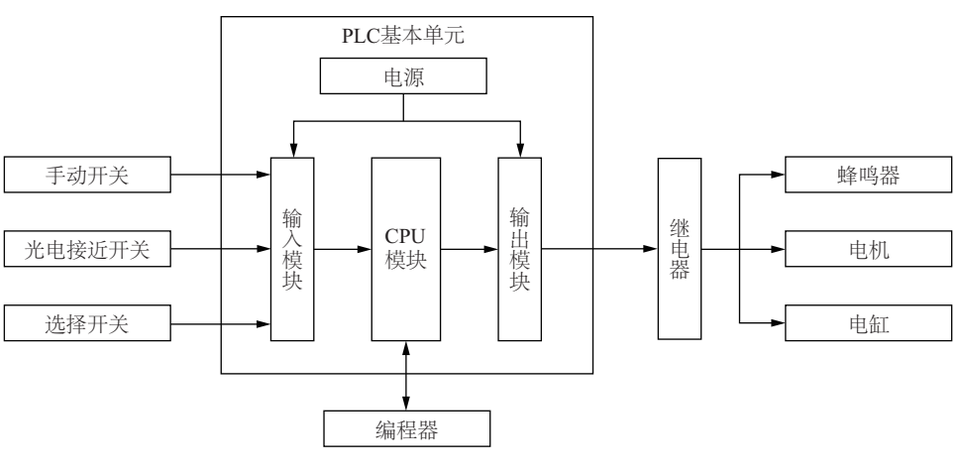


图4　自动缠网装置控制结构图

Figure 4　Control structure chart of automatic net-wrapping mechanism

作业时,随着拖拉机带动圆捆机前进,秸秆被捡拾器捡起并输送至打捆室,当打捆室内草捆成型完成时,满量传感器被激活,控制器输出鸣笛和送网信号,蜂鸣器鸣笛,提示驾驶员停止前进,送网电机带动主动送网辊送网;当丝网被卷入打捆室时,停止送网电机,进入缠网阶段;当缠网层数达到设定值时,切网电缸伸出,进行切网,丝网被切断后,切网电缸收缩,切网刀归位,完成缠网作业。

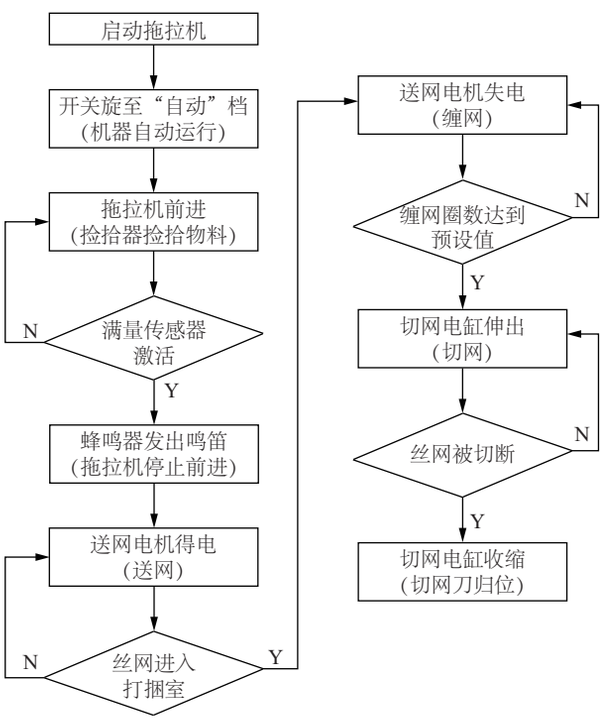


图5 自动缠网装置控制流程图

Figure 5 Control flow chart of automatic net-wrapping mechanism

1.5.2 信号处理

本文共用两个传感器作为检测元件,其中,满量传感器检测打捆室内草捆紧实度是否达到预设值[17-18],是圆捆机本身已有的传感器,只需接入控制电路即可;为降低成本,用一个光电接近开关同时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数据。检测机构工作时,数据检测板随送网辊每转一圈,光电接近开关被激活一次,并不能直接测定上述数据,故需将接近开关电信号进行相应转换,具体方法如下:

1)判断丝网是否被卷入打捆室。在送网阶段,丝网速度等于送网速度(主动送网辊在电机带动下的线速度),在缠网阶段,丝网速度等于草捆线速度。由于草捆线速度大于送网速度,因此,当丝网被卷入打捆室后,丝网的速度会增大,故当丝网速度大于送网速度时,即可判定,丝网已被卷入打捆室内。丝网运动分析如图6所示。

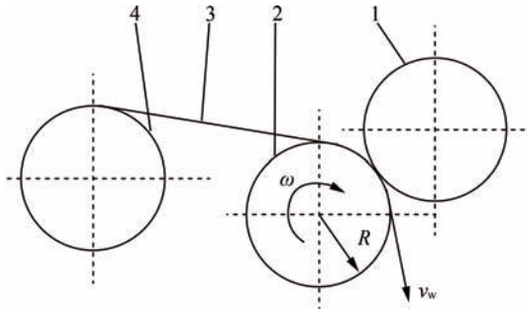


图6 丝网运动分析图

Figure 6 Motion analysis diagram of net

1. 从动送网辊 2. 主动送网辊 3. 丝网 4. 丝网辊

由图6可知,由于丝网被夹持在主动送网辊和从动送网辊之间,故丝网速度等于主动送网辊线速度,即

$$v_w = \omega R \tag{1}$$

其中:$\omega = \dfrac{\Delta\theta}{\Delta t}$

式中:v_w——丝网速度,m/s;

ω——主动送网辊角速度,rad/s;

R——主动送网辊半径,m。

根据式(1)可知,丝网速度增大时,主动送网辊角速度也随之增大,因此主动送网辊旋转一周所需的时间将减小。故当主动送网辊旋转一周所用时间小于其在送网阶段旋转一周所用时间时,证明丝网已被卷入打捆室内。即

$$\Delta t_1 < \Delta t_2 = \frac{60}{n} \tag{2}$$

式中:Δt_1——主动送网辊旋转一周所用时间,s;

Δt_2——主动送网辊在送网阶段旋转一周所用时间,s;

n——送网电机转速,r/min。

本文所用电机转速n=100 r/min,带入式(2)计算得,Δt_2=0.6 s。在送网开始后,数据检测板随主动送网辊转动,光电接近开关被间歇性激活,PLC控制器通过计算光电开关从断开到激活的时间间隔,即主动送网辊旋转一周所用时间Δt_1,当$\Delta t_1 < \Delta t_2$时,PLC控制器判定丝网已卷入打捆室。

2)判断丝网是否被切断。当丝网被切断时,主动送网辊停止旋转,光电接近开关长时间处于激活或断开状态。由于送网和缠网过程中,主动送网辊旋转一周所用时间$\Delta t_1 \leqslant 0.6$ s,故本文确定在切网刀伸出后,光电接近开关处于激活或断开状态时间持续达到1 s时,即可判定已丝网被切断。

3)判断缠网层数是否达到设定值。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

$$N_1\pi D = N_2\pi d \tag{3}$$

式中：N_1——缠网层数；

N_2——主动送网辊旋转圈数；

d——主动送网辊直径，mm；

D——草捆直径，mm。

化简得

$$N_2 = \frac{D}{d}N_1 \tag{4}$$

将缠网层数 N_1 输入至 PLC 控制器，PLC 通过式(4)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 次时，即可判定缠网层数已达到设定值。

2　关键部件设计

2.1　送网辊设计

主动送网辊由驱动轴、主动送网滚筒、橡胶管和从动轴组成，具体结构如图 7 所示。

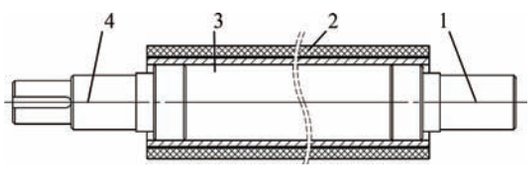


图 7　主动送网辊结构示意图

Figure 7　Structure diagram of active net roller

1. 从动轴　2. 橡胶管　3. 主动送网滚筒　4. 驱动轴

主体采用空心设计，由两根半轴和一个空心管焊接而成，可以减轻主动送网辊重量；在主体外侧加装一根橡胶管，增加丝网与主动送网辊之间的摩擦力，以便更好地夹持丝网，避免打滑影响检测数据。

从动送网辊主要由从动送网辊轴、从动送网滚筒和轴承组成。具体结构如图 8 所示。

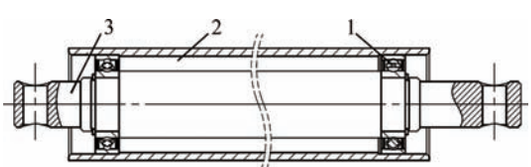


图 8　从动送网辊结构示意图

Figure 8　Structure diagram of driven net roller

1. 轴承　2. 从动送网滚筒　3. 从动送网辊轴

从动送网滚筒通过轴承连接在从动送网辊轴上，在压簧的作用下，从动送网滚筒与主动送网辊紧密贴合，工作时随着主动送网辊转动。

本文所设计的缠网装置配套于草捆尺寸为 Φ 500 mm×700 mm 的小型圆捆机，选用 700 mm 丝网，故两送网辊的长度为 700 mm，送网辊直径 d 取为 50 mm。

2.2　摩擦限矩组件设计

摩擦限矩组件由预紧螺栓、压紧弹簧、摩擦垫、驱动链轮、摩擦片、滑动轴承和驱动盘组成，具体结构如图 9 所示。

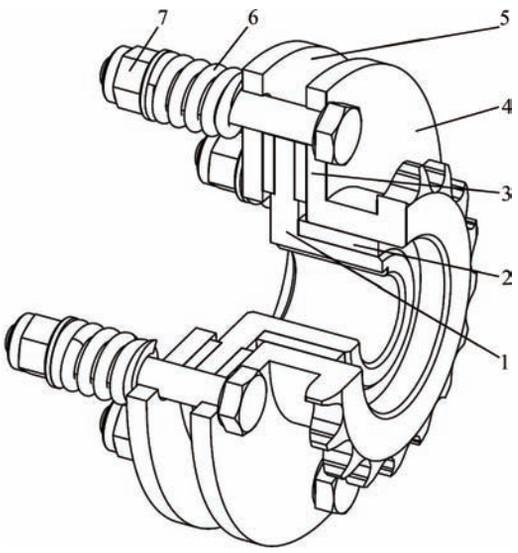


图 9　摩擦限矩组件结构示意图

Figure 9　Structure diagram of friction torque limiting component

1. 驱动盘　2. 滑动轴承　3. 摩擦片　4. 驱动链轮　5. 摩擦垫　6. 压紧弹簧　7. 预紧螺栓

驱动盘通过滑动轴承以转动副形式与驱动链轮连接[19]，两片摩擦片分别被摩擦垫和驱动链轮夹在驱动盘两侧，预紧螺栓将压紧弹簧、摩擦垫和驱动链轮固定在一起。作业时，驱动盘固定在主动送网辊端部，驱动链轮通过链传动与送网电机相连。在送网阶段，送网电机带动驱动链轮旋转，驱动盘依靠摩擦片的摩擦力矩随驱动链轮旋转；在缠网阶段，送网电机停止，驱动链轮被固定，主动送网辊被丝网带动旋转，驱动盘也随之旋转，此时驱动盘受到摩擦片的摩擦力矩，最终转化为对丝网的拉力，使丝网缠绕得更加紧实。

为减小组件体积，本文选用摩擦片尺寸(内径×外径×厚度)为：50 mm×80 mm×3 mm，摩擦垫需与摩擦片侧面完全接触并留出螺栓孔位置，故取摩擦垫内径为 45 mm，外径为 110 mm，摩擦垫周边均匀布置 4 组预紧螺栓和压紧弹簧，将摩擦片夹紧，组件整体尺寸为 Φ 110 mm×75 mm。

缠网时，为减小主动送网辊外侧橡胶磨损，需保证丝网与主动送网辊间无相对滑动，即打捆室内对丝网产生的拉力小于丝网与主动送网辊间的最大静摩擦力。在此条件下，分析主动送网辊受力情况，如图 10 所示。

根据设计要求，在送网时，驱动链轮需要依靠摩擦片与驱动盘间的摩擦力矩驱动主动送网辊，故摩擦片与驱动盘间的摩擦力矩需大于驱动主动送网辊转动所需最小扭矩，并通过受力分析可得：

$$M_f = F_1 R > T_q \tag{5}$$

式中:T_q——驱动主动送网辊所需最小扭矩,Nm;

M_f——驱动盘与两摩擦片间相对转动时的摩擦力矩,Nm;

F_1——丝网对主动送网辊产生的拉力,N。

取摩擦片外径和内径中间位置为摩擦力臂长度,可得

$$M_f = 2f \times \frac{D' + d'}{2\,000} \tag{6}$$

式中:f——摩擦片与驱动盘间的滑动摩擦力,N;

D'——摩擦片外径,mm;

d'——摩擦片内径,mm。

摩擦片与驱动盘间的滑动摩擦力

$$f = \mu F_N \tag{7}$$

式中:μ——摩擦片与驱动盘间的动摩擦系数;

F_N——摩擦片与驱动盘间的正压力,N。

在组件中,摩擦片与驱动盘间的正压力F_N来源于4个弹簧向其施加的弹力,即

$$F_N = 4F_t = 4kx \tag{8}$$

式中:F_t——弹簧弹力,N;

k——弹簧劲度系数,N/mm;

x——弹簧压缩量,mm。

根据牛顿第三定律,可得

$$F_1' = F_1 \tag{9}$$

式中:F_1'——主动送网辊对丝网产生的拉力,N。

化简后得:

$$F_1' = \mu kx \frac{D' + d'}{250R}, \left(x > \frac{250T_q}{\mu k\left(D' + d'\right)}\right) \tag{10}$$

式中:μ, k, D', d'——常数。

故令$a = \dfrac{\mu k\left(D' + d'\right)}{250}$,化简式(10)得

$$F_1' = \frac{ax}{R}, \left(x > \frac{T_q}{a}\right) \tag{11}$$

由式(11)可知,丝网拉力大小与弹簧压缩量成正比,可通过调节弹簧压缩量调整丝网拉力,调节方法如下。

1) 确定弹簧调整范围下限:将丝网夹持在两送网辊之间,调试无误后,不断增加弹簧压缩量,手动转动摩擦限矩组件,在组件恰好可以带动送网辊送网时,测量当前弹簧压缩量,即弹簧调整范围下限。

2) 确定弹簧调整范围上限:固定驱动链轮,将丝网从缠网装置下方拉出,不断压缩弹簧,手动拉动丝网,在丝网与主动送网辊间产生相对滑动时,测量当前弹簧压缩量,即弹簧调整范围上限。

3) 调节弹簧压缩量:在已确定的弹簧弹力调节范围内,按作业要求调整至所需位置,进行打捆缠网作业。

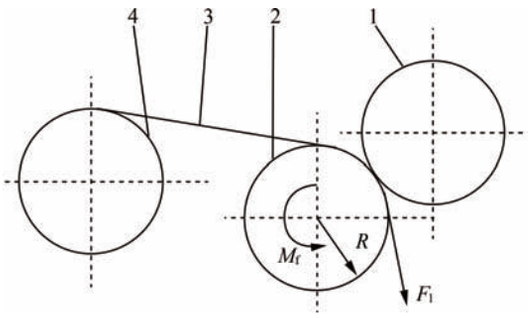


图10 主动送网辊受力分析图

Figure 10 Force analysis diagram of active feed roller

1. 从动送网辊 2. 主动送网辊 3. 丝网 4. 丝网辊

3 性能试验

3.1 试验材料与仪器

自动缠网装置试验于2024年在甘肃省兰州市甘肃农业大学旱作农业装备工程实验室进行。打捆农业物料为干冬小麦秸秆,含水率3.7%,丝网材料为700 mm宽打捆专用丝网。根据农艺技术要求,先对小麦秸秆进行均匀连续铺条,并将自动缠网装置安装于圆捆机上。

3.2 试验方法

依照样机预期实现的设计功能,结合国家行业标准GB/T 14290−2021《圆草捆打捆机》规定的试验方法进行性能试验[20]。试验选取缠网层数为试验因素,缠网成功率和草捆抗摔率为测试指标,同时观察送网机构、切网机构和展网辊等结构的工作运转情况及装置稳定性[21-22]。

对样机进行调试,空转运转正常后,开始性能试验测定,对Φ 500 mm×700 mm的圆草捆进行试验。通过更改缠网层数,以1层为单位由少至多递增,取4组不同的缠网层圈数试验,4组缠网层数分别为2、3、4、5层。统计不同缠网层数下的缠网个数和缠网失败个数(包括操作和机械本身原因),并根据公式(12)计算得到缠网成功率。

$$S_s = \frac{I_c - I_f}{I_c} \times 100\% \tag{12}$$

式中:S_s——缠网成功率,%;

I_c——缠网个数,捆;

I_f——缠网失败个数,捆。

随机选取若干缠网成功的圆草捆进行抗摔试验,每捆举起高度800 mm左右进行自由落体,重复3次,之后统计摔散的圆捆数,则根据公式(13)计算得到圆捆的抗摔率。

$$S_k=\frac{I_s-I_d}{I_s}\times 100\% \tag{13}$$

式中：S_k——抗摔率，%；

I_s——被摔圆捆个数，捆；

I_d——摔散圆捆个数，捆。

3.3　试验结果分析

自动缠网装置在自动作业模式和空转模式下交换运行65次，共缠网60次，其间无故障现象发生。草捆成型后密度为110 kg/m^3，草捆缠网效果如图11所示。

所得试验结果如表2所示。装置的性能试验表明，缠网层数越多，作业时间越长，缠网成功率和草捆抗摔率越大。

其中，在对草捆缠网3层时，可实现较大成功率，为95%，但抗摔率较低，为83.3%，在丘陵山地中，草捆滚落时容易散开，故适合在平地作业，不适合在丘陵山地作业；在对草捆缠网4层以上时，可实现较大的成功率与抗摔率，分别为100%和90%，适合在丘陵山区作业。



图11　草捆缠网效果图

Figure 11　Straw bale net-wrapping effect

综上所述，建议在平地作业时选择缠网3层，坡地作业时，根据坡度选择缠网4～5层；总之，在保证草捆不散落的前提下，尽可能选择更小的缠网层数，从而提高作业效率。

表2　自动缠网装置性能试验结果

Table 2　Performance test results of automatic net-wrapping mechanism

缠网层数 e/层	时间 t/s	缠网成功率测试			草捆抗摔率测试		
		缠网数 I_c/捆	失败数 I_f/捆	成功率 S_s/%	摔捆数 I_s/捆	摔散数 I_d/捆	抗摔率 S_k/%
2	3.2	20	6	70	14	9	35.7
3	4.3	20	1	95	18	3	83.3
4	5.3	10	0	100	10	1	90
5	6.4	10	0	100	10	0	100

4　结论

1）设计的自动缠网装置由检测机构检测运行参数，控制电路用来接收信号并控制送网机构和切网机构运行，可实现自动送网、缠网及切网作业，并且可以调节缠网层数，其结构简单，制造成本低。

2）装置采用一个光电接近开关，分别判断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数据，并确定相应的信号转换方法，满足信号采集要求且能降低制造成本。

3）装置采用的摩擦限矩组件可在缠网阶段为丝网施加拉力，使得缠网更紧实，并确定了丝网拉力大小调节方法。

4）装置在对 Φ 500 mm×700 mm的圆草捆缠网3层时，满足平地作业要求，坡地作业时缠网层数需要调至4～5层，在保证顺利完成的前提下，尽可能选择更小的缠网层数。

参　考　文　献

[1] 李晓，李玉．中国秸秆菌业现状及研究进展[J]．菌物研究，2024，22(2)：118－129.
LI Xiao，LI Yu，The status and progress of straw-edible mushroom industry in China [J]. Journal of Fungal Research，2024，22(2)：118－129.

[2] 陈理，韩毅，瞿云山，等．基于专利分析的玉米秸秆创新利用态势研究[J]．中国农业大学学报，2024，29(1)：1－20.
CHEN Li，HAN Yi，QU Yunshan，et al. Research on innovative utilization trend of corn straw based on patent analysis [J]. Journal of China Agricultural University，2024，29(1)：1－20.

[3] 付敏，陈效庆，高泽飞，等．秸秆粉体利用技术及秸秆微粉碎研究现状与展望[J]．中国农机化学报，2023，44(7)：91－100.
FU Min，CHEN Xiaoqing，GAO Zefei，et al. Research status and prospect of straw powder utilization technology and straw micro-grinding [J]. Journal of Chinese

Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 91－100.

[4] TAYLOR R K. Effects of net-wrapping on large round baler capacity [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1995, 11 (229－230): 229－230.

[5] ZAWADA M, NIJAK M, MAC J, et al. Control and measurement systems supporting the production of haylage in baler-wrapper machines [J]. Sensors, 2023, 23(6): 2992.

[6] SHINNERS K J, HUENINK B M, MUCK R E, et al. Storage characteristics of large round and square alfalfa bales: low-moisture wrapped bales [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(2): 401－407.

[7] TAYLOR R K, BLASI D A, SHROYER J P. Storage losses in net-wrapped, large round bales of alfalfa [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1994, 10 (3): 317－320.

[8] 张海滨, 刘希锋, 吴昊, 等. 青贮秸秆圆捆打捆机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(5): 52－56, 62.
ZHANG Haibin, LIU Xifeng, WU Hao, et al. Design and experiment of round baler for silage straw [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 52－56, 62.

[9] 刘晓. 青饲料收获打捆包膜一体机关键装置的研制与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
LIU Xiao. Design and experiment of key device of single pass silage round wrapping machine [D]. Tai′an: Shandong Agricultural University, 2018.

[10] 邵利国, 杜鹏, 王德强, 等. 圆草捆打捆机的设计及优化[J]. 拖拉机与农用运输车, 2022, 49(1): 34－36, 51.
SHAO Liguo, DU Peng, WANG Deqiang, et al. Design and optimization of round bale baler [J]. Tractor & Agricultural Transporter, 2022, 49(1): 34－36, 51.

[11] 王德福, 张全超, 杨星, 等. 秸秆圆捆机捆绳机构的参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 55－61.
WANG Defu, ZHANG Quanchao, YANG Xing, et al. Parameter optimization and experiment of rope-winding mechanism of straw round baler [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (14): 55－61.

[12] 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.

[13] 徐易恒. 苜蓿青贮打捆包膜一体化圆捆机设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
XU Yiheng. Design of alfalfa silage bundling and encapsulation integrated round bundler [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.

[14] 张德学, 闵令强, 刘学峰, 等. 9YYB12型青饲料打捆缠膜一体机的整机设计与研发[J]. 农机化研究, 2020, 42 (2): 36－43.
ZHANG Dexue, MIN Lingqiang, LIU Xuefeng, et al. Design and development 9YYB12 type integrative machine for silage bundling and package wrapping [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 42 (2): 36－43.

[15] 张成保, 孙宜田, 钟波, 等. 9YYB12型青饲料打捆缠膜一体机智能控制流程研究[J]. 中国农机化学报, 2018, 39 (3): 55－60.
ZHANG Chengbao, SUN Yitian, ZHONG Bo, et al. Research on intelligent control process of 9YYB12 greenfeed banding & wrapping AIO machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39 (3): 55－60.

[16] 张将, 刁培松, 刁怀龙, 等. 自走式青贮打捆缠膜一体机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 73－77.
ZHANG Jiang, DIAO Peisong, DIAO Huailong, et al. Design and experiment on self-propelled silage baling tangle film machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(12): 73－77.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 刘兆懿, 崔红伟, 常宗旭, 等. 柱面摩擦限矩器接触特性及打滑转矩影响因素研究[J/OL]. 机械设计与制造, 1－6 [2024－04－10].
LIU Zhaoyi, CUI Hongwei, CHANG Zongxu, et al. Influencing factors of contact characteristics and slip torque of cylindrical friction torque limiter [J/OL]. Machine Design & Manufacture, 1－6[2024－04－10].

[20] GB/T 14290－2021, 圆草捆打捆机[S].

[21] 冯斌, 张涛, 梁涛, 等. 电驱式青贮饲料打捆裹膜机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(2): 564－573.
FENG Bin, ZHANG Tao, LIANG Tao, et al. Design and experiment of silage baling and wrapping machine with electric driving [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(2): 564－573.

[22] 杨茂林, MOHAMMAD Nizamuddin Inamdar, 刘坤宇,

等. BL－600型指盘式搂草机关键部件设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(4): 65－70.
YANG Maolin, MOHAMMAD Nizamuddin Inamdar, LIU Kunyu, et al. Design and experiments on the key components of BL－600 finger wheel rake [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(4): 65－70.

Design and test of automatic net-wrapping mechanism for small round baler in hilly and mountainous areas

AN Jing[1], ZHANG Keping[1*], LI Xiaokang[2], YANG Zhikai[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: With the development of agricultural science and technology, the utilization of crop straw has become more diversified, and its demand has also increased. This paper aims to solve the disadvantages of small round baler in hills and mountainous areas, such as easy scattering of bales, unadjustable number of net layers and low degree of automation. The net-wrapping device was modularized, including the design of the net feeding mechanism, the net cutting mechanism, the detection mechanism and the control circuit, and the mechanical analysis of the net feeding mechanism was carried out. The operation parameters of the device are detected by the detection device, and send to corresponding execution instructions to the feeding mechanism and cutting mechanism after processing by the controller, thus realizing the automatic operation of feeding, winding and cutting, and realizing the adjustable number of winding layers. When the net is wrapped, the friction torque limit component exerts tension on the net, so that the net is more tightly wound, the mechanical analysis found that the net tension depends on the compression spring elasticity, and the corresponding adjustment method is provided. The performance test results show that the device has stable performance and reliable operation. It can automatically wrap the hay bale of Φ 500 mm×700 mm. The wire net covers the side of the bale without leakage and entangling. When the number of layers is 3, the success rate is 95% and the anti-fall rate is 83.3%. When the number of layers is 4, the success rate of wrapping is 100%, and the anti-fall rate is 90%. When the number of net layers is 5, the success rate of net-wrapping and the anti-fall rate of bale are 100%. This paper designed a small automatic net-wrapping mechanism for small round baler in hills and mountains areas, the test verified that the performance of the machine is stable and reliable, meet the design requirements. When the number of layers is 3, the cost performance of flat operation is the highest, and when the operation is hilly and mountainonous areas, it needs to be adjusted to 4－5 layers to the slope of the operation.

Keywords: hilly and mountainous areas; round baler; net-wrapping mechanism; automatic control; friction limiting moment