

丘陵山地秸秆打捆机仿形浮动捡拾控制系统设计与试验

唐 汉¹ 陈 锐¹ 李东涛² 徐福东¹ 梁朝程¹ 李景岩³ 王金武¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江农垦农业机械试验鉴定站, 哈尔滨 150038;
3. 黑龙江德沃科技开发有限公司, 哈尔滨 150086)

摘要: 针对丘陵山地复杂工况下常规秸秆打捆机进行秸秆捡拾作业时,存在秸秆捡拾率低、捆包含土率高等问题,本研究以德沃科技 9Y-2230 轻型秸秆捡拾打捆一体机为载体,设计了一种基于 PLC 主动式仿形浮动秸秆捡拾控制系统,通过分析田间起伏地面复杂工况下秸秆捡拾过程,指出常规打捆机捡拾装置的局限性,明确仿形浮动秸秆捡拾方案的总体规划设计,确定控制系统关键部件的结构参数及工况范围。建立打捆机仿形浮动捡拾控制系统模型并设计模糊 PID 控制器,搭建控制系统 Matlab/Simulink 仿真模型验证控制策略可靠性。田间试验结果表明,在丘陵山地区域农田进行玉米秸秆捡拾打捆作业过程,当机具前进速度 3 km/h、捡拾滚筒转速 110 r/min、捡拾高度 100 mm 时,仿形浮动捡拾控制系统介入下秸秆捡拾率平均值为 96.039%、捆包含土率平均值为 3.485%,且作业稳定性及捡拾效果优于手动模式控制,满足设计目标及相关国家标准要求。

关键词: 丘陵山地; 秸秆打捆机; 仿形浮动捡拾; 控制系统; 模糊 PID; 田间试验

中图分类号: S817.11⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0214-12 OSID: 

Design and Experiment of Profiling Floating Pickup Control System for Straw Baler in Hilly and Mountainous Areas

Tang Han¹ Chen Rui¹ Li Dongtao² Xu Fudong¹ Liang Chaocheng¹ Li Jingyan³ Wang Jinwu¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Heilongjiang Agricultural Reclamation Agricultural Machinery Test and Appraisal Station, Harbin 150038, China
3. Heilongjiang Dewo Technology Development Co., Ltd., Harbin 150086, China)

Abstract: Aiming at the problems of low straw pickup rate and high soil content in bales during the straw pickup operation of conventional straw balers under complex working conditions in hilly and mountainous areas, taking the Dewo Technology 9Y-2230 lightweight integrated straw pickup and baling machine as the carrier, an active profiling floating straw pickup control system was designed based on PLC. By analyzing the straw pickup process under complex working conditions of undulating farmland surfaces, the limitations of the pickup device of conventional balers were pointed out, the overall planning and design of the profiling floating straw pickup scheme were clarified, and the structural parameters and working condition ranges of key components of the control system were determined. A model of the profiling floating pickup control system for the baler was established, a fuzzy PID controller was designed, and a Matlab/Simulink simulation model of the control system was built to verify the reliability of the control strategy. Field test results showed that during the corn straw pickup and baling operation in farmlands of hilly and mountainous areas under the working conditions of machine forward speed of 3 km/h, pickup drum speed of 110 r/min and pickup height of 100 mm, the average straw pickup rate was 96.039% and the average soil content in bales was 3.485% with the intervention of the profiling floating pickup control system. Moreover, the operation stability and pickup effect were superior to those of the control group under manual mode control, meeting the design objectives and relevant national standard requirements.

Key words: hilly and mountainous areas; straw baler; profiling floating pickup; control system; fuzzy PID; field test

0 引言

丘陵山地耕地面积约占我国耕地总面积的 34.62%，是我国保障粮食安全、发展特色农业的重要基础^[1-2]。其中玉米作为主要种植的粮食作物，每季收获后将产生大量需还田或离田处理的玉米秸秆。捡拾打捆作为最主流秸秆离田手段，可有效提高秸秆资源利用效率，促进农业可持续发展^[3-4]。丘陵山地起伏多变的地形与频繁变化的坡度显著增加了秸秆捡拾的复杂性与难度，严重制约了秸秆打捆机的作业效果。而不规则的田块形状与狭窄的山间通道，导致打捆机转弯、掉头困难，需频繁停机以调整作业路线，使秸秆捡拾动作连贯性被破坏，降低了作业效率^[5]。

针对上述问题，国内外学者为适应丘陵山地复杂工况下作业环境，对机具机械结构优化以及仿形控制系统开展了相关研究。贾彭程等^[6]设计了轻筒型水稻秸秆捡拾打捆一体机，适应性和稳定性良好；张克平等^[7]研发苜蓿捡拾打捆裹包一体机，捡拾滚筒可浮动避障；Cristiano 等^[8]实现联合收获机与甘蔗收获机割台高度自适应调控；Xie 等^[9]验证了联合收获机割台高度控制系统的闭环带宽限制；宫元娟等^[10]设计割台随动控制系统，降低甘蔗破头率；汪昕等^[11]基于模糊 PID 设计马铃薯捡拾装置作业参数自调节系统，提升捡拾效果；刘伟健等^[12]基于模糊 PID 设计仿形割台，实现稻茬高度自适应调整。

上述研究大多集中于作物收获等领域，而在秸秆捡拾过程复杂地形精准检测、捡拾高度自适应调控等方向的研究较少，亟需系统性解决方案。本研究以适用于水稻、玉米、小麦等作物的德沃科技 9Y-2230 轻筒型秸秆捡拾打捆一体机为载体，设计一种基于 PLC 的秸秆打捆机主动式仿形浮动秸秆捡拾控制系统，以期具有精准地形检测、精确仿形捡拾等功能。通过捡拾弹齿及捡拾滚筒的运动学分析，阐明田间起伏地表上秸秆捡拾的作业机理；根据丘陵山地秸秆捡拾农艺要求，确定地形检测装置及仿形执行装置的结构参数及工况范围；开发基于 PLC 的仿形浮动秸秆捡拾控制系统，实现秸秆仿形捡拾全过程的自适应调控与实时工况监测；通过静态及田间试验验证仿形浮动秸秆捡拾控制系统的作业性能，为丘陵山区秸秆捡拾提供技术支撑与装备参考。

1 仿形浮动捡拾装置设计与工作原理

1.1 总体设计

打捆机仿形浮动捡拾装置总体设计如图 1 所

示，主要由摆动式地形检测装置、集成控制箱、弹齿式捡拾滚筒、仿形执行装置和角度传感器组成。摆动式地形检测装置安装在打捆机牵引梁下方，主要负责地形起伏高度信息的采集与打捆机实时速度的检测。集成控制箱内核心元件为 PLC 控制器及伺服驱动器，满足仿形信号的快速输入输出需求。为方便设定调试过程的相关参数与监测控制系统的实时工作状态，配置触摸式人机交互屏幕。仿形执行装置主要元件为伺服电动推杆，负责完成捡拾滚筒的仿形浮动捡拾动作。

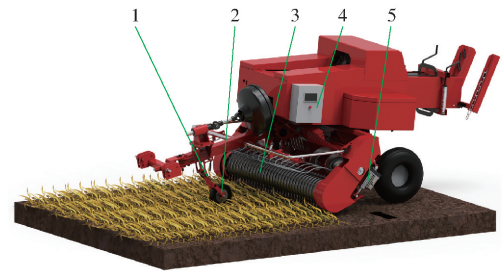


图 1 仿形浮动捡拾装置总体结构

Fig. 1 Overall structure of profiling floating pickup device

1. 摆动式地形检测装置 2. 角度传感器 3. 弹齿式捡拾滚筒
4. 集成控制箱 5. 仿形执行装置

1.2 工作原理

在打捆机秸秆捡拾作业过程，摆动式地形检测装置的仿形地轮先于秸秆捡拾滚筒接触起伏地面，并通过角度传感器将起伏高度转换为角度电压信号传递到仿形浮动捡拾控制系统。PLC 控制器通过预先设定的控制算法对电压信号进行处理，转换为数字信号计算后输出给仿形执行装置，伺服电动推杆根据指令伸缩进而控制捡拾滚筒升降，使捡拾滚筒与起伏地面之间始终保持预先设定的捡拾高度，在作业过程最大程度地贴合地表曲面。伺服电动推杆内置电位计实时监测推杆的伸缩量，同时将信号反馈给控制系统，由此判断仿形浮动高度是否处于预期值误差区间内，并通过模糊 PID 控制器进行调整，以此实现仿形捡拾高度的闭环控制，达到高精度仿形浮动捡拾的效果。

2 丘陵山地复杂工况下秸秆捡拾过程分析

2.1 秸秆捡拾机理分析

打捆机通过捡拾弹齿完成秸秆的捡拾作业，理想状态下作业效果为弹齿顶端恰好触及秸秆堆底部，此时弹齿顶端轨迹与地表贴合程度最佳，且使堆积在田间地表的大部分秸秆处于捡拾区域内，可提高秸秆捡拾率。避免产生弹齿扎入表层土壤，在捡拾秸秆同时夹杂少量土壤的现象。

常规打捆机进行秸秆捡拾打捆作业时，通过捡

拾滚筒两侧的地轮与地面接触完成被动式秸秆仿形捡拾过程,且需在停机状态下手动调节预设捡拾高度。捡拾滚筒大部分质量通过仿形地轮以下压力形式作用到田间地表,因捡拾装置自身质量较大,在土壤坚实度较低的地块作业时地轮易陷入,降低了地面仿形准确度,影响捡拾作业效果。在局部凸起地块作业时,捡拾滚筒会因自身惯性导致仿形动作滞后,此时捡拾高度低于预设值,使得捡拾区域与地块凸起部分重叠,导致弹齿顶端扎入表层土壤,如图2a所示,不仅会增加弹齿磨损程度,减少使用寿命,在拾起秸秆的同时也铲起少量地表土块,与秸秆一同抛送至螺旋输送绞龙内,使得该区域内所产出秸秆捆包的含土率增高,影响捆包进一步综合利用;在局部凹陷地块作业时,捡拾滚筒因地轮的机械限位无法大幅度降低捡拾高度对凹陷地表仿形,导致在凹陷地块出现秸秆漏捡区域,如图2b所示,捡拾弹齿顶端无法触及下层秸秆,使打捆机在该区域作业过程秸秆捡拾率降低,影响捡拾打捆作业效果。

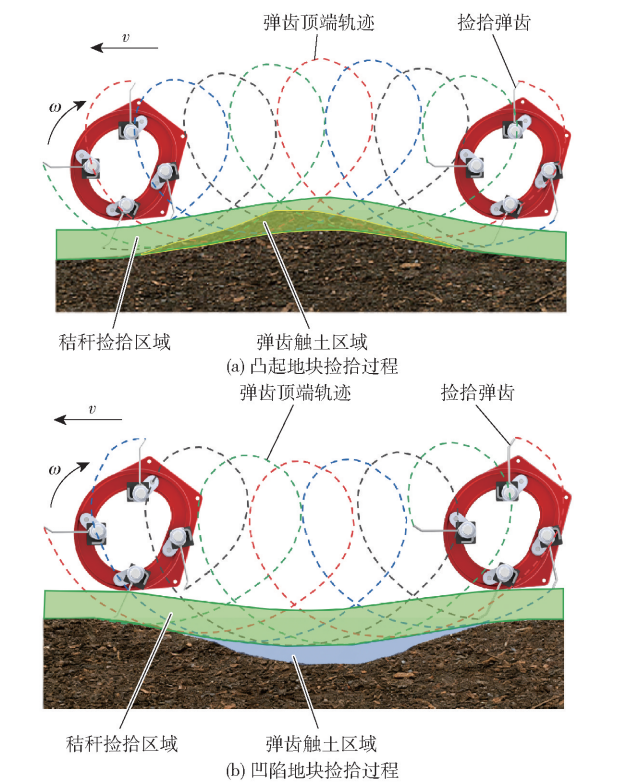


图2 复杂工况下秸秆捡拾作业示意图
Fig.2 Schematics of straw pickup operation under complex working conditions

在狭窄山间地块作业需跨过田埂转弯或掉头时,具备仿形浮动捡拾功能的捡拾滚筒可自动抬升,无需停机调整捡拾高度,避免捡拾滚筒与凸起田埂产生碰撞导致损坏,有效提升作业效率;在凹陷地块作业时捡拾滚筒也能随地形而降低捡拾高度,减少秸秆漏捡区域面积,增强秸秆捡拾作业效果。

2.2 秸秆捡拾过程弹齿运动状态分析

秸秆打捆机弹齿捡拾滚筒主要由D型凸轮滑轨、曲柄滑块、弹齿、弹齿辊、护圈、中心主轴、侧板等组成,如图3所示。

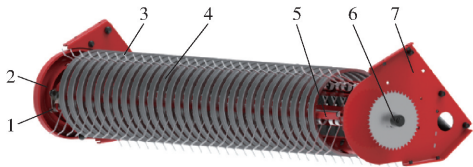


图3 弹齿式捡拾滚筒主要结构
Fig.3 Main structure of tine-type pickup drum
1. D型凸轮滑轨 2.曲柄滑块 3.弹齿 4.护圈 5.弹齿辊
6.中心主轴 7.侧板

进行秸秆捡拾作业时,捡拾滚筒在中心主轴动力作用下旋转,固定在弹齿辊上的弹齿随之绕主轴转动。以弹齿顶端接触到秸秆瞬间为起始时刻,弹齿分别历经捡拾、举升、抛送和空回4个工位^[13]。在D型凸轮滑轨运动限制下,弹齿顶端回转半径时刻变化,因此弹齿运动为即将开始捡拾工位时快速从护圈中伸出,此时回转半径变大,使得弹齿顶端轨迹与地面贴合程度更高;在抛送工位时回转半径变小,使弹齿具有加速向后抛掷的运动效果,随后迅速收回到护圈内,避免出现夹带秸秆的情况。其余位置回转半径保持不变,使弹齿可以平稳地运送秸秆^[14]。如图4所示,在机具前进方向为x轴,竖直方向为y轴的坐标系中,弹齿顶端点Q速度及轨迹方程为

$$\begin{cases} v_{Qx} = v - R_s \omega \sin(\omega t) + l' \omega \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi) - l_z \omega \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi - \gamma) \\ v_{Qy} = R_s \omega \cos(\omega t) - l' \omega \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi) + l_z \omega \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi - \gamma) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_Q = vt + R_s \cos(\omega t) - l' \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi) + l_z \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi - \gamma) \\ y_Q = R_s \sin(\omega t) - l' \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi) + l_z \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi - \gamma) \end{cases} \quad (2)$$

- 式中 v ——打捆机前进速度,m/s
 ω ——捡拾滚筒角速度,rad/s
 x_Q ——弹齿顶端点Q水平方向位移,m
 y_Q ——弹齿顶端点Q竖直方向位移,m
 v_{Qx} ——弹齿顶端点Q水平方向速度,m/s
 v_{Qy} ——弹齿顶端点Q竖直方向速度,m/s
 R_s ——弹齿顶端回转半径,m
 l_z ——弹齿长度,m
 l' ——曲柄长度,m
 φ ——凸轮机构摆角,rad
 φ_0 ——凸轮机构初始摆角,rad

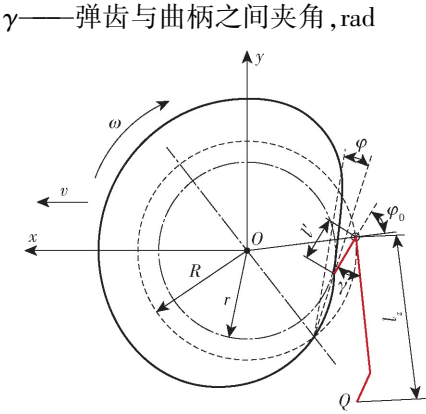


图 4 弹齿运动示意图

Fig.4 Schematic of spring tine movement

弹齿运动与前进速度叠加后,弹齿顶端合运动轨迹大致为余摆线。若使秸秆能被弹齿捡拾不滑落,且具有向后抛送秸秆的条件,则弹齿顶端运动到最高点时水平方向速度应小于零。

$$v_x = v - R'\omega' < 0 \tag{3}$$

式中 v_x ——弹齿顶端最高点水平方向速度,m/s

R' ——弹齿顶端最高点轨迹半径,m

ω' ——弹齿顶端最高点角速度,rad/s

设弹齿运动到最高点时顶端线速度与前进速度的比值为 λ ,则

$$\lambda = \frac{R'\omega'}{v} \tag{4}$$

在打捆机作业过程,弹齿顶端最高点角速度 ω' 与捡拾滚筒角速度 ω 基本一致,因此在丘陵山地复杂工况下进行秸秆捡拾作业时, $\lambda > 1$ 为弹齿能拾起秸秆的必要条件^[15]。

由式(4)可知,在打捆机前进速度不变时,滚筒角速度 ω 需达到足够的速度方可满足秸秆被捡拾的必要条件。而当滚筒角速度 ω 过高时,弹齿顶端最高点线速度也会随之增加,高速运动的弹齿与秸秆碰撞易打飞,增加秸秆破损率的同时也降低了秸秆捡拾率。因此作业过程一般要求弹齿顶端最高点线速度不超过 3 m/s^[16]。由于丘陵山地农田地形起伏频繁,机具前进速度不宜过大,一般为 2 ~ 4 km/h。相关参数代入式(4)可得滚筒转速为 9.37 ~ 13.34 r/s。

3 关键部件设计与分析

3.1 摆动式地形检测装置

3.1.1 总体设计

摆动式地形检测装置由角度传感器、接近开关、接近开关格栅、安装架、仿形地轮、气弹簧等部件构成,总体结构如图 5 所示。

打捆机作业时,仿形地轮紧贴地表向前滚动。

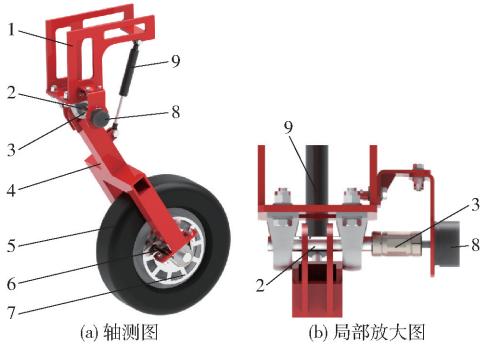


图 5 摆动式仿形检测装置示意图

Fig.5 Schematics of oscillating profiling detection device

1.固定架 2.销轴 3.联轴器 4.支臂 5.仿形地轮 6.电感式接近开关 7.格栅板 8.气弹簧 9.角度传感器

当打捆机在平整地面行进至局部凸起地面时,仿形地轮先于捡拾滚筒通过此处,所处地面高度发生变化,如图 6 所示。地面高度从 h_a 变到 h_b ,同时仿形地轮支臂与水平方向夹角也从 α_a 变到 α_b 。设仿形地轮半径为 r ,摆动式仿形检测装置角度计算式为

$$\begin{cases} \alpha_a = \arcsin \frac{h_a - r}{l} \\ \alpha_b = \arcsin \frac{h_b - r}{l} \\ \Delta\alpha = \alpha_a - \alpha_b \end{cases} \tag{5}$$

其中 $\Delta\alpha = \arcsin \frac{h_a - r}{l} - \arcsin \frac{h_b - r}{l}$ (6)

式中 l ——支臂长度,m

对式(6)两边求导得

$$(\Delta\alpha)' = \frac{h_b - r}{l^2 \sqrt{1 - \left(\frac{h_b - r}{l}\right)^2}} - \frac{h_a - r}{l^2 \sqrt{1 - \left(\frac{h_a - r}{l}\right)^2}} \tag{7}$$

易得 $(\Delta\alpha)' < 0$,在摆动式地形检测装置其他参数不变的情况下,仿形地轮支臂长度 l 越长,支臂与水平方向夹角变化越小,即仿形地轮支臂绕销轴摆动的角度范围越小,工作效果越稳定^[17-18];对角度传感器灵敏度的要求越低,信号输出的准确度越高,仿形效果越好,反之则越差。综合上述,结合打捆机在丘陵山地区域农田实际作业情况,设计仿形地轮支臂长度为 440 mm,在机械限位范围内最大可检测地面起伏高度差为 250 mm,满足丘陵山地农田的地形检测要求。

3.1.2 超前检测分析

由于摆动式仿形检测装置检测点与捡拾滚筒最低点在水平方向上存在一定距离,会导致地面起伏信息采集时间相对早于捡拾滚筒进行秸秆捡拾作业时间,存在检测时效超前的问题,如图 7 所示。

因此建立检测点与捡拾滚筒捡拾位置之间的关

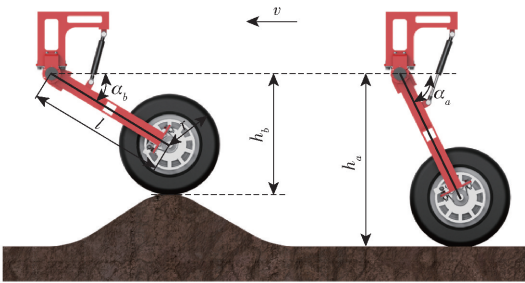


图 6 仿形地轮角度变化示意图

Fig. 6 Schematic of angle variation of profiling land wheel

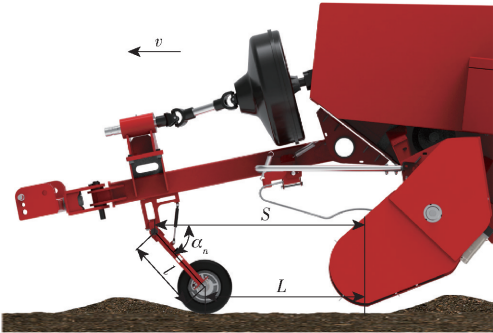


图 7 摆动式仿形检测装置超前量示意图

Fig. 7 Schematic of lead of oscillating profiling detection device

系,计算检测超前距离,并根据打捆机实时前进速度计算延时调节时间,减少仿形误差。由图 7 可知,各参数关系为

$$\begin{cases} S = L + l \cos \alpha_n \\ t_1 = \frac{L}{v} \\ T_d = t_1 - t_x \end{cases} \quad (8)$$

式中 S ——仿形地轮支臂铰接点与捡拾滚筒最低点的水平距离,m

L ——超前量距离,m

α_n ——当前夹角,rad

t_1 ——打捆机通过超前距离所需时间,s

t_x ——仿形浮动捡拾控制系统响应时间,s

T_d ——延时调节时间,s

由于仿形浮动捡拾控制系统自身存在一定的响应时间,为避免出现仿形执行装置响应不及时导致仿形滞后问题,打捆机以最大前进速度作业时,捡拾滚筒通过超前量距离所用时间需大于系统响应时间,即

$$\frac{v_{\max}}{L} > t_x \quad (9)$$

式中 $v_{\max}$ ——打捆机作业时最大前进速度,m/s

3.1.3 测速模块设计

为获取打捆机实时前进速度,在仿形地轮处集成测速模块。采用 NPN 常闭型电感式接近开关,配

合可随仿形地轮轴同步转动的 Q235 钢材质格栅板实现测速。接近开关固定于地轮支臂处,检测头与格栅板间距设为 4 mm,格栅板均匀布设 10 个栅条,相邻栅条夹角 36°。仿形地轮转动时栅条依次扫过检测头,触发接近开关并输出脉冲信号。通过检测相邻脉冲的时间间隔,结合仿形地轮结构参数,可计算打捆机实时前进速度;栅条数量决定信号采样频率,直接影响速度计算精度,所设计栅条排布可满足实际作业的采样与测量精度要求。前进速度计算式为

$$v = \frac{2\pi r \frac{36^\circ}{360^\circ}}{t_s} = \frac{\pi r}{5t_s} \quad (10)$$

式中 t_s ——接近开关发出相邻信号时间,s

3.1.4 气弹簧分析

在打捆机前进作业过程,仿形地轮处于贴地滚动状态,可随地面的起伏而上下摆动。为更准确获得地面的实时情况,需使仿形地轮时刻保持紧贴地面的状态,因此采用气弹簧,两端分别连接在安装架与仿形地轮支臂处,且气弹簧处于预伸长状态,受到一定的预伸力。气弹簧区别于普通弹簧,工作原理为通过压缩气体产生压力,使内部活塞杆能够平稳地伸出或缩回。在活塞杆伸缩过程,动态弹力变化幅度很小,可视为弹力保持不变。基于气弹簧的自身特性,不仅能给予仿形地轮足够的弹力使其贴紧地面,还能避免在通过较大起伏时因仿形地轮自身惯性而振荡的问题。由于待捡拾农田铺满玉米秸秆,而摆动式地形检测装置会先于捡拾滚筒通过检测点,因此仿形地轮会不可避免地压在秸秆上方,如图 8 所示。

若气弹簧给予仿形地轮向下的压力不足以压实秸秆,会使地形检测装置产生检测高度误差 h_x ,导致检测信号失准。因此气弹簧的弹力需处于一定范围内,弹力过小会使仿形地轮无法压实地面覆盖的秸秆,过大则会使仿形地轮陷入农田表层土壤中。

以仿形地轮支臂与固定架铰接点 o 为原点,列转矩平衡方程为

$$F_n L_p \sin \theta_0 - F_p l_{on} \cos \tau_0 = 0 \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} \tau_0 = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{l_s^2 + l_{on}^2 - l_{oe}^2}{2l_{on}l_s} \\ \theta_0 = \arccos \frac{l_s^2 + l_{oe}^2 - l_{on}^2}{2l_{oe}l_s} + \arccos \frac{l_s^2 + l_{on}^2 - l_{oe}^2}{2l_{on}l_s} - \gamma_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中 F_p ——气弹簧杆弹力,N

F_n ——仿形地轮受到的支持力,N

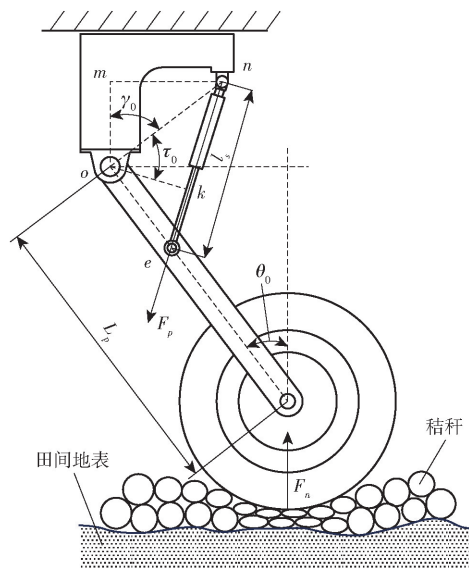


图 8 仿形地轮挤压秸秆受力分析

Fig. 8 Force analysis of straw extrusion by profiling land wheel

l_s ——气弹簧杆总长度, mm
 l_{on} ——点 o 、 n 间距离, mm
 l_{oe} ——点 o 、 e 间距离, mm
 θ_0 ——支臂所在直线与竖直方向夹角, rad
 τ_0 ——线段 ok 与线段 on 夹角, rad
 γ_0 ——线段 om 与线段 on 夹角, rad
令 $K = F_p / F_n$, 当 $l_{smin} = 145$ mm 时, $K_{max} = 2.725$; $l_{smax} = 200$ mm 时, $K_{min} = 2.518$ 。即当气弹簧总长度最大时, 通过仿形地轮作用到秸秆上的压力最小, 设此时仿形地轮压实秸秆所需最小力为 F_m , 仿形地轮质量为 m , 需满足

$$F_n + mg \geq F_m \tag{13}$$

在收获后未进行打捆作业的丘陵山地区域玉米田内, 随机选取 10 处秸秆覆盖良好地点测量压力。将推拉力计采用推力测试模式和平头测头, 竖直倒置推拉力计并使测头抵住仿形地轮正上方中心点。当逐渐向下用力按压推拉力计时, 仿形地轮下方秸秆受到压力而逐渐被压实, 继续增力直至秸秆堆无压实余量, 记录此时推拉力数值。试验结果推力最大值为 104.9 N, 由式 (13) 计算得所需气弹簧弹力 F_m 最小为 280.14 N, 因此选用压力规格为 300 N 的气弹簧。

3.2 仿形执行装置设计与分析

打捆机的捡拾滚筒能以螺旋搅龙中轴为轴心上下摆动, 为避免捡拾滚简单侧受力而发生形变, 因此在捡拾滚筒两侧对称区域分别安装 2 个相同规格的伺服电动推杆。2 个伺服电动推杆顶部铰接在捡拾装置两侧侧板的对称点, 底部则铰接在两侧机架的对称点。为避免两侧伺服电动推杆执行伸缩指令时

出现不同步问题, 采用双电机主令并行控制方法, 使两侧伺服电机时刻保持转速同步状态。在极端工况下, 短期内两侧推杆负载可能不一致, 2 台伺服电机需要一定时间恢复转速同步状态, 可能会导致两侧推杆伸缩量出现细微的差异。因此在伺服电动推杆前后铰接钢销的外侧增加橡胶缓冲垫圈, 利用橡胶垫圈的弹性避免出现推杆卡死情况, 同时也有效减少伺服电动推杆与打捆机因刚性铰接而产生的震动, 增加仿形执行装置的可靠性与使用寿命。

通过控制伺服电动推杆的伸缩量进而控制捡拾滚筒的浮动高度, 因此需要对伺服电动推杆进行运动分析, 如图 9 所示, 捡拾高度与伺服电动推杆总长度之间的关系为

$$\begin{cases} h_1 = H - h_2 - h_3 \\ h_2 = l_x \sin \alpha \\ h_3 = l_{ob} \sin (\beta + \gamma + \alpha - \pi) \end{cases} \tag{14}$$

其中
$$\begin{cases} \alpha = \arccos \frac{l_x^2 + l_{oc}^2 - l_{ob}^2}{2l_{oc}l_x} \\ \gamma = \arccos \frac{l_x^2 + l_{ob}^2 - l_{oc}^2}{2l_{ob}l_x} \end{cases} \tag{15}$$

式中 H ——机架与推杆铰接点与地面之间竖直距离, mm
 h_3 ——推杆下铰接点与捡拾滚筒最低点竖直距离, mm
 h_2 ——推杆上下铰接点之间竖直距离, mm
 h_1 ——捡拾高度, mm
 l_x ——推杆总长度, mm
 l_{ob} ——点 o 、 b 间距离, mm
 l_{oc} ——点 o 、 c 间距离, mm

将打捆机捡拾滚筒三维模型导入到 Solidworks 软件, 在“质量属性”模块中赋予各个零件材质, 以此计算捡拾滚筒自身重心 g 位置。忽略捡拾滚筒摆动过程铰接处的摩擦, 对仿形执行装置进行受力分

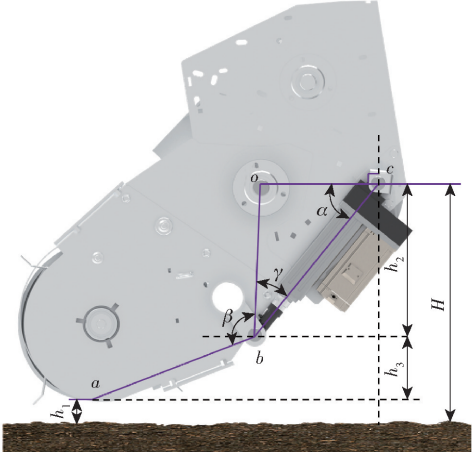


图 9 仿形执行装置运动分析

Fig. 9 Kinematic analysis of profiling actuator

析,如图 10 所示。以点 o 为原点,列转矩平衡方程为

$$Gl_{og}\sin\psi - F_t l_{oc}\sin\mu = 0 \tag{16}$$

式中 G ——捡拾滚筒重力,N
 F_t ——伺服电动推杆推力,N
 l_{og} ——点 o 、 g 之间距离,mm
 l_{oc} ——点 o 、 c 之间距离,mm
 ψ ——点 o 、 g 连线与垂直方向夹角,rad
 μ ——电动推杆与水平方向夹角,rad

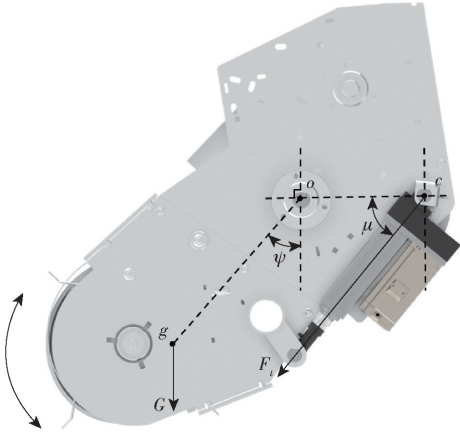


图 10 仿形执行装置受力分析

Fig. 10 Force analysis of profiling actuator

通过捡拾滚筒浮动高度与伺服电动推杆总长度关系,结合机械限位等机具参数,计算得捡拾滚筒最大摆动角度为 22.53° ,捡拾高度为 205.42 mm ,满足丘陵山地秸秆捡拾作业要求。通过仿形执行装置受力分析可知,捡拾滚筒向上浮动时,伺服电动推杆总长度逐渐增加,使得捡拾滚筒重心点 g 与捡拾滚筒摆动圆心点 o 的连线与竖直方向所成夹角 ψ 逐渐变大,而伺服电动推杆伸缩方向与水平方向夹角 μ 逐渐变小。结合式(16)各变量之间的关系,易知当捡拾高度达到最大值时,伺服电动推杆所需的推力最大,计算得所需最大推力为 $7\,125.99\text{ N}$ 。

结合上述数据,考虑动力冗余等,选用伺服电机额定功率为 750 W ,额定转速为 $3\,000\text{ r/min}$,额定转矩为 $2.39\text{ N}\cdot\text{m}$ 。装配 60-T100-L5 型号伺服电动推杆,推杆最大行程 100 mm ,最大伸缩速度为 120 mm/s ,单台最大推力 $5\,500\text{ N}$,具有断电自锁功能,满足仿形执行装置的动力要求。

3.3 仿形浮动捡拾控制系统设计与仿真

3.3.1 整体设计

控制系统性能的优劣直接决定秸秆仿形捡拾效果,核心控制器采用西门子 PLC,搭配 Profinet 总线型伺服驱动器,二者负责对控制系统的输入输出信号进行快速处理。采用触摸屏作为人机交互媒介,可进行捡拾高度预设、捡拾滚筒仿形浮动速度设置、

角度传感器标定等,同时也可显示打捆机实时作业速度、控制系统各部件运行状态等信息,程序界面如图 11 所示。



图 11 程序界面

Fig. 11 Program interface

角度传感器灵敏度较高,能检测到地面微小的起伏。若控制器将微小的起伏信号经处理后传递给伺服电动推杆,会导致捡拾滚筒上下浮动频率过快,不仅会使捡拾滚筒产生震动,影响捡拾效果,还可能导致伺服电动推杆的损坏。根据田间秸秆捡拾作业经验,捡拾高度误差在 10 mm 范围内对捡拾效果影响很小。对仿形执行装置进行运动分析可知,当伺服电动推杆伸缩速度处于最大值时,捡拾滚筒在竖直方向上浮动速度可达 200 mm/s 。因此设定采样周期为 0.05 s ,当地形检测装置在 1 个采样周期内检测到地形起伏高度变化量小于 10 mm 时,控制系统自动过滤;当变化量大于 10 mm 时,仿形浮动控制系统介入,将浮动指令传递给伺服电动推杆,进行仿形浮动捡拾作业。

3.3.2 模型建立

仿形浮动控制系统模型由摆动式仿形检测装置中角度传感器检测实时角度,传递至上位机计算实际高度与目标高度差值,最终以伺服电动推杆目标位置作为输入量,驱动器将信号计算处理后迅速传递给仿形执行装置,最终系统输出量为推杆的伸缩位移变化量。由于伺服电动推杆内置电位计,可以实时反馈推杆伸缩长度信号给控制器,通过控制算法进行闭环负反馈控制^[19-20],则仿形浮动控制系统的前向通道传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s) \tag{17}$$

式中 $G_n(s)$ ——第 n 个控制环节传递函数

电位计将推杆伸缩位移线性转换为电压信号,忽略检测延迟等非理想因素,输入与输出信号呈线性关系,在控制模型中起负反馈作用,传递函数为

$$H(s) = \frac{U_{cc}(s)}{L_0(s)} \tag{18}$$

式中 $H(s)$ ——反馈通道传递函数

$U_{cc}(s)$ ——电位计输出电压,V
 $L_0(s)$ ——电动推杆行程,mm
控制系统采用总线通讯,模块输入量为模拟信号,输出量为数字信号,因此传递函数为比例环节,公式为

$$G_1(s) = \frac{X_o(s)}{X_i(s)} = K_a \tag{19}$$

式中 $X_o(s)$ ——模块输出量
 $X_i(s)$ ——模块输入量
 K_a ——模拟量与数字信号转换系数
伺服电机视为二阶系统,利用拉普拉斯变换表示输入和输出关系^[21-22]。传递函数视为惯性环节和积分环节串联,即

$$G_2(s) = \frac{1/(2\pi K_e)}{s\left(\frac{J_n R_n}{K_e K_c} s + 1\right)} \tag{20}$$

式中 K_e ——电机电动势系数,V·s/rad
 J_n ——电机转子转动惯量,kg·cm²
 R_n ——电机电阻,Ω
 K_c ——电机转矩系数,N·m/A

电动推杆内置减速机构,传动比为 1.5:1,可视为比例环节,则传递函数为

$$G_3(s) = \frac{Z_{out}(s)}{Z_{in}(s)} = i \tag{21}$$

式中 $Z_{out}(s)$ ——减速机构输出转速,r/min
 $Z_{in}(s)$ ——减速机构输入转速,r/min

减速机构动力输出端直连丝杆,丝杆为螺纹结构,则传递函数为常数,即

$$G_4(s) = p \tag{22}$$

式中 p ——丝杆导程,mm

查询相关参数可知,伺服电机电动势系数为 5.57×10^{-3} V·s/rad,转动惯量为 1.688 kg·cm²,电机电阻为 0.35 Ω,电机转矩系数为 0.583 N·m/A。电位计供电电压为 5 V,模拟量与数字信号的转换系数为 0.15,丝杆导程为 5 mm,将数据代入得

$$G(s) = \frac{13.41}{s(0.157s + 1)} \tag{23}$$

电位计输出电压信号变化量与推杆位置变化量比值为 0.05,则闭环反馈系统传递函数 $G_z(s)$ 为

$$G_z(s) = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)} = \frac{4.47}{0.0523^2s + 0.333s + 0.2235} \tag{24}$$

3.3.3 控制器设计

控制系统需根据地形起伏情况对捡拾高度进行实时精准调控,实际仿形效果受系统控制策略的影响。因此建立捡拾高度与输入信号的关系模型,以此设计捡拾高度 PID 控制策略。由于丘陵山地地形

起伏波动幅度较大,控制系统受到干扰因素影响较为明显^[23]。因此采用模糊 PID 控制器,控制原理如图 12 所示。

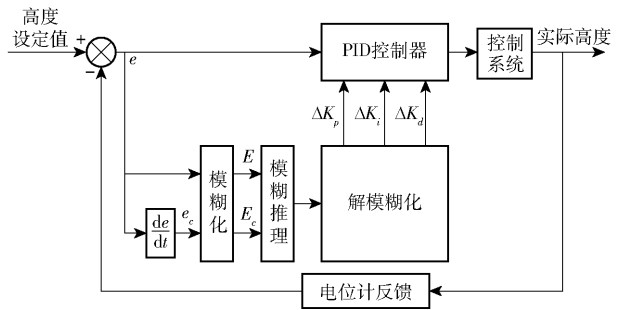


图 12 模糊 PID 控制原理
Fig. 12 Schematic of fuzzy PID control

伺服电动推杆内电位计获取推杆的伸缩量后,根据推杆伸缩量与捡拾滚筒浮动高度的关系式可得捡拾高度的实时反馈值。此时控制系统收到反馈信息后会将其与高度设定值进行比较,得出高度偏差 e 和高度偏差变化率 e_c 。将 2 个变量进行模糊化处理,得到语言变量 E 和 E_c ,控制器再进行模糊推理和解模糊化,结合实际情况制定模糊推理调节器和控制规则。通过模糊控制规则表,确定输出语言变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 各自对应的隶属度。然后得出 PID 控制器控制参数的修正值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,以此达到 PID 参数在线自整^[24-25]。在控制系统运行过程,模糊 PID 控制器会实时监测伺服电动推杆实际伸缩位移,并输出对应控制量进行调整,以实现捡拾高度的高精度自适应控制。

根据控制系统的实际情况设置仿形捡拾高度偏差 e 、高度偏差变化率 e_c 及输出语言变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的基本论域、量化论域与模糊子集,如表 1 所示。建立模糊 PID 的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 控制规则表,并分别输入到规则编辑器,完成模糊 PID 控制器的设计^[26-30]。

表 1 模糊 PID 算法参数设置

Tab. 1 Fuzzy PID algorithm parameters setting			
参数	基本论域	量化论域	量化因子
e	[-20 , 20]	[-6 , 6]	0.3
e_c	[-12 , 12]	[-6 , 6]	0.5
ΔK_p	[-1.2 , 1.2]	[-6 , 6]	5
ΔK_i	[-0.2 , 0.2]	[-6 , 6]	30
ΔK_d	[-0.1 , 0.1]	[-6 , 6]	60

3.3.4 仿真试验

为验证系统控制策略的可靠性及优化控制系统相关参数,在 Matlab/Simulink 模块中分别搭建传统 PID 与模糊 PID 的控制系统仿真模型,设置仿真时间为 1.0 s,采样时间为 15 ms,在输入高度预设值

10、30、50、70 mm 进行仿真试验,试验结果如图 13 所示。

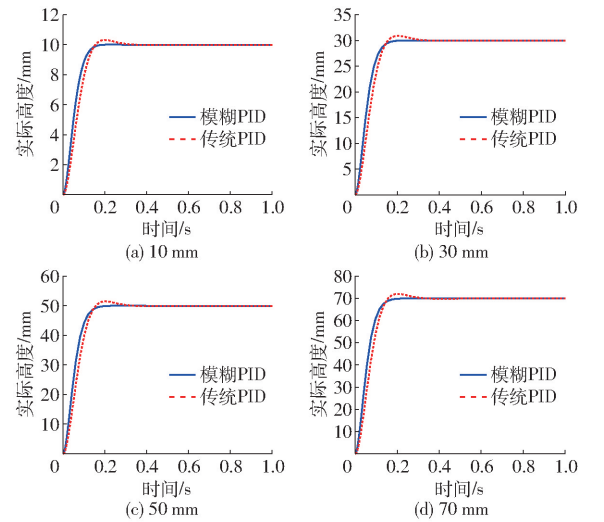


图 13 Simulink 仿真结果
Fig. 13 Simulation results

由图 13 可得,在输入高度设定值 10、30、50、70 mm 时,模糊 PID 控制器平均上升时间为 0.154 5 s,相对于传统 PID 控制器平均上升时间 0.183 4 s 减少 15.8%。以±2%作为稳态值允许误差带,模糊 PID 平均调节时间为 0.265 3 s,相对于传统 PID 平均调节时间 0.389 1 s 减小 31.8%。在输入高度增大时,模糊 PID 控制器性能变化较小,而传统 PID 控制器的超调量相对增大,说明模糊 PID 控制器可以根据输入对系统参数进行自整,最终实现超调量更小、调节时间更短。在实现仿形浮动捡拾作业过程,控制系统能更精确的控制捡拾滚筒的捡拾高度,保证仿形装置执行的准确度。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证仿形浮动秸秆捡拾控制系统实际田间作业性能,于 2025 年 10 月 30 日在黑龙江省哈尔滨市阿城区合兴村收获后玉米田内进行田间试验,试验现场如图 14 所示。试验地具有典型的丘陵山地区域地形特点,田间地形起伏明显,利用高精度地形采集器测得该地块平均坡度为 12.15%,最大坡度为 20.81%。试验地块长度为 500 m,宽度为 120 m,田间地表玉米秸秆覆盖良好,平均秸秆覆盖量为 1.85 kg/m²,利用烘干法测得秸秆平均含水率为 19.26%。测试仪测得地块表面 5 cm 下土壤紧实度为 66.5 N/cm²,地表下 5 cm 处土壤含水率为 15.9%。牵引动力采用雷沃欧豹 704 型轮式拖拉机,额定功率 51.5 kW,试验设备包括电子秤、米尺等。



图 14 捡拾打捆田间试验

Fig. 14 Field test of straw pickup and baling

4.2 试验方法与指标

试验方法和评价指标参照 GB/T 25423—2023《方草捆打捆机》和 GB/T 10395.20—2021《农林机械 安全 第 20 部分:捡拾打捆机》及其他打捆机械相关试验方法设计打捆试验流程。按照秸秆打捆作业农艺要求,捡拾高度设置为 100 mm,为测试仿形浮动捡拾控制系统的实际效果,采用对比试验方法,将待捡拾地块分为试验区与对照区,每区分为 3 条试验带,试验带长、宽分别为 100、3 m。每条试验带分别设定打捆机前进速度为 2、3、4 km/h,捡拾滚筒转速取 110 r/min。其中试验组设置控制系统为“自动模式”,此时打捆机可实现地形检测与仿形浮动捡拾功能;对照组设置为“手动模式”,在作业过程捡拾高度保持不变。机具调试完毕后先后在试验区、对照区进行秸秆捡拾打捆作业。秸秆捡拾率与捆包含土率可综合反映机具在作业过程仿形捡拾效果,因此以秸秆捡拾率、捆包含土率为试验指标。对于稻麦、玉米等作物,参照相关国家标准,秸秆捡拾率≥95%、捆包含土率≤5%视为合格,计算式为

$$\eta = \frac{M_b - M_a}{M_b} \times 100\% \tag{25}$$

$$T = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \tag{26}$$

- 式中 η ——秸秆捡拾率,%
 M_b ——试验前取样点内秸秆总质量,kg
 M_a ——试验后取样点内残余秸秆质量,kg
 T ——捆包含土率,%
 m_1 ——样品中含土质量,kg
 m_2 ——取样样品质量,kg

4.3 试验结果及分析

试验完成后,秸秆捡拾率与捆包含土率试验结果箱线图如图 15 所示。

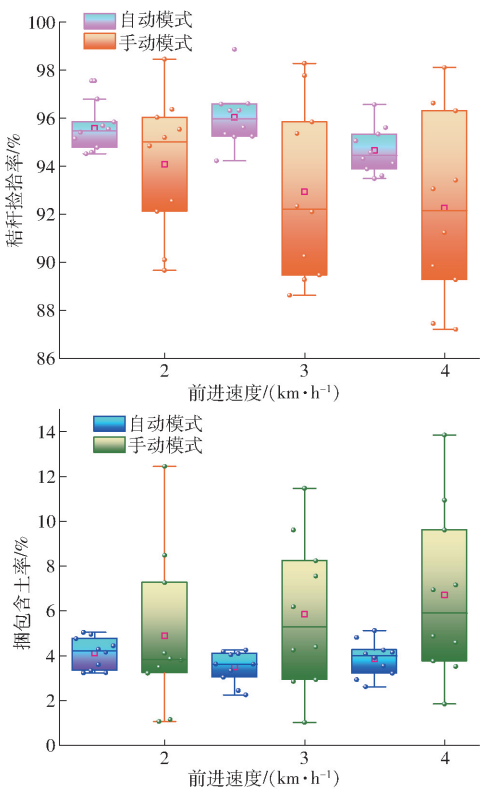


图 15 2 种控制模式下试验结果

Fig. 15 Comparison of test results under two control modes

由图 15 可知,机具处于自动模式时前进速度在 2、3、4 km/h 时秸秆捡拾率平均值分别为 95.591%、96.039%、94.659%,相比手动模式对应前进速度 94.091%、92.937%、92.256% 的秸秆捡拾率平均值分别提高 1.500、3.102、2.403 个百分点。自动模式捆包含土率平均值分别为 4.102%、3.485%、3.861%,相比手动模式下捆包含土率平均值 4.888%、5.849%、6.707% 分别降低 0.786、2.364、2.846 个百分点。且由图 15 直观得出,自动模式下秸秆捡拾率与捆包含土率试验结果变化幅度较小,在前进速度为 3 km/h 时二者均达到最优值。表明在仿形浮动控制系统介入下机具仿形捡拾作业效果

理想,且浮动高度误差控制在一定范围内;手动模式下秸秆捡拾率及捆包含土率试验结果不稳定,在不同前进速度下秸秆捡拾率最低为 86.11%,捆包含土率最高达到 12.45%。因此,自动模式仿形浮动捡拾作业效果显著优于手动模式,且秸秆捡拾率与捆包含土率试验结果均满足国家相关标准要求,体现了秸秆仿形浮动捡拾模式的优越性。

5 结论

(1) 针对丘陵山地秸秆捡拾打捆作业过程易出现秸秆捡拾率低、捆包含土率高等问题,本研究以德沃科技 9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机为载体,设计了主动式仿形浮动秸秆捡拾控制系统、摆动式地形检测装置、仿形执行装置等,可在复杂工况下高效完成秸秆的仿形捡拾、稳定输送、压缩打捆及实时捡拾高度监测等作业。

(2) 对局部凸起、凹陷地块秸秆捡拾过程进行分析,指出复杂工况下常规打捆机作业过程中所产生漏捡区域大、弹齿触土等问题。对捡拾滚筒的弹齿运动进行分析,探究在丘陵山地农田完成秸秆捡拾作业的必要条件。通过对摆动式仿形检测装置、仿形执行装置的运动学及动力学分析,确定了关键部件的结构参数及工况范围。

(3) 建立仿形浮动捡拾控制系统模型,实现了捡拾高度的负反馈控制。设计了仿形浮动控制系统模糊 PID 控制器,有效提高了捡拾高度的控制精度,通过 Simulink 仿真试验验证了控制系统的合理性。

(4) 田间试验结果表明,在丘陵山区复杂地况下进行秸秆捡拾作业时,仿形浮动捡拾控制系统介入下作业效果显著优于手动模式。当机具前进速度 3 km/h、捡拾滚筒转速 110 r/min、捡拾高度 100 mm 时,秸秆捡拾率为 96.039%,捆包含土率为 3.485%,满足设计要求及相关国家标准。

参 考 文 献

[1] 崔思远,曹蕾,陈聪,等. 基于应用场景的丘陵山区农业机械化发展路径研究[J]. 智能化农业装备学报, 2024, 5(2): 1-8.
Cui Siyuan, Cao Lei, Chen Cong, et al. Path research on the agricultural mechanization development in hilly and mountainous areas based on application scenarios[J]. Journal of Intelligent Agricultural Equipment, 2024, 5(2): 1-8. (in Chinese)

[2] 韩亚芬,董昊,吴海华,等. 丘陵山区农业机械化发展现状与思考[J]. 农业工程, 2025, 15(10): 1-7.
Han Yafen, Dong Hao, Wu Haihua, et al. Development situation and considerations on agricultural mechanization in hilly and mountainous areas[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(10): 1-7. (in Chinese)

[3] 陈理,赖有春,陈帅宇,等. 基于文献计量学的玉米秸秆利用及关键共性技术分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 224-236.
Chen Li, Lai Youchun, Chen Shuaiyu, et al. Analysis of the key generic technologies for the utilization of maize stovers based on bibliometrics[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 224-236. (in Chinese)

[4] 王健,张辉,沈玉君,等. 中国循环农业发展实践与推进路径探究[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 12-21.
Wang Jian, Zhang Hui, Shen Yujun, et al. Development practice and promotion route of circular agriculture in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(22): 12-21. (in Chinese)

- [5] 王东洋, 何亚凯, 韩亚芬, 等. 丘陵山区农业机械研究现状及发展建议[J]. 农业工程, 2023, 13(12): 5–10.
Wang Dongyang, He Yafen, Han Yafen, et al. Current status and development suggestions of agricultural machinery research in hilly and mountainous areas[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(12): 5–10. (in Chinese)
- [6] 贾彭程, 徐福东, 王金武, 等. 轻简型水稻秸秆捡拾打捆一体机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 298–307.
Jia Pengcheng, Xu Fudong, Wang Jinwu, et al. Design and test of light-weight rice straw picking and baling integrated machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 298–307. (in Chinese)
- [7] 张克平, 李升升, 李晓康, 等. 丘陵山区苜蓿捡拾打捆裹包一体机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 135–145.
Zhang Keping, Li Shengsheng, Li Xiaokang, et al. Design and experiment of alfalfa picking baling and wrapping integrated machine in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 135–145. (in Chinese)
- [8] Cristiano M A, Rafull L Z, Queiroz D M, et al. Modeling and simulating the harvester header dynamics using 3-way valve and PID controller[J]. Measurement, 2026, 258: 119116.
- [9] Xie Y, Alleyne A, Greer A, et al. Fundamental limits in combine harvester header height control[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME, 2013, 135(3): 5279–5285.
- [10] 宫元娟, 金忠博, 白晓平, 等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 119–128, 138.
Gong Yuanjuan, Jin Zhongbo, Bai Xiaoping, et al. Design and experiment of servo control system for sugarcane header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 119–128, 138. (in Chinese)
- [11] 汪昕, 杨德秋, 李洋, 等. 马铃薯捡拾装置作业参数模糊 PID 自调节系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 361–373.
Wang Xin, Yang Deqiu, Li Yang, et al. Fuzzy PID self adjusting system for operation parameters of potato picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 361–373. (in Chinese)
- [12] 刘伟健, 罗锡文, 曾山, 等. 基于模糊 PID 控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 1–9.
Liu Weijian, Luo Xiwen, Zeng Shan, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 1–9. (in Chinese)
- [13] 许涛, 刘志侠, 高连兴, 等. 曲柄-滑道-弹齿滚筒式花生捡拾机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 62–71.
Xu Tao, Liu Zhixia, Gao Lianxing, et al. Design and optimization of crank–slide type spring-finger cylinder peanut pickup mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4): 62–71. (in Chinese)
- [14] 高连兴, 梁港平, 蔡依琳, 等. 铲齿-双滚筒组合式花生捡拾装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 13–22.
Gao Lianxing, Liang Gangping, Cai Yilin, et al. Pickup device with shovel teeth and double cylinders for the bunch of peanuts [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 13–22. (in Chinese)
- [15] 史明伟, 王明刚, 王伟, 等. 棉秆粉碎与残膜回收打捆一体机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 397–406.
Shi Mingwei, Wang Minggang, Wang Wei, et al. Design and experiment of integrated machine for cotton stalk crushing and residual film recycling and baling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 397–406. (in Chinese)
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [17] Luo Y, Liao Z, Shi S, et al. Design and testing of a 2–DOF adaptive profiling header for forage harvesters[J]. Agronomy-Basel, 2024, 14(9): 1909.
- [18] Wang S, Li B, Chen S, et al. Design and performance test of soybean profiling header suitable for harvesting bottom pods on film[J]. Agriculture-Basel, 2024, 14(7): 1058.
- [19] 李尚平, 任泓宇, 莫一凡, 等. 基于双模态与模糊自适应 PID 控制的甘蔗收获机切梢器智能定位系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 366–375.
Li Shangping, Ren Hongyu, Mo Yifan, et al. Intelligent positioning system of sugarcane harvester tip cutter based on bimodal and fuzzy adaptive PID control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 366–375. (in Chinese)
- [20] Ni Y, Jin C, Chen M, et al. Computational model and adjustment system of header height of soybean harvesters based on soil-machine system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 183: 105907.
- [21] 常贺, 刘立晶, 崔巍, 等. 基于超螺旋滑模自抗扰的移栽机调平控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 247–258.
Chang He, Liu Lijing, Cui Wei, et al. Study of leveling control system for transplanters based on super-twisting sliding mode active disturbance rejection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 247–258. (in Chinese)
- [22] 薛冰, 周利明, 牛康, 等. 基于自适应模糊 PID 的小麦播深控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 93–102.
Xue Bing, Zhou Liming, Niu Kang, et al. Sowing depth control system of wheat planter based on adaptive fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 93–102. (in Chinese)
- [23] 肖茂华, 丁甲辰, 朱烨均, 等. 丘陵山地轨道农机具转运平台防失稳系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 170–179.
Xiao Maohua, Ding Jiachen, Zhu Yejun, et al. Design and test of anti-instability system of hilly and mountain track

agricultural machinery transfer platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 170 – 179. (in Chinese)

[24] 倪子健, 李文强, 杨世香. 模糊 PID 控制策略研究及规则库的构建与应用[J]. 机械设计, 2026, 43(1): 11 – 20.
Ni Zijian, Li Wenqiang, Yang Shixiang. Research on fuzzy PID control strategies as well as construction and application of rule base[J]. Journal of Machine Design, 2026, 43(1): 11 – 20. (in Chinese)

[25] 邱长龙, 马程宏, 杜小强, 等. 基于 BAS 改进模糊 PID 算法的旋耕机具自适应调平控制研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 385 – 394.
Qiu Changlong, Ma Zenghong, Du Xiaoqiang, et al. Adaptive leveling control of rotary tillage equipment based on BAS fuzzy PID algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 385 – 394. (in Chinese)

[26] Nie J, Luo H, Zhou Y, et al. Design and test of a low-loss soybean header based on synchronous profiling[J]. Agriculture-Basel, 2023, 13(8): 1580.

[27] Qin H, Wang L, Wang S, et al. A fuzzy adaptive PID coordination control strategy based on particle swarm optimization for auxiliary power unit[J]. Energies, 2024, 17(21): 5311.

[28] 丁征亮, 马少春, 霍鹏, 等. 甘蔗收获机入土切割深度控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 121 – 127.
Ding Zhengliang, Ma Shaochun, Huo Peng, et al. Research on under-the-ground basecutting control system of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S2): 121 – 127. (in Chinese)

[29] 付作立, 宫志超, 褚青昕, 等. 高速免耕玉米播种单体镇压力主动调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 273 – 284.
Fu Zuoli, Gong Zhichao, Chu Qingxin, et al. Design and test of active control system for soil compaction of high speed no-tillage maize planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 273 – 284. (in Chinese)

[30] 安晓飞, 周雨来, 李立伟, 等. 玉米免耕播种机镇压力精准调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 72 – 80.
An Xiaofei, Zhou Yulai, Li Liwei, et al. Design and experiment of precision control system for compaction pressure force of corn no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 72 – 80. (in Chinese)

(上接第 213 页)

[18] 王德成, 赵彦瑞, 尤泳, 等. 履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 178 – 187.
Wang Decheng, Zhao Yanrui, You Yong, et al. Design and experiment of self-propelled tracked chassis of king grass harvester for gentle sloping fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 178 – 187. (in Chinese)

[19] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平山地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 358 – 369.
Sun Jingbin, Chu Guoping, Pan Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358 – 369. (in Chinese)

[20] 张兆国, 王媛, 温博, 等. 自走式三七联合收获机设计与行驶通过性试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 306 – 319.
Zhang Zhaoquo, Wang Yuan, Wen Bo, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 306 – 319. (in Chinese)

[21] 戚江涛, 蒙贺伟, 坎杂, 等. 基于 EDEM 的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 65 – 71.
Qi Jiangtao, Meng Hewei, Kan Za, et al. Analysis and test of feeding performance of dual-spiral cow feeding device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 65 – 71. (in Chinese)

[22] 付建伟, 张国忠, 谢干, 等. 双通道喂入式再生稻收获机研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 11 – 20.
Fu Jianwei, Zhang Guozhong, Xie Gan, et al. Development of double-channel feeding harvester for ratoon rice[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 11 – 20. (in Chinese)

[23] 樊启洲, 邵耀坚. 螺旋滚筒在粘土上推进力的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 1998(4): 20 – 24.
Fan Qizhou, Shao Yaojian. A mathematical model for study the tractive force of screws on saturated clay soil[J]. Tractor & Farm Transporter, 1998(4): 20 – 24. (in Chinese)

[24] Thakur C S, Morrissey P J, Sun J, et al. Micromechanical analysis of cohesive granular materials using the discrete element method with an adhesive elasto-plastic contact model[J]. Granular Matter, 2014, 16(3): 383 – 400.

[25] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116 – 123.
Xiang Wei, Wu Mingliang, Lü Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116 – 123. (in Chinese)

[26] 莫泓滔. 船式拖拉机叶轮-土壤相互作用仿真与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
Mo Hongtao. Simulation and experiment on impeller – soil interaction of boat-tractor[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese)