doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.018

玉米免耕播种机动力补偿自适应清秸装置设计与试验

张银平[1]　郝泽华[1]　徐　婷[1]　刁培松[1]　周　华[1]　梅文凯[2]
(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东国丰机械有限公司, 济宁 272100)

摘要: 针对黄淮海两熟区麦茬地秸秆覆盖量大、切碎质量差、根茬处理难,传统玉米免耕播种机清秸清茬效果有限,能耗高,高速作业易拥堵等问题,设计了动力补偿自适应清秸装置。通过分析清秸盘前倾角和安装夹角、作业速度和清秸盘转速等参数对清秸作业效果的影响,确定了清秸装置结构参数和运动参数的取值范围。以作业速度、清秸盘转速和安装夹角为试验因素,以种床清秸率和作业功耗为试验指标,通过 EDEM 离散元仿真软件,对不同参数下清秸装置作业进行仿真对比,确定了各参数对清秸装置性能的影响规律。设计了被动清秸和主动清秸结合的动力补偿自适应控制系统,进行田间试验,结果表明:当出现拥堵时,清秸装置能够及时进行动力补偿,进入主动清秸作业状态,解决拥堵;作业速度为 12 km/h、清秸盘安装夹角为 67.5°、清秸盘转速为 130 r/min、入秸入土深度为 55 mm 时,平均种床清秸率为 88.93%,最高达 91.33%,较完全主动清秸方式节省功耗 43.50% 以上,作业幅宽满足黄淮海两熟区免耕播种作业要求。

关键词: 免耕播种机; 清秸装置; 动力补偿; 自适应控制; 种床清秸率; 离散元
中图分类号: S23　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0174-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Dynamic Compensation Adaptive Straw Removal Device for Corn No-till Seeder

ZHANG Yinping[1]　HAO Zehua[1]　XU Ting[1]　DIAO Peisong[1]　ZHOU Hua[1]　MEI Wenkai[2]
(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*
2. *Shandong Guofeng Machinery Co., Ltd., Jining* 272100, *China*)

Abstract: Corn no-till seeding in the wheat stubble field of Huang-Huai-Hai double-cropping area was facilitated the problems of large amount of straw covered, poor quality cutting and difficult stubble treatment. However, the performance of removing stubble by traditional corn no-tillage planter was limited, results in easy congestion in high-speed operation and high energy consumption. A dynamic compensation adaptive straw removal device was designed. By analyzing the influence of front tilt angle, installation angle, working speed and rotating speed of the cleaning tray on the cleaning effect, the value range of the structure parameters and motion parameters of the straw removal device were determined. With the operation speed, rotation speed and installation angle as test factors, and the removal rate and power consumption as test indexes, the operation of the straw removal device under different parameters was simulated and compared by using EDEM discrete element simulation software, and the influence rule of each parameter on the performance of the straw removal device was determined. Meanwhile, a dynamic compensation adaptive control system combining passive and active straw clearing was designed and field experiments were carried out. The results showed that when congestion occurred, the dynamic compensation in the straw removal device was carried out and the device entered the active stubble clearing mode automatically. While the straw removal device was dived by electric machine and the congestion of straw removal device could be solved in time. When the operation speed was 12 km/h, the installation angle of the two straw tray was 67.5°, the rotation speed of the straw tray was 130 r/min, and

收稿日期: 2024-09-06　修回日期: 2024-09-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000401-2)、山东省中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0339)、山东省农业重大技术协同推广计划项目(SDNYXTTG-2024-03)和山东省自然科学基金项目(ZR2022QE150)
作者简介: 张银平(1989—),女,副教授,博士,主要从事旱作农业智能装备研究,E-mail: zhangyinping929@163.com
通信作者: 周华(1991—),男,讲师,博士,主要从事旱作智能农机装备研究,E-mail: zhouhua688@163.com

the depth of straw insertion was 55 mm, the average straw removal rate was 88.93% and the maximum was 91.33%. However, the power dissipation was lower 43.50% than that of the completely active straw removal mode and the operation width met the requirement of no-tillage sowing. The research result can provide an idea for the design of high speed corn no-till planter in Huang - Huai - Hai double-cropping area.

Key words: no-till seeder; straw removal device; dynamic compensation; adaptive control; straw clearing rate of seedbed; discrete element

0　引言

玉米是中国主要粮食作物之一，常年需求量为 2.5×10^8 t，2023 年全年进口量 2.713×10^7 t[1]，当务之急是“稳住面积，主攻单产，力争多增产”[2-3]。在耕地资源有限的条件下，提高玉米单产是实现大面积增产的有效途径，除品种、栽培方式、管理措施等因素外，机械化播种质量是影响玉米产量的重要因素，高质量播种有利于产量提升[4]，提高机械化播种质量对实现玉米单产提升、保证粮食安全具有重要意义。

良好的清秸防堵性能是保证免耕播种机高速、高质量播种的前提[5]，一直是免耕播种领域的研究重点。国外免耕播种机清秸防堵技术偏重于被动式，采用重力圆盘破茬切土、拨草盘清秸或多梁结构增大行距等解决秸秆覆盖还田下免耕播种机的拥堵问题。MALASLI 等[6]对重力圆盘安装角度进行了研究，分析了圆盘水平和竖直方向倾角对其受力的影响，得到最佳角度组合；FALLAHI 等[7]通过试验研究得出双侧清秸盘与圆盘开沟器结合的防堵装置能适应秸秆覆盖地的免耕播种作业；SARAUSKIS 等[8]对双侧清秸盘工作参数进行了研究，分析了倾斜角度和盘齿入土深度对清秸效果的影响，得到最佳工作参数；TORBERT 等[9]针对大量秸秆覆盖时双侧清秸盘产生拥堵的问题，在清秸盘前增加了 2 根挠性软管推动秸秆残茬，再由清秸盘将秸秆拨离种带，为开沟器创造良好的入土环境。国内免耕播种机以中小轻型机为主，防堵技术多为粉碎旋耕[10-11]，土壤扰动大、能耗高[12]，针对此，贾洪雷等[13-14]设计了组合刀片式防堵机构和双刀盘异向等速动态仿生破茬防堵机构，将秸秆切断而不粉碎，减小动力消耗；赵宏波等[15]设计了旋切后抛防堵装置，与传统粉碎旋耕相比，功耗减小 13.83%，土壤扰动减小 37.5%；卢彩云等[16]设计了滑板压秆旋切式防堵装置，相较于传统旋耕破茬装置动土量小，能耗低，但切断式清秸能力有限，种床秸秆清除率低；王奇等[17-18]基于秸秆移位原理，对传统清秸盘进行了优化，设计了星齿凹面清秸盘，玉米茬地种床清秸率为 92.2%；曹鑫鹏等[19]设计了主动旋转集行清秸装置，将播种带上的玉米秸秆集中到非播种带上，种带清秸率为 98.3%；侯守印等[20-21]设计了玉米原茬地秸秆侧抛覆秸防堵装置，将播种行上的玉米秸秆侧抛到已播行，种带清秸率为 91.03%，同时设计了带有助推螺旋的清秸盘，高速作业种床秸秆清除率大于 85%[22]；高振等[23]设计了协拨组合式玉米条带秸秆清理装置，玉米秸秆清理率为 87% ~ 90%。目前清秸盘及主动集行、侧抛清秸防堵装置主要应用在一熟区玉米茬，针对两熟区麦茬地，方会敏等[24]和王韦韦等[25]分别设计了驱动立式螺旋拨草轮和立式秸秆移位驱动耙，作业速度均小于 6 km/h，种床清洁率大于 90%，但立式清秸机构高速作业阻力大，秸秆易缠绕；姚文燕[26]设计了斜置耕刀，作业速度 6 km/h，秸秆清除率 74.5%，土壤扰动系数 34.7%，虽然优化了侧切削刀曲线，但斜置耕刀增大触茬面积，能耗高。

针对两熟区麦茬地玉米免耕播种机被动清秸存在拥堵、粉碎旋耕清秸能耗高、立式清秸易缠绕等问题，本文将被动清秸与主动清秸结合，设计动力补偿清秸装置，通过理论分析、仿真试验和田间试验确定清秸盘结构参数及动力补偿控制系统参数，为两熟区玉米免耕播种机设计提供理论参考。

1　清秸装置设计

1.1　清秸装置结构和工作原理

动力补偿清秸装置安装在玉米免耕播种机播种单体前端，结构如图 1 所示，主要包括机架、清秸盘、调速电机、传动系统和控制系统等。其中两个清秸盘为清秸作业的主要部件，一个为被动式，一个带有动力补偿驱动系统，两个清秸盘与前进方向呈一定夹角，盘齿在前端交错啮合形成互驱。动力补偿驱动系统由调速电机、电磁离合器、锥齿轮、传动轴以及转速传感器等组成。

免耕播种机正常作业时，清秸盘依靠盘齿与土壤接触被动转动清秸，清秸盘传动轴上安装有转速传感器，当清秸盘拥堵时，转速变慢，低于机具移动速度所对应的清秸盘转速，此时电磁离合器闭合，清秸盘由调速电机驱动，并根据机具移动速度调整转速，从而形成动力补偿，将拥堵秸秆主动清除。整个

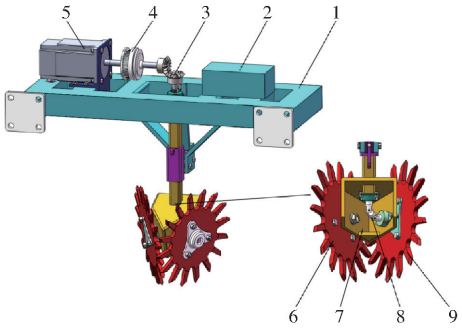


图 1 动力补偿清秸装置结构简图

Fig. 1 Structure diagram of dynamic compensation straw removal device

1. 机架 2. 自适应控制系统 3. 锥齿轮 4. 电磁离合器 5. 调速电机 6. 被动清秸盘 7. 盘支架 8. 万向节 9. 主动清秸盘

免耕播种清秸作业过程由被动清秸和主动清秸结合,形成低能耗被动清秸和拥堵动力补偿主动清秸作业模式。

1.2 关键部件设计

1.2.1 清秸盘结构参数和安装参数

清秸盘作为清秸防堵装置的关键工作部件,其直径、安装偏角、盘齿入秸入土深度、转速等均对清秸效果产生影响[27-29]。

如图 2 所示,设清秸盘盘齿与地面开始接触点为 A,分离点为 E,清秸盘入秸入土深度为 h,在保证不拥堵和清秸率高的前提下,尽量减小清秸装置的土壤扰动量可减少动力消耗。小麦收获后秸秆粉碎还田,地表秸秆平均厚度为 30 ~ 40 mm[5],为保证有效清秸,设置清秸盘齿垂直入秸入土深度 h 为 55 mm,参考《农业机械设计手册》[30],清秸盘直径为

$$d = Kh \tag{1}$$

式中 d——清秸盘直径,mm

K——径深比,取 5 ~ 7[5]

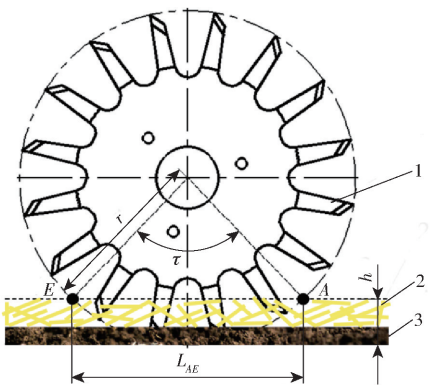


图 2 清秸盘与秸秆土壤互作简图

Fig. 2 Schematic of interaction between straw tray and straw soil

1. 清秸盘 2. 小麦秸秆 3. 土壤

计算可得 d 为 275 ~ 385 mm,齿爪高一般取清秸盘半径 30% ~ 50%[31]。结合整机尺寸,根据文献[19],确定清秸盘直径 d 为 360 mm,齿爪高 d_c 为 70 mm。

清秸盘与地面交点连线长度 L_{AE} 为单个清秸盘的有效作业长度,计算式为

$$L_{AE} = 2r\sin\frac{\tau}{2} = 2\sqrt{r^2 - (r-h)^2} \tag{2}$$

其中 $r = d/2 = 180$ mm

式中 r——清秸盘半径,mm

τ——清秸盘与秸秆土壤初始接触点 A 和离开接触点 E 与清秸盘圆心连线的夹角,(°)

以动力驱动清洁盘为研究对象,以清秸盘圆心为原点 O,机具前进方向为 X 轴正向,建立坐标系,对清秸盘结构参数和作业参数进行分析,如图 3 所示。

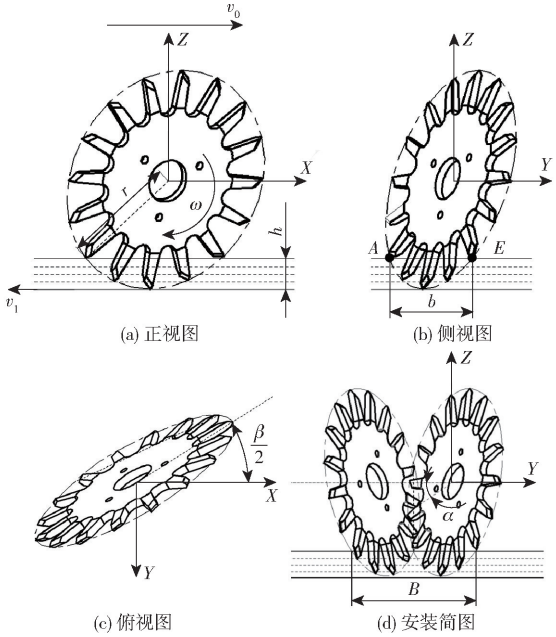


图 3 清秸盘参数分析简图

Fig. 3 Schematics of parameter analysis of cleaning straw tray

假设清秸盘安装前倾角为 α,两清秸盘安装夹角为 β,则单个清秸盘有效作业幅宽 b 为[32-33]

$$b = L_{AE}\sin\frac{\beta}{2} = 2\sin\frac{\beta}{2}\sqrt{r^2 - (r-h)^2} \tag{3}$$

两清秸盘交错对置安装,则清秸装置理论作业幅宽 B 为

$$B = 2b - e = 4\sin\frac{\beta}{2}\sqrt{r^2 - (r-h)^2} - e \tag{4}$$

式中 e——对置清秸盘啮合重叠部分宽度,mm

由式(4)可知,清秸装置作业幅宽与清秸盘安装夹角 β、入秸入土深度 h、清秸盘半径 r 以及啮合重叠部分宽度 e 有关。啮合重叠部分宽度 e 与齿爪啮合交点位置有关,设两清秸盘重叠部分接触点为

C，分离点为 D，CD 中点为 m（图 4），两清秸盘齿爪啮合部分 L_{CD} 过大，旋转过程中容易导致齿爪碰撞，旋转卡顿；啮合部分 L_{CD} 过小，齿爪尖端接触，无法传递足够力矩进行清秸防堵。为保证齿爪有效啮合接触，考虑到齿爪厚度等因素，设计两齿爪交点位于齿爪尖以下 $d_c/3$ 处，则清秸盘啮合重叠部分宽度为

$$e=\frac{1}{3}d_c\sin\frac{\beta}{2} \tag{5}$$

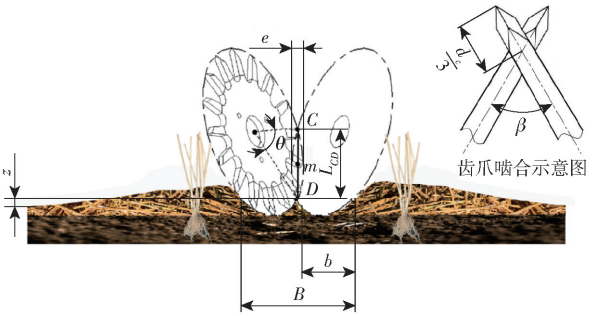


图 4　清秸宽度示意图

Fig. 4　Width diagram of straw

清秸盘重叠前倾可避免出现漏清区域，但前倾角过小，容易出现漏清；前倾角过大，清秸盘作业幅宽减小，因此设计啮合分离点 D 不高于秸秆表面，计算式为

$$z=r-h-r\cos\left(90°-\alpha-\frac{\theta}{2}\right) \tag{6}$$

式中　z——清秸盘啮合分离点 D 离地距离，mm

θ——两啮合点与清秸盘中心连线夹角，(°)

为保证清秸装置作业时不出现漏清区域，在清秸盘尺寸和入秸入土深度确定的前提下，确定清秸盘前倾角 α 为 30°，两清秸盘安装夹角 β 为 60°～75°。

1.2.2　清秸盘运动参数

清秸作业中，清秸盘转速越高秸秆被抛掷距离越远，黄淮海两熟区玉米播种行距一般为 600～650 mm[34-35]，若清秸盘转速过高，秸秆被抛掷到邻行，影响邻行播种。为获得秸秆合理的抛掷距离，确定最佳清秸盘转速，对秸秆被抛掷瞬时进行运动学分析，如图 5 所示，假定秸秆为质点，清秸盘匀速转动，忽略空气阻力。

清秸盘在点 E 结束切拨秸秆，秸秆在点 E 脱离清秸盘并沿清秸盘径向抛出，设秸秆抛出瞬时速度为 v_1，则在 X' 和 Z' 方向上分速度为

$$\begin{cases}v_{1x'}=v_1\cos\dfrac{\tau}{2}=\omega(r-h)\\ v_{1z'}=v_1\sin\dfrac{\tau}{2}=\omega\sqrt{2rh-h^2}\end{cases} \tag{7}$$

式中　$v_{1x'}$——秸秆抛出瞬时速度在 X' 轴分速度，m/s

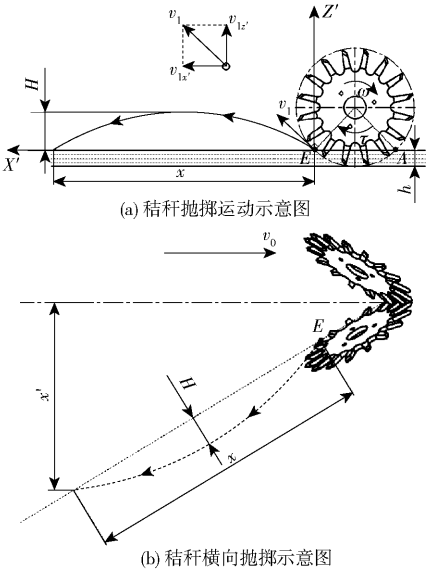


图 5　秸秆抛掷运动分析

Fig. 5　Analysis of straw throwing movement

$v_{1z'}$——秸秆抛出瞬时速度在 Z' 轴分速度，m/s

ω——清秸盘角速度，rad/s

秸秆脱离清秸盘后作抛物线运动，其轨迹方程为

$$z'=v_{1z'}t-\frac{gt^2}{2}=\omega t\sqrt{2rh-h^2}-\frac{gt^2}{2} \tag{8}$$

式中　t——秸秆抛掷运动时间，s

g——重力加速度，m/s^2

秸秆被抛掷最大高度 H 和最大抛掷距离 x 为

$$H=v_{1z'}t=\frac{2\omega^2(2rh-h^2)}{g} \tag{9}$$

$$x=v_{1x'}t=\frac{2\omega^2(r-h)\sqrt{2rh-h^2}}{g} \tag{10}$$

则秸秆横向抛掷距离 x' 为

$$x'=x\sin\frac{\beta}{2}=\frac{2\omega^2(r-h)\sqrt{2rh-h^2}\sin\dfrac{\beta}{2}}{g} \tag{11}$$

气吸式玉米播种机单体宽度一般为 120～140 mm，为防止拥堵，保证播种顺畅，设计种床秸秆清理宽度为 150 mm，则秸秆应被拨离到开沟器的两侧至少 75 mm，但不超过 450 mm 的行间，代入式(11)求得满足作业幅宽的清秸盘转速 n 为 60～150 r/min。为解决高速（10～14 km/h）免耕作业拥堵，清秸盘主动清秸转速应大于被动清秸转速，由此确定清秸盘主动清秸转速为 110～150 r/min。

2　清秸过程仿真试验

根据黄淮海两熟区实际田间秸秆覆盖情况建立“清秸装置-秸秆-土壤”互作模型，模拟实际作业情况，分析影响作业主要因素，寻求最优参数组合。

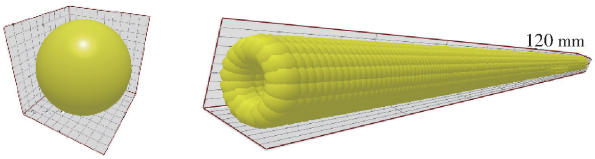
2.1 离散元模型建立

2.1.1 清秸装置模型

为方便计算,对清秸装置模型进行简化处理,只保留主要工作部件,运用 Solidworks 2016 对清秸装置进行实体建模(比例 1∶1),保存. STL 格式并导入 EDEM 2021 软件 Geometry 项中,设置仿真模型材料为 45 号钢,泊松比为 0.31,剪切模量为 7.8×10^{10} Pa,密度为 7 800 kg/m^3[36]。

2.1.2 土槽模型

简化土壤、秸秆模型,采用直径 8 mm 小球作为土壤颗粒,泊松比为 0.38,剪切模量为 1×10^6 Pa,密度为 1 850 kg/m^3。根据田间粉碎秸秆的实际尺寸采样测量,采用 1 mm 小球环绕排列组成外径为 5 mm、壁厚为 1 mm、长度为 120 mm 的空心颗粒为秸秆模型,泊松比设为 0.4,剪切模量为 1×10^6 Pa,密度为 241 kg/m^3[36],如图 6 所示。根据黄淮海两熟区实地情况,结合文献[37-38],设定颗粒力学关系模型为 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型,仿真材料接触参数如表 1 所示。



(a) 土壤颗粒 (b) 秸秆颗粒

图 6 土壤、秸秆颗粒模型

Fig. 6 Soil and straw particle models

表 1 仿真材料接触参数

Tab. 1 Material contact parameters for simulation

项目	滚动摩擦因数	静摩擦因数	恢复系数
部件-土壤	0.05	0.6	0.6
部件-秸秆	0.01	0.3	0.6
土壤-秸秆	0.05	0.3	0.5
土壤-土壤	0.40	0.6	0.6
秸秆-秸秆	0.30	0.3	0.5

在 EDEM 2021 中建立虚拟仿真土槽,尺寸为 2 500 mm×700 mm×140 mm(长×宽×高),土壤与秸秆的颗粒工厂为 2 000 mm×700 mm(长×宽),土壤层厚度为 95 mm,秸秆层厚度为 35 mm,保证土槽内有充足的颗粒进行仿真,如图 7 所示。在颗粒生成过程中,使其在重力作用下从土槽上方自然沉降,且整体生成后在颗粒群上方加载校准土壤密度所需的垂直载荷,进行土壤模型压实,使仿真土壤与实际土壤一致,保证仿真的准确性。

2.2 仿真过程

仿真过程如图 8 所示,设置清秸装置于土槽一侧开始作业,清秸盘入秸入土深度为 55 mm。0~1 s 生成土壤颗粒,1~2 s 土壤颗粒自然沉降,2~4 s 生成秸秆颗粒,4~5 s 秸秆颗粒自然沉降,5~7 s 清秸装置作业,仿真总时长 7 s,预留自然沉降时间保证颗粒达到预设效果,更加贴近真实田间情况。将网格尺寸设置为自动识别与设定,设置虚拟仿真过程固定时间步长为自动时间步长。

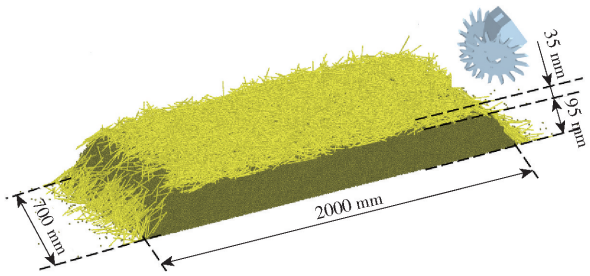


图 7 清秸盘几何模型与虚拟土槽模型

Fig. 7 Geometric model of clearing straw tray and virtual soil trough model

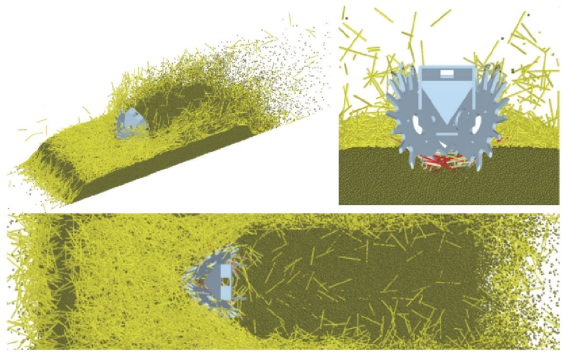


图 8 清秸作业 EDEM 仿真过程

Fig. 8 EDEM simulation process of straw removal operation

2.3 仿真试验设计

为研究清秸装置作业质量和功耗,分析影响清秸作业性能的主要因素,得到较优结构参数组合,进行 EDEM 仿真正交试验。根据理论分析结果,确定作业速度、清秸盘转速和清秸盘安装夹角为试验因素,以清秸率和功耗为试验指标,采用三因素三水平 Box-Behnken 试验确定清秸盘最佳参数组合,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	作业速度 v_0/(km·h^{-1})	清秸盘转速 n/(r·min^{-1})	清秸盘安装夹角 β/(°)
-1	10	110	60.0
0	12	130	67.5
1	14	150	75.0

2.4 试验指标

参考 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》[39]并结合实际玉米免耕播种作业技术要求,计算清秸率和功耗。

(1)清秸率

通过 EDEM 软件的 Solve Report 模块，获取建立的秸秆颗粒在清秸装置理论作业幅宽内作业前后的秸秆颗粒数量(图 9)，计算清秸作业清秸率 η，计算式为

$$\eta = \left(1 - \frac{N_1}{N}\right) \times 100\% \tag{12}$$

式中　N——清秸前作业幅宽内秸秆数量

N_1——清秸后作业幅宽内秸秆数量

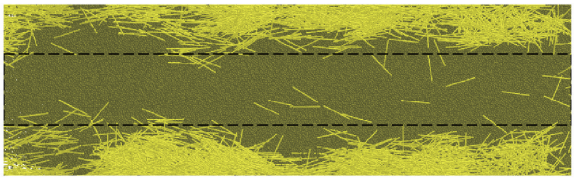


图 9　清秸率测定区域

Fig. 9　Area for determination of straw removal rate

(2)功耗

通过 EDEM 软件的 Analyst Tree 模块，统计仿真过程中所有秸秆颗粒和土壤颗粒受到的总转矩(图 10)，根据转速、转矩和功耗的关系，计算出工作过程中装置的功耗 P，计算式为

$$P = \frac{Tn}{9\,550} \tag{13}$$

式中　T——仿真全过程总转矩，N·m

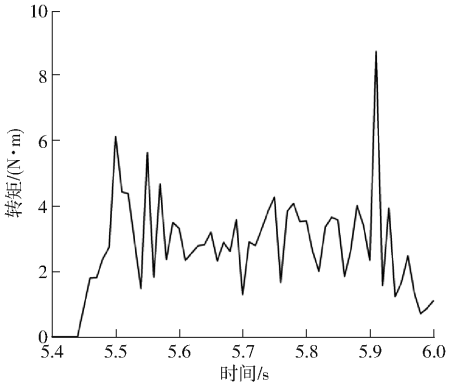


图10　清秸装置转矩变化曲线

Fig. 10　Torque change curve of straw removal device

2.5　仿真试验结果分析

仿真结果如表 3 所示，通过 Design-Expert 软件对试验数据进行二次回归分析和方差分析，筛选出影响显著因素，从而得清秸率 Y_1 和功耗 Y_2 回归方程为

$$Y_1 = 91.01 - 0.93x_1 + 3.23x_2 - 0.38x_3 - 2.67x_1^2 - 1.75x_2^2 - 2.58x_3^2 + 0.78x_1x_2 + 0.64x_1x_3 - 1.37x_2x_3 \tag{14}$$

$$Y_2 = 38.20 + 0.50x_1 + 10.25x_2 + 2.50x_3 - 1.22x_1^2 + 1.78x_2^2 - 0.73x_3^2 + 0.75x_1x_2 - 1.25x_1x_3 - 0.25x_2x_3 \tag{15}$$

式中　x_1、x_2、x_3——因素编码值

表 3　仿真试验设计与结果

Tab. 3　Simulation test design and results

试验序号	因素			清秸率 Y_1/%	功耗 Y_2/W
	作业速度/(km·h^{-1})	清秸盘转速/(r·min^{-1})	清秸盘安装夹角/(°)		
1	10	150	67.5	90.01	48
2	12	110	60.0	82.25	27
3	14	130	75.0	85.61	39
4	12	130	67.5	90.50	37
5	12	130	67.5	89.90	40
6	12	150	75.0	88.37	51
7	12	110	75.0	83.96	31
8	12	130	67.5	91.60	38
9	12	130	67.5	92.10	39
10	14	150	67.5	88.91	50
11	10	110	67.5	85.81	29
12	12	150	60.0	92.13	48
13	14	110	67.5	81.60	28
14	14	130	60.0	84.84	35
15	10	130	75.0	85.40	40
16	10	130	60.0	87.18	31
17	12	130	67.5	90.93	37

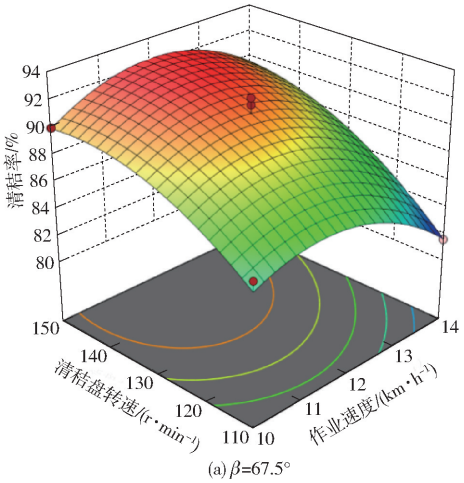
清秸率 Y_1 作为清秸作业效果的重要指标，方差分析如表 4 所示，可以看出回归模型极显著($P = 0.000\,1 < 0.01$)。3 个因素显著性从大到小依次为清秸盘转速 n、作业速度 v_0、清秸盘安装夹角 β。其中清秸盘转速与清秸盘安装夹角交互作用对清秸率存在显著影响，两者乘积与清秸率呈负相关，作业速度一定，清秸盘转速为 130 r/min、安装角度为 67.5°时，清秸率最高为 92.10%；当转速小于 130 r/min 时，清秸盘转速越大，对秸秆切拨效果越好；当转速

表 4　清秸率方差分析

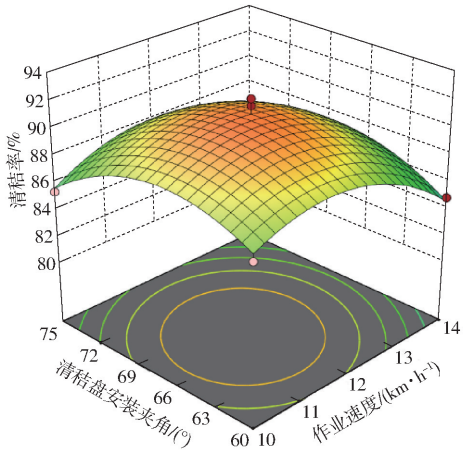
Tab. 4　Variance analysis of straw removal rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	181.73	9	20.19	26.18	0.000 1
x_1	6.92	1	6.92	8.97	0.020 1
x_2	83.21	1	83.21	107.86	<0.000 1
x_3	1.17	1	1.17	1.52	0.257 8
x_1x_2	2.42	1	2.42	3.13	0.120 0
x_1x_3	1.63	1	1.63	2.11	0.189 9
x_2x_3	7.48	1	7.48	9.70	0.017 0
x_1^2	30.06	1	30.06	38.96	0.000 4
x_2^2	12.92	1	12.92	16.75	0.004 6
x_3^3	27.96	1	27.96	36.24	0.000 5
残差	5.40	7	0.77		
失拟差	2.37	3	0.79	1.04	0.465 7
纯误差	3.03	4	0.76		
总和	187.13	16			

大于 130 r/min 时,清秸率有所下降(图 11a),这是因为转速过高,部分秸秆被清理抛起后落回到清秸盘作业幅宽范围内,导致清秸率降低。在试验预设速度范围内,清秸盘转速和安装夹角一定时,作业速度为 12 km/h 时清秸率最高。



(a) β=67.5°



(b) n=130 r/min

图 11 试验因素对清秸率影响的响应曲面

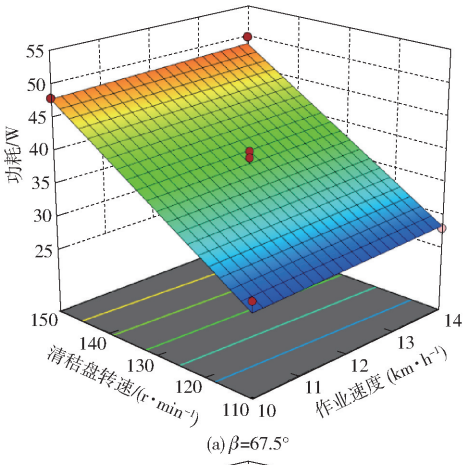
Fig. 11 Response surfaces of influence of test factors on straw removal rate

在清秸作业满足免耕播种的作业宽幅和清秸率条件下,清秸装置功耗 Y_2 越小越好。清秸装置功耗方差分析如表 5 所示,回归方程如式(15)所示。根据方差分析,回归模型极显著(P<0.000 1),决定系数为 0.971 1,回归模型拟合度高,影响因子对清秸装置功耗有较高的影响。3 个因素对功耗指标影响显著性从大到小依次为清秸盘转速 n、清秸盘安装夹角 β、作业速度 v_0。清秸盘转速与功耗呈正相关,清秸盘转速越大功耗越高(图 12a);清秸盘安装夹角越大,作业时清秸盘与秸秆颗粒和土壤颗粒在作业速度方向上正对接触面积越大,清秸盘横向切拨秸秆颗粒做功也越大,在清秸盘转速和作业速度相同水平时,清秸盘安装夹角为 60.0°比 75.0°功耗平均低 15.39%。

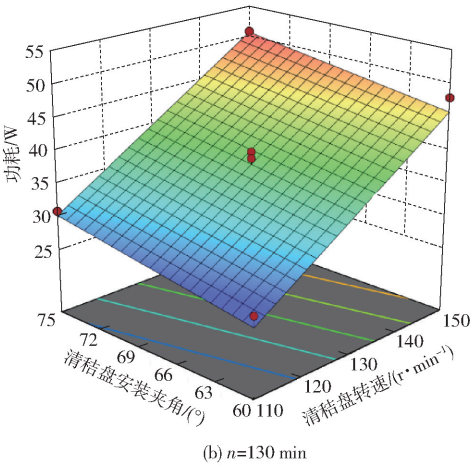
表 5 功耗方差分析

Tab. 5 Variance analysis of power consumption

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	921.96	9	102.44	60.77	<0.000 1
x_1	2.00	1	2.00	1.19	0.312 1
x_2	840.50	1	840.50	498.60	<0.000 1
x_3	50.00	1	50.00	29.66	0.001
x_1x_2	2.25	1	2.25	1.33	0.285 9
x_1x_3	6.25	1	6.25	3.71	0.095 6
x_2x_3	0.25	1	0.25	0.15	0.711 6
x_1^2	6.32	1	6.32	3.75	0.094 1
x_2^2	13.27	1	13.27	7.87	0.026 3
x_3^2	2.21	1	2.21	1.31	0.289 5
残差	11.80	7	1.69		
失拟差	5.00	3	1.67	0.98	0.485 8
纯误差	6.80	4	1.70		
总和	933.76	16			



(a) β=67.5°



(b) n=130 min

图 12 试验因素对功耗影响的响应曲面

Fig. 12 Response surfaces of influence of test factors on power consumption

为获得清秸装置最佳工作参数组合,对试验因素进行优化设计,遵循提高清秸率、降低功耗的设计原则,采用多目标变量优化方法,结合试验因素边界条件,建立参数约束目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min Y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant x_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant x_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{16}$$

基于 Design-Expert 软件中的多目标参数优化(Optimization)模块对数学模型进行分析求解,可得多组优化参数组合,结合播种作业实际,优化结果中作业速度 12 km/h、转速 130 r/min、清秸盘安装夹角 67.5°参数组合下,清秸率为 92.10%,功耗为 39 W,为最优参数组合。根据优化的结果进行仿真验证试验,与优化结果基本一致。

3　动力补偿自适应控制系统设计

3.1　控制系统组成

基于清秸装置开发动力补偿自适应控制系统,根据播种机实时作业速度调整电机驱动转速,实现清秸盘转速自适应,从而有效防堵,同时减小功率消耗。控制系统主要包括北斗定位模组、转速传感器、舵机、开关驱动模块、电磁离合器以及调速电机等,如图 13 所示。

北斗定位模组和转速传感器分别监测播种机作业速度和清秸盘转速,电磁离合器和调速电机为自适应控制系统的执行元件,检测元件和执行元件通过微控制器连接组成控制系统。为实现自适应清秸作业,北斗定位模组安装在机架上,实时监测播种机作业速度,转速传感器安装在主传动轴位置,实时监测清秸盘作业转速,通过机具移动速度与清秸盘转速的关系判断清秸盘作业是否拥堵。若正常作业无拥堵情况,则开关驱动模块控制电磁离合器断开,电机不工作,被动作业;若出现拥堵情况,则开关驱动模块控制电磁离合器连通,调速电机根据机具移动速度调整相应转速驱动清秸盘主动作业,实现清秸防堵。通过变频器改变供电频率实现电机转速调节。

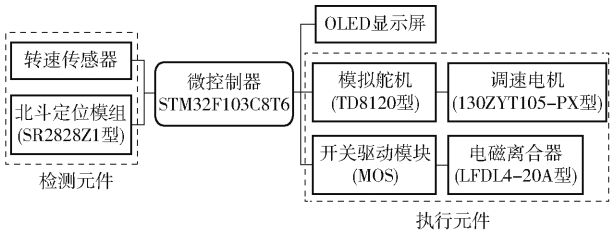


图 13　自适应控制系统结构框图

Fig. 13　Block diagram of adaptive control system

3.2　动力补偿控制原理

系统主要硬件原理框图如图 14 所示。STM32F103C8T6 为微控制器,其工作频率可达 72 MHz,提供丰富的 I/O 口和内部资源,满足设计需求。转速传感器通过 I^2C 总线连接到单片机的硬件 I^2C 引脚(PA1),无遮挡时接收管导通,模块 DO 输出低电平,遮挡时 DO 输出高电平,再通过记录两周期时间间隔,计算传动轴转速即清秸盘实时转速。北斗定位模组(SR2828Z1 型)通过 UART 串口与单片机的 USART2(PA2、PA3)相连,模组采集一次定位信息后,通过 NAME 协议将当前的经纬度信息发送给单片机,单片机利用前后两次的定位信息和信息间隔来计算当前系统的移动速度。OLED 显示屏通过硬件 I^2C(PB8、PB9)接口与单片机连接,可实

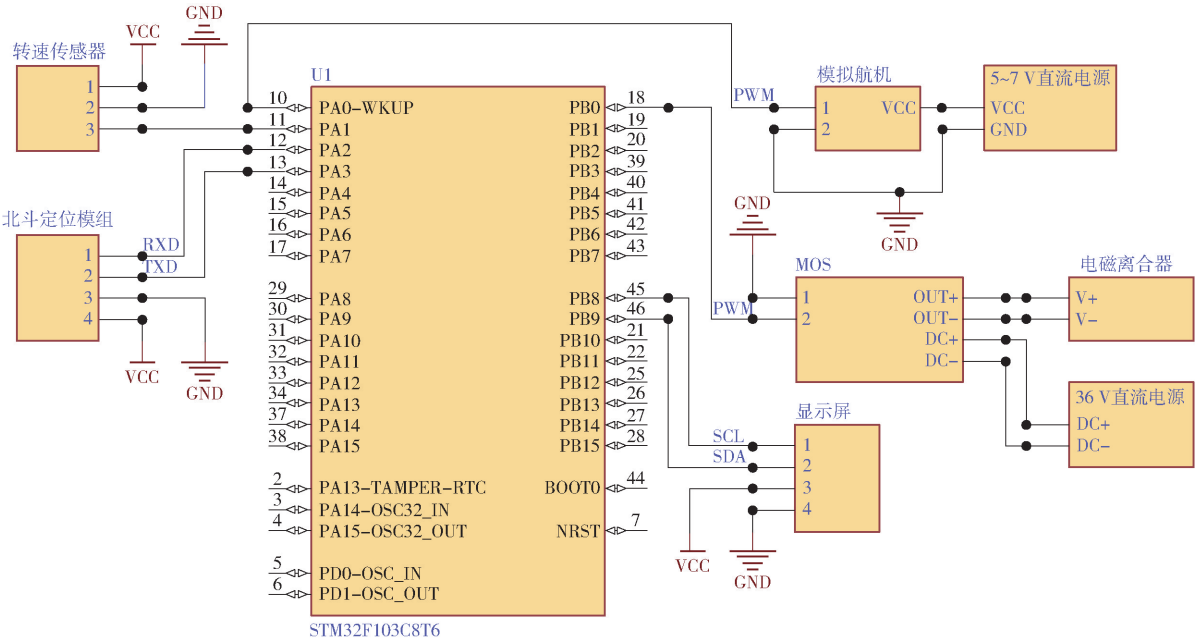


图 14　控制系统硬件框图

Fig. 14　Control system hardware block diagram

时显示系统的传动轴转速和移动速度等。单片机使用定时器控制 PA0 引脚,输出 20 ms 的 PWM 波给 270°模拟舵机(TD8120 型),当 PWM 脉宽在 0.5 ~ 2.5 ms 之间时,舵机可在 0° ~270°之间转动,进而控制变频器改变电源的供电频率,实现调整电机的输出转速。单片机通过 PB0 引脚控制开关驱动模块,从而控制电磁离合器的动作,实现电机输出驱动的传递和保护电机的作用。控制系统设计流程图如图 15 所示。

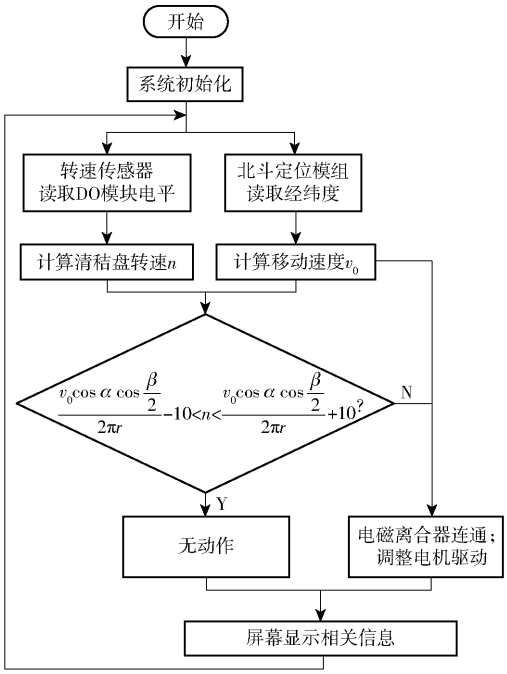


图 15 自适应控制系统设计流程图

Fig. 15 Design flowchart of adaptive control system

机组作业速度监测采用北斗定位模组,选用深圳市星河微电子科技有限公司的 SR2828Z1 型传感器,主芯片采用中科微 AT6558D 型,数据刷新率为 1 ~ 10 Hz,由于机具移动速度是由前后两次定位信息和时间间隔计算得出,所以在不同纬度地区换算公式不同,由此移动速度换算时,参考后期试验点选取山东省淄博市临淄区附近(36°49′N,118°18′E),测量精度误差不超过 0.1%。转速传感器采用槽型光耦模块对比磁感应式传感器,精度高,体积小,响应速度快,使用寿命长,工作几乎不受震动及磁场等其他因素影响,同时也没有机械接触磨损,适合后续复杂的试验环境。调速电机为直流永磁行星齿轮减速电机。OLED 显示屏和开关驱动模块均与单片机连接供电,舵机单独接 5 ~7 V 电源。自适应控制系统实物如图 16 所示。

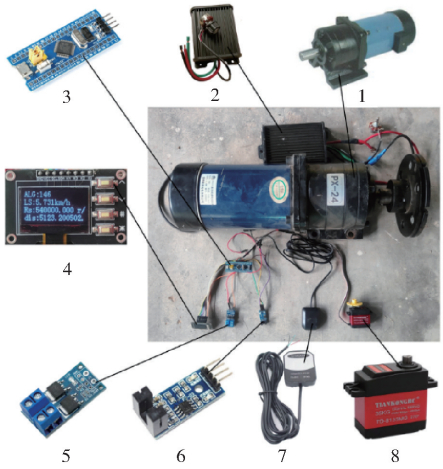


图 16 自适应控制系统实物图

Fig. 16 Physical diagram of adaptive control system

1. 变频器 2. 电机 3. STM32F103C8T6 微控制器 4. OLED 显示屏 5. 开关驱动模块 6. 转速传感器 7. 北斗定位模组 8. 舵机

4 田间试验

4.1 试验条件

田间试验于 2024 年 6 月 17 日在山东省淄博市临淄区淄博富群农机合作社田间进行,试验现场如图 17 所示。将清秸装置安装在沃德 WD454K 型轮式拖拉机上进行作业,试验地块留茬高度平均为 23 cm、秸秆长度平均为 15 cm、秸秆含水率平均为 7.56% 、秸秆单位覆盖量平均为 0.74 kg/m^2。采用 TZS - Ⅱ W 型土壤水分温度测量仪测得土壤含水率为 6.59% ,土壤温度为 34℃,使用 TJS - 450G 型土壤紧实度仪测得土壤紧实度为 3.06 MPa。



图 17 田间试验

Fig. 17 Field trial

4.2 试验设计

将清秸装置通过机架安装在拖拉机后悬挂上,调整好清秸作业位置,调整入秸入土深度为 55 mm,拖拉机牵引清秸装置进行清秸作业。对比试验清秸装置在被动作业、主动作业以及安装自适应控制系统状态下在速度为 12 km/h 时的清秸效果以及功率损耗。每种作业状态在田间作业一个来回(地块长宽均大于 10 m),任意取一个 10 m 范围,按照试验指标记录试验前后的秸秆状态以及整个试验过程中清秸装置的作业状态。

4.3　试验指标

(1)清秸率

试验前对试验田地表秸秆采用五点取样法随机取点，使用电子秤称量，计算平均每单位面积内秸秆质量 G_1，每次试验清秸装置作业结束时，在单位长度的理论作业幅宽内捡拾未被清理的秸秆，称量总质量 G_0(图 18)，计算清秸装置的种床清秸率。每组试验重复 3 次，计算平均值，计算式为

$$\lambda = \left(1 - \frac{G_1}{G_0}\right) \times 100\% \tag{17}$$

式中　λ——清秸率，%

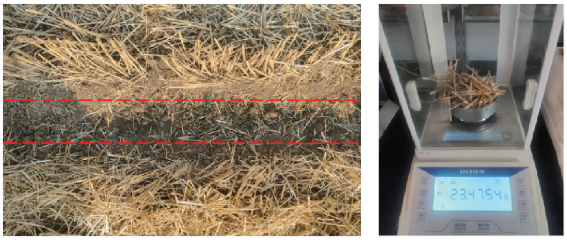


图 18　清秸率测定

Fig. 18　Determination of straw removal rate

(2)秸秆横向移动最大距离

田间试验结束后，取连续一段 1 m 的作业区域，测量被抛掷清理的秸秆到清秸区域中心的最大距离(图 19)，记录数据并计算平均值，比对两熟区玉米种植行距。

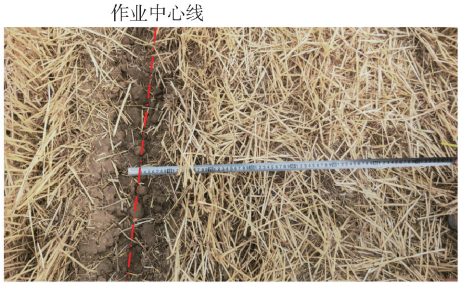


图 19　秸秆横向移动最大距离测量

Fig. 19　Measurement of maximum lateral movement distance of straw

(3)清秸装置通过性

在田间试验中观察记录清秸装置作业过程中和作业结束时秸秆的堆积、缠绕以及清秸盘的拥堵情况。根据农业行业标准 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》[39]及农业农村部农机鉴定总站免耕播种机性能检测要求，判断清秸装置是否正常作业，对比作业性能。

4.4　试验结果分析

田间试验结果显示：清秸装置被动作业时极易出现秸秆堆积、缠绕以及清秸盘拥堵等情况，安装自适应控制系统作业后，清秸装置作业时，当出现拥堵情况后进行动力补偿，进入主动清秸防堵作业状态，未出现通过性问题，如表 6 所示。

表 6　清秸装置田间试验结果

Tab. 6　Results of field test of straw clearing device

作业方式	清秸率/%	秸秆横向移动最大距离/mm	通过性		
			堆积	缠绕	拥堵
被动作业	83.57	320	轻微	/	/
	84.01	380	/	轻微	轻微
	89.63	360	/	/	/
主动作业	91.73	450	/	/	/
	92.97	400	/	/	/
	93.30	490	/	/	
自适应控制作业	89.35	360	/	/	/
	86.12	350	/	/	/
	91.33	440	/	/	/

注：/表示未发生。

(1)清秸率

被动作业平均清秸率为 85.74%，清秸装置重叠设计很好地避免传统清秸装置的漏清问题，作业幅宽内的秸秆得到充分清理，提供高质量种床；主动作业平均清秸率为 92.67%，比被动作业高 6.93 个百分点，高于仿真结果，相差不大，误差原因可能是仿真环境过于理想，而试验中秸秆和土壤含水率有偏差，但误差均在可接受范围内；自适应控制作业以被动清秸为主，以主动补偿清秸为辅，减小了动力消耗，提高了清秸作业的流畅性，保证了清秸效果的稳定性，田间试验平均清秸率为 88.93%。

(2)秸秆横向移动最大距离

清秸装置被动作业和主动作业的秸秆横向移动最大距离相差较大，平均值分别为 353.3 mm 和 446.7 mm。被动作业时清秸盘动力依靠与土壤和秸秆之间的摩擦相互作用，将秸秆甩向两侧；主动作业时由电机驱动清秸盘转动，清秸盘轴扭矩大，将秸秆切抛到两侧，秸秆横向移动最大距离较大。自适应控制作业平均秸秆横向移动最大距离为 383.3 mm，3 种作业方式的秸秆横向移动最大距离均小于玉米播种行距。

通过记录分析自适应控制作业状态下，控制系统输出电机工作数据，在保证清秸装置流畅稳定作业的前提下，比主动作业功率消耗减小 43.50% 以上。与仿真试验结果基本一致，能耗大大降低。并且测量每次作业后苗带清秸宽度均大于 240 mm，符合黄淮海两熟区免耕播种作业幅宽要求。田间试验结果表明，动力清秸装置和自适应控制系统能够较好地实现清秸作业效果，作业质量满足免耕播种作业的农艺要求。

5　结论

(1)设计了一种动力补偿清秸装置，适合在黄

淮海两熟区小麦收获后秸秆条件复杂的麦茬地中进行清秸防堵作业,清秸幅宽大,清秸率高,作业性能稳定,作业效率有显著提升,满足免耕播种机播种的要求。对清秸盘进行运动学分析,得出影响其作业性能的主要参数为清秸盘安装夹角 β、转速 n 和作业速度 v_0,通过理论计算得到各主要参数取值:60.0°≤β≤75.0°,110 r/min≤n≤150 r/min。

(2)运用 EDEM 虚拟仿真软件,以转速、作业速度和清秸盘安装夹角为试验因素,以清秸率和功耗为试验指标,采用虚拟正交试验方法建立了因素与指标间数学模型,运用 Design-Expert 软件对试验结果进行处理,采用多目标变量优化方法建立了优化模型,得出动力补偿清秸装置最优结构参数为转速 130 r/min、作业速度 12 km/h、清秸盘安装夹角 67.5°,该参数组合下清秸率为 92.10%,功耗为 39 W。

(3)运用北斗定位模组、转速传感器和调速电机协同,设计了自适应控制系统,通过实时监测作业速度和清秸盘转速的关系判断清秸盘是否拥堵,调控电机转速进行不同作业速度下的动力补偿驱动。通过试验,验证在自适应控制系统调控下,清秸装置能够保证清秸作业的流畅性和稳定性,并有效减小功率消耗,避免能耗浪费。

(4)田间试验结果表明,对比不同作业方式,主动作业比被动作业清秸率提高 6.93 个百分点,安装自适应控制系统清秸率平均为 88.93%,秸秆横向移动最大距离平均值均小于 450 mm,满足玉米种植行距要求,自适应控制作业比主动作业节省能耗 43.50%以上,作业稳定性较高,具有较高的清秸作业质量,能够适应黄淮海两熟区复杂的秸秆覆盖地况,清理的种床满足玉米种植农艺要求。

参 考 文 献

[1] 肖赟,许晴. 国家粮食和物资储备局宣教中心:粮储月度新闻(2024 年 1 月)[J]. 中国粮食经济,2024(2):70-72.

[2] 徐淑媚,赵霏,徐恒斌,等. 山东省农业机械化绿色可持续发展形势分析及策略研究[J]. 山东农业工程学院学报,2024,41(2):11-17.
XU Shumei, ZHAO Fei, XU Hengbin, et al. Analysis and strategy study on the situation and strategy of green sustainable development of agricultural mechanization in Shandong Province[J]. The Journal of Shandong Agriculture and Engineering University, 2024,41(2):11-17. (in Chinese)

[3] 刘华彬. 促进单产提升保障粮食安全——粮油等主要作物大面积单产提升行动实施综述[J]. 中国农民合作社,2024(1):18-20.

[4] 顾玲. 农业种植技术与现代农业机械化融合探讨[J]. 农业开发与装备,2024(6):41-43.

[5] 卢彩云,罗锡文,李洪文,等. 我国保护性耕作的发展与政策建议[J]. 中国工程科学,2024,26(2):103-112.
LU Caiyun, LUO Xiwen, LI Hongwen, et al. Progress and suggestions of conservation tillage in China[J]. Strategic Study of CAE, 2024,26(2):103-112. (in Chinese)

[6] MALASLI M Z,CELIK A. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194:104304.

[7] FALLAHI S, RAOUFAT M H. Row-crop planter attachments in a conservation tillage system: a comparative study[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1):27-34.

[8] SARAUSKIS E, VAITAUSKIENE K, ROMANECKAS K,et al. Research in strip tillage machine row cleaner technology process [J]. Engineering for Rural Development, 2015, 5:20-22.

[9] TORBERT H A, INGRAM J T, PRIOR S A. Planter aid for heavy residue conservation tillage systems[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(2):478-480.

[10] 李兴国. 我国耕整地机械发展现状及未来趋势[J]. 农机使用与维修,2024(6):86-88.
LI Xingguo. The development status and future trend of China's tillage and land preparation machinery[J]. Farm Machinery Using and Maintenance, 2024(6): 86-88. (in Chinese)

[11] 牛加立. 小麦秸秆还田及免耕播种机械化技术[J]. 中国农机装备,2024(6):28-30.
NIU Jiali. Mechanization technology of returning wheat straw to field and no-tillage sowing[J]. China Agricultural Machinery Equipment,2024(6):28-30. (in Chinese)

[12] 赵竹. 玉米收获机纵置切碎装置切刀-秸秆互作机理及刀刃仿生研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
ZHAO Zhu. Cutter-straw interaction mechanism of the longitudinal chopping device for the corn harvester and a study of the bionic blade[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2023. (in Chinese)

[13] 贾洪雷,赵佳乐,姜鑫铭,等. 行间免耕播种机防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):16-25.
JIA Honglei, ZHAO Jiale, JIANG Xinming, et al. Design and experiment of anti-blocking mechanism for inter-row no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(18):16-25. (in Chinese)

[14] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J]. 农业机械学报,2018,49(10):103-114.
JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):103-114. (in Chinese)

[15] 赵宏波,何进,李洪文,等. 条带式旋切后抛防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):65-75.
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of strip rotary-cut-throw anti-blocking implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):65-75. (in Chinese)

[16] 卢彩云,赵春江,孟志军,等. 基于滑板压秆旋切式防堵装置的秸秆摩擦特性研究[J]. 农业工程学报,2016,32(11):83－89.
LU Caiyun, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Straw friction characteristic based on rotary cutting anti-blocking device with slide plate pressing straw[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(11):83－89. (in Chinese)
[17] 王奇,贾洪雷,朱龙图,等. 免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2):68－77.
WANG Qi, JIA Honglei, ZHU Longtu, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68－77. (in Chinese)
[18] 王奇. 行间清秸耕整关键技术及条带耕整机研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
WANG Qi. Research on key technologies of inter-row clean-tillage and its strip-till machine[D]. Changchun:Jilin University, 2019. (in Chinese)
[19] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 主动旋转集行式清秸装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6):26－34.
CAO Xinpeng, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and experiment of active rotating collective straw-cleaner[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6):26－34. (in Chinese)
[20] 侯守印,邹震,魏志鹏,等. 玉米碎秸多级横向运移整流装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(3):45－56.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of rectifier for multi-stage lateral movement of corn straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):45－56. (in Chinese)
[21] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 玉米原茬地侧向清茬刀设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(2):59－69.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of lateral stubble cleaning blade for corn stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(2):59－69. (in Chinese)
[22] 侯守印,纪张驰,薛东辉,等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):111－122.
HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw cleaning device suitable for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):111－122. (in Chinese)
[23] 高振,卢彩云,位旭阳,等. 协拨组合式玉米条带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10):68－79.
GAO Zhen, LU Caiyun, WEI Xuyang, et al. Design and experiment of co-stirring combined corn strip straw cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10):68－79. (in Chinese)
[24] 方会敏,史嵩,乔璐,等. 圆辊拨爪式防堵机构作业性能的模拟与试验[J]. 中国农机化学报,2018,39(12):1－9.
FANG Huimin, SHI Song, QIAO Lu, et al. Numerical and experimental study of working performance of round roller-claw type anti-blocking mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12): 1－9. (in Chinese)
[25] 王韦韦,朱存玺,陈黎卿,等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(24):10－17.
WANG Weiwei, ZHU Cunxi, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(24):10－17. (in Chinese)
[26] 姚文燕. 麦-玉轮作区玉米免耕播种主动防堵技术研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
YAO Wenyan. Research on active anti-blocking technology of no-tillage seeding of corn in wheat－corn rotation[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2023. (in Chinese)
[27] 范旭辉,贾洪雷,张伟汉,等. 免耕播种机仿形爪式防堵清茬机构参数分析[J]. 农业机械学报,2011,42(10):56－60.
FAN Xuhui, JIA Honglei, ZHANG Weihan, et al. Parametric analysis of finger-type anti-blocking residue-cleaner for no-till planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):56－60. (in Chinese)
[28] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982:389－403.
[29] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129:329－340.
[30] 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.
[31] 第一机械部机械研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
[32] 林静,刘安东,李宝筏,等. 2BG－2 型玉米垄作免耕播种机[J]. 农业机械学报,2011,42(6):43－46,62.
LIN Jing, LIU Andong, LI Baofa, et al. 2BG－2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6):43－46,62. (in Chinese)
[33] 包文育. 东北垄作免耕播种机关键部件研究与整机设计[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2009.
BAO Wenyu. Study on key and holistic device of the no-till planter of the ridge cropping system in northeast area of China [D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2009. (in Chinese)
[34] 姚文燕,刁培松,张银平,等. 两熟区小麦玉米种植模式对机械化作业的影响[J]. 农机化研究,2021,43(4):255－262.
YAO Wenyan, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Effect of wheat and maize planting modes on mechanized operation in double cropping areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(4): 255－262. (in Chinese)
[35] 王超,刘从京,李洪文,等. 非对称式大小圆盘开沟装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):28－36.
WANG Chao, LIU Congjing, LI Hongwen, et al. Design and experiment of asymmetric large-small double discs ditching device [J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):28－36. (in Chinese)
[36] LI Xin, ZHANG Yinping, HE Haojie, et al. Design and experiment of row cleaner with staggered disc teeth for no-till planter [J]. Agriculture, 2023, 13(7): 1373.
[37] TAGAR A A,JI Changying, ADAMOWSKI J, et al. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions[J]. Soil and Tillage Research,2015,145:157－170.
[38] ZENG Zhiwei, CHEN Ying. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction[J]. Biosystems Engineering,2019,180:25－35.
[39] 中华人民共和国农业部. 免耕播种机质量评价技术规范:NY/T 1768—2009[S]. 北京:中国农业出版社,2009.