

自走式制种玉米联合收获机设计与试验

赵一鸣 戴飞 史瑞杰 陈俊志 辛尚龙 赵武云 张锋伟

(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 大田玉米收获机收获制种玉米时容易产生伤穗落籽、杂物堵塞等现象,本文针对适收期制种玉米生物特性,设计了一种大型制种玉米联合收获机,采用小行距对行柔性板式摘穗割台和可替换组合式剥皮装置,确保低损摘穗、输送、剥皮作业,降低籽粒损失与损伤;其中割台上方配备钢质覆胶弧形摘穗板,“橡胶+钢质”夹持输送链和六棱低速拉茎辊,可替换组合式剥皮装置采用柔性破皮+揉搓+降速组合形式。通过 Plackett-Burman 试验设计筛选提取影响机具指标的主要因素,采用 Box-Behnken 试验设计原理,以机具前进速度、拉茎辊转速和剥皮辊转速为试验因素,以总损失率与含杂率为性能指标,通过田间试验对机具进行检验,优化得出机具最佳作业参数。试验结果表明,优化后,当机具前进速度为 4.87 km/h、拉茎辊转速为 877.27 r/min、剥皮辊转速为 442.52 r/min 时,果穗总损失率为 1.61%,含杂率为 0.55%。田间试验结果表明,当收获机前进速度为 4.9 km/h、拉茎辊转速为 880 r/min、剥皮辊转速为 450 r/min 时,果穗总损失率为 1.64%,含杂率为 0.57%,满足制种玉米机械化联合收获的作业要求,可为制种玉米联合收获机设计与试验提供参考。

关键词: 制种玉米;联合收获机;自走式;低损柔性摘穗

中图分类号: S225.5+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)05-0121-14

OSID:



Design and Experiment of Self-propelled Seed Corn Combine Harvester

ZHAO Yiming DAI Fei SHI Ruijie CHEN Junzhi XIN Shanglong ZHAO Wuyun ZHANG Fengwei
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the field corn harvester harvesting seed corn is prone to the phenomenon of injury to ears and seeds, debris blockage, etc., a large-scale seed corn combine harvester for the biological characteristics of seed corn in the suitable harvest period was designed. The machine adopted small row spacing to row flexible plate picking cutting platform and replaceable combined peeling device, to ensure low-loss picking, conveying, peeling operation and reduce seed loss and damage, which was equipped with steel rubber-covered curved picking plate on the upper part of the cutting platform, “rubber + steel” clamping conveyor chain and six-pronged low-speed pulling rollers, and the replaceable combined peeling device adopted flexible peeling + rubbing + speed reduction. The main factors affecting the machine indexes were extracted by screening through the Plackett-Burman experimental design, and the Box-Behnken experimental design principle was applied, taking the forward speed of the machine, the rotational speed of the stem pulling roller and the rotational speed of the peeling roller as the experimental factors, and taking the total loss rate and the impurity rate as the experimental indexes, the machine was examined through the field test, and the best operating parameters of the machine were optimized. The test results showed that the total loss rate of cob was 1.61% and the impurity rate was 0.55% when the optimized machine forward speed was 4.87 km/h, the stem pulling roller speed was 877.27 r/min and the peeling roller speed was 442.52 r/min. It was verified in the field test: when the forward speed of the harvester was 4.9 km/h, the rotational speed of the stalk pulling roller was 880 r/min, and the rotational

收稿日期: 2023-12-01 修回日期: 2024-02-23

基金项目: 甘肃省农业农村厅农机装备补短板项目(njyf2022-02、njyf2023-02)、甘肃省重大专项(21ZD10NF003-4-01)、中央引导地方科技发展资金项目(23ZYQF305-1)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-14-1-28)和甘肃省科技重大专项(23ZDNA008)

作者简介: 赵一鸣(2000—),男,硕士生,主要从事农业工程技术与装备研究,E-mail: 15693316571@163.com

通信作者: 张锋伟(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事工程力学及农业装备研究,E-mail: zhangfw@gsau.edu.cn

speed of the peeling roller was 450 r/min, the total loss rate of the cob was 1.64%, and the rate of impurity was 0.57%, which met the requirements of the mechanized joint harvesting of corn for seed production, and it can be used as a reference for the design and test of the joint harvesting machine for corn for seed production.

Key words: seed corn; combine harvester; self-propelled; low-loss flexible picking

0 引言

制种玉米专门用于生产优质种子,具有高产、抗病性和对不同生长条件的适应性^[1-2]。目前许多国家都在大规模生产玉米种子,包括美国、中国、巴西、阿根廷等,推动了现代杂交玉米品种的规模化生产^[3-5]。优质玉米种子生产直接影响玉米产业的优质丰产和农民增收,而制种玉米机械化收获则是影响种子质量的关键,收获总损失率、籽粒含杂率直接影响种子玉米减损增收和种子活力及发芽率,是制种玉米优质高效生产的重要技术支撑。

我国制种玉米主产区主要在甘肃、新疆和黑龙江等地区^[6],随着用种需求量增大,制种面积逐年增加^[7]。欧美发达国家制种玉米种植模式统一,农艺性状一致性好,产品功能多样化且自动化程度高,但由于其机具尺寸较大,并不适用于我国多品种小地块收获情况。近年来,相关学者针对玉米果穗机收进行了研究^[8-10],李天宇^[11]设计了鲜食玉米柔性低损摘穗试验台,针对拉茎辊的不同安装方式与不同辊刀数量刀辊进行运动学分析及时序性分析;付乾坤等^[12-13]进行了玉米摘穗割台刚柔耦合减损机理研究并设计了柔性触穗表面板式摘穗机构,对该机构摘穗时的碰撞参数和籽粒损失情况进行了分析;李克鸿^[14]设计了间隙可调组合式玉米摘穗机构并进行了试验,试验结果表明,该机构能够降低现有摘穗板与拉茎辊组合式摘穗机构的含杂率,锥形拉茎辊能降低果穗与摘穗板的撞击力;纪晓琦等^[15]将激振技术与摘穗相结合,设计出一种采用椭圆拉茎辊的摘穗装置,用激振力将果穗摘下,在控制果穗损失的同时,还能降低作业功耗。但有关制种玉米收获装备相关研究仍相对较少。由于我国制种玉米品种繁多,含水率不一致,种植模式多样化,其种穗经济成本高,机械化适应性较差。目前仍未有成熟的制种玉米收获机投入使用,制种玉米收获基本上采用人工及大田玉米收获机作业方式,造成制种玉米种植综合成本高、规模效益低、种子质量不稳定等问题,阻碍了制种玉米全程机械化发展^[16-18]。

为提高种子产业机械化收获水平,解决损失过大问题,本文针对不同行距制种玉米及大田玉

米兼收的收获要求设计一种板式制种玉米摘穗装置,配备外扩链齿引导喂入机构、钢基质覆胶缓冲弧形摘穗板、小倾角六棱低速拉茎辊、“钢质链条+橡胶拨禾齿”结构夹持输送链和可替换式剥皮机等装置,提高耐用性的同时实现低损摘穗剥皮与顺畅喂入,以期解决损失高、易堵塞等问题。

1 制种玉米农艺要求与植株特性

玉米种子播种主要采用膜上穴播法。河西地区玉米种子采用两种种植模式:覆膜 1.4 m 和覆膜 0.7 m(图 1)。宽 1.4 m 的地膜两侧各覆盖宽 0.1 m 的土带,土带与种子间的距离为 6~7 cm,行间距为 35~36 cm。两条播种带之间的膜间距为 30 cm,行间距为 62~64 cm。对于宽 0.7 m 的地膜,上面两行种子行距为 40 cm。两条播种带之间的膜间距为 30 cm,行间距为 60 cm,遵循 40 cm-60 cm-40 cm-60 cm 的宽窄行种植模式。在灌溉条件较好的情况下,采用宽 0.7 m 的地膜;灌溉条件较差时,使用宽 1.4 m 的地膜。播种深度控制在 3~5 cm,而施肥深度则在 6~10 cm。

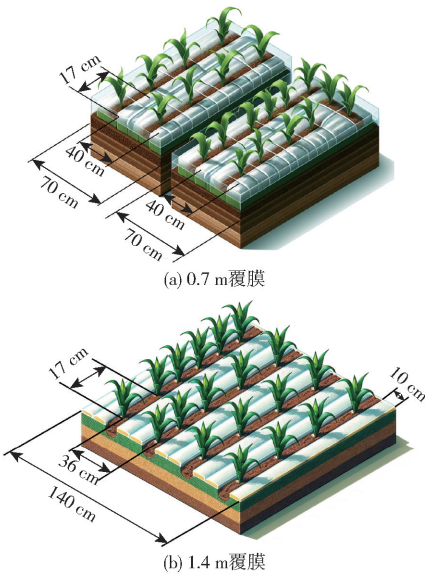


图 1 2 种植模式示意图

Fig. 1 Two planting modes

制种玉米收获时籽粒含水率为 20%~45%,成熟期株高、种穗长度和直径因具体品种、生长条件和遗传特性而异^[19]。一般来说,株高 140~160 cm,种穗长度为 15~31 cm,直径为 4.05~

7.89 cm,种穗倾斜角为 60°~80°。如图 2 所示,制种玉米相较于大田玉米,其种穗较小,穗位较低,其收获期内物料特性变化大,初期籽粒含水率较高,机械化收获易损伤种皮;末期籽粒成熟度高、含水率低,种穗下垂,机械化收获容易落籽、掉穗。普通窄行距大田玉米收获机籽粒损失损伤率较高,无法满足收获标准^[20]。

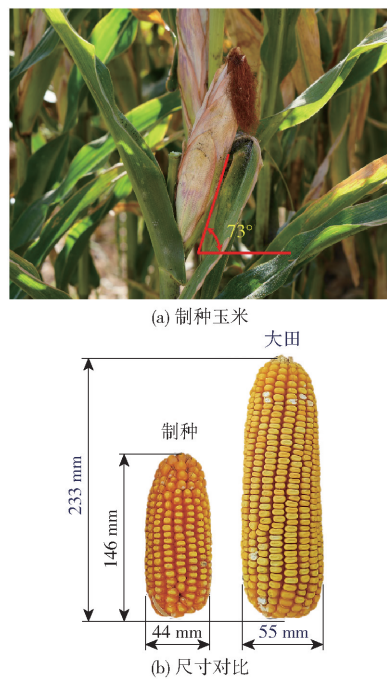


图 2 制种玉米与大田玉米对比

Fig.2 Seed corn and comparison with field corn

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

4YZPS-4B 型制种玉米收获机由 YCA05200-T400 型水冷式 4 缸 4 冲程柴油机提供动力,整机包括摘穗系统、升运输送系统、气固耦合排杂系统、清种系统、剥皮系统、储粮卸粮系统、行走系统、传动系统与其他控制系统等。其中摘穗系统包括摘穗割台,割台采用 4 行喂入,由分禾器、摘穗机构、螺旋输送机、机架等组成。摘穗机构主要由摘穗板、拉茎辊和拨禾链等组成;升运输送系统包括升运器,主要为升运链和升运板等;气固耦合排杂系统包括双排杂离心风机、二次拉茎辊、苞叶双排杂螺旋输送器等;清种系统包括籽粒螺旋输送机、籽粒筛板、籽粒通道等;剥皮系统包括多纹路橡胶剥皮辊、星轮式压送器、拨穗轮和抛送轮等;储粮卸粮系统包括粮仓和液压卸粮架等,整机结构如图 3 所示,技术参数见表 1。

2.2 工作原理

整机工作过程包括分禾、摘穗、输送、排杂、剥皮

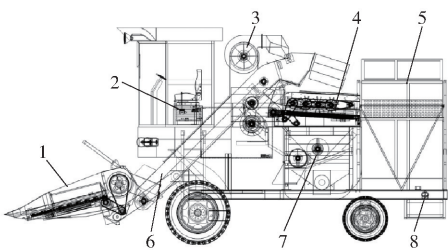


图 3 制种玉米收获机整机结构示意图

Fig.3 Schematic of overall structure of seed corn harvester

1. 摘穗装置 2. 驾驶室 3. 排杂装置 4. 剥皮装置 5. 集穗箱
6. 升运装置 7. 清种系统 8. 油箱

表 1 制种玉米收获机主要技术参数

Tab.1 Seed corn harvester main technical parameters

参数	数值/型式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	6 800×2 450×3 200
结构型式	柔性板式割台+跑步机/剥皮机
额定功率/kW	147
工作幅宽/mm	2 200
最小离地间隙/mm	260
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 200
作业速度/(km·h ⁻¹)	2.0~4.0
行距/mm	500~600
生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.3~0.5

等工序步骤。作业时,分禾器先将玉米茎秆扶正,拨禾链和拉茎辊导锥引导玉米茎秆进入各行,玉米茎秆被夹持在摘穗板间隙,拉茎辊相向旋转拉茎段向下拉拽玉米茎秆,当玉米种穗碰到摘穗板,其大端被卡住,种穗与茎秆断开连接掉落割台上,由拨禾链上的橡胶拨禾齿输送进入螺旋输送机,完成割台摘穗。随后螺旋输送机将玉米种穗送入升运输送装置进行输送,进入割台的茎秆到达二次拉茎辊处被拉出,后方茎秆切碎装置对茎秆进行粉碎,茎秆切碎装置由茎秆切碎辊与多组刀片组成。同时在茎秆切碎辊一侧安装的风机高速旋转,将碎茎秆沿侧向通道吹出机外。同时质量较轻的杂余叶片等直接通过升运器下方的离心风机沿排杂口吹出机外,完成清杂过程。而玉米种穗由升运器掉落进入剥皮机前端,压送器拨穗轮将其向后入拨入至剥皮辊上方进行剥皮,剥下的苞叶从剥皮辊间隙中掉下,通过下方的两个螺旋输送机输送出机外,而剥皮过程掉落的籽粒通过苞叶螺旋输送机下方的筛板掉入清种通道进行收集。玉米种穗剥皮完成之后由剥皮机后方抛送轮输送至粮仓,完成玉米种穗收获。

2.3 传动系统

4YZPS-4B 型制种玉米收获机工作时,发动机将动力一分为三,通过带轮分别将动力传输至割台挂接轴、升运器中间轴和变速箱。割台挂接轴与割

台传动轴通过链传动,将动力分别传递至割台螺旋输送机及齿轮箱,进而带动摘穗辊和拨禾链进行转动;升运器中间轴将动力传递至剥皮机主轴与下方风机轴,剥皮机主轴再将动力分配至两个苞叶螺旋输送机与籽粒提升轴上;变速箱将动力传递至收获机底盘(图4)。

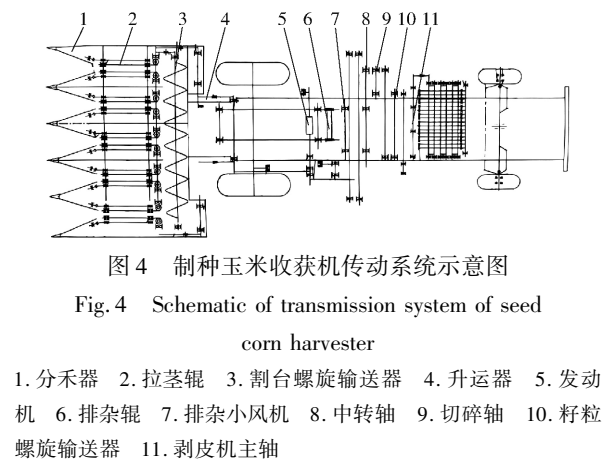


图4 制种玉米收获机传动系统示意图
Fig.4 Schematic of transmission system of seed corn harvester

1.分禾器 2.拉茎辊 3.割台螺旋输送机 4.升运器 5.发动机 6.排杂辊 7.排杂小风机 8.中转轴 9.切碎轴 10.籽粒螺旋输送机 11.剥皮机主轴

3 关键部件设计

3.1 小行距柔性种穗割台

为解决制种玉米收获不对行、易损伤的问题,设计了一种小行距柔性种穗割台(图5)。该割台为对行站秆摘穗收获,主要由分禾器、喂入拨禾链、摘穗板、拉茎辊、横向螺旋输送机、机架和传动系统等组成。

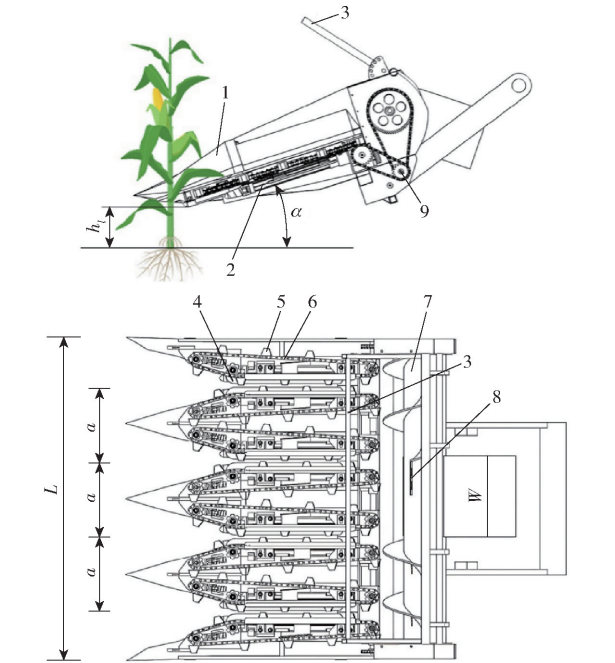


图5 制种玉米收获机割台结构示意图
Fig.5 Schematic of structure of cutting table of seed corn harvester

1.分禾器 2.拉茎辊 3.挡茎装置 4.摘穗板 5.拨禾块 6.拨禾链 7.螺旋输送机 8.拨穗板 9.传动装置

制种玉米农艺复杂特殊,制种玉米父本、母本分行播种,二者种植行距、株距和播种时间各不相同,造成了机械对行收获困难^[21],同时西北产区制种地块小且分散,进场转场难,为保证机具的适应性与田间通过性的同时考虑其功率,割台行数采用4行,工作幅宽 L 为2 200 mm,能够较好地兼顾适应性与作业效率。制种玉米果穗性状特殊,其种穗穗位偏低,高度为350~700 mm,收获难度大,故制种玉米割台倾角为 19° ,最低摘穗高度 h_l 为260 mm,能够保证收获中不掉穗漏穗,且对于收获倒伏植株和穗位低植株效果较好。针对不同制种玉米产区种植行距差异(400~700 mm),目前河西地区制种行距多为500~600 mm,故设计割台行距 a 为520 mm,配合小行距外扩链齿能够进行不对行收获。割台后方过桥采用宽体过桥,目的是增大割台喂入量,减少堵塞。

3.1.1 分禾器设计

制种玉米收获机分禾器作为收获器的导向器,作业时沿作物边缘线集拢禾株,将其引导进入摘穗装置。分禾器前端应尽量贴近地面,以便更好插入玉米禾株丛,扶起倒伏植株;分禾器倾角 α 过小,起不到引导的作用,反之 α 过大,无法起到扶禾的作用,故分禾器倾角 α 与离地高度 h 决定了其分禾能力^[22]。制种玉米在各产区播种时行距和株距均有一定差距,不对行收获时,玉米茎秆被分禾器引导向两侧和前方倾斜,当茎秆倾斜至分禾器大端时达到最大倾斜角 γ ,玉米茎秆极易发生折断,故茎秆分禾器宽度需小于玉米茎秆最大倾斜长度。除此之外,分禾器起到保护割台上方部件的作用,应坚固耐用且便于维修更换。

由图6可知,玉米茎秆不发生折断现象,必须满足条件

$$\begin{cases} d_j \leq c/2 \\ \gamma = \arctan \frac{c}{2h} \leq \gamma_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 d_j ——玉米茎秆最大倾斜长度,mm
 c ——分禾器宽度,mm
 γ ——茎秆最大倾角, $(^\circ)$
 γ_0 ——玉米茎秆折断角, $(^\circ)$

测量得折断角 γ_0 为 $34^\circ \sim 40^\circ$,折断时玉米根茬平均高度为218 mm,则分禾器离地高度 h 取260 mm,代入式(1)得出 $c_{\max} \leq 489.2$ mm,并考虑下方拨禾链等部件空间位置,设计 $c = 400$ mm。

假设玉米茎秆不受前进速度的影响且与分禾器之间无相对移动,对玉米茎秆进行受力分析可得

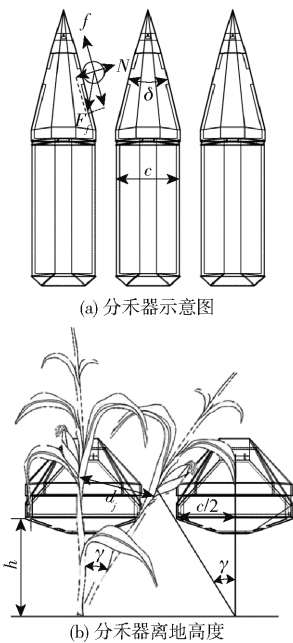


图 6 分禾器受力与几何关系示意图

Fig. 6 Schematic of force and geometric relationship of grain divider

$$\begin{cases} F_f \sin \frac{\delta}{2} = N \\ f = f_s N \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_f ——分禾器对玉米茎秆静摩擦力, N
 δ ——分禾器两作用边夹角, ($^{\circ}$)
 N ——分禾器对茎秆的作用力, N
 f ——茎秆与分禾器内壁摩擦力, N
 f_s ——玉米茎秆与分禾器间的摩擦因数
则能实现顺利分禾的条件为

$$F_f \cos \frac{\delta}{2} \geq f \quad (3)$$

其中 f_s 取 0.2 ~ 0.6^[23], 得出 $32^{\circ} \leq \delta \leq 46^{\circ}$, 考虑下方拨禾链齿与夹持链条布置结构, 取 $\delta = 38^{\circ}$ 。

3.1.2 夹持输送装置

夹持输送装置(图 7)其作用为将玉米茎秆夹持并快速喂入摘穗装置的同时不推倒玉米植株。传统拨禾链齿虽拨禾效果较好, 但其拨齿间距较大, 不适用于小尺寸的制种玉米, 且输送链上钢制拨齿极易与摘下的种穗发生碰撞造成损失, 本文采用“橡胶 + 钢质”夹持输送链, 各橡胶拨齿间距为 100 mm, 保证将茎秆有序送入摘穗装置的同时, 将摘下的种穗刚好卡在相邻两拨齿之间, 避免果穗跳动。

夹持输送装置在工作时, 与茎秆的运动关系如图 8 所示。拨禾链线速度决定了链齿与玉米茎秆间的相互作用^[24], 当机具以速度向前运动时, 夹持输送链以速度向后进行拨禾, 这时玉米茎秆与橡胶链齿接触点速度为

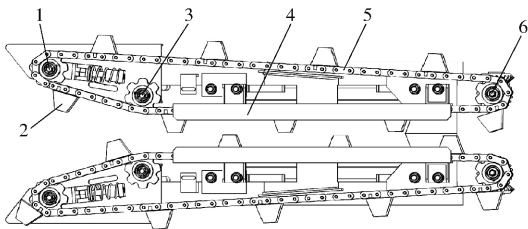


图 7 夹持输送装置结构示意图

Fig. 7 Schematic of structure of clamping and conveying device

1. 被动链轮 2. 橡胶拨齿 3. 张紧链轮 4. 导链板 5. 输送链条 6. 主动链轮

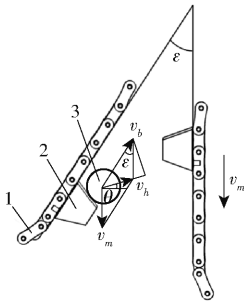


图 8 夹持输送装置与玉米茎秆速度关系图

Fig. 8 Relationship diagram between clamping conveyor and corn stalk speed

1. 被动链轮 2. 橡胶拨齿 3. 玉米茎秆

$$\begin{cases} v_b = \frac{v_m \cos \theta / \cos \beta}{\cos (\varepsilon + \theta)} \\ v_h = v_b \sin (\varepsilon + \theta) - v_m \sin \theta / \cos \beta \end{cases} \quad (4)$$

式中 v_b ——夹持输送链线速度, m/s
 v_m ——机具前进速度, m/s
 β ——割台倾角(拉茎辊工作倾角), ($^{\circ}$)
 θ ——玉米茎秆速度方向与机具前进方向法线夹角, ($^{\circ}$)
 ε ——夹持输送链夹角, ($^{\circ}$)
 v_h ——玉米茎秆运动速度, m/s

即保证玉米茎秆不被夹持输送装置推倒且能正常向后拨禾条件为^[25]

$$v_b \geq \frac{v_m}{\cos \varepsilon \cos \beta} \quad (5)$$

设计 ε 为 25° ^[26], 割台倾角设为 19° , 收获机前进时均速为 1 m/s, 代入式(5)可得 $v_b \geq 1.17$ m/s, 故设拨禾链速为 1.8 m/s。机具夹持输送链选择 12A 单排链, 考虑机具前进速度(1 m/s)与制种玉米株距(17 cm), 取两相邻橡胶链齿距离为 96 mm。

3.1.3 柔性摘穗板设计

摘穗板位于拉茎辊上方, 其工作长度及对称中心与拉茎辊相同。摘穗板关键作用在于整个摘穗过程应在茎秆拉断前完成^[27]。对收获过程中的种穗和茎秆进行受力分析, 如图 9 所示。

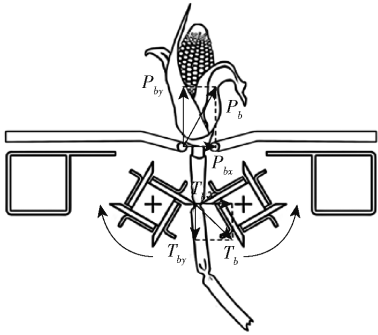


图9 种穗受力分析
Fig.9 Stress analysis of ear

板式摘穗机构通过拉茎辊钳住玉米茎秆并将玉米茎秆向下方拉引,在拉引茎秆的同时,拉茎辊对玉米茎秆的拉引力 T_b 在水平方向的分力 T_{bx} 会造成玉米茎秆压缩。

若摘穗板在茎秆拉断前将种穗摘下,则需满足

$$T_{by} - 2P_{by} > F_l \tag{6}$$

式中 T_{by} ——拉茎辊拉引茎秆在竖直方向的分力, N

P_{by} ——摘穗板阻碍玉米种穗运动在竖直方向的分力, N

F_l ——种穗拉断所需的力, N

该柔性摘穗板采用钢基质覆胶,降低了摘穗过程中种穗受到的冲击。为减少对种穗的挤压磕伤,将摘穗板边缘制作呈圆弧形,并且将摘穗板摘穗端倒角 15° ,能够保证对中摘穗,避免种穗摘穗过程倾斜所造成的损伤。摘穗板结构形式呈V形,前端小,后端大,该结构能够有效避免茎秆喂入过多造成摘穗装置堵塞(图10)。

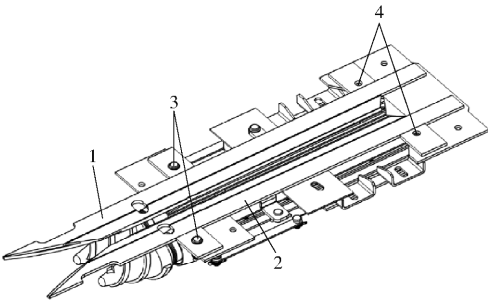


图10 摘穗板结构示意图
Fig.10 Schematic of ear picking plate structure
1. 右摘穗板 2. 左摘穗板 3. 前调节槽口 4. 后调节槽口

摘穗板间隙是影响摘穗效果的主要因素^[28],间隙过小不但使果穗含杂率升高,并且在作业过程中碰到直径较大茎秆会直接卡死;间隙过大,摘穗时将种穗卡在两摘穗板间,造成籽粒损失与破碎。为保证制种玉米低损收获,将摘穗板间隙调至种穗直径的 $2/3$,即摘穗板前端间隙25 mm,后端为30 mm。对于不同含水率、不同茎秆直径品种可以通过调节

槽口来调整摘穗板间隙。

3.1.4 拉茎辊设计

本设计拉茎辊采用六棱形拉茎辊,主要由两段组成,前段为带螺纹的导锥进行引导喂入,后段六棱刀辊起拉茎切柄的作用。拉茎辊采用铸钢制成,摩擦因数大,保证了足够的抓取能力,并在上面覆有一层耐磨涂层,使其拥有较好的抗老化性能。

拉茎辊工作长度是其主要参数之一,其长度直接影响摘穗装置整体尺寸,而摘穗装置尺寸增大会导致整个制种收获机转弯半径增加。如图11所示,在作业过程中,拉茎辊长度应确保能够完全拉下整株茎秆,同时减少因拉茎辊长度不合适而导致茎秆折断并进入集穗箱的问题。这样,可以保证玉米摘穗操作顺利进行^[29]。

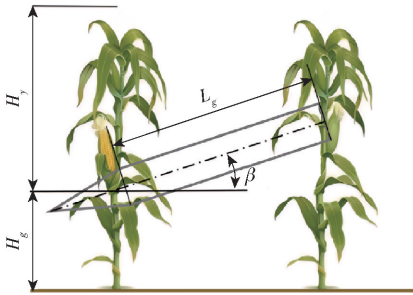


图11 拉茎辊作业示意图
Fig.11 Schematic of ear picking roller

在摘穗过程中,拉茎辊与地面应保持适当高度,离地高度过高,低穗位种穗无法在摘穗板上方摘穗造成损失;离地高度过低,对于平整性较差的地块极易产生积土甚至与地面发生碰撞,损坏摘穗部件。为此,拉茎辊前端距离地面高度设为360 mm。

拉茎辊工作间隙同样对于摘穗过程至关重要。若工作间隙过小,茎秆在拉茎辊的前端拉茎时容易被切断,从而导致种穗中的杂质含量增加。另一方面,若间隙过大,茎秆在拉茎辊的尾端拉茎时,未能及时被拉下,这些茎秆可能会被拨禾链带入升运器,同样会导致含杂率的增加,甚至可能导致拉茎辊无法成功拉取茎秆,最终导致摘穗装置的堵塞。由图12b可得拉茎辊对茎秆的压缩比 r 为

$$r = \frac{\varphi_j - h_w}{\varphi_j} \tag{7}$$

其中 $h_w = (0.1 \sim 0.4) \varphi_j$

式中 φ_j ——玉米茎秆直径, mm

h_w ——拉茎辊工作间隙, mm

测量得到拉茎处制种玉米茎秆直径为20.35~24.05 mm,压缩比取0.7较为适宜^[30],代入式(7)可得 h_w 为3.25~9.34 mm,故设计该装置拉茎辊工作间隙保持在4~6 mm之间。

拉茎辊之间的间隙相对较小,若不考虑滑移等

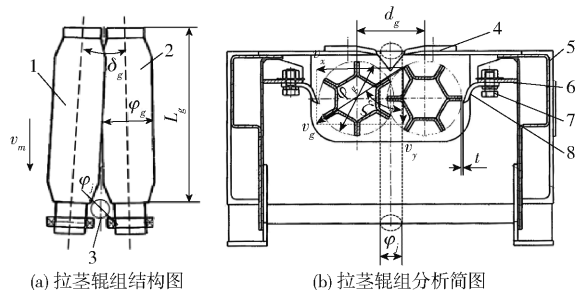


图 12 拉茎辊组结构及工作分析简图

Fig. 12 Schematic of structure and work analysis of stem pulling roller group

1. 右拉茎辊 2. 左拉茎辊 3. 玉米茎秆 4. 摘穗板 5. 摘穗架
6. 剔除刀固定座板 7. 固定螺栓 8. 剔除刀

因素的影响,拉茎辊运动能够分解为垂直向下的运动与沿拉茎辊轴线方向的运动,对其运动规律进行分析可得

$$\begin{cases} v = v_1 / \tan \beta = v_2 \cos \beta \\ L_g / v_1 = (H_y - H_g) / v_2 \\ L_g = (H_y - H_g) \sin \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中 v ——拉茎辊线速度, m/s

v_1 ——沿拉茎辊轴线方向分速度, m/s

v_2 ——拉茎辊竖直方向分速度, m/s

L_g ——拉茎辊工作长度, mm

H_g ——拉茎辊中心轴前端距地面的距离, mm

田间测试成熟期中科玉 505 制种玉米植株株高为 1 560 mm,最低穗位高度为 690 mm,拉茎辊工作倾角 β 为 19° ,代入式(8)可得 L_g 为 384.2 mm。考虑拉茎辊工作中与茎秆之间的滑移,滑移系数 μ_h 为 0.9,则

$$L_g \geq \frac{L_{g\min}}{\mu_h} = 426.9 \text{ mm} \quad (9)$$

综合考虑,取拉茎辊有效工作长度为 427 mm,依据摘穗板直线工作长度等于拉茎辊的有效工作长度,则摘穗板有效直线段长度为 427 mm。

如图 12 所示,为保证拉茎辊刀棱能抓取制种玉米茎秆并减少刀棱与制种玉米茎秆间的相对滑移,应满足

$$\begin{cases} \varphi_j + \varphi_g \geq d_g \\ \zeta \leq \theta_f \end{cases} \quad (10)$$

式中 φ_g ——拉茎辊直径, mm

d_g ——拉茎辊中心距, mm

ζ ——拉茎喂入角, $(^\circ)$

θ_f ——玉米茎秆与拉茎辊的摩擦角, $(^\circ)$

田间测量得到制种玉米中部结穗处茎秆直径为 20.35 ~ 24.05 mm,故取 $\varphi_j = 22.2$ mm。采用窄行距割台,故拉茎辊中心距 d_g 设置为 119 mm。参考玉米茎秆与钢材间摩擦因数 μ 为 0.32 ~ 0.54, θ_f 为

$17.75^\circ \sim 28.37^\circ$ [21]。根据式(10)得 $\varphi_g = 96.8$ mm,则拉茎辊直径取 97 mm。为保证茎秆能够顺畅进入,拉茎辊锥角 δ_g 取 $6^\circ \sim 8^\circ$ 。剔除间隙 t 是由拉茎辊间隙调整而产生。拉茎辊调整前必须首先考虑剔除间隙的变化,并及时调整,否则会引起拉茎辊与剔除刀剧烈碰撞,造成损坏。通常 t 调至 1 ~ 2.5 mm。

拉茎辊转速对于籽粒破碎率影响至关重要,其转速要求在保证能够抓取茎秆的同时避免种穗损伤,则其转速为

$$n = \frac{30kv_m}{\pi r_g \sin \beta} \quad (11)$$

式中 k ——拉茎辊水平方向分速度与前进速度之比

r_g ——拉茎辊半径, mm

已知拉茎辊半径为 48.5 mm,机具前进速度为 4 ~ 6 km/h, k 取 1.5 [31],则拉茎辊转速 n 为 756 ~ 1 261 r/min。

3.2 剥皮装置结构设计

本研究制种玉米收获机上采用可替换式剥皮装置(图 13),主要由剥皮辊、传动系统、调节装置等组成。该装置能够根据不同需求来更换压送器与跑步机,对于种穗损失损伤较低,可采用输送带机构进行不剥皮输送;对于作业效率要求较高,则可将跑步机替换为压送器进行剥皮处理。种穗通过升运器输送至剥皮装置处,先经过导流板对其进行分流使其均匀分散在剥皮辊或输送带上进行剥皮或输送,最后掉入集穗箱完成收获。

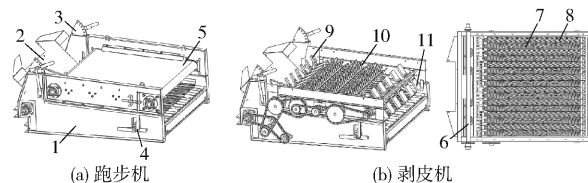


图 13 可替换式剥皮装置结构示意图

Fig. 13 Schematic structural diagrams of replaceable peeling device

1. 安装架 2. 导流板 3. 倾角调节架 4. 高度调节装置 5. 输送带 6. 主动轴 7. 组合式剥皮辊 8. 输送剥皮辊 9. 拨穗轮 10. 轮式压送器 11. 抛送轮

该剥皮装置专门针对制种玉米设计,采用 4 组 8 通道剥皮辊配合轮式压送器进行剥皮,辊型采用水平布置,每组左侧剥皮辊全部使用大螺距胶质辊,右侧剥皮辊采用组合式胶质辊交错排列。左侧大螺距剥皮辊输送能力强,破皮与剥皮能力差,不伤籽,承担种穗输送任务;右侧组合式剥皮辊主要分为 3 部分:快速破皮段(Ⅰ)、内层揉搓段(Ⅱ)和降速排杂段(Ⅲ)。其作业过程如图 14 所示,首先种穗在拨穗轮带动下沿降速段输送至快速破皮段,破皮

辊凸缘上方带有小凹槽,能够将苞叶划破,完成第 1 步破皮,随后由压送器送至内层揉搓段,每组剥皮辊相向转动以攥取划破的种穗苞叶,在剥皮辊轴线方向上,种穗受自身重力与剥皮辊的力沿着橡胶辊的凹槽向下滑动,此时苞叶受向上的摩擦力;而在剥皮辊轴线法向方向上,由于两剥皮辊表面纹路不同,种穗受到剥皮辊施加的不同力矩,使其绕剥皮辊轴线旋转,当苞叶与胶辊的摩擦力大于种穗与苞叶的摩擦力时,苞叶便被剥下。剥下苞叶后的种穗此时到达最后的减速段,能够在种穗降速的同时将杂余经过凹槽排出,种穗降速后缓慢落入集穗箱,避免了速度过高种穗撞击集穗箱内侧造成损伤。该辊型能够保证强抓取能力的同时籽粒损伤较低,且对于松口和低含水率品种适应性更好。将随种穗输送的苞叶及杂草强制抓出防止堵塞,并将种穗向后平稳输送。

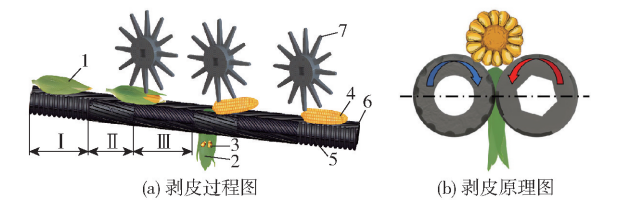


图 14 剥皮原理示意图

Fig. 14 Schematics of corn peeling principle
1. 玉米种穗(带苞叶) 2. 苞叶 3. 掉落籽粒 4. 玉米种穗(未带苞叶) 5. 组合式剥皮辊 6. 输送剥皮辊 7. 轮式压送器

剥皮辊长度是影响剥净率的主要参数^[32],剥皮辊越长,抓取的苞叶越多,剥净率越高,但长度过长会增加籽粒掉落与破碎,常用玉米剥皮辊长度为 800 ~ 1 150 mm,考虑制种玉米尺寸较小,需要更长的行程去抓取苞叶,故本文中剥皮辊长度设定为 1 100 mm。剥皮辊直径是影响含杂率与剥净率的主要参数^[33],剥皮辊直径越大,则会直接抓取并挤压直径较小果穗,造成籽粒破碎或剥皮机堵塞,甚至直接崩断剥皮轴;剥皮辊直径过小,则无法抓取大直径种穗苞叶,降低了剥净率。目前,国内剥皮辊外圆直径为 60 ~ 80 mm,考虑到制种玉米普遍直径较小,故取剥皮辊直径为 68 mm。剥皮辊转速是影响损失率的主要参数,剥皮转速过大,籽粒损失损伤越大,剥皮转速过小,会造成堵塞进而影响生产率,故取剥皮辊转速为 450 r/min,该转速下对于不同含水率的种穗效果较好。

剥皮辊上方增设有压送器,使种穗能够稳定与剥皮辊接触以此增大摩擦,从而提高剥皮装置的剥净率与工作效率^[34]。压送器采用叶轮式全方位压送,其橡胶叶片呈螺旋式分布,保证了压送器在转动过程中能够拨取到各种姿态的种穗。压送器沿橡胶

剥皮辊总长均匀设置 3 排,每排间隔 1 000 mm,前后两排叶轮数为 15,中间叶轮数与剥皮辊辊数相同,中间排叶轮与前后排叶轮交错分布,保证了全方位压送玉米种穗。叶片回转半径为 134 mm,转速为 45 r/min,该转速下能够避免种穗直接被叶轮拨飞导致剥皮行程缩短。

4 田间试验

4.1 试验条件及评价指标

4.1.1 试验条件

制种玉米收获机作业性能试验于 2023 年 9 月 18 日在甘肃省张掖市肃州区党寨镇园艺场和甘肃省张掖市肃州区上坝镇进行。试验工具:秒表、100 m 皮尺、钢卷尺、游标卡尺、取样袋、电子秤、籽粒水分速测仪。试验地玉米为 1 膜 4 行种植模式,种植品种为中科玉 505,主要性状参数如表 2 所示。试验地长 200 m,宽 50 m,面积 1 hm²,地势平坦,土壤为沙粘土。试验前在作业地块中确定试验区,试验区划分为准备区、测定区和停车区 3 个区域,准备区长度为 15 m,测定区长度为 20 m,停车区长度为 15 m,符合试验区标准。

表 2 中科玉 505 制种玉米植株性状参数

Tab.2 Plant trait parameters of CKJ 505 seed corn

参数	数值
株高/mm	1 560
行距/mm	689
株距/mm	142
茎秆直径(根×中×颈)/(mm×mm×mm)	21.41×22.06×17.13
籽粒含水率/%	25.5
茎秆含水率/%	59.2
种穗长度(无苞叶和果柄)/mm	160
未去苞叶种穗直径(大端)/mm	49.7
去掉苞叶种穗直径(大端)/mm	46.66
苞叶数量	8
最低结穗高度/mm	690

4.1.2 评价指标

试验按照 GB/T 21962—2020《玉米收获机械》^[35]国家标准要求进行。结合试验标准,收获机作业后要求总损失率不大于 3%,含杂率不大于 1.0%。其中落地籽粒损失率 S_L 、果穗损失率 S_U 、总损失率 S_Z 、含杂率 G_N 计算式为

$$\begin{cases} S_L = m_L / m_Z \times 100\% \\ S_U = m_U / m_Z \times 100\% \\ S_Z = S_L + S_U \\ G_N = m_n / m_p \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

式中 m_L ——落地籽粒质量,g

m_z ——籽粒总质量,g
 m_v ——漏摘和落地果穗籽粒质量,g
 m_n ——杂物质量,g
 m_p ——果穗箱中物料总质量,g

在测区内,随机选取 5 个面积 1 m²地块作为试验区域,分别取值后进行计算,结果取平均值。在测定区取值范围内拣起全部落地籽粒、秸秆中夹带籽粒和长度小于 50 mm 的碎果穗,称出质量,并按公式计算落地籽粒损失率;在测定区取值范围内,收集漏摘和落地的果穗,按照百粒质量计算出质量,计算果穗损失率;在测定区取值范围内,接取果穗箱中的物料,分别称出接取物总质量及杂物质量,现场计算果穗含杂率。现场田间作业性能指标测试如图 15 所示。



图 15 机具田间作业性能指标测试

Fig. 15 Field performance index test of machines and tools

4.2 试验设计与结果分析

4.2.1 试验方案

由田间试验可得,整机前进速度直接影响果穗损失率与含杂率,并且由于该制种玉米收获机收获方式为果穗收获,与大田玉米籽粒收获方式不同,故整机损失率与含杂率主要由摘穗装置与剥皮装置两部分决定。摘穗装置参数主要包括割台高度、割台倾角、摘穗板间隙、拨禾链线速度与拉茎辊转速^[11];剥皮装置参数包括剥皮辊转速、剥皮辊间隙、压送器高度与压送器转速^[36]。由表 2 可得,果穗大端直径为 46.66 mm,穗位高度为 690 mm,结穗处直径为 22.06 mm,其性状一致性较好,故将割台高度、摘穗板中部间隙和剥皮辊间隙作为定值,分别设置为 200、28、1 mm。为避免漏摘最低穗位果穗,割台倾角设为定值 18°。研究可得,剥皮辊转速与压送器转速传动比为 0.2 时效果较好^[37]。

综上所述,选取前进速度、拉茎辊转速、拨禾链线速度、剥皮辊转速和压送器高度作为试验因素。

4.2.2 Plackett – Burman 试验

为寻求整机损失率和含杂率影响显著因素,采用 Plackett – Burman 试验方法,以总损失率 Y_1 与含杂率 Y_2 为响应值,以前进速度、拉茎辊转速、拨禾链线速度、剥皮辊转速和压送器高度为试验因素,结合各因素的田间试验值和文献试验值^[18,20,22,34]作为范

围取值,对这 5 个因素进行筛选,试验因素编码见表 3,试验方案和结果见表 4, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为编码值。

表 3 Plackett – Burman 试验因素编码		
Tab. 3 Plackett – Burman test factor and coding		
因素	编码	
	– 1	1
前进速度/(km·h ^{–1})	4	6
拉茎辊转速/(r·min ^{–1})	800	1 000
拨禾链线速度/(m·s ^{–1})	1	3
剥皮辊转速/(r·min ^{–1})	400	500
压送器高度/mm	25	35

表 4 Plackett – Burman 试验方案与结果							
Tab. 4 Plackett – Burman test protocol and results							
编号	因素					Y_1 /%	Y_2 /%
	前进速度	拉茎辊转速	拨禾链线速度	剥皮辊转速	压送器高度		
	A	B	C	D	E		
1	1	– 1	1	1	1	2. 28	0. 85
2	1	1	1	– 1	– 1	2. 74	1. 05
3	– 1	1	1	– 1	1	2. 18	1. 03
4	– 1	1	1	1	– 1	2. 24	1. 27
5	– 1	– 1	1	– 1	1	2. 03	0. 83
6	1	– 1	1	1	– 1	2. 30	0. 88
7	– 1	– 1	– 1	1	– 1	2. 00	0. 86
8	1	1	– 1	– 1	– 1	2. 63	1. 04
11	– 1	1	– 1	1	1	2. 13	1. 18
15	1	– 1	– 1	– 1	1	2. 34	0. 65
16	1	1	– 1	1	1	2. 59	1. 18
17	– 1	– 1	– 1	– 1	– 1	2. 01	0. 82

根据表 4 的 Plackett – Burman 试验结果,对总损失率 Y_1 和含杂率 Y_2 进行回归模型显著性分析,结果如表 5 和表 6 所示,得到回归模型

$$\begin{cases} Y_1 = 2.29 + 0.191A + 0.129B + 0.006C - \\ \quad 0.033D - 0.031E \\ Y_2 = 0.71 + 0.13A + 0.028B + 0.043C + \\ \quad 0.041D + 0.016E \end{cases}$$

(13)

由表 5、6 可知,两模型 $P < 0.01$ 、 $R^2 = 0.9715$,表明主要效应模型显著,说明模型所拟合的回归方程与实际情况相符合,能够表示因素 $A \sim E$ 对总损失率与含杂率的影响程度,由表 5 可知前进速度 A 、拉茎辊转速 B 对损失率影响极显著;由表 6 可得拉茎辊转速 B 、剥皮辊转速 D 对含杂率影响极显著,而拨禾链线速度 C 与压送器高度 E 对总损失率与含杂率均无显著性影响。取对总损失率和含杂率影响程度和贡献率较大的因素:前进速度 A 、拉茎辊转速 B 与剥皮辊转速 D 作为响应面试验因素。

表 5 总损失率方差分析

Tab. 5 Total loss rate significance analysis of

Plackett – Burman test results

来源	平方和	自由度	均方和	贡献率/%	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0. 661 7	5	0. 132 3		40. 97	0. 000 1 **
<i>A</i>	0. 437 0	1	0. 437 0	64. 48	135. 27	<0. 000 1 **
<i>B</i>	0. 200 2	1	0. 200 2	29. 54	61. 97	0. 000 2 **
<i>C</i>	0. 000 4	1	0. 000 4	0. 06	0. 126 4	0. 734 4
<i>D</i>	0. 012 7	1	0. 012 7	1. 87	3. 92	0. 094 9
<i>E</i>	0. 011 4	1	0. 011 4	1. 68	3. 53	0. 109 3
残差	0. 019 4	6	0. 003 2			
总和	0. 681 1	11				
<i>R</i> ²		0. 971 5		<i>R</i> ² _{pre}		0. 886 2
<i>R</i> ² _{Adj}		0. 947 8		Adeq Precision		17. 837 1

注：* 表示显著($P < 0.05$)；** 表示极显著($P < 0.01$)。下同。

表 6 含杂率方差分析

Tab. 6 Impurity rate significance analysis of

Plackett – Burman test results

来源	平方和	自由度	均方和	贡献率/%	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0. 357 3	5	0. 071 5		28. 78	0. 000 4 **
<i>A</i>	0. 009 6	1	0. 009 6	2. 59	3. 88	0. 096 4
<i>B</i>	0. 288 3	1	0. 288 3	77. 41	116. 09	<0. 000 1 **
<i>C</i>	0. 002 7	1	0. 002 7	0. 72	1. 09	0. 337 3
<i>D</i>	0. 053 3	1	0. 053 3	14. 32	21. 48	0. 003 6 **
<i>E</i>	0. 003 3	1	0. 003 3	0. 89	1. 34	0. 290 7
残差	0. 014 9	6	0. 002 5			
总和	0. 372 2	11				
<i>R</i> ²		0. 960 0		<i>R</i> ² _{pre}		0. 839 9
<i>R</i> ² _{Adj}		0. 926 6		Adeq Precision		15. 986 9

4. 2. 3 响应面试验设计

为在制种玉米收获机的作业过程中寻求最优参数,基于试验地块制种玉米植株特性,选取 3 个影响作业效果的工作参数:前进速度 *A*、拉茎辊转速 *B*、剥皮辊转速 *D*,对其进行 3 因素 3 水平正交试验。试验因素编码如表 7 所示。

表 7 试验因素编码

Tab. 7 Horizontal coding of test factors

编码	因素		
	前进速度/ (km·h ⁻¹)	拉茎辊转速/ (r·min ⁻¹)	剥皮辊转速/ (r·min ⁻¹)
-1	4	800	400
0	5	900	450
1	6	1 000	500

4. 2. 4 结果分析

表 8 为三因素三水平正交试验结果。

对总损失率进行二次回归方程分析,见表 9。并以总损失率 Y_1 为响应值,建立二次多项回归方程

表 8 响应曲面优化试验设计与结果

Tab. 8 Response surface optimization test and results

试验 序号	因素			评价指标	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	1	-1	1. 82	0. 66
2	1	1	0	3. 02	0. 97
3	0	0	0	1. 69	0. 59
4	-1	0	-1	2. 04	0. 72
5	-1	0	1	1. 98	0. 81
6	1	0	-1	2. 91	0. 63
7	0	0	0	1. 68	0. 59
8	0	0	0	1. 69	0. 57
9	0	0	0	1. 68	0. 54
10	-1	-1	0	1. 94	0. 69
11	0	0	0	1. 69	0. 55
12	-1	1	0	2. 05	0. 92
13	0	-1	1	1. 79	0. 78
14	0	1	1	1. 83	1. 23
15	1	0	1	3. 07	0. 92
16	1	-1	0	2. 97	0. 71
17	0	-1	-1	1. 75	0. 85

表 9 种穗总损失率模型方差分析

Tab. 9 Analysis of variance for the total ear
loss rate model

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0. 57	9	0. 063 3	53. 7	<0. 000 1 **
<i>A</i>	1. 96	1	0. 101 3	85. 86	<0. 000 1 **
<i>B</i>	0. 009 1	1	0. 023 1	19. 6	0. 003 1 **
<i>D</i>	0. 002 8	1	0. 001 5	1. 28	0. 294 7
<i>AB</i>	0. 000 9	1	0. 012 1	10. 26	0. 015 *
<i>AD</i>	0. 012 1	1	0. 025 6	21. 71	0. 002 3 **
<i>BD</i>	0. 000 2	1	0. 001 2	1. 04	0. 342
<i>A</i> ²	2. 4	1	0. 301 9	255. 96	<0. 000 1 **
<i>B</i> ²	0. 011 9	1	0. 027 1	22. 99	0. 002 **
<i>D</i> ²	0. 014 3	1	0. 046 6	39. 55	0. 000 4 **
残差	0. 008 3	7	0. 001 2		
失拟项	0. 004	3	0. 001 3	1. 24	0. 406
纯误差	0. 004 3	4	0. 001 1		
总和	0. 578 2	16			

$$Y_1 = 1. 69 + 0. 495A + 0. 034B + 0. 019D -$$
$$0. 015AB + 0. 055AD - 0. 008BD +$$
$$0. 756A^2 + 0. 053B^2 + 0. 058D^2 \quad (14)$$

由表 9 可知,该模型差异极显著($P < 0.001$),决定系数 R^2 为 0. 985 7,说明模型拟合较优,能较为直观地拟合试验结果。失拟项不显著($P = 0. 406 > 0.05$),说明模型误差较小,校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0. 967 4,说明模型的相关性和解释度都很好,可以用此模型进行理论分析和预测。

由表 9 可知, A 、 B 、 AD 、 A^2 、 B^2 、 D^2 对总损失率影

响极显著 ($P < 0.01$)。总损失率响应曲面如图 16 所示。

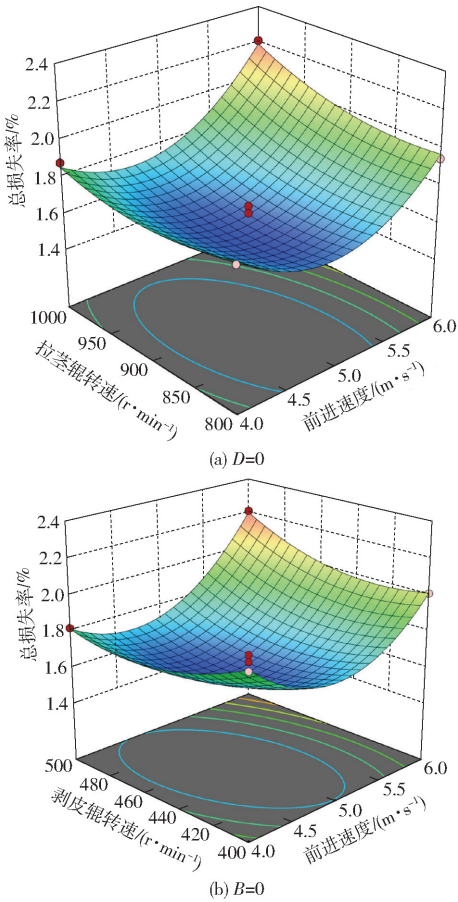


图 16 总损失率响应面

Fig. 16 Total loss rate response surfaces

由图 16a 可知,当拉茎辊转速一定时,随着前进速度的增加,总损失率呈先降低后增高的趋势,由于机具前进速度过慢,种穗会在摘穗板前端被摘下,输送行程增大,且摘穗板前端间隙较小,极易造成损伤与堵塞。当前进速度过高时,进入割台植株增多,拉茎辊第一时间无法全部摘穗,导致了其损失率增高;当前进速度一定时,随着拉茎辊转速的增加,总损失率仍呈先降低后增高的趋势,因为拉茎辊转速较低时,种穗所受摘穗板的力与种穗和穗柄间的力相差不大,会出现摘穗不流畅现象,甚至导致堵塞,当拉茎辊转速过大时,摘穗板与种穗碰撞力过大,造成籽粒破损。仅考虑二者交互作用的情况下,当前进速度为 4.4 ~ 5.3 km/h、拉茎辊转速为 850 ~ 950 r/min 时,总损失率较小。

AD 响应曲面图如图 16b 所示,随着剥皮辊转速的增加,总损失率呈先降低后增高的趋势。仅考虑二者交互作用的情况下,得知当剥皮辊转速为 440 ~ 480 r/min、前进速度在 4.5 ~ 5.5 km/h 时,总损失率较小。

对含杂率进行二次回归方程分析,见表 10。以

含杂率 Y_2 为响应值,建立二次多项回归方程为

$$Y_2 = 0.568 + 0.011A + 0.094B + 0.11D + 0.008AB + 0.05AD + 0.16BD + 0.072A^2 + 0.182B^2 + 0.13D^2 \quad (15)$$

表 10 种穗含杂率模型方差分析

Tab. 10 Analysis of variance for the ear impurity

rate model					
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.536 6	9	0.059 6	38.62	<0.000 1 **
A	0.001	1	0.001	0.655 9	0.444 7
B	0.070 3	1	0.070 3	45.55	0.000 3 **
D	0.096 8	1	0.096 8	62.71	<0.000 1 **
AB	0.000 2	1	0.000 2	0.145 8	0.713 9
AD	0.01	1	0.01	6.48	0.038 4 *
BD	0.102 4	1	0.102 4	66.34	<0.000 1 **
A ²	0.022	1	0.022	14.24	0.007 **
B ²	0.139 9	1	0.139 9	90.6	<0.000 1 **
D ²	0.070 9	1	0.070 9	45.92	0.000 3 **
残差	0.010 8	7	0.001 5		
失拟项	0.008 7	3	0.002 9	5.59	0.064 8
纯误差	0.002 1	4	0.000 5		

由表 10 可知,该模型差异极显著 ($P < 0.001$), 决定系数 R^2 为 0.980 3,失拟项 $P > 0.05$,变异系数为 5.25%,校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0.954 9,由此可得模型误差较小,且相关性和解释度都很好,能够正确反映预测指标与各因素间关系。其中 B 、 D 、 BD 、 A^2 、 B^2 、 D^2 对含杂率的影响极显著 ($P < 0.01$)。含杂率响应曲面如图 17 所示。

由图 17a 可知,随着前进速度的增加,含杂率呈先降低后增加的趋势,当前进速度较低时,随着剥皮辊转速的增加,含杂率呈先降低后增加趋势,当前进速度较高时,含杂率与剥皮辊转速呈正相关,可看出拉茎辊转速与摘穗板间距之间的交互作用较显著。仅考虑二者交互作用的情况下,当前进速度为 4.3 ~ 5.9 km/h、剥皮辊转速为 420 ~ 460 r/min 时,含杂率较低。

BD 响应曲面图如图 17b 所示,当拉茎辊转速较低时,含杂率随着剥皮辊转速的增大呈先降低后升高的趋势;当拉茎辊转速较高时,剥皮辊转速与含杂率呈正相关趋势;剥皮辊转速一定时,拉茎辊转速呈先降低后增高的趋势,仅考虑二者交互作用的情况下,当拉茎辊转速为 850 ~ 980 r/min、剥皮辊转速为 450 ~ 475 r/min 时,含杂率较低。

4.3 参数优化

根据回归方程模型,以总损失率、含杂率最小为优化目标,约束条件及目标模型为

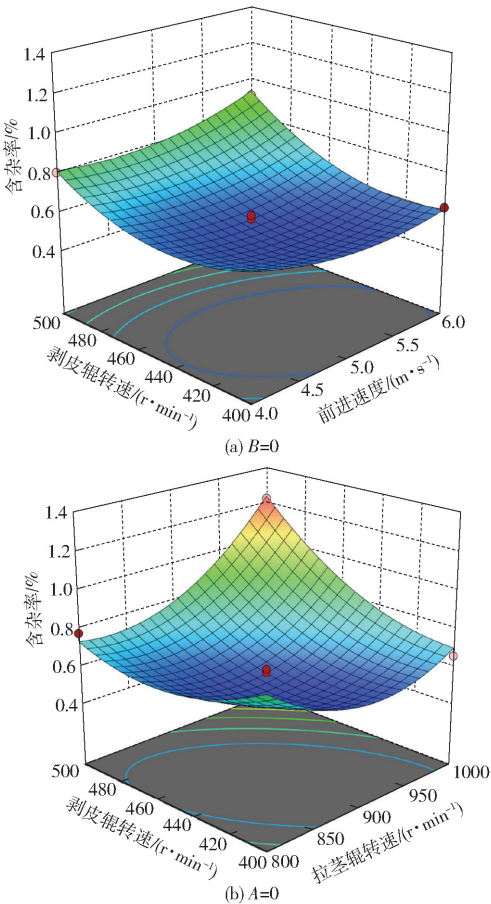


图 17 含杂率响应曲面
Fig. 17 Impurity rate response surfaces

$$\begin{cases} \min(Y_1, Y_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq D \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

优化后可得:当前进速度为 4.87 km/h、拉茎辊转速为 877.27 r/min、剥皮辊转速为 442.52 r/min 时,总损失率为 1.61%、含杂率为 0.55%。

4.4 验证试验

基于制种玉米收获机以上测试得到的数据,于 2023 年 10 月 7 日在张掖市党寨镇进行田间验证试验,试验条件同 4.1 节,依据实际试验情况将参数修正为前进速度为 4.9 km/h、拉茎辊转速为 880 r/min、

拉茎辊转速为 450 r/min,在此条件下进行 3 次平行试验,结果如表 11 所示,试验得到:实际损失率为 1.64%、果穗含杂率为 0.57%,与预测值总损失率为 1.61%、果穗含杂率为 0.55%,在偏差 5% 范围内,证实了预测值和试验值之间的良好相关性。

表 11 验证试验结果
Tab. 11 Verification test result %

参数	区组	试验值	平均值	指标要求
总损失率	I	1.48	1.64	≤3
	II	1.81		
	III	1.63		
果穗含杂率	I	0.68	0.57	≤0.6
	II	0.51		
	III	0.53		

5 结论

(1) 针对现有玉米收获机工作时容易产生伤穗落籽、容易堵塞等问题,设计了一种大型制种玉米联合收获机。前端采用外扩链齿柔性板式摘穗割台,割台上方配备钢基质覆胶弧形摘穗板,“橡胶 + 钢质”夹持输送链与小倾角低速六棱拉茎辊,机具后方配备可替换组合式剥皮装置来输送果穗和剥净苞皮,并且进行理论分析与计算,确定其最佳工作参数,保证了低损高效摘穗、输送与剥皮。

(2) 对制种玉米收获机摘穗装置与剥皮装置工作过程与原理进行分析,确定了影响收获作业效果的影响因素:前进速度、拉茎辊转速、剥皮辊转速。通过响应曲面法分析了各因素对机具作业性能的影响,得出总损失率的因素影响由大到小依次为前进速度、拉茎辊转速和剥皮辊转速;含杂率的因素影响由大到小依次为剥皮辊转速、拉茎辊转速、前进速度。对模型进行优化并进行田间验证,得到当收获机前进速度为 4.9 km/h、拉茎辊转速 880 r/min、剥皮辊转速为 450 r/min 时,果穗总损失率为 1.64%,含杂率为 0.57%,整机工作平稳,满足制种玉米收获机的标准要求。

参 考 文 献

[1] SHULL G H. Hybrid seed corn[J]. Science, 1946, 103: 547 – 550.
[2] LAHUE D W. Grain protectants for seed corn[J]. Journal of Economic Entomology, 1976, 69(5): 652 – 654.
[3] TROYER A F. Development of hybrid corn and the seed corn industry[M]. Handbook of Maize: Genetics and Genomics, 2009:87 – 114.
[4] RYAN B, GROSS N C. The diffusion of hybrid seed corn in two iowa communities[J]. Rural Sociol, 1943, 8(8):15 – 24.
[5] PISHGAR-KOMLEH S H, KEYHANI A, MOSTOFI-SARKARI M R, et al. Assessment and determination of seed corn combine harvesting losses and energy consumption[J]. Elixir Agriculture, 2013, 54: 12631 – 12637.
[6] 刘丹, 安雨丽, 陶笑笑, 等. 西北地区制种玉米产量及氮素吸收对供氮水平的响应[J]. 中国农业科学, 2023, 56(3): 441 – 452.
LIU Dan, AN Yuli, TAO Xiaoxiao, et al. Effects of different nitrogen gradients on yield and nitrogen uptake of hybrid seed

- maize in northwest China[J]. *Scientific Agricultura Sinica*, 2023, 56(3):441–452. (in Chinese)
- [7] 李继军, 裴晖平. 西北制种基地成本提高对玉米种企的影响[J]. *中国种业*, 2022(3):52–55.
LI Jijun, PEI Huiping. The effect of increasing cost of seed production bases in northwest China on maize seed enterprise[J]. *China Seed Industry*, 2022(3):52–55. (in Chinese)
- [8] 汪凤珠, 赵博, 刘阳春, 等. 玉米青贮收获机多参数检测系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1):127–136.
WANG Fengzhu, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Design and experiment of multi-parameter detection system for corn silage harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1):127–136. (in Chinese)
- [9] 朱晓龙, 迟瑞娟, 杜岳峰, 等. 玉米收获机低损脱粒智能控制系统半实物仿真平台设计[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(8):114–122.
ZHU Xiaolong, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Design of hardware in loop simulation platform for intelligent control system of corn kernel harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(8):114–122. (in Chinese)
- [10] 王立军, 刘伟腾, 李懿航, 等. 大喂入量玉米籽粒收获机清选系统双层筛孔抖动板研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7):92–102.
WANG Lijun, LIU Weiteng, LI Yihang, et al. Research on double-layer jitter plates with holes in large-feeding mass cleaning system of maize grain harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7):92–102. (in Chinese)
- [11] 李天宇. 鲜食玉米柔性低损摘穗装置设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
LI Tianyu. Design and experiment on flexible low-loss fresh corn picking device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [12] 付乾坤, 付君, 王锋德, 等. 轮式刚柔耦合减损玉米摘穗割台的设计与参数优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7):21–30.
FU Qiankun, FU Jun, WANG Fengde, et al. Design and parameter optimization of corn head with wheel type rigid-flexible coupling snapping device to reduce loss[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(7):21–30. (in Chinese)
- [13] 付乾坤, 付君, 陈志, 等. 玉米摘穗割台刚柔耦合减损机理分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4):60–68.
FU Qiankun, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Loss reduction mechanism and experiment on snapping of rigid-flexible coupling corn head[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4):60–68. (in Chinese)
- [14] 李克鸿. 间隙可调组合式玉米摘穗机构设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
LI Kehong. Design and experimental study on gap-adjustable combined ear-picking mechanism of corn[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [15] 纪晓琦, 耿端阳, 姚艳春, 等. 玉米收获机激振摘穗装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2):126–133.
JI Xiaoqi, GENG Duanyang, YAO Yanchun, et al. Design and experiment of corn harvester vibration picking device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp.2):126–133. (in Chinese)
- [16] 杨万忠, 张吉龙, 杨晓明, 等. 制种玉米种子机械化收获的实践与思考[J]. *中国种业*, 2022(2):70–72.
YANG Wanzhong, ZHANG Jilong, YANG Xiaoming, et al. Practice and thinking on mechanized harvest of maize seeds for seed production[J]. *China Seed Industry*, 2022(2):70–72. (in Chinese)
- [17] 汪振荣. 破解制种玉米全程机械化难题有良方[J]. *农机科技推广*, 2019(1):40–43.
- [18] 刘强, 周新丽, 杨明花. 对机械化收获玉米种子发芽率的思考[J]. *种子*, 2019(5):156–158.
LIU Qiang, ZHOU Xinli, YANG Minghua. Consideration on seed germination rate of maize with mechanized harvesting[J]. *Seed*, 2019(5):156–158. (in Chinese)
- [19] ADESOLA A S, RÜHL G, GREEF J M. Impact of mechanical damage to hybrid maize seed from harvesting and conditioning[J]. *Seed Technology*, 2006, 28:7–21.
- [20] VERHEYE W. Growth and production of maize: traditional low-input cultivation[M] // *Land use, land cover and soil sciences*. Ghent: UNESCO – EOLSS Publishers, 2010.
- [21] 唐遵峰, 刘淑平, 周福君, 等. 制种玉米种穗收获机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7):102–112.
TANG Zunfeng, LIU Shuping, ZHOU Fujun, et al. Design and experiment of ear harvester for seed corn[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7):102–112. (in Chinese)
- [22] 杜岳峰. 丘陵山地自走式玉米收获机设计方法与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
DU Yuefeng. Design method and experimental research on self-propelled corn harvester for hilly and mountainous region[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [23] 辛尚龙, 赵武云, 戴飞, 等. 旱区全膜双垄沟播履带式玉米联合收获机的设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14):1–11.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Design of crawler type corn combine harvester for whole plastic film mulching on double ridges in arid regions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(14):1–11. (in Chinese)
- [24] 王子佳. 4YZ-2 自走式玉米联合收获机总体设计及关键部件的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
WANG Zijia. Design and research of key component of 4YZ-2 self-propelled corn harvest[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)

- [25] 张宗玲, 韩增德, 李树君, 等. 玉米穗茎兼收割台切割夹持输送装置仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 215–221.
ZHANG Zongling, HAN Zengde, LI Shujun, et al. Simulation and test on straw cutting and clamping device of corn combine harvester for stalk and ears[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (Supp.): 215–221. (in Chinese)
- [26] 耿端阳, 张道林, 李清华, 等. 玉米收获机拨禾导向装置技术参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 45–49.
GENG Duanyang, ZHANG Daolin, LI Qinghua, et al. Experimental study on technical parameters of raking and conveying device of corn harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 45–49. (in Chinese)
- [27] 崔涛, 樊晨龙, 张东兴, 等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 1–13.
CUI Tao, FAN Chenlong, ZHANG Dongxing, et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 1–13. (in Chinese)
- [28] 罗惠中, 左平安, 蒋小霞, 等. 基于 ADAMS 的刚柔耦合玉米摘穗力学仿真试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(1): 147–153, 162.
LUO Huizhong, ZUO Ping'an, JIANG Xiaoxia, et al. Mechanical simulation experiment of rigid flexible coupling corn plucking based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(1): 147–153, 162. (in Chinese)
- [29] 辛尚龙, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟播玉米穗茎兼收对行联合收获机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 21–28.
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Development of corn combine harvester reaping both corn ear and stalk for whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 21–28. (in Chinese)
- [30] 张宗玲. 新型玉米穗茎联合收获机割台的研制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
ZHANG Zongling. Study on a new corn combine harvester header for reaping both corn stalk and spike[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [31] 阿吉奎. 鲜食玉米收获机摘穗装置的设计与试验[D]. 成都: 四川农业大学, 2021.
A Jikui. Design and test of ear picking device of fresh corn harvester[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [32] 陈舜, 易克传, 张新伟, 等. 高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 30–42.
CHEN Shun, YI Kechuan, ZHANG Xinwei, et al. Design and test of longitudinal axial flow high and low roller type fresh corn flexible peeling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 30–42. (in Chinese)
- [33] 刘磊, 刘理汉, 杜岳峰, 等. 基于 TRIZ 理论的种子玉米剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 131–141.
LIU Lei, LIU Lihan, DU Yuefeng, et al. Design and experiment of seed corn peeling mechanism based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 131–141. (in Chinese)
- [34] 蔺吉顺, 包玉成. 立式玉米剥皮机的设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 70–73.
LIN Jishun, BAO Yucheng. Design of vertical corn husker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 70–73. (in Chinese)
- [35] 全国农业机械标准化技术委员会. GB/T 21962—2020 玉米收获机械[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [36] 崔俊伟. 玉米联合收获机剥皮装置结构及运动参数的优化设计[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2010.
CUI Junwei. Optimal design of structure and motion parameters of husking device of corn combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2010. (in Chinese)
- [37] 王善博, 阿力木·买买提吐尔逊, 黄强斌, 等. 基于 EDEM-RecurDyn 耦合的玉米剥皮装置仿真分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10): 115–120, 143.
WANG Shanbo, ALI MU·MAI TITULIXUN, HUANG Qiangbin, et al. Simulation analysis and experiment of a maize peeling device based on EDEM-RecurDyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 115–120, 143. (in Chinese)