

# 丘陵山地藜麦联合收割机设计与试验

王天福<sup>1</sup>, 戴飞<sup>1</sup>, 赵武云<sup>1</sup>, 史瑞杰<sup>1</sup>, 赵一鸣<sup>1</sup>, 杨发荣<sup>2</sup>, 邢立成<sup>3</sup>, 王国鑫<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院畜牧与绿色农业研究所, 甘肃 兰州 730070;  
3. 江苏沃得农业机械有限公司, 江苏 镇江 212300)

**摘要:**我国藜麦多种植于高海拔、丘陵山区, 种植地块小、坡度大、道路狭窄, 为降低普通稻麦联合收割机收割藜麦损失大、含杂高、喂入不畅等问题, 本研究针对藜麦种植农艺和茎秆特性设计了一种丘陵山地藜麦联合收割机。该机采用小行距扩口链齿喂入装置, 配合下割刀、纹杆与杆齿组合式纵轴流脱粒滚筒、组合式分离凹板、双层往复振动筛等装置, 实现藜麦顺畅喂入、脱粒与分离、清选作业, 对关键部件进行设计仿真, 并进行田间试验。仿真结果表明: 藜麦分禾喂入过程分禾角度较小, 不会产生茎秆折损。试验结果表明: 藜麦籽粒含水率14%、茎秆含水率为26%时, 脱净率96.83%、含杂率4.30%、破损率0.15%、割台损失率1.54%、夹带损失率0.92%、清选损失率0.52%、总损失率2.98%。作业期间整机运行平稳, 满足藜麦机械化收获要求与作业指标, 可以作为丘陵山地藜麦联合收割机使用。本文可为藜麦联合收割机设计与试验提供一定参考。

**关键词:** 藜麦; 联合收割机; 割台; 试验; 丘陵山地

**中图分类号:** S225.31 **文献标志码:** A

## Design and test of *quinoa* combine harvester in hilly and mountainous areas

WANG Tianfu<sup>1</sup>, DAI Fei<sup>1</sup>, ZHAO Wuyun<sup>1</sup>, SHI Ruijie<sup>1</sup>,

ZHAO Yiming<sup>1</sup>, YANG Farong<sup>2</sup>, XING Licheng<sup>3</sup>, WANG Guoxin<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;  
2. Livestock Grass and Green Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China;  
3. Jiangsu World Agricultural Machinery Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212300, China)

**Abstract:** Many kinds of *quinoa* are planted in high altitude and hilly mountainous areas in China with small planting plots, large slopes, and narrow roads. To reduce the problems of large loss, high impurity content and poor feeding of *quinoa* harvested by ordinary rice wheat combine harvester, this study focused on *quinoa* planting agronomy and stem characteristics with a new design of hilly and mountainous *quinoa* combine harvester. The machine used a small row spacing flared chain tooth feeding device, lower cutter, combined longitudinal axial flow threshing drum of corrugated rod and rod tooth, combined separation concave plate, double layer reciprocating vibrating screen and other devices to realize the smooth feeding, threshing, separation and cleaning of *quinoa*. The key components were designed and simulated, and a field experiment was carried out. The simulation results showed that the feeding angle of *quinoa* was small, the stalk was damaged. The results showed that when the moisture content of *quinoa* grain was 14%, the moisture content of stem was 26%, the threshing rate was 96.83%, the impurity rate was 4.30%, the damage rate was 0.15%, the header loss rate was 1.54%, the entrainment loss rate was 0.92%, the cleaning loss rate was 0.52%, and the total loss rate was 2.98%. During the operation, the whole machine ran smoothly and met the requirements and operation indexes of *quinoa* mechanized harvest. Therefore, it could be used as the *quinoa* combine harvester in hilly and mountainous areas. This study provides some reference for design and

收稿日期: 2022-05-12

修回日期: 2022-09-01

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目(ZCYD-2020-6-2); 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-14-1-28)

作者简介: 王天福(1996-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向为农业工程技术与装备。E-mail: 807441141@qq.com

通信作者: 赵武云(1966-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事北方旱区作物生产装备工程研究。E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

test of quinoa combine harvester.

**Keywords:** quinoa; combine harvester; header; experiment; hills and mountains

藜麦 (*Quinoa*) 又称南美藜、印第安麦等,原产地南美洲,为一年生草本植物,具有耐盐碱和抗寒旱特性,被誉为“营养黄金”,是我国西北、西南高寒干旱丘陵地区的主要粮食作物<sup>[1-4]</sup>。藜麦低脂低糖,营养价值丰富,富含人体所必需氨基酸,是婴幼儿、三高人群的理想保健和食疗产品,近年来备受推崇<sup>[2-4]</sup>。我国藜麦种植面积约为  $2.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 主要分布在甘肃、青海、云南、贵州等省份,其中甘肃省作为藜麦主产区之一,其种植面积约占全国种植总面积的 40%<sup>[2-5]</sup>。

藜麦在欧美国家种植面积较大,现有藜麦联合收割机均采用播禾轮或链齿式进行喂入,脱粒装置、清选装置均采用无级变速,各装置智能化和模块化控制,可实现对不同成熟度藜麦进行收获作业,收获效率较高<sup>[6]</sup>。我国藜麦引进较晚,同时受地域、种植品种、作业成本等多方面限制,收获装备尚不能完全适应我国丘陵山地藜麦收获作业。近年来,海梅等<sup>[7-8]</sup>对普通收获机械收获藜麦脱出物物料特性进行研究,为藜麦清选设备研发提供借鉴;赵子龙等<sup>[9]</sup>对藜麦谷物进行浸水试验;甘肃农业大学针对大田种植模式研发出国内第一台大型自走式藜麦联合收割机,解决了大田藜麦收获无机可用现状<sup>[10]</sup>。目前,市场未见适应丘陵山地藜麦收获装备,丘陵山地稻麦联合收割机不能适应高秆藜麦作物性状以及脱出物料差异小等特性,造成损失大、含杂高等问题,国内藜麦收获多以人工收割撵压脱粒为主,劳动强度大,收获效率低。山区降雨集中,成熟藜麦浸雨后会发生发芽,其品质受到严重影响,丘陵山地藜麦机械化收获现状严重制约产业发展,地区藜麦收获装备研发成为亟需解决的难题。

针对国内丘陵山地藜麦种植地块小、道路狭窄、大型机具难进场等现象,为降低藜麦收获损失率和含杂率,解决丘陵山区藜麦联合收获无机可用

的难题,本研究依据藜麦种植农艺要求,基于其茎秆特性拟设计出一种丘陵山地藜麦联合收割机。该机采用小行距扩口式链齿喂入装置、穗茎分流双层割刀、纹杆和杆齿组合式纵轴流脱粒滚筒、组合式分离凹板、双层往复振动筛等装置,实现藜麦茎秆和果穗顺畅喂入、脱粒与分离、清选等作业,从而解决收获喂入难和损失大等难题,为藜麦机械化生产提供参考。

## 1 藜麦种植农艺要求与植株特性

丘陵山地藜麦多采用覆膜穴播方式,单膜 3 行种植,中间留有植保工作行,种植后膜面宽度为 1 000 mm,藜麦种植行距 350~380 mm,株距 150~250 mm<sup>[4,7]</sup>,种植地坡度 15°。藜麦生长期 90~120 d,成熟期藜麦植株高 300~2 500 mm,单株质量为 200~260 g,草谷比平均为 1.8,千粒重 4~6 g,籽粒圆周直径 1.8~2.2 mm,平均厚度 1.2 mm。成熟藜麦植株穗头大、茎秆脆、易倒伏,普通稻麦联合收割机无法对倒伏藜麦进行适应收获。

## 2 整机结构与工作原理

### 2.1 整机结构

丘陵山地藜麦联合收割机(图 1,见 260 页)由割台、过桥、下割刀、链齿喂入装置、脱粒装置、清选装置、发动机动力系统、行走系统等组成,其中割台是整机创新部分。整机由柴油机提供动力,单边链齿完成拨禾工序,割台负责藜麦切割、喂入工序,实现藜麦小偏差对行收获;脱粒滚筒采用纹杆+杆齿纵轴流结构,与组合式凹板实现藜麦物料的高效脱粒与分离;清选系统由风机和双层往复振动筛组成,实现藜麦脱粒物料的清选作业,整机满足丘陵山地、坡地作业。整机技术参数见表 1。

表 1 丘陵山地藜麦联合收割机技术参数

Table 1 Technical parameters of quinoa combine harvester in hilly and mountainous areas

参数 Parameter	取值 Value	参数 Parameter	取值 Value
结构形式 Structural style	全喂入履带式 Full feed crawler type	额定转速 Rated speed/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	2 400
整机尺寸(长×宽×高) Overall dimension ( $L \times W \times H$ )/mm	4 950×2 150×2 590	脱粒滚筒参数(直径×长度) Threshing drum parameter ( $D \times L$ )/mm	550×1 350
割台宽度 Cutting width/mm	1 900	履带节距×节数×宽 Crawler pitch×pitch numbers×width/mm	90×44×400
喂入量 Feeding rate/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	4.0	履带轨距 Gauge of crawler/mm	1 080
作业速度 Working speed/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.75~1.50	离地间隙 Ground clearance/mm	320
生产率 Productivity/( $\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ )	0~0.5	额定功率 Rated power/kW	51.5

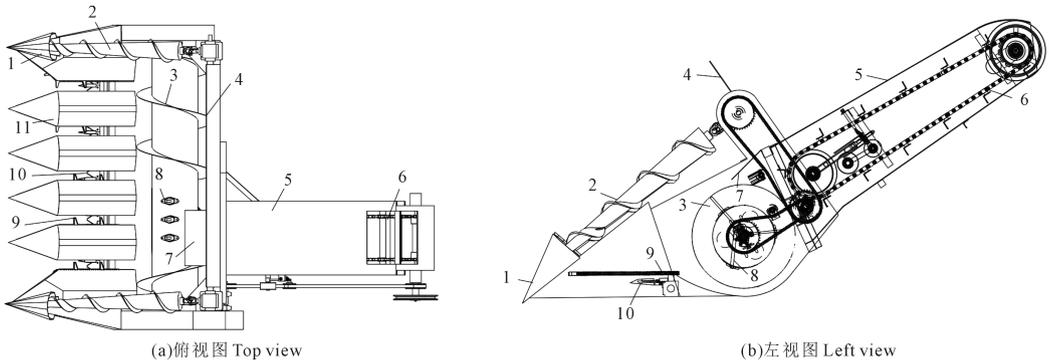
## 2.2 工作原理

机具作业时,割台分禾器对藜麦上部茎秆进行分禾切割后进入脱粒滚筒,下部茎秆被下割刀切割后铺放在田间。藜麦物料在纹杆式脱粒滚筒的打击、揉搓作用下分离,部分藜麦籽粒由栅格凹板落下,其余物料进入杆齿段并分层,藜麦籽粒、短茎秆和颖壳从组合式编制筛凹板孔隙落入到清选装置,茎秆在导草板的作用下排出机外,质量较轻的短茎秆、颖壳、轻杂质被风机吹出机外。经过气流与振动筛作用后的藜麦籽粒被一级输送螺旋输送进粮仓,含藜麦穗头较多的杂余被二级螺旋输送至脱粒室进行复脱和复清选。

## 3 关键部件设计

### 3.1 割台

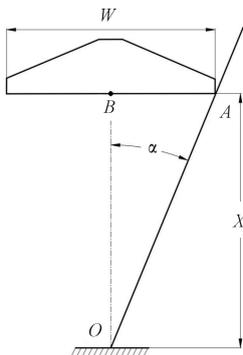
丘陵山地藜麦联合收割机割台(图 2)采用小行



1. 侧分禾器; 2. 螺旋分禾器; 3. 螺旋输送搅拢; 4. 后挡板; 5. 过桥; 6. 输送链; 7. 挡草板; 8. 伸缩弹齿; 9. 拨齿; 10. 上割刀; 11. 中间分禾器。  
1. Side grain divider; 2. Spiral grain divider; 3. Spiral conveying and stirring; 4. Rear baffle; 5. Bridge; 6. Conveyor chain;  
7. Grass guard; 8. Telescopic spring teeth; 9. Shift teeth; 10. Upper cutting knife; 11. Middle grain divider

图 2 藜麦扩口链齿喂入割台

Fig.2 Quinoa flared chain teeth are fed into the header



注:  $X$  为割台离地高度 (mm);  $\alpha$  为分禾器对藜麦分禾倾角 ( $^{\circ}$ );  $W$  为分禾器宽度 (mm);  $O$  点为藜麦植株与地面的交点;  $B$  点为分禾器尖端;  $A$  点为藜麦与分禾器接触点。

Note:  $X$  is the height of the header from the ground (mm);  $\alpha$  is the inclination angle of the crop divider to the quinoa ( $^{\circ}$ );  $W$  is the width of the crop divider (mm); Point  $O$  is the intersection point between the quinoa plant and the ground; Point  $B$  is the tip of the crop divider; Point  $A$  is the contact point between the quinoa and the divider.

图 3 藜麦分禾示意图

Fig.3 Schematic diagram of quinoa division

距扩口式链齿喂入,包括侧分禾器、螺旋分禾器、中间分禾器、链齿、上割刀、螺旋搅轮、后挡板、过桥。侧分禾器和中间分禾器采用扩口式结构,可实现藜麦小偏差对行收获;喂入装置使用链齿式喂入,链齿直接作用于藜麦茎秆,减少与藜麦果穗接触,解决喂入难、损失大等问题。

参照藜麦种植农艺、行距、株距,考虑到作业效率、转移等情况,割台设计幅宽为 1 900 mm,5 行喂入,由种植农艺与作业速度计算得到单位时间喂入藜麦 15~20 株,质量 3 000~3 900 g,设计喂入量为  $4.0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.1.1 分禾器 藜麦植株在沿分禾器外沿运动,植株经分禾后在  $A$  点达到最大分禾倾角  $\alpha$ 。田间测得藜麦茎秆最大倾角为  $37^{\circ}$ <sup>[10-11]</sup>,此时最大拉伸力约为 30 N,藜麦分禾示意图如图 3 所示。

分禾器宽度计算公式为:

$$\arctan\left(\frac{W}{2X}\right) \leq 37^{\circ} \quad (1)$$

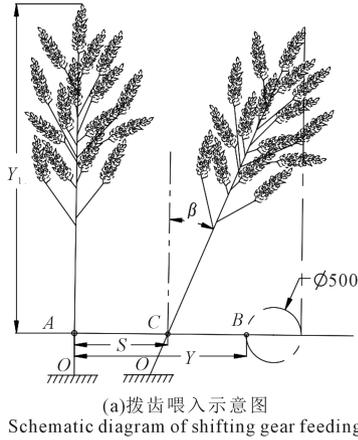
式中,  $X$  为分禾器与茎秆根部距离 (mm), 取  $X = 200 \text{ mm}$ 。

由式(1)计算得出中间分禾器宽度为 527 mm,结合种植行距,实现小偏差对行收获,取中间分禾器宽度  $W = 230 \text{ mm}$ ,此时最大分禾倾角为  $29.8^{\circ}$ ,小于田间测定最大测定倾角,不会造成藜麦喂入折损,符合设计原理。

3.1.2 链齿喂入装置 喂入过程中,链轮带动整个喂入链条做拨禾运动,拨齿对藜麦茎秆产生接触力,与茎秆发生相对运动,拨禾过程中藜麦向链齿边滑动,喂入过程中相对运动位移为  $\Delta S$ ,链齿拨禾角度  $\beta$  应小于临界折断角  $37^{\circ}$ <sup>[10-12]</sup>,链齿拨禾示意图如图 4 所示,其运动方程<sup>[13]</sup>为:

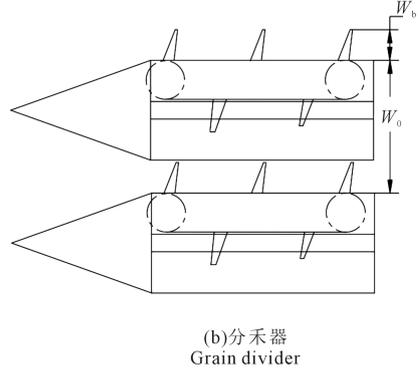
$$\begin{cases} \lambda = \frac{V_b}{V_a} > 1 \\ \Delta t = \frac{C_1}{V_a} \\ \beta = \arctan\left(\frac{\Delta S}{X}\right) \leq 37^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为速比;  $V_a$  为机器前进速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 取  $V_a = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $V_b$  为链齿速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。  $\Delta t$  为单株藜麦



拨禾所用时间 (s);  $C_1$  为藜麦种植株距 (mm), 取  $C_1 = 250 \text{ mm}$ ;  $\beta$  为茎秆链齿喂入倾角 ( $^\circ$ ), 取  $\beta = 37^\circ$ 。

由式 (2) 计算得, 相对位移  $\Delta S$  应小于  $150.7 \text{ mm}$ , 则链齿速度为  $1.0 \sim 1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为避免藜麦喂入折损, 茎秆后倾幅度不宜过大, 设计  $V_b = 1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 链齿线速度满足喂入条件, 可实现藜麦植株顺畅喂入。链齿喂入夹角  $\beta$  小于藜麦临界折断倾角<sup>[10,14]</sup>, 不会造成喂入折损。



注:  $Y$  为链齿拨禾行程 (mm);  $Y_1$  为茎秆切割后高度 (mm);  $S$  为链齿节距 (mm);  $\beta$  为链齿拨禾角度 ( $^\circ$ );  $O$  点为藜麦植株与地面的交点;  $W_0$  为分禾器安装间距 (mm);  $W_b$  为拨齿高度 (mm)。

Note:  $Y$  is the stroke of the sprocket (mm);  $Y_1$  is the height of quinoa after cutting (mm);  $S$  is the pitch of the sprocket (mm);  $\beta$  is the angle of the sprocket ( $^\circ$ ); Point  $O$  is the intersection point between the quinoa plant and the ground;  $W_0$  is the installation spacing of divider (mm);  $W_b$  is the gear height (mm)。

图 4 拨齿喂入示意图

Fig.4 Schematic diagram of shifting gear feeding

藜麦在拨齿作用下达到一定倾角后由割刀切割后倒向割台内部, 完成切割喂入工序, 输送链为单边拨齿, 拨齿由  $A$  点拨禾至  $B$  点 (工作长度记为  $Y$ , 图 2), 完成切割, 设  $A$  点到  $B$  点,  $B$  点到  $C$  点,  $A$  点到  $C$  点距离分别为  $L_{AB}$ 、 $L_{BC}$ 、 $L_{AC}$ , 链齿长度可按式 (3) 计算:

$$Y = L_{AB} = L_{AC} + L_{BC} \quad (3)$$

设计茎秆喂入角  $\beta = 37^\circ$ , 水平螺旋输送机装配尺寸为  $550 \text{ mm}$ , 则  $L_{BC}$  最小距离为:

$$L_{BC} = Y_1 \sin \beta - 550 \quad (4)$$

$$L_{AC} = S \quad (5)$$

式中,  $S$  为链齿间距 (mm)。藜麦平均株高为  $1620 \text{ mm}$ , 割茬高度为  $150 \text{ mm}$ , 则  $Y_1$  为  $1470 \text{ mm}$ 。

考虑到藜麦种植农艺, 减少因链齿间距过大造成的植株折损, 导致喂入不畅, 设置喂入链齿间距为  $S$ , 链齿在前进单个株距时间运动距离为:

$$S_0 = v_b \cdot \Delta t = \frac{v_b}{v_a} C_1 \quad (6)$$

设计每个链齿最多拨送 1 枝藜麦, 计运动距离内链齿数为  $N$ , 则有:

$$N \cdot S \geq S_0 \quad (7)$$

则该时间内经过链齿数  $N_{\min}$  为:

$$N_{\min} = \text{int}\left(\frac{v_b C_1}{v_a S}\right) \quad (8)$$

则链齿间距

$$S = \frac{v_b}{v_a N_{\min}} \quad (9)$$

式中,  $N_{\min}$  为单个藜麦株距内转过最少链齿数, 取  $N_{\min} = 2$ 。

带入计算数据可得, 链齿间距  $S \leq 156 \text{ mm}$ , 设计取链齿间距  $S = 125 \text{ mm}$ <sup>[11]</sup>。考虑到割台尺寸, 设计输送链长度  $Y = 470 \text{ mm}$ 。

为确保顺畅拨禾、喂入, 对拨齿高度有一定要求, 田间测量藜麦根部拨齿部位茎秆直径为  $12.00 \sim 19.12 \text{ mm}$ , 取茎秆平均直径为  $16.4 \text{ mm}$ , 极限尺寸偏差为  $7 \text{ mm}$ , 取链齿间隙极限尺寸偏差为  $5 \text{ mm}$ , 喂入时要求藜麦不能滑出拨齿, 满足 99.9% 藜麦喂入要求<sup>[10]</sup>, 则设计拨齿高度  $W_b$  满足:

$$1 - \eta \left( \frac{W_b - 16.4}{\sqrt{7^2 + 5^2}} \right) \leq 0.001 \quad (10)$$

式中,  $\eta$  为标准正态分布函数。

由式(10)计算得  $W_b \geq 36.94$  mm。链齿长度影响割台喂入流畅性, 为保证不发生藜麦茎秆堵塞和断裂等现象, 同时考虑装配间隙, 取  $W_b = 55$  mm, 设计分禾器安装间距  $W_0 = 290$  mm。

藜麦植株高、草谷比大, 为降低清选难度, 割台配置下割刀(图 5), 作业过程中, 上割刀将对藜麦最低结穗部位进行切割, 已切割的作物被输送进割台进入脱粒装置, 下割刀对茎秆根部再次切割, 实现穗茎分流, 减少茎秆喂入, 降低脱粒系统功率损耗。

### 3.2 割台喂入仿真分析

3.2.1 模型建立 基于 Hertz-Mindlin with Bonding 接触模型建立藜麦茎秆离散元模型, 茎秆离散元接触参数参考史瑞杰等<sup>[10]</sup>方法确定(表 2), 藜麦茎秆离散元模型生成方法为先填充后粘结, 颗粒粘结参数法向刚度  $K_n$ 、切向刚度  $K_s$ 、法向极限应力  $\sigma$ 、切向极限应力  $\gamma$  计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} K_n = \frac{4}{3} \left( \frac{1 - \mu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \mu_b^2}{E_b} \right)^{-1} \left( \frac{R_a + R_b}{R_a R_b} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ K_s = \left( \frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) K_n \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\mu_a$  和  $\mu_b$  为颗粒泊松比, 取值 0.3;  $E_a$  和  $E_b$  为颗粒弹性模量(MPa), 取值 416 MPa;  $R_a$  和  $R_b$  为颗粒半径(mm), 取值 8.2 mm。

$$\begin{cases} \sigma = \frac{F_n}{\pi R^2} \\ \gamma = F_c + \tan \varphi \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $F_n$  为临界压力(N), 取  $F_n = 1\ 028$  N;  $R$  为压缩面半径(mm), 取  $R = 8.2$  mm;  $F_c$  为茎秆内聚力(MPa), 取  $F_c = 0.005$  MPa<sup>[15]</sup>;  $\varphi$  为内摩擦角( $^\circ$ ), 取  $\varphi = 30^\circ$ <sup>[15]</sup>。

将力学试验数据代入式(11)、(12), 得  $K_n = 2.36 \times 10^9$  N · m<sup>-3</sup>、 $K_s = 1.58 \times 10^9$  N · m<sup>-3</sup>、 $\sigma = 48.7$  MPa、 $\gamma = 28.1$  MPa, 设置颗粒粘结半径  $R_j = 10$  mm。在藜麦秸秆几何体内建立 1 个颗粒工厂, 藜麦茎秆离散元模型长 650 mm, 直径 16.4 mm。颗粒粘结后导入分禾器三维模型, 对各部件分别定义材料属性。设置前进速度为  $1$  m · s<sup>-1</sup>, 链齿速度为  $1.25$  m · s<sup>-1</sup>。计算时采用 Rayleigh 时间的 15%, 时间步长为  $3.5 \times 10^{-6}$ , 设置仿真时间  $1$  s<sup>[10]</sup>。参数设置完成后分别进行藜麦植株分禾、链齿喂入过程仿真计算。

仿真结束后在后处理得到藜麦茎秆分禾过程与链齿喂入过程接触受力云图(图 6, 见 260 页); 藜麦茎秆分禾、链齿喂入过程各时刻受力如图 7 所示。

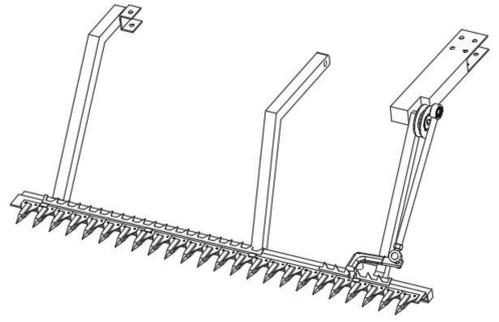


图 5 下割刀示意图

Fig.5 Schematic diagram of lower cutter

表 2 EDEM 中物料属性及接触参数

Table 2 Parameters of materials and contact in EDEM

项目 Project	参数 Parameter	值 Value
藜麦茎秆 Quinoa stem	泊松比 Poisson's ratio	0.3
	剪切模量 Shear modulus/MPa	160
	密度 Density/(kg · m <sup>-3</sup> )	590
割台 Header	泊松比 Poisson's ratio	0.3
	剪切模量 Shear modulus/MPa	$7.9 \times 10^4$
	密度 Density/(kg · m <sup>-3</sup> )	7 800
茎秆-茎秆 Stem-stem	恢复系数 Coefficient of recovery	0.21
	静摩擦系数 Static friction coefficient	0.25
	动摩擦系数 Dynamic friction coefficient	0.18
茎秆-割台 Stem-header	恢复系数 Coefficient of recovery	0.42
	静摩擦系数 Static friction coefficient	0.34
	动摩擦系数 Dynamic friction coefficient	0.12

3.2.2 仿真分析 由图 6A、图 7a 可以看出, 随机具前进, 沿分禾方向, 分禾角度逐渐增大, 藜麦茎秆在 0.03 s 时受力最大, 此时分禾器与藜麦茎秆瞬间接触, 最大作用力为 10.14 N, 0.4 s 时藜麦茎秆到达分禾器侧边处, 进入链齿喂入过程, 此时最大分禾角度为  $28^\circ$ ; 由图 6B、图 7b 可以看出, 随机具前进, 沿链齿喂入方向, 藜麦茎秆链齿喂入角度逐渐增大, 茎秆在 0.47 s 受力最大, 此时拨齿与茎秆最大作用力为 9.95 N, 此时藜麦经链齿拨禾到达割刀处, 链齿喂入过程中最大分禾角度为  $23^\circ$ <sup>[16]</sup>。分禾与链齿喂入过程中茎秆与割台接触力均未达到藜麦茎秆折断最大受力, 植株未到达最大折断倾角, 割台仿真分禾、喂入过程与实际分禾、喂入过程接近, 表明割台设计参数合理。

### 3.3 脱粒装置

3.3.1 组合式脱粒滚筒 藜麦成熟期含水率高、茎秆脆, 藜麦脱粒采用纹杆+杆齿空间布局方式, 藜麦先经纹杆挤压, 再经杆齿分离以降低夹带损失<sup>[17]</sup>。组合式脱粒滚筒结构如图 8 所示。

脱粒滚筒长度影响藜麦脱净率, 计算公式为:

$$L \geq q_1/q_0 \quad (13)$$

式中,  $q_1$  为脱粒装置的喂入量 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 取  $q_1 = 4.0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $q_0$  为滚筒单位长度允许承担的喂入量 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ), 取  $q_0 = 3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , 计算得滚筒长度为  $1\ 350 \text{ mm}$ <sup>[10,13]</sup>。

成熟期藜麦籽粒包裹有颖壳, 为使脱粒充分, 取脱粒滚筒直径  $D = 550 \text{ mm}$ <sup>[13]</sup>, 脱粒滚筒配置纹杆数  $Z = 6$ , 按式(14) 计算纹杆间距  $T$  为  $280 \text{ mm}$ 。

$$T = \frac{\pi D}{Z} \quad (14)$$

滚筒转速影响脱净率与损失率<sup>[18]</sup>。滚筒转速  $n$  计算公式为:

$$n = \frac{6 \times 10^4 v}{\pi D} \quad (15)$$

式中,  $v$  为脱粒滚筒线速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 参考水稻、高粱取  $v = 20 \sim 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。计算得藜麦脱粒滚筒转速范围为  $694 \sim 833 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

脱粒滚筒由喂入段、纹杆脱粒段、杆齿分离段、排草段组成, 设计喂入段长度  $L_1 = 240 \text{ mm}$ , 纹杆脱粒段  $L_2 = 550 \text{ mm}$ , 杆齿分离段  $L_3 = 550 \text{ mm}$ 。杆齿对

称安装实现充分分离, 杆齿间距  $L_5 = 70 \text{ mm}$ , 工作高度  $L_6 = 66 \text{ mm}$ 。

3.3.2 组合式凹板筛 组合式凹板筛(图 9) 配合脱粒滚筒完成谷物脱粒与分离。脱离滚筒前段配置栅格凹板, 利用栅格筛较好的脱粒能力, 使物料籽粒快速脱粒, 根据籽粒直径设计栅格间距  $d_s = 10 \text{ mm}$ ; 后段配置编制筛, 减少细碎茎秆落入清选系统, 降低含杂率<sup>[19]</sup>, 取编制筛间距  $a$  为  $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 。

凹板面积对分离效率和脱净率均产生影响。较大的分离面积使得脱粒分离作业更容易, 凹板弧长、凹板面积、凹板包角计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} A_0 = B_0 l \geq \frac{(1 - \zeta) q_1}{0.6 q_a} \\ B_0 = L_2 + L_3 \\ l = \frac{\pi D}{2} \\ \tau = \frac{360l}{\pi D} \end{cases} \quad (16)$$

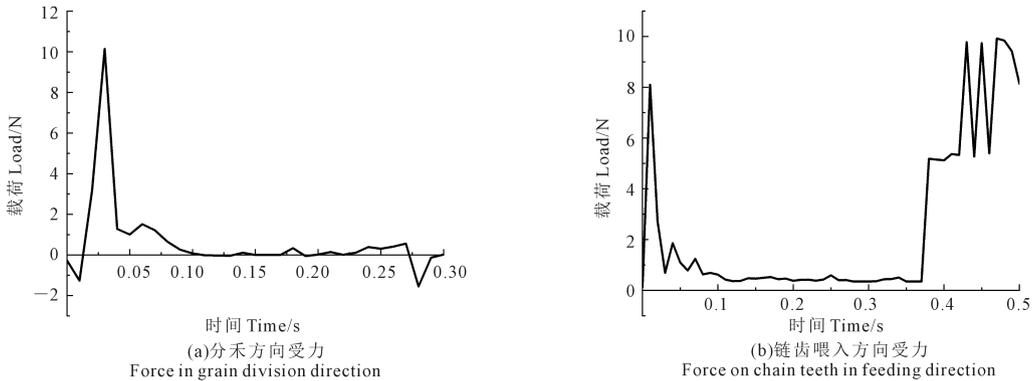
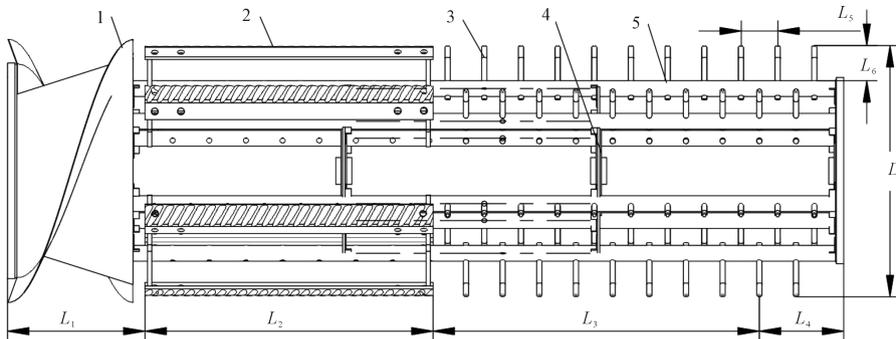


图 7 藜麦茎秆与割台接触力曲线

Fig.7 Contact force curve between quinoa stalk and header



注: 1. 喂入头; 2. 纹杆脱粒元件; 3. 杆齿脱粒元件; 4. 辐盘; 5. 辐条。  $L_1$  为喂入段长度 ( $\text{mm}$ );  $L_2$  为纹杆工作长度 ( $\text{mm}$ );  $L_3$  为分离段工作长度 ( $\text{mm}$ );  $L_4$  为排草段长度 ( $\text{mm}$ );  $L_5$  为杆齿间距 ( $\text{mm}$ );  $L_6$  为杆齿工作长度 ( $\text{mm}$ )。

Note: 1. Feeding head; 2. Striated rod threshing element; 3. Rod tooth threshing element; 4. Spoke plate; 5. Spoke.  $L_1$  is the length of feeding section ( $\text{mm}$ ).  $L_2$  is the working length of the corrugated rod ( $\text{mm}$ );  $L_3$  is the working length of separation section ( $\text{mm}$ );  $L_4$  is the length of grass discharge section ( $\text{mm}$ );  $L_5$  is the rod tooth spacing ( $\text{mm}$ );  $L_6$  is the working length of rod teeth ( $\text{mm}$ ).

图 8 纹杆+杆齿组合式脱粒滚筒示意图

Fig.8 Schematic diagram of grain rod + rod tooth combined threshing drum

式中,  $A_0$  为凹板面积 ( $\text{m}^2$ );  $B_0$  为凹板宽度 ( $\text{mm}$ );  $l$  为凹板弧长 ( $\text{mm}$ )。  $\zeta$  为喂入物料中藜麦籽粒所占比重, 取  $\zeta = 0.35$ <sup>[10]</sup>;  $q_1$  为喂入量 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 取  $q_1 = 4.0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $q_a$  为单位凹板面积可承受的喂入量 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 取  $q_a = 5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。 计算得到  $B_0 = 1\ 100 \text{ mm}$ , 凹板弧长  $l$  为  $870 \text{ mm}$ , 凹板面积  $0.95 \text{ m}^2$ , 包角  $\tau$  为  $180^\circ$ , 设计凹板间隙  $d_x = 20 \text{ mm}$ 。

### 3.4 清选装置

清选装置(图 10, 见 260 页)采用离心风机+双层振动筛模式, 由离心风机、筛箱、输送螺旋等组成<sup>[20-22]</sup>。 振动筛负责将藜麦籽和短茎秆等混合物分层筛选, 风机负责将脱粒产生的杂余以及藜麦颖壳吹出。

清选装置简图如图 11 所示。 为确保往复振动筛运送藜麦脱粒物料能够充分分离, 筛面尺寸、喂入量之间应满足关系式<sup>[23-24]</sup>:

$$W_1 = q_1(1 - \psi K) / B_1 q_s \quad (17)$$

式中,  $W_1$  为筛板长度 ( $\text{mm}$ );  $q_1$  为收割机喂入量 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 取  $q_1 = 4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\psi$  为秸草占藜麦脱粒物料总重量的比值, 取  $\psi = 0.6$ <sup>[8, 10]</sup>;  $K$  为脱粒清选装置工作特性系数, 取  $K = 0.75$ <sup>[23-24]</sup>;  $B_1$  为筛板的宽度 ( $\text{mm}$ ), 取  $B_1 = 650 \text{ mm}$ ;  $q_s$  为筛面单位面积可承担的

脱粒物料喂入量 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 取  $q_s = 2.8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[23]</sup>。 由此可计算得  $W_1 = 1\ 200 \text{ mm}$ 。

双层往复式振动筛上筛使用鱼鳞筛(图 12a), 鱼鳞筛开度  $0 \sim 45^\circ$  可调节, 目的是在不同作业模式下调整鱼鳞筛开度以提高筛分效率; 根据藜麦直径与筛分条件, 为降低含杂率, 取编制筛(图 12b)间距  $D_1$  为  $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ , 编制筛直径  $j = 2 \text{ mm}$ , 编制筛尺寸为  $650 \text{ mm} \times 530 \text{ mm}$ <sup>[10]</sup>。

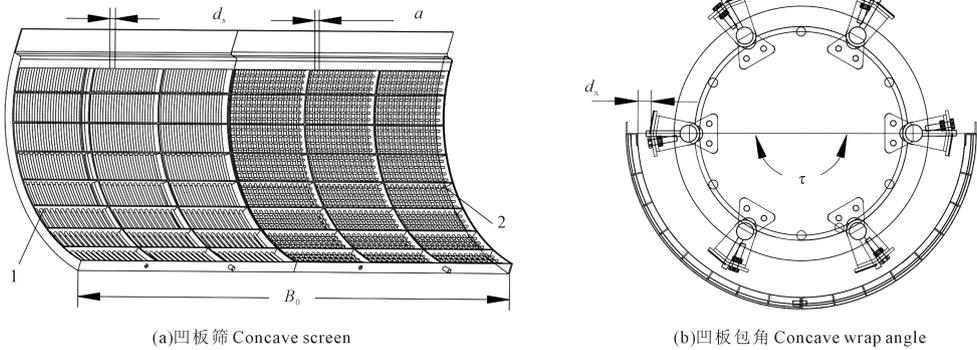
选用通用离心式风机, 风扇直径  $D_0 = 350 \text{ mm}$ 。 风机工作时, 气流从两端吸入, 在叶片作用下, 沿风道方向吹出。 出风口高度决定吹风面积, 影响脱出物分散程度<sup>[23, 25]</sup>, 两者需满足条件:

$$H = K_1 W_1 \sin \theta_0 \quad (18)$$

式中,  $H$  为出风口高度 ( $\text{mm}$ );  $K_1$  为系数, 取  $K_1 = 0.4$ <sup>[23]</sup>;  $\theta_0$  为气流与筛面夹角 ( $^\circ$ ), 取  $\theta_0 = 30^\circ$ <sup>[25]</sup>。 可计算得  $H = 240 \text{ mm}$ 。

### 3.5 行走稳定性分析

在机具转场作业时要经历爬坡、下坡等情况, 为适应丘陵山地小地块作业, 需对丘陵山地藜麦联合收割机爬坡、下坡过程进行车辆稳定性分析。 机具纵向和横向稳定性分析如图 13 所示。

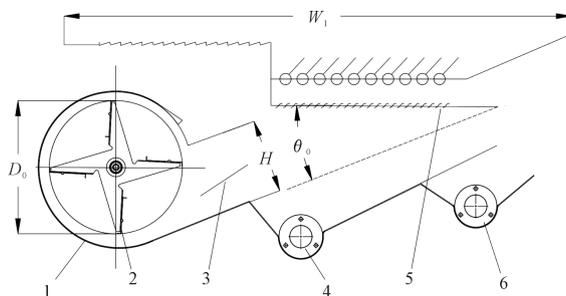


注: 1. 栅格筛; 2. 编制筛。  $d_s$  为栅格间距 ( $\text{mm}$ );  $a$  为编制筛间距 ( $\text{mm}$ );  $\tau$  为凹版包角 ( $^\circ$ );  $d_x$  为凹版间隙 ( $\text{mm}$ )。

Note: 1. Grid sieve; 2. Weaving sieve.  $d_s$  is the grid spacing ( $\text{mm}$ );  $a$  is the spacing of the weaving sieve ( $\text{mm}$ );  $\tau$  is intaglio wrap angle ( $^\circ$ );  $d_x$  is gravure clearance ( $\text{mm}$ ).

图 9 分离凹板结构示意图

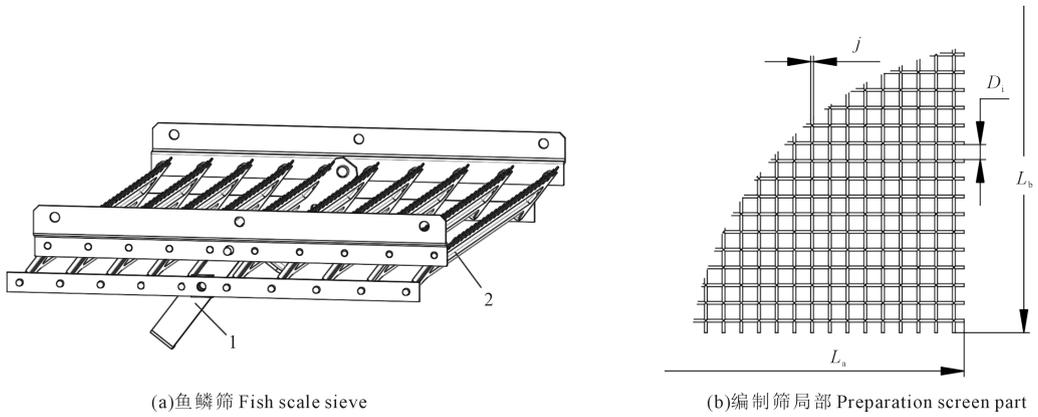
Fig.9 Structural diagram of separating concave plate



1. 风机外壳; 2. 风扇叶片; 3. 调风板; 4. 籽粒搅拢; 5. 筛箱; 6. 杂余搅拢  
1. Fan shell; 2. Fan blade; 3. Air regulating plate; 4. Grain mixing; 5. Screen box; 6. Miscellaneous mixing

图 11 清选系统简图

Fig.11 Schematic diagram of cleaning system



(a)鱼鳞筛 Fish scale sieve

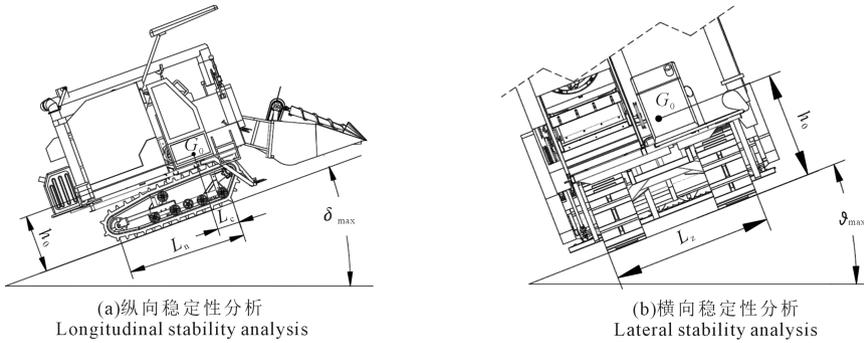
(b)编制筛局部 Preparation screen part

注:1.开度调节装置;2.筛片。 $L_a$ 为下筛长度(mm); $L_b$ 为下筛宽度(mm); $D_1$ 为编制筛间距(mm); $j$ 为筛条直径(mm)。

Note: 1. Opening adjustment device; 2. Sieve piece.  $L_a$  is the length of the lower screen (mm);  $L_b$  is the width of the lower screen (mm);  $D_1$  is the spacing of the screen (mm);  $j$  is the diameter of the screen bar (mm).

图 12 鱼鳞筛与清选编制筛局部图

Fig.12 Partial drawing of fish scale screen and cleaning screen



(a)纵向稳定性分析

Longitudinal stability analysis

(b)横向稳定性分析

Lateral stability analysis

图 13 机具行走稳定性分析

Fig.13 Analysis of walking stability of the implement

机具行驶稳定性主要影响因素为履带触地长度、履带轨距、机具质心离地高度<sup>[26]</sup>,则机具纵向极限倾覆角度为:

$$\delta_{\max} = \arctan\left(\frac{h_0}{L_n - L_c}\right) \quad (19)$$

式中, $L_n$ 为履带触地长度(mm),取 $L_n = 1\ 324$  mm; $h_0$ 为质心 $G_0$ 离地高度(mm),取 $h_0 = 570$  mm; $L_c$ 为机具质心距前触地点距离(mm),取 $L_c = 330$  mm。

横向极限倾覆角度为:

$$\vartheta_{\max} = \arctan\left(\frac{2h_0}{L_z}\right) \quad (20)$$

式中, $L_z$ 为履带轨距(mm),取 $L_z = 1\ 360$  mm。

由式(19)、(20)计算得出机具纵向极限倾覆角度 $\delta_{\max} = 29.8^\circ$ ,横向极限倾覆角度 $\vartheta_{\max} = 40.6^\circ$ 。藜麦种植地坡度远小于机具设计倾覆值,样机可进行丘陵山地藜麦收获作业。

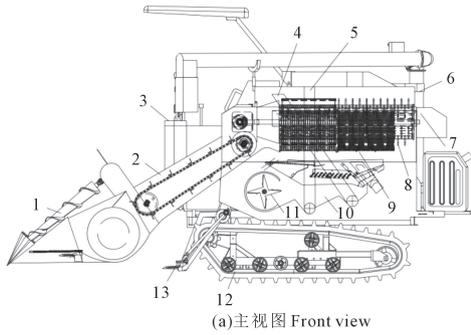
## 4 田间试验

### 4.1 试验条件

藜麦样机收获试验于2021年10月在甘肃省临夏州东乡县达阪镇进行,该地属于典型西北丘陵地貌。试验藜麦品种为‘陇藜5号’,采用旱作覆膜穴播种植方式,平均株高1 620 mm,平均结穗高度355 mm,无倒伏情况,试验地藜麦籽粒含水率14%,茎秆含水率26%,试验地面积2.67 hm<sup>2</sup>。样机作业速度为0.75~1.50 m·s<sup>-1</sup>,各装置调整至设计值后进行田间试验,田间试验现场如图14所示。

### 4.2 试验方法

丘陵山地藜麦联合收获作业性能试验按照GB/T 8097.2008《收获机械联合收割机试验方法》分别测定脱净率、含杂率、割台损失、夹带损失、清选损失、总损失率6项工作性能指标<sup>[10,18]</sup>。



- (a)主视图 Front view
- (b)实物图 Real products
- 1.割台;2. 过桥;3. 操作台;4. 杂余输送机;5. 籽粒输送机;6. 卸粮桶;7. 粮箱;8. 脱粒滚筒;  
9. 组合凹板筛;10. 振动筛;11. 风机;12. 行走底盘;13. 下割刀
1. Header; 2. Bridge; 3. Console; 4. Miscellaneous conveyor; 5. Grain conveyor; 6. Unloading bucket; 7. Grain box; 8. Threshing drum; 9. Combined concave screen; 10. Vibrating screen; 11. Fan; 12. Walking chassis; 13. Lower cutter

图 1 丘陵山地藜麦联合收割机

Fig.1 Hilly quinoa combine harvester

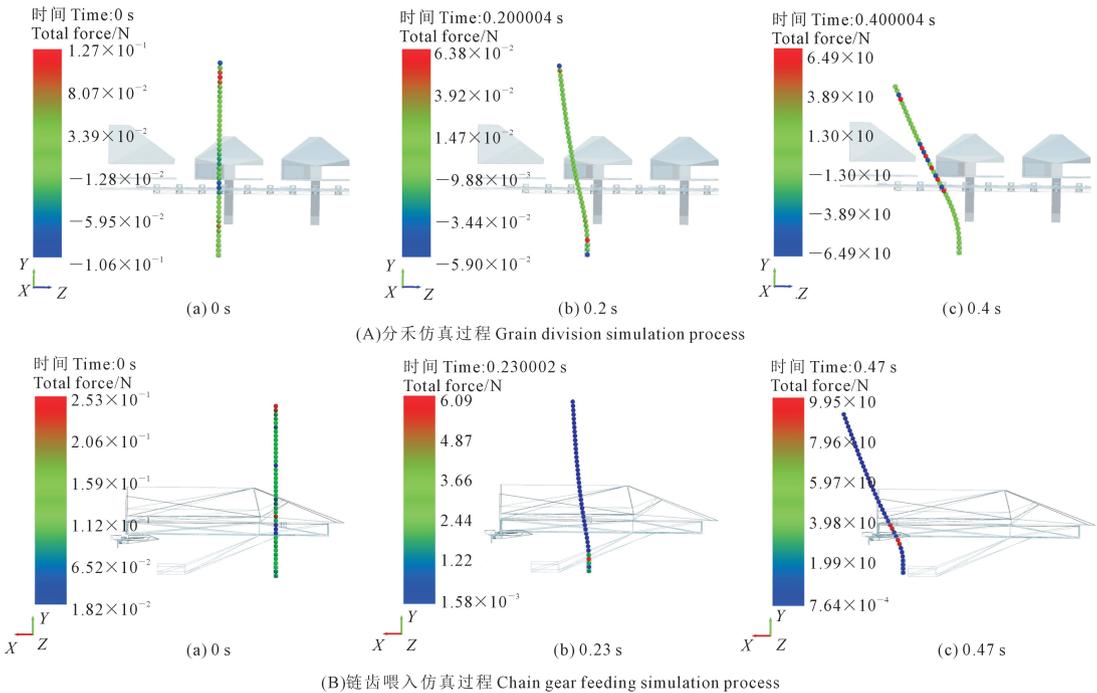
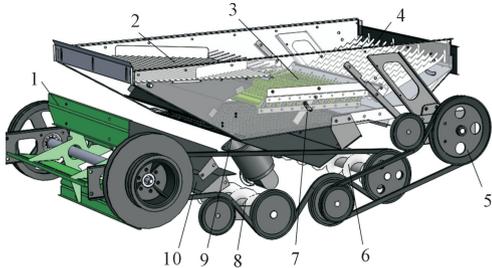


图 6 藜麦分禾、链齿喂入受力云图

Fig.6 Stress nephogram of quinoa grain division and chain tooth feeding



- 1.风机;2. 抖动版;3. 鱼鳞筛;4. 尾筛;5. 偏心轮;6. 二级杂余输送螺旋;  
7. 鱼鳞筛开度调节装置;8. 一级籽粒输送螺旋;9. 下筛;10. 调风板
1. Fan; 2. Shaking plate; 3. Fish scale screen; 4. Tail screen;  
5. Eccentric wheel; 6. Secondary residue conveying screw;  
7. Fish scale screen opening adjustment device;  
8. Primary grain conveying screw; 9. Lower screen; 10. Air regulating plate

图 10 清选装置总成

Fig.10 Cleaning device assembly



图 14 样机田间试验

Fig.14 Field test of prototype

按照作业规范以满幅收割工况在试验区域前进 100 m,期间随机取 5 个试验指标取样点,以 1 m<sup>2</sup> 取样器对地表未脱净穗头、割台落穗、清选损失籽粒及粮仓脱粒籽粒进行取样并装袋标记,作业完成后使用电子秤进行作业指标测定,测量结果取平均值。

#### 4.3 试验结果

根据国内藜麦收获技术要求、结合藜麦种植农艺,要求藜麦联合收割机脱净率 $\geq 95\%$ ,含杂率、总

损失率均 $<5\%$ ,割台损失率、夹带损失率、清选损失率均 $<3\%$ 。按照作业规范进行田间试验与收获指标测定,结果见表 3。作业过程中整机与各装置运行稳定,割台喂入与脱粒作业流畅,收获过程割台损失较小,粮仓籽粒含杂率低,总损失率较小,作业效果与收获效率与传统履带式稻麦联合收割机相比有较大提升,满足丘陵山地藜麦联合收获作业的要求。

表 3 整机试验结果

Table 3 Complete machine test results

试验指标 Test index	脱净率 Threshing rate/%	含杂率 Impurity rate/%	破损率 Damage rate/%	割台损失率 Header loss rate/%	夹带损失率 Entrainment loss rate/%	清选损失率 Cleaning loss rate/%	总损失率 Total loss rate/%
标准值 Standard value	$\geq 95$	$\leq 5$	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$
试验结果 Test result	96.83	4.3	0.15	1.54	0.92	0.52	2.98

## 5 结论

1) 针对国内藜麦种植现状和农艺特性,设计了丘陵山地藜麦联合收割机,对割台、脱粒滚筒、组合式分离凹板、双层往复振动清选装置、样机行走稳定性等关键部件的参数进行设计与计算,并对割台分禾、链齿喂入过程进行离散元仿真分析,仿真结果表明,藜麦分禾、链齿喂入过程接触载荷较小,未造成藜麦折损,分禾、链齿喂入与实际作业相符,实现藜麦茎秆顺畅喂入、切割、脱粒与分离、清选,可进行丘陵山地藜麦收获作业,并进行田间试验。

2) 藜麦籽粒含水率 14%,茎秆含水率 26%时,样机收获脱净率为 96.83%、含杂率 4.30%、破损率 0.15%、割台损失率 1.54%、夹带损失率 0.92%、清选损失率 0.52%、总损失率 2.98%。收获过程中割台喂入顺畅,机具工作平稳,脱粒装置无堵塞,田间性能试验与相关指标均达到藜麦联合收获作业质量要求。

3) 藜麦植株高度、成熟度等对藜麦收获损失有较大影响,藜麦脱粒物清选较困难。清选系统还需进一步进行结构和作业参数优化,并结合不同地区的藜麦生物特性进行深入研究。本研究可为丘陵山地藜麦联合收割机的设计试验提供一定参考。

#### 参考文献:

[1] REPO-CARRASCO R, ESPINOZA C, JACOBSEN S E. Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*)[J]. Food Reviews International, 2003, 19(1/2): 179-189.

[2] 任贵兴, 杨修仕, 么杨. 中国藜麦产业现状[J]. 作物杂志, 2015, (5): 1-5.

REN G X, YANG X S, ME Y. Current situation of quinoa industry in

China[J]. Crops, 2015, (5): 1-5.

[3] 黄杰, 杨发荣, 李敏权, 等. 13 个藜麦材料在甘肃临夏旱作区适应性的初步评价[J]. 草业学报, 2016, 25(3): 191-201.

HUANG J, YANG F R, LI M Q, et al. Preliminary evaluation of adaptability of 13 quinoa varieties in the Linxia arid region of Gansu Province, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25 (3): 191-201.

[4] 杨发荣, 黄杰, 魏玉明, 等. 藜麦生物学特性及应用[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 607-613.

YANG F R, HUANG J, WEI Y M, et al. A review of biological characteristics, applications, and culture of *Chenopodium quinoa* [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(3): 607-613.

[5] STIKIC R, GLAMOCLJIA D, DEMIN M, et al. Agronomical and nutritional evaluation of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) as an ingredient in bread formulations[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(2): 132-138.

[6] 陈庆文, 韩增德, 崔俊伟, 等. 自走式谷物联合收割机发展现状及趋势分析[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(1): 109-114.

CHEN Q W, HAN Z D, CUI J W, et al. Development status and trend current situation of self-propelled combine harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(1): 109-114.

[7] 海梅, 杜文亮, 吴英思, 等. 藜麦脱出物空气动力学特性测试与分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 192-195, 215.

HAI M, DU W L, WU Y S, et al. Test and analysis of aerodynamics on the quinoa threshed mixture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 192-195, 215.

[8] 海梅. 藜麦联合收获机脱出物清选试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.

HAI M. Experimental study on clearance of quinoa combine harvester [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.

[9] 赵子龙, 郭占斌, 杜文亮, 等. 浸水藜谷的机械特性研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 162-165, 170.

ZHAO Z L, GUO Z B, DU W L, et al. The study of the mechanical properties of quinoa[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 162-165, 170.

[10] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 自走式藜麦联合收割机设计与试验

- [J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-13. (2022-02-07) [2022-04-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=JLGY20220200A&DbName=DKFX2022>. DOI:10.13229/j.cnki.jdx-bgxb20211199.
- SHI R J, DAI F, ZHAO W Y, et al. Design and test of self-propelled quinoa combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition): 1-13. (2022-02-07) [2022-04-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=JLGY20220200A&DbName=DKFX2022>. DOI:10.13229/j.cnki.jdx-bgxb20211199.
- [11] 耿端阳, 李玉环, 何珂, 等. 立辊玉米收获机割台间隙夹持输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 130-136.
- GENG D Y, LI Y H, HE K, et al. Design and experiment on gripping delivery mechanism for vertical-rollers type of corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 130-136.
- [12] 辛尚龙, 赵武云, 戴飞, 等. 旱区全膜双垄沟播覆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 S L, ZHAO W Y, DAI F, et al. Design of crawler type corn combine harvester for whole plastic film mulching on double ridges in arid regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 1-11.
- [13] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- China Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Agricultural machinery design manual: part II[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007.
- [14] 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 Z F, LIU S P, ZHOU F J, 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.
- [15] 刘禹辰, 张锋伟, 宋学锋, 等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(1): 45-54.
- LIU Y C, ZHANG F W, SONG X F, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(1): 45-54.
- [16] 张开兴, 陈鹤, 王一琨, 等. 玉米割台摘穗装置的设计与仿真[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1042-1048.
- ZHANG K X, CHEN H, WANG Y K, et al. Design and simulation of corn header ear picking device[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(6): 1042-1048.
- [17] 戴飞, 高爱民, 孙伟, 等. 纵轴流锥型滚筒脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 74-78.
- DAI F, GAO A M, SUN W, et al. Design and experiment on longitudinal axial conical cylinder threshing unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 74-78.
- [18] 史瑞杰, 戴飞, 刘小龙, 等. 履带式丘陵山地胡麻联合收割机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 59-67.
- SHI R J, DAI F, LIU X L, et al. Design and experiments of crawler-type hilly and mountainous flax combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 59-67.
- [19] 郝建军, 魏文波, 秦家辉, 等. 切流式油菜脱粒筛分机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 139-148.
- HAO J J, WEI W B, QIN J H, et al. Design and test of cut-flow type oil sunflower threshing and screening machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 139-148.
- [20] 沈宇峰, 吴明亮, 吴梓高, 等. 纵轴流式水稻联合收割机清选系统结构设计[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(增刊1): 94-96.
- SHEN Y F, WU M L, WU Z G, et al. Structural design of longitudinal axial rice combine harvester[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2013, 39(S1): 94-96.
- [21] 王学农, 边博, 吐鲁洪·吐尔迪, 等. 巴旦木物料壳仁风选装置试验及参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 299-306.
- WANG X N, BIAN B, TURDI T L H, et al. Experiments and parameter optimization of almond shell and kernel air separation device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 299-306.
- [22] 于昭洋, 胡志超, 曹明珠, 等. 切流式花生全喂入联合收割机清选机构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 29-37.
- YU Z Y, HU Z C, CAO M Z, et al. Design of cleaning device of tangential flow and whole-feed peanut combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 29-37.
- [23] 戴飞, 赵武云, 史瑞杰, 等. 自走式胡麻联合收割机设计与试验[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 678-686.
- DAI F, ZHAO W Y, SHI R J, et al. Design and experiment on self-propelled flax combine harvester[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(3): 678-686.
- [24] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117-125, 247.
- DAI F, FU Q F, ZHAO W Y, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117-125, 247.
- [25] 张敏, 金诚谦, 梁苏宁, 等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 8-15.
- ZHANG M, JIN C Q, LIANG S N, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 8-15.
- [26] 杨天, 赵武云, 辛尚龙, 等. 铰接转向果园割草机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 61-72.
- YANG T, ZHAO W Y, XIN S L, et al. Design and test of articulated steering orchard mower[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 61-72.