

# 新型横辊式玉米摘穗装置设计与试验

耿端阳, 明家锐, 王伯龙, 王其欢, 张策, 何庆浩

(山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 针对我国丘陵山地玉米种植区地块小、回转难、坡地多等制约着我国玉米收获机械化的一系列问题, 设计了一款横辊摘穗割台, 实现了在丘陵山地复杂地形的玉米机械化收获。该割台采用横辊摘穗技术, 整机长度较常规玉米收获割台缩短0.7 m, 有效减小了整机的回转半径, 提高了收获机对复杂地形的适应性; 采用Box-Behnken试验方法, 研究了横辊摘穗辊配置角度、机具前进速度、摘穗辊转速对摘穗过程中果穗损失率的影响规律, 建立了试验因素与考察指标之间的回归方程, 并生成了相应的响应曲面; 结果表明: 横辊摘穗割台的摘穗辊配置角度、机具前进速度、摘穗辊转速对收获过程的果穗损失率有显著的影响; 最终确定了最佳组合为摘穗辊配置角度 $26^{\circ}$ , 机具前进速度2 km/h, 摘穗辊转速1 050 r/min, 在该条件下进行了试验验证, 平均果穗损失率为1.227%, 低于国家玉米收获机械技术标准要求。

**关键词:** 玉米; 横辊割台; 玉米收获机; 果穗损失率

**中图分类号:** S225.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)10-3085-10

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221590

## Design and experiment of a new type of cross roll corn ear picking device

GENG Duan-yang, MING Jia-rui, WANG Bo-long, WANG Qi-huan, ZHANG Ce, HE Qing-hao  
(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** Aiming at a series of problems restricting the mechanization of maize harvesting in hilly and mountainous areas, such as small plot, difficult turning and many sloping land, a cross-roll ear picking and cutting platform was designed to solve the mechanization of maize harvesting in hilly and mountainous areas. The length of the whole machine is 0.7 m shorter than that of the conventional corn harvesting and cutting table, which effectively reduces the turning radius of the whole machine and improves the adaptability of the harvester to complex terrain. The Box-Behnken test method was used to study the influence of the angle of transverse roll picking, the forward speed of the machine and the rotation speed of the roll on the ear loss rate in the process of ear picking. The regression equation between the test factors and the index was established, and the corresponding response surface was generated. The results showed that the configuration angle of ear picking roll, the forward speed of the machine and the rotation speed of ear picking roll had significant effects on the ear loss rate in the harvest process. Finally, the optimal

**收稿日期:** 2022-12-17.

**基金项目:** “十四五”重点研发计划项目(2021YFD20005022); 山东省自然科学基金项目(ZR202111290044); 山东省现代农业产业技术体系创新团队项目(SDAIT-02-02).

**作者简介:** 耿端阳(1969-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 新型农业机械装备开发. E-mail: dygxt@sdut.edu.cn

combination was determined as the configuration angle of ear picking roller  $26^\circ$ , the forward speed of the machine was 2 km/h, and the rotation speed of ear picking roller was 1 050 r/min. Under these conditions, the average ear loss rate was 1.227%, which was lower than the requirements of the national technical standard of corn harvester.

**Key words:** corn; cross roll stripping header; corn harvester; corn loss rate

## 0 引言

玉米是我国种植面积最大的粮食作物,具有粮食、饲料、工业原料等用途,在我国农业生产中占据着重要地位<sup>[1-5]</sup>。在我国实现了小麦机械化收获之后,玉米机械化收获技术进入了快速发展阶段,到2021年,我国玉米收获机械化水平超过了80%,但丘陵山地的玉米机械化收获水平却很低,甚至只有20%左右,严重制约了我国玉米收获机械化水平的进一步提高<sup>[6-10]</sup>。

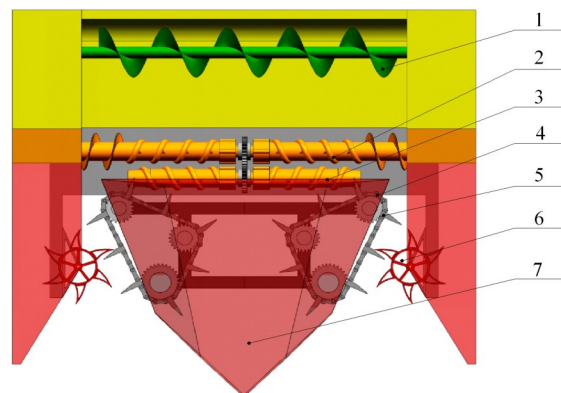
针对该问题,国内许多企业和学者加强了对丘陵山地玉米收获机械化技术的研究<sup>[11,12]</sup>,如开发了2行、单行纵卧辊式或板式割台的玉米收获机,虽然可以完成玉米的机械化收获,但是由于整机长度过长导致回转半径太大,很难满足丘陵山地小地块、复杂环境的作业要求;为了缩小整机纵向尺寸,吉林大学闫洪余团队、山东理工大学郭晓晓团队<sup>[13,14]</sup>开发了立辊式玉米收获割台,显著缩短了整机长度;吉林大学张道林团队研究了拨穗轮式玉米摘穗技术、山东理工大学王优团队<sup>[15,16]</sup>研究了上掰穗式玉米摘穗技术,均采用自上而下的果穗与茎秆的分离方法,不仅缩短了割台长度,而且降低了功率消耗;张亮亮团队<sup>[17]</sup>在保持立辊式摘穗割台纵向尺寸较短优势的基础上,研发了激振摘穗式玉米割台,显著提高了作业效率。

综上,虽然都是在纵卧辊式和板式摘穗的基础上实现了玉米收获机纵向尺寸的减小,但是由于受到结构制约,其纵向尺寸控制非常有限,难以满足狭小地形、频繁调头的丘陵山地作业的玉米收获要求,所以迫切需要研发适合丘陵山地玉米机械化收获的技术与装备,以落实国家“十四五”农机装备补短板中关于发展丘陵山区轻简型谷物联合收获机的发展规划<sup>[18,19]</sup>。

## 1 横辊摘穗玉米割台结构与工作原理

考虑常规摘穗方式导致整机纵向尺寸较大影

响丘陵山地玉米收获的适应性问题,结合玉米摘穗原理,利用摘穗辊对茎秆的牵拉力大于果穗与果柄的连接力实现果穗与茎秆的分离,本团队开发了如图1所示的横辊摘穗玉米割台,主要由拨禾链、行星轮、横辊摘穗器以及果穗横向输送装置等组成。



1-果穗横向输送装置; 2-长摘穗辊/后低辊; 3-短摘穗辊/前高辊;  
4-拨禾链; 5-拨禾指; 6-行星轮; 7-分禾器

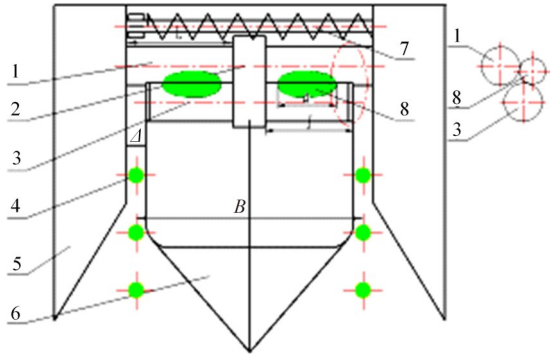
图1 横辊摘穗割台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross roll stripping header

工作时,首先由边分禾器将待收玉米植株与其他植株分开,并在行星轮的辅助作用下,将待收植株引向拨禾链,由拨禾链将植株输送到由长、短摘穗辊组成的横辊摘穗器入口处;由于长摘穗辊(后低辊)表面设有螺旋叶片,可以将植株强制输送到长、短摘穗辊(前高辊)组成的摘穗间隙,并在长、短摘穗辊作用下,完成果穗与茎秆的分离,收获的果穗落在前高后低摘穗辊组的结合位置;最后,在后续茎秆的拨送和果穗重力作用下,自动滑落到位于长摘穗辊后方的果穗横向输送装置,由其送往机器的一侧。

## 2 横辊摘穗割台主要参数的确定

横辊摘穗割台是提高收获机对坡地作业适应性的关键,为了便于说明摘穗装置的主要结构参数,将图1结构转化为简化的平面结构,如图2所示。



1-后低辊; 2-驱动系统; 3-前高辊; 4-玉米植株;  
5-边分禾器; 6-中分禾器; 7-横向输送装置; 8-果穗

图 2 横辊摘穗玉米割台

Fig. 2 Cross-roller style of corn header

### 2.1 前、后摘穗辊的配置

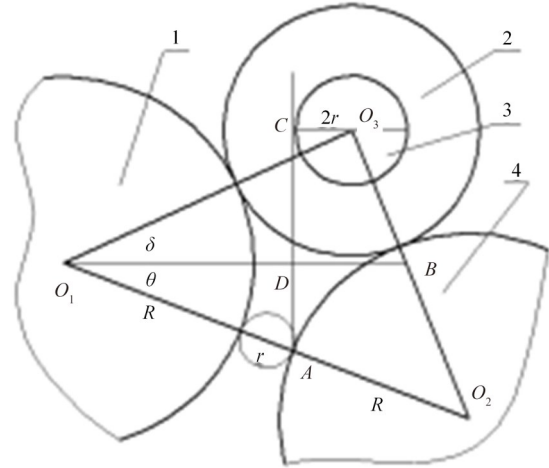
玉米摘穗过程主要是靠摘穗辊上螺旋凸棱向后输送植株以及摘穗辊拽断果柄或摘穗钩挤断果柄实现果穗与茎秆的分离,如果摘下的果穗不能及时脱离摘穗辊,必然被螺旋凸棱、摘穗钩啃伤。

因此,摘穗辊一般采用高低配置方式,以便摘下的果穗在重力作用下主动滑落摘穗辊,减少果穗的啃伤和落粒损失。本研究结合横辊摘穗结构,选用了前高后低的摘穗辊分布结构,保证了摘下果穗稳定、顺利滑落到位于摘穗辊后的果穗横向输送装置,如图 2 所示。

为了提高玉米植株喂入摘穗辊组间隙的顺畅性,当两摘穗辊处于同一水平位置时,可以保证水平喂入间隙最大,有利于直立状态玉米植株进入摘穗辊组间隙,但由此增加了果穗滑落摘穗辊组的难度,最终导致果穗啃伤风险加剧;相反,若两辊中心线与水平面夹角过大,虽然有利于摘下果穗的滑落,但是由于其水平喂入间隙会显著变小,所以增加了直立状态植株喂入的难度,严重时会导致玉米植株在此堵塞。为了解决该问题,对摘穗辊布局结构进行分析,如图 3 所示。

假设摘穗辊直径为  $2R$ ,果穗的最小直径(考虑最难滑落情况)为  $d_{\min}$ ,果柄直径近似等于茎秆直径,均为  $2r$ ,摘穗辊组间隙为茎秆直径的一半,即  $r$ ,两摘穗辊中心  $O_1O_2$  连线与水平面夹角为  $\theta$ ,上辊与果穗中心连线  $O_1O_3$  与水平面  $O_1B$  夹角为  $\delta$ ,则两辊中心连线  $O_1O_2$  与上辊与果穗中心  $O_1O_3$  连线夹角为  $\theta + \delta$ 。在  $\Delta O_1O_2O_3$  中,由余弦定律有:

$$\left(R + \frac{d_{\min}}{2}\right) = (2R + r)^2 + \left(R + \frac{d_{\min}}{2}\right)^2 - 2(2R + r) \left(R + \frac{d_{\min}}{2}\right) \cos(\delta + \theta) \quad (1)$$



1-前高辊; 2-果穗; 3-果柄; 4-后低辊

图 3 摘穗布局结构示意图

Fig. 3 Layout and structure diagram of roller picking

化简后有:

$$\theta + \delta = \cos\left(\frac{2R + r}{2(d_{\min} + 2R)}\right) \quad (2)$$

为了减少果穗在摘穗过程的啃伤损伤,采用后续茎秆位于果穗果柄的高位端一侧(图 3 中的 C 点左侧),这样便于茎秆对果穗的自动清理,即在玉米植株夹持后,过后低辊与夹持茎秆接触点 A 作铅垂线 AC,该直线即玉米植株下部进入摘穗辊组间隙的上部茎秆位置。显然,当该位置位于果柄左侧时,随着茎秆被摘穗辊表面螺旋凸棱的夹持与输送,有助于将摘下果穗有效推离摘穗辊组,避免了果穗被摘穗辊的啃伤和籽粒脱落。即:

$$DO_1 \leq O_1O_3 \cos \delta - r \quad (3)$$

又:

$$DO_1 = (R + r) \cos \theta, O_1O_2 = R + d_{\min}/2 \quad (4)$$

则有:

$$(R + r) \cos \theta \leq \left(R + \frac{d_{\min}}{2}\right) \cos \delta - r \quad (5)$$

联立方程(2)(5),将摘穗辊直径、果柄以及果穗直径代入上式,即可确定前上辊和后下辊的相对位置,即  $20.84^\circ \leq \theta \leq 39.57^\circ$ 。

### 2.2 前高辊长度的确定

对于横辊摘穗而言,前高辊长度对果穗损失和植株喂入稳定性有显著影响。即前高辊越长,可以提高摘下果穗落在摘穗辊组、进而滑落到果穗横向输送装置的可靠性,但是该辊过长,会减小玉米植株纵向喂入的通道,增加植株的喂入难度,严重时会导致喂入通道堵塞;前高辊越短,虽然有利于增大玉米植株纵向喂入的通道,提高植株喂

人的顺畅性,但是摘下的果穗可能会由于受力不平衡滑落割台,并由此导致果穗收获损失的增加。

考虑理想摘穗过程,果穗在前高辊中部完成与茎秆的分离,设其长度为  $l$ ,考虑摘穗辊是通过机械加工的方法完成,所以其标准差为  $\sigma_l \approx 0$ ;而玉米果穗的长度为  $a$ ,标准差为  $\sigma_a$ ,且符合正态分布的特点,采用机械可靠性理论设计方法,可靠性指标  $Z_R$  满足:

$$Z_R = \frac{l - a}{\sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_a^2}} = \frac{l - a}{\sigma_a} \quad (6)$$

根据生产要求和玉米收获机试验方法(GBT 21961—2008),确定其工作可靠度  $R$ ,并借助可靠性计算方法,有:

$$R = \int \Phi(Z_R) dZ_R \quad (7)$$

依据生产实际要求,确定果穗落入中部的概率  $R$ ,并以其值为依据,通过查阅正态分布表,将结果代入方程(6),即可确定前上辊的长度为  $l = 20.30 \sim 25.22$  cm。

### 2.3 后低辊长度的确定

对于横辊摘穗而言,后低辊长度的作用是引导来自输送通道的玉米植株横向运动到摘穗辊组间隙,并配合前高辊完成玉米果穗与植株的分离,因此,其长度在理论上等于前高辊长度  $l$  与输送通道宽度  $\Delta$  之和,即后低辊长度为  $L$  为:

$$L = l + \Delta \quad (8)$$

输送通道是玉米植株稳定输送到后摘穗辊输入端的通道。当输送通道过宽时,虽然有利于玉米植株的通过,但是很难保证植株输送姿态的一致性;相反,如果输送通道过窄,虽然可以保证玉米植株输送姿态的一致性,但是狭窄通道很容易影响植株输送的稳定性,严重时会导致通道的堵塞,因此,该通道应该在种植行偏差  $\Delta_1$  的基础上,在两边各增加一个间隙偏差  $\Delta_2$ ,即:

$$\Delta = \Delta_1 + 2\Delta_2 \quad (9)$$

将式(8)代入式(9),则后下辊长度为:

$$L = l + \Delta_1 + 2\Delta_2 \quad (10)$$

依据我国农业行业标准《玉米播种机作业质量标准》(NY/T 1628—2008)中规定的玉米播种行偏差  $\Delta_1$  为 60 mm;间隙偏差根据我国农机制造和机手操作水平,取  $\Delta_2 = 30 \sim 50$  mm。代入相关数据计算,后下辊长度为 323~372 mm。

### 2.4 摘穗辊转速的确定

摘穗辊转速对玉米收获效率有着很大的影

响,如果速度过快,容易导致籽粒损伤和果穗损失。依据玉米收获原理是摘穗辊对茎秆进行下拉,由于果穗大端直径大于摘穗辊间隙,所以当摘穗辊遇到果穗时,摘穗辊对果穗施加的作用力大于果穗与果柄之间的连接力,即可实现果穗与茎秆的分离,故假设玉米最大结穗高度距离摘穗辊的距离为  $h_{\max}$ (考虑极限情况),摘穗辊线速度为  $v$ ,则结穗高度茎秆段通过摘穗辊所用的时间  $t_1$  为:

$$t_1 = \frac{h_{\max}}{v} \quad (11)$$

进一步,由于坡地玉米收获机结构紧凑,如本研究为 2 行收获机,且地形较为复杂,所以假设玉米收获机作业速度为  $v_m$ ,玉米种植株距为  $d$ ,前进一个株距所用的时间为  $t_2$ ,则:

$$t_2 = \frac{d}{v_m} \quad (12)$$

依据发动机功率大小,假设摘穗辊可以同时完成  $n$  株玉米的夹持下拽,则:

$$t_1 = nt_2 \quad (13)$$

有:

$$\frac{h_{\max}}{v} = \frac{nd}{v_m} \quad (14)$$

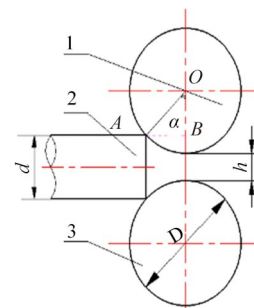
有:

$$v = \frac{h_{\max}}{nd} v_m \quad (15)$$

代入相关数据,计算出摘穗辊线速度为 3.5~5.2 m/s,即摘穗辊转速为 891~1 242 r/min。

### 2.5 摘穗辊直径的确定

尽管本机型为横辊摘穗,但是其摘穗条件与传统摘穗条件一致,即抓住茎秆、不抓住果穗。假设摘穗辊直径为  $D$ ,摘穗辊间隙为  $h$ ,摘穗辊对茎秆的抓取角为  $\alpha$ ,茎秆直径为  $d$ ,摘穗辊对茎秆的抓取过程如图 4 所示。则:



1-前高辊; 2-茎秆; 3-后低辊

图 4 摘穗辊对茎秆的抓取过程

Fig. 4 Grasping process of stalk by picking roller

$$\cos \alpha = \frac{OB}{OA} = \frac{\frac{D}{2} - \frac{d-h}{2}}{\frac{D}{2}} = 1 - \frac{d-h}{D} \quad (16)$$

解之得:

$$D = \frac{d-h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}} \quad (17)$$

结合摘穗辊抓取茎秆、不抓住果穗的条件,则有:

$$\frac{d_j - h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_j^2}}} \leq D \leq \frac{d_g - h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_g^2}}} \quad (18)$$

式中: $\mu_j$ 为摘穗辊对茎秆的抓取系数; $\mu_g$ 为摘穗辊对果穗的起始抓取系数; $d_j$ 为茎秆直径,mm; $d_g$ 为果穗大端直径,mm。

代入相关数据,可得:

$$(d_g - h) \geq D \geq (3 \sim 3.35)(d_j - h) \quad (19)$$

计算得:100 mm  $\geq D \geq$  72 mm。

### 2.6 后低辊结构参数的确定

根据前述横辊摘穗原理可知,玉米植株通过输送通道先运动到后低辊端部,然后在后低辊端部叶片作用下,强制转向输送到摘穗辊组间隙。后低辊结构如图5所示,分为导入段、摘穗段和强拉段,其中导入段为螺旋叶片结构,摘穗段为与导入段螺距相等的螺旋凸棱结构,强拉段为焊有平行于摘穗辊轴线直圆钢的圆柱结构。

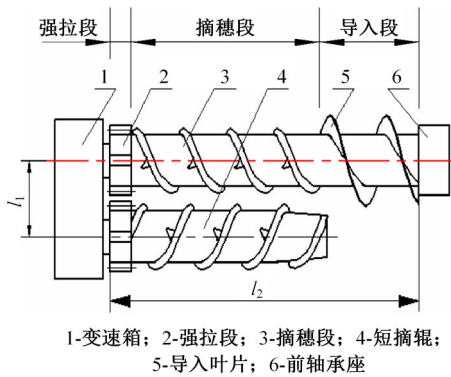


图5 横辊摘穗结构

Fig. 5 Structure of cross roll stripping

对于导入段的螺旋叶片,为了防止茎秆在导入过程出现滑落问题,叶片高度大于茎秆直径的1/2,即:

$$h_y \geq \frac{1}{2} d_j \quad (20)$$

式中: $h_y$ 为叶片高度,mm; $d_j$ 为茎秆直径,mm。

为了保证植株不在该位置发生堵塞,要求后低辊对茎秆的导入速度快于拨禾链对玉米植株的输送速度。

由前述分析可知,摘穗辊线速度为 $v$ ,其直径为 $D$ ,则其转速:

$$v = \frac{\pi D n}{60} \quad (21)$$

即:

$$n = \frac{60v}{\pi D} \quad (22)$$

从而有每转所用时间 $t_1$ 为:

$$t_1 = \frac{1}{n} = \frac{\pi D}{60v} \quad (23)$$

设螺旋叶片的螺距为 $s$ ,即摘穗辊每转动一周可以推动茎秆前进的距离为 $s$ ,则被摘穗辊夹持后玉米植株的轴向输送速度 $v_s$ 为:

$$v_s = \frac{s}{t_1} = \frac{60vs}{\pi D} \quad (24)$$

显然,要避免玉米植株在摘穗辊喂入口的堵塞,则必须保证玉米茎秆的轴向输送速度快于玉米植株在输送通道的运动速度(理想情况下等于机器前进的速度),即:

$$v_s = \frac{60vs}{\pi D} \geq v_m \quad (25)$$

从而有螺距 $s$ 为:

$$s \geq \frac{\pi D v_m}{60v} \quad (26)$$

代入相关数据,计算得到低辊螺旋叶片的螺距为140~160 mm。

其他参数由于都是成熟设计方法计算得出,这里不再赘述。

## 3 试 验

### 3.1 试验条件

试验在山东省济宁市兖州区大安镇山东国丰机械有限公司试验田进行,试验田为山东玉米的较高产地带,示范基地玉米种植行距为600 mm,该试验地长度为60 m、宽度为18 m,适合机械化收获试验验证。

玉米收获机如图6所示。其主要技术参数表1所示。

试验玉米品种为郑单958品种,收获期玉米植株的物理特性如表2所示。



图 6 横辊式玉米收获机

Fig. 6 Cross roll corn harvester

表 1 横辊摘穗玉米收获机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of cross roll corn harvester

项目	参数
外形(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 300×1 300×2 600
作业行数/行	2
喂入量/(kg·s <sup>-1</sup> )	4
工作幅宽/mm	1 130
最小离地间隙/mm	300
适应最低摘穗高度/mm	350
理论作业速度/(km·h <sup>-1</sup> )	1.9~2.8
生产率/(km <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.3~0.4
摘穗辊形式	横卧辊式
摘辊直径/mm	82
摘穗辊转速/(r·min <sup>-1</sup> )	800~1 000
配套动力/kW	48
驱动形式	履带式

表 2 玉米植株参数

Table 2 Parameters of corn plant

参数	数值
植株高度/mm	2 558
植株直径/mm	21
果穗大端直径/mm	50
果穗长度/mm	181
最低结穗高度/mm	350
籽粒含水率/%	28.4
茎秆含水率/%	84
果柄含水率/%	58.4
植株倒伏率/%	≤5
果穗下垂率/%	5
行距/cm	55

### 3.2 试验方法

根据《玉米收获机械——试验方法》(GBT 21961—2008)、《玉米收获机械——技术条件》(GBT 21962—2008)以及《玉米收获机质量评价

技术规范》(NY/T 645—2002)对横辊摘穗式玉米收获机进行试验测试,检测果穗损失率所使用的主要检测设备包括 0~30 m 卷尺、TL-4 型智能水分测试仪、J9-2 型电子秒表、HCS-50 型电子吊秤、JJ3000 型电子天平和 TEST0410-2 型数字式风速仪。

为验证横辊式割台的摘穗效果,确定各工作参数对摘穗效果的影响规律,采用 Box-Behnken 响应曲面试验方法对其进行正交试验,结合前文理论分析结果,选取影响摘穗效果的前后辊配置角度、机具前进速度、摘穗辊转速为试验因素,以果穗损失率为试验指标,开展三因素三水平的 Box-Behnken 响应曲面试验,各因素编码如表 3 所示,每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果,试验中选择评价玉米收获质量的果穗损失率作为考核指标。

表 3 试验因素编码

Table 3 Factors and coding of experiment

编码	因素		
	前后辊配置角度 X <sub>1</sub> /(°)	机具前进速度 X <sub>2</sub> /(km·h <sup>-1</sup> )	摘穗辊转速 X <sub>3</sub> /(r·min <sup>-1</sup> )
-1	21	2.0	890
0	30	2.4	1 045
1	39	2.8	1 200

果穗损失率为玉米收获过程从割台掉落的果穗数与总收获果穗的比值,即:

$$Y = \frac{W_1}{W_D} \times 100\% \quad (27)$$

式中:Y 为果穗损失率,%;W<sub>1</sub>为测定区断、碎和落地果穗的质量,kg;W<sub>D</sub>为测定区内果穗质量,kg。

### 3.3 试验结果分析

#### 3.3.1 方差分析

根据 Design-Expert 软件中的响应曲面法进行试验方案设计与数据分析<sup>[20-24]</sup>,以果穗损失率为试验考核指标。试验总次数共计 17 次,其中 12 组为析因点,5 组为零点,零点试验重复多次,以减小试验误差。试验方案和结果见表 4(X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub> 分别为前后辊配置角度、机具前进速度、摘穗辊转速的编码值)。

试验数据由 Design-Expert 软件处理后,得出果穗损失率的方差分析结果,如表 5 所示。

对表 5 中的数据进行二次多元回归拟合,去除不显著影响因素,得出考核指标与各因素编码值间的二次多元回归方程为:

表 4 试验方案与结果

Table 4 Test design scheme and results

序号	前后辊配置 角度 $X_1$	机具前进 速度 $X_2$	摘穗辊 转速 $X_3$	果穗损失率 $Y/\%$
1	-1	0	1	1.56
2	0	1	1	1.58
3	0	0	0	1.28
4	1	1	0	1.79
5	0	0	0	1.29
6	0	0	0	1.24
7	0	-1	1	1.22
8	0	1	-1	1.65
9	-1	0	-1	2.01
10	1	0	1	1.54
11	0	0	0	1.35
12	-1	-1	0	1.52
13	0	0	0	1.32
14	-1	1	0	1.75
15	1	-1	0	1.44
16	1	0	-1	2.04
17	0	-1	-1	1.75

表 5 果穗损失率方差分析结果

Table 5 Variance analysis result of grain loss rate

变异来源	离均差平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.02	9	0.11	22.37	0.000 2**
$X_1$	$1 \times 10^{-4}$	1	$1 \times 10^{-4}$	0.022	0.885 6
$X_2$	0.088	1	0.088	17.47	0.004 1**
$X_3$	0.3	1	0.3	59.48	<0.000 1**
$X_1X_2$	$4 \times 10^{-3}$	1	$4 \times 10^{-3}$	0.71	0.426 4
$X_1X_3$	$6 \times 10^{-4}$	1	$6 \times 10^{-4}$	0.12	0.735 3
$X_2X_3$	0.053	1	0.053	10.48	0.014 3*
$X_1^2$	0.34	1	0.34	66.90	0.000 1**
$X_2^2$	$8 \times 10^{-3}$	1	$8 \times 10^{-3}$	1.75	0.228 0
$X_3^2$	0.18	1	0.18	36/16	0.000 5**
残差	0.035	7	$5 \times 10^{-3}$		
失拟	0.028	3	$9 \times 10^{-3}$	5.48	0.067
纯误差	$7 \times 10^{-3}$	4	$2 \times 10^{-3}$		
误差	1.05	16			

注:\*\*代表试验因素在 0.01 显著性水平下显著;\*代表试验因素在 0.05 显著性水平下显著。

$$Y = 1.3 - 4 \times 10^{-3} X_1 + 0.11 X_2 - 0.19 X_3 + 0.03 X_1 X_2 - 0.013 X_1 X_3 + 0.12 X_2 X_3 + 0.28 X_1^2 + 0.046 X_2^2 + 0.21 X_3^2 \quad (28)$$

式中: $X_1$ 为前后辊配置角度,°; $X_2$ 为机具前进速度,km/s; $X_3$ 为摘穗辊转速,r/min; $Y$ 为果穗损失

率,%。

由表 5 方差分析及回归方程可知,影响因子  $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1^2$ 、 $X_3^2$  对果穗损失率影响显著,其他因子影响不显著,且各因子对果穗损失率的显著性由大到小依次为摘穗辊转速  $X_3$ 、机具前进速度  $X_2$ 、前后辊配置角度  $X_1$ 。

### 3.3.2 响应曲面分析

应用相应曲面法分析各因素交互作用对果穗损失率的影响,即固定 3 个因素中 1 个因素为 0 水平,考察其他 2 个因素对果穗损失率的影响。

(1)当摘穗辊转速为 1 045 r/min 时,得到摘穗辊配置角度与机具前进速度对果穗损失率的影响,如图 7 所示。随着摘穗辊配置角度的增加,果穗损失率表现出先降低后升高的趋势。这是因为在摘穗辊转速一定的情况下,摘穗辊配置角度对摘穗质量影响显著,随着配置角度增大,果穗从摘穗辊组滑落顺畅性提高,减少了果穗与摘穗辊的碰撞,减少了果穗损失和籽粒啃伤;随着配置角度的进一步增大,玉米植株进入摘穗辊组间隙的难度随之增加,严重时会出现茎秆折断和喂入口堵塞,增加了玉米果穗的收获损失,因此,造成果穗损失率上升。

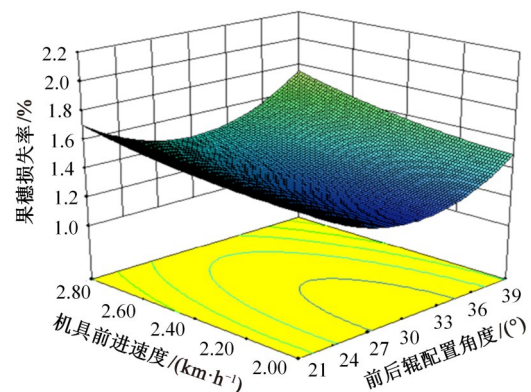


图 7 摘穗辊配置角度与机具前进速度交互作用下的影响分析

Fig. 7 Analysis of interaction between configuration angle of stripping roll and forward speed of machine tool

(2)当机具前进速度为 2.4 km/h 时,得到摘穗辊配置角度与摘穗辊转速对果穗损失率的影响,如图 8 所示。随着摘穗辊配置角度的增大,果穗损失率呈先降低后升高的趋势,这是因为在横辊摘穗过程中,摘穗辊配置角度越大,被摘下的果穗滑落摘穗辊组的流畅性越高,果穗与摘穗辊的碰撞概率下降,减少了果穗损失和籽粒啃伤;随着

配置角度的进一步增大,玉米植株进入摘穗辊组间隙的难度随之增加,严重时会导致茎秆折断和喂入口堵塞,增加了玉米果穗的收获损失,因此,果穗损失率出现上升趋势。

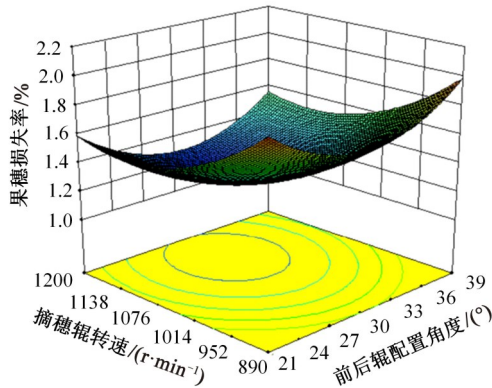


图 8 摘穗辊配置角度与摘穗辊转速交互作用下的影响分析

Fig. 8 Analysis of influence of interaction between configuration angle of picking roll and speed of picking roll

随着机具前进速度的加快,果穗损失率表现出持续上升趋势,这是因为机具前进速度越快,喂入量就越大,加之丘陵复杂地形的影响,易出现喂入口处拥堵现象,导致果穗与果穗、果穗与割台间的碰撞概率增加,造成果穗损失率持续升高。

随着摘穗辊转速的加快,果穗损失率呈先降低后升高的趋势,这是因为摘穗辊转速对玉米收获效率有着很大的影响,转速较低时会导致喂入口堵塞以及摘穗辊对茎秆的抓取力下降,出现摘穗辊循环抓取茎秆的现象,使果穗与摘穗辊的碰撞次数增多,导致果穗损失率较高。而随着摘穗辊转速的进一步升高,果穗损失率出现明显上升,主要因为在作业速度不变的条件下,单独增加摘穗辊转速,导致果穗因冲击力增加而从割台弹出,最终导致果穗损失率升高。

(3)当摘穗辊配置角度为 $30^\circ$ 时,得到摘穗辊转速与机具前进速度对果穗损失率的影响,如图 9 所示。随着摘穗辊转速的加快,果穗损失率呈先下降后上升的趋势。这是因为当摘穗辊转速较低时会导致喂入口堵塞以及摘穗辊对茎秆的抓取力不足,出现摘穗辊循环抓取的现象,增加了果穗与摘穗辊的碰撞次数,最终导致果穗损失率较高;而随着摘穗辊转速的进一步加快,果穗损失率出现先下降后上升的趋势,主要因为在摘穗辊配置角度不变的条件下,单独加快摘穗辊转速,导致

果穗因冲击力增加而从割台弹出的问题,最终果穗损失率有所上升。

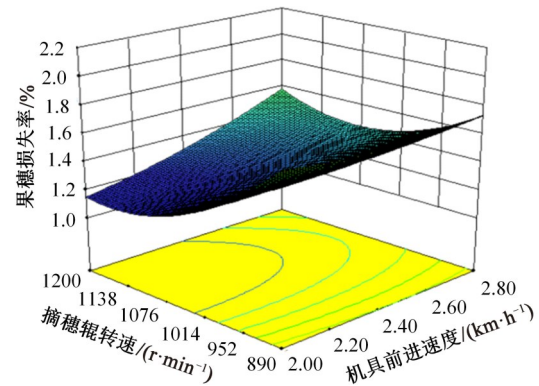


图 9 摘穗辊转速与机具前进速度交互作用下的影响分析

Fig. 9 Analysis of influence of interaction between speed of stripping roll and forward speed of machine tool

随着机具前进速度的加快,果穗损失率呈上升趋势。这是因为机具前进速度对果穗损失率影响显著,前进速度的加快使摘穗喂入量变大,过大的喂入量易造成喂入口处果穗堵塞,增加了果穗与果穗、果穗与割台间的碰撞概率,因此,造成摘穗果穗损失率升高。

以上方差分析结果表明:在横辊摘穗过程中,摘穗辊转速、机具前进速度以及摘穗辊配置角度都是影响果穗损失率的关键性因素,也是导致果穗损失的主要原因。

### 3.3.3 验证试验

在上述研究的基础上,为得到试验因素最佳水平组合,即横辊摘穗装置最佳工作参数,对其结构进行优化设计,建立参数化数学模型,对果穗损失率的回归方程进行分析<sup>[25]</sup>,依据《玉米收获机械技术条件》(GB/T 21962—2008),得到其非线性规划的数学模型:

$$\begin{cases} \min Y(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 21^\circ \leq X_1 \leq 39^\circ \\ 2.0 \text{ km/h} \leq X_2 \leq 2.8 \text{ km/h} \\ 890 \text{ r/min} \leq X_3 \leq 1200 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

由圆整优化结果可知,当摘穗辊配置角度为 $26^\circ$ ,机具前进速度为 $2 \text{ km/h}$ ,摘穗辊转速为 $1050 \text{ r/min}$ 时,玉米摘穗效果最佳,果穗损失率为 $1.23\%$ 。

为验证优化分析结果,在最佳水平参数组合下对果穗损失率进行验证试验。为消除随机误

差,试验重复 5 次,试验数据取平均值,果穗损失率的五次结果分别为 1.275%、1.19%、1.225%、1.21%、1.235%,平均值为 1.227%,圆整优化结果可信。

## 4 结 论

(1)研制了横辊摘穗式玉米收获割台,有效缩短了割台长度,为坡地玉米收获提供了可选割台;分析了摘穗机构主要参数对作业性能的影响规律,建立了该型割台的设计理论,为横辊摘穗技术的开发应用提供了理论支持。

(2)开展了割台主要参数的正交试验,确定了影响摘穗质量(果穗损失率)的主要因素为摘穗辊配置角度、机具前进速度和摘穗辊转速;建立了较优参数组合,即当摘穗辊配置角度为 26°,机具前进速度为 2 km/h,摘穗辊转速为 1 050 r/min 时,果穗损失率为 1.23%,均符合国家相关标准。

(3)在较优参数组合下进行了试验验证,结果表明:摘穗辊配置角度为 26°,机具前进速度为 2 km/h,摘穗辊转速为 1 050 r/min 时,果穗损失率为 1.227%,与前期试验结果基本一致。

### 参考文献:

- [1] 贾学文. 中国玉米市场供求关系研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014.  
Jia Xue-wen. Research on the supply and demand of corn market in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [2] 程修沛,贾晓东,陈美舟,等. 上拉茎掰穗式玉米收获台架试验与分析[J]. 农业工程学报,2016,32(22):50-55.  
Cheng Xiu-pei, Jia Xiao-dong, Chen Mei-zhou, et al. Experiment and analysis on test device of corn ear picking by pulling stalk upwards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(22): 50-55.
- [3] 中国统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京:中国统计出版社,2020.
- [4] 翁凌云. 我国玉米生产现状及发展对策分析[J]. 中国食物与营养,2010(1):22-25.  
Weng Ling-yun. Analysis on the current situation and development countermeasures of maize production in China[J]. Chinese Journal of Food and Nutrition, 2010(1): 22-25.
- [5] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报,2019,35(22):132-140.  
Cong Hong-bin, Yao Zong-lu, Zhao Li-xin, et al. Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(22): 132-140.
- [6] 姚艳春,刘元义,牛国栋,等. 山东旱作灌溉区小麦-玉米全程机械化技术模式经济效益分析与评价方法[J]. 中国农机化学报,2020,41(12):6-11.  
Yao Yan-chun, Liu Yuan-yi, Niu Guo-dong, et al. Economic benefit analysis and evaluation method of wheat maize whole mechanization technology mode in dry farming irrigation area of Shandong Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12): 6-11.
- [7] 陈志,郝付平,王锋德,等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J]. 农业机械学报,2012,43(12):44-50.  
Chen Zhi, Hao Fu-ping, Wang Feng-de, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 44-50.
- [8] 王晓文,袁寿其,贾卫东. 丘陵山区农业机械化现状与发展[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(5):535-540.  
Wang Xiao-wen, Yuan Shou-qi, Jia Wei-dong. Current situation and development of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(5): 535-540.
- [9] 张健伟,徐曼. 丘陵山区农业机械化发展现状与解决对策[J]. 山西农经,2021(8):155-156.  
Zhang Jian-wei, Xu Man. Current situation and solutions of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2021(8): 155-156.
- [10] 郝付平,陈志. 国内外玉米收获机械研究现状及思考[J]. 农机化研究,2007,29(10):206-208.  
Hao Fu-ping, Chen Zhi. Actuality of domestic and foreign corn harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(10):206-208.
- [11] 王优. 新型玉米摘穗装置工作机理的基础性研究[D]. 长春:吉林大学生物与农业工程学院,2011.  
Wang You. The basic research in the mechanism of the new corn picker[J]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jinlin University, 2011.
- [12] 张莉. 新型仿生玉米摘穗机构理论分析与仿真研究[D]. 长春:吉林大学生物与农业工程学院,2015.

- Zhang Li. The oretical analysis and simulation research on novel bionic corn-ear snapping mechanism [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jinlin University, 2015.
- [13] 闫洪余, 吴文福, 韩峰, 等. 立辊型玉米收获机摘穗辊型对工作性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5):76-80.
- Yan Hong-yu, Wu Wen-fu, Han Feng, et al. Effects of the type of the snapping rolls of vertical corn harvester on harvesting performance[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 76-80.
- [14] 郭晓晓, 张道林, 卜令昕, 等. 立辊式玉米收获机夹持输送装置的设计分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(2): 124-127.
- Guo Xiao-xiao, Zhang Dao-lin, Bu Ling-xin, et al. Design and analysis on gripping delivery mechanism for vertical-roll type of corn harvester[J]. Research on Agricultural Mechanization, 2015, 37(2): 124-127.
- [15] 张道林, 刁培松, 董锋, 等. 拨禾指式不对行玉米收获装置的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 103-106.
- Zhang Dao-lin, Diao Pei-song, Dong Feng, et al. Experiment of no-row corn harvesting device with finger wheel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 103-106.
- [16] 王优, 张强, 于路路. 玉米摘穗装置的应用现状与展望[J]. 农机化研究, 2011, 33(1):228-231.
- Wang You, Zhang Qiang, Yu Lu-lu. The present situation of corn snapping device and its exception[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1):228-231.
- [17] 张亮亮, 李其昀, 于磊. 立式玉米茎秆切碎装置研究[J]. 山东理工大学学报:自然科学版, 2011, 25(3): 52-55.
- Zhang Liang-liang, Li Qi-yun, Yu Lei. Study on vertical corn stalk chopper[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 25(3): 52-55.
- [18] 耿端阳, 王骞, 鹿秀凤, 等. 基于激振理论的玉米多棱摘穗辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):124-132.
- Geng Duan-yang, Wang Qian, Lu Xiu-feng, et al. Design and experiment on vertical polygonal roller snapping ears of corn harvester based on excitation theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 124-132.
- [19] 张宗毅. “十四五”期间丘陵山区农田宜机化改造若干重大问题与举措[J]. 中国农村经济, 2020(11):13-28.
- Zhang Zong-yi. Some important problems and measures of farmland construction suitable for mechanization in hilly and mountainous areas during the 14th Five-year Plan period[J]. China Rural Economy, 2020(11): 13-28.
- [20] Willcutt H. Corn harvesting, drying, and storage: extension service of Mississippi[J]. Cooperating with U. S. Department of Agriculture, 2001, 41(5): 37-41.
- [21] 耿端阳, 何珂, 王骞, 等. 横轴流式玉米柔性脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3):101-108.
- Geng Duan-yang, He Ke, Wang Qian, et al. Design and experiment on transverse axial flow flexible threshing device for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 101-108.
- [22] 耿端阳, 李玉环, 何珂, 等. 立辊式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 Duan-yang, Li Yu-huan, He Ke, 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.
- [23] 耿端阳, 孙延成, 李华彪, 等. 履带式坡地玉米收获机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13):11-19.
- Geng Duan-yang, Sun Yan-cheng, Li Hua-biao, et al. Design and experiment of crawler corn harvester for sloping fields[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 11-19.
- [24] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [25] 徐中儒. 回归分析与试验分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1998.