

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.015

# 玉米收获机激振摘穗装置设计与试验

纪晓琦<sup>1</sup> 耿端阳<sup>1</sup> 姚艳春<sup>1</sup> 杜鹃<sup>1</sup> 朱俊科<sup>1</sup> 徐海港<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东时风(集团)有限责任公司, 高唐 252800)

**摘要:** 针对当前玉米果穗收获存在损伤大、效率低的问题,在原来激振摘穗技术研究的基础上,从激振辊夹持果柄实现激振波有效传递入手,结合激振摘穗实现果-茎分离的条件,开发了基于椭圆截面的新型摘穗装置,确定了该型摘穗辊结构参数的设计方法;根据激振摘穗过程中产生的激振波波面确定了椭圆激振辊的布局 and 结构参数,建立了椭圆激振摘穗试验台;通过正交试验确定了影响摘穗质量(果穗啃伤率、落粒率和茎秆折断率)的主次因素依次为激振辊长短径之比、激振辊基圆直径、摘穗辊转速;确定了较优组合,即当激振辊长短径之比为0.7、激振辊基圆直径为7.5 cm、摘穗辊转速为1 000 r/min时,果穗啃伤率为0.38%,落粒率为0.12%,茎秆折断率为0.49%,均低于国家玉米收获机械技术标准要求。在较优参数组合下进行了试验验证,结果表明激振辊长短径之比为0.7、激振辊基圆直径为7.5 cm、摘穗辊转速为1 000 r/min时,果穗啃伤率为0.39%,落粒率为0.12%,茎秆折断率为0.48%,与前期试验结果基本保持一致。

**关键词:** 玉米; 摘穗; 激振; 摘穗辊

**中图分类号:** S225.51      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0126-08

## Design and Experiment of Corn Harvester Vibration Picking Device

JI Xiaoqi<sup>1</sup> GENG Duanyang<sup>1</sup> YAO Yanchun<sup>1</sup> DU Juan<sup>1</sup> ZHU Junke<sup>1</sup> XU Haigang<sup>2</sup>

(1. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Shandong Shifeng (Group) Co., Ltd., Gaotang 252800, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high damage and low efficiency in corn ear harvesting, based on the original research of vibration picking technology, a new type of ear picking device based on elliptical cross-section was developed. Based on the conditions of vibration picking to realize the effective transmission of vibration waved by clamping the fruit handle with the excitation roller, the determination method of the structural parameters of this type of ear picking roller was determined and an elliptical vibration test-bed was established. Through the orthogonal test, the main and secondary factors affecting the ear gnawing rate, threshing rate and stem breaking rate were determined as follows: the ratio of the long and short diameter of the exciting roller, the rotation speed of the snapping roller and the diameter of the base circle of the exciting roller. The better combination was determined, that was, the ratio of the long and short diameter of the exciting roller was 0.7, the diameter of the base circle of the exciting roller was 7.5 cm, and the rotation speed of the stripping roller was 1 000 r/min, the ear gnawing rate was 0.38%, the seed dropping rate was 0.12%, and the stalk breaking rate was 0.49%, which were all lower than the requirements of the national corn harvesting machinery technical standards. The experimental verification was carried out under the optimal combination of parameters. The results showed that the ratio of short length to diameter of exciting roller was 0.7, the diameter of base circle of exciting roller was 7.5 cm, the rotation speed of snapping roller was 1 000 r/min, the rate of ear gnawing was 0.39%, the rate of falling grain was 0.12%, and the rate of stalk breaking was 0.48%. The test results showed that the results were basically consistent with the previous test results.

**Key words:** corn; ear picking; vibration; picking roller

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE050)和山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF004)

作者简介: 纪晓琦(1997—),女,硕士生,主要从事现代农机装备研究,E-mail: 771659185@qq.com

通信作者: 耿端阳(1969—),男,教授,主要从事现代农机装备研究,E-mail: dyst@sdu.edu.cn

## 0 引言

玉米种植面积和产量在 2012 年超过了水稻,成为我国第一大粮食作物<sup>[1-3]</sup>。但是 2014 年,随着国际玉米进口量的增加以及国内玉米库存量的增加,国内玉米价格出现了断崖式下跌<sup>[4-6]</sup>,严重影响了玉米的生产效益,损害了种植户的积极性。加之近年来国内劳动力成本的上升,更使玉米生产效益雪上加霜。在该大背景下,努力提高玉米生产的机械化水平就成为解决该问题的关键<sup>[7-8]</sup>。

但是在玉米机械化收获过程中,摘穗装置结构限制导致了玉米果穗损伤和损失较大,严重影响了玉米收获质量;其次,籽粒一旦损伤,就会增加籽粒感染黄曲霉素的风险,为此国内许多学者开始了对降低玉米收获损失和损伤技术的研究<sup>[9-13]</sup>。最先取得突破的是拉茎辊-摘穗板式收获技术,由于摘穗板阻隔了果穗与拉茎辊的接触,所以大幅度地降低了果穗的啃伤率,并在生产上得到了推广应用;另一种立辊式摘穗技术,减少了果穗与摘穗辊的接触时间,所以其损失也得到一定的降低<sup>[14-20]</sup>。本文利用激振原理,使果穗受到的激振力大于果穗与茎秆的连接力,以实现在果穗与激振辊免/少接触条件下的果-茎分离。为了进一步探索激振摘穗理论,本文对新型摘穗辊结构进行理论分析和试验研究。

## 1 激振摘穗理论

激振摘穗即在茎秆夹持输送过程中利用激振器对果穗施加激振作用,当果穗受到的激振力大于果柄与茎秆或果穗与果柄的连接强度时,即可实现果穗与茎秆的分离,设激振波频率为  $f$ , 振幅为  $A$ , 则激振波  $c$ <sup>[19]</sup> 的表达式为

$$c = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中  $\omega$ ——角速度, rad/min

$t$ ——时间, min  $\varphi_0$ ——初相位, rad

对时间进行一次和二次求导即可获得其速度和加速度的方程,即:

速度

$$v = c' = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

加速度

$$k = c'' = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

当激振器将该激振波传给果穗时,设果穗质量为  $m$ , 则果穗受到的激振力为

$$F = mk = -mA\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (4)$$

考虑果穗在激振力作用下实现的是折柄摘穗,果穗受到的载荷包括重力  $mg$  和激振力  $F$ , 如图 1 所示,对夹持位置取弯矩为

$$M_0 = Fx - mgl \quad (5)$$

式中  $l$ ——重力到夹持位置的距离

$x$ ——激振力到夹持位置的距离

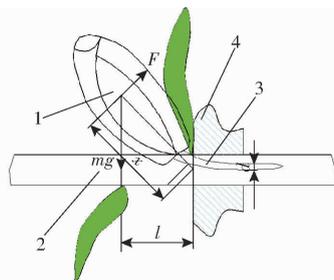


图 1 激振力作用下果穗受力情况

Fig. 1 Stress of ear under excitation force

1. 果穗 2. 茎秆 3. 果柄 4. 激振器

对于激振摘穗而言,由于  $F$  是水平方向的激振力,而重力为垂直方向的作用力,所以在分析激振摘穗过程中,重力作用可以不加考虑,故激振器施加给果柄的实际弯矩为

$$M_0 \approx Fx = -mA\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (6)$$

则果柄受到的弯应力

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{32M_{\max}}{\pi d^3} \quad (7)$$

式中  $M_{\max}$ ——最大弯矩, N·cm

$W$ ——抗弯截面系数, cm<sup>3</sup>

$d$ ——果柄界面直径, cm

要使果穗与茎秆分离,则

$$\sigma_{\max} \geq [\sigma_x] \quad (8)$$

式中  $\sigma_{\max}$ ——最大弯应力, N

$\sigma_x$ ——许用应力, N

进一步,对果柄受弯后的变形进行分析,假设果柄为实心圆柱,则果柄在弯矩  $M_0$  作用下的变形如图 2 所示。

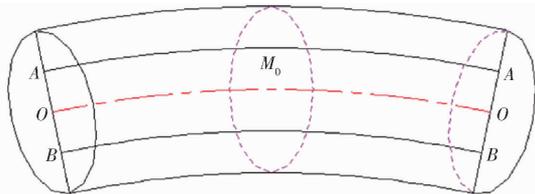


图 2 果柄在弯矩作用下的变形

Fig. 2 Deformation of fruit handle under action of bending moment

由图 2 可以看出,果柄在弯矩  $M_0$  作用下,其中心线  $OO$  以上的部分如  $AA$  线承受拉应力,而  $OO$  以下的部分如  $BB$  线承受压应力。考虑果柄为木质化纤维材料,所以该压应力不会将木质化纤维压断,而拉应力可以把木质化纤维拉断,由此决定了果柄折弯摘穗属于先上部断裂,然后在激振力换向后下部再断裂。显然,传统的辊式摘穗属于果柄均匀载荷下一次性拉

断,所以导致拉断果柄的应力大于弯折果柄的应力,即折柄摘穗较拉断果柄要明显节省能量<sup>[20]</sup>。

进一步,在果柄任意位置取一截面,假设该截面距离果穗重心位置为  $s$ ,则此时果穗在激振力作用下形成的弯矩为

$$M_s \approx Fs = -msA\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (9)$$

其弯曲应力为

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W} = \frac{32msA\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0)}{\pi d^3} \quad (10)$$

由上式可以看出,在激振力一定的条件下,夹持点距离果穗重心越远,则果柄受到的弯曲应力越大。但是由于过远后,激振力的传递会受到茎秆阻尼的抑制,所以激振力传递给果穗的条件是激振辊首先夹持果柄以保证激振波的有效传递;其次,果穗与果柄连接处为面积突变位置,所以该位置成为应力集中区,即果穗与茎秆分离多发生在果柄与果穗的连接位置,这与笔者的试验以及前期研究的结果完全一致。

## 2 激振辊结构确定

根据上述激振波方程,确定了激振波的变化过程如图3所示,要保证激振辊夹持输送茎秆过程形成如图3所示的波形,则要求激振辊转动过程必须保证激振辊的外沿形成如图3所示的曲线,即存在一个长边,一个短边,且为对称结构;进一步考虑摘穗辊转动过程对茎秆输送的稳定性,将其平滑连接起来,从而形成了椭圆结构,由此决定了激振辊的截面为椭圆结构。设该椭圆长径为  $2a$ ,短径为  $2b$ ,则振幅为长半径与短半径的差,即  $A = |a - b|$ ;由于摘穗辊转动形成的激振频率为该辊的转速与每周的激振次数之积,结合前期研究<sup>[19]</sup>知,摘穗辊转动形成的激振频率为

$$f = \frac{nn_1}{60} \quad (11)$$

式中  $n$ ——摘穗辊转速, r/min

$n_1$ ——摘穗辊转动一周的激振次数,次/周

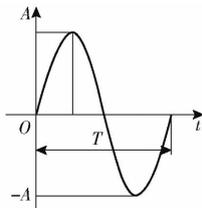


图3 激振波结构

Fig. 3 Excited wave structure

由于激振辊每转动一周,会形成4个激振波变化周期。故激振辊转动过程形成的激振频率为

$$f = \frac{n}{15} \quad (12)$$

## 3 摘穗辊布局与结构参数确定

为了使摘穗辊转动过程形成较好的激振波,且尽量保证激振过程夹持间隙的稳定性,所以两摘穗辊配置采用如图4所示的实线布局,即一个摘穗辊转至长径与  $y$  轴方向重合时,另一个摘穗辊刚好转至短径与  $y$  轴重合;随着摘穗辊的转动,一个摘穗辊半径逐渐变短,另一个恰好变长。

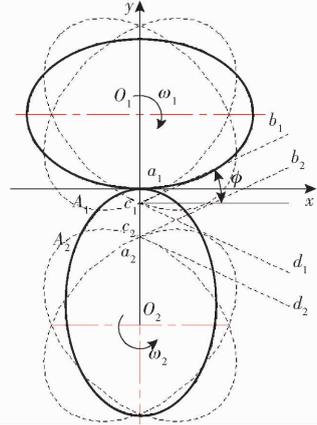


图4 摘穗辊配置结构

Fig. 4 Configuration structure of picking roller

### 3.1 摘穗辊短径

依据玉米收获机作业过程要求摘穗辊抓取茎秆而不抓取果穗的原理,摘穗辊直径  $D$  满足公式<sup>[18]</sup>

$$\frac{d_j - h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_j^2}}} \leq D \leq \frac{d_g - h}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_g^2}}} \quad (13)$$

式中  $d_j$ ——茎秆直径, cm

$h$ ——摘穗辊间隙, cm

$d_g$ ——果穗大端直径, cm

$\mu_j$ ——摘穗辊对茎秆的抓取系数

$\mu_g$ ——摘穗辊对果穗的抓取系数

依据相关资料显示,在考虑该摘穗辊外形特点的条件下,  $\mu_j \approx \mu_g = 0.48 \sim 0.65$ 。

根据山东省玉米种植的情况(本例品种:先玉335),其茎秆直径  $1.6 \sim 3.1$  cm;果穗大端直径  $4.4 \sim 5.5$  cm;则摘穗辊短径长度为  $6.8 \sim 8.1$  cm。

### 3.2 摘穗辊长径

虽然激振过程增大振幅和增加频率都可以实现果穗与茎秆的分离,但是考虑振幅过大会导致茎秆的早期折断,所以对茎秆进行田间折弯试验,结果为当折弯角度大于  $37.56^\circ$  时,茎秆会出现折断或折弯,与文献[19]的试验结果一致。而激振过程中,一旦茎秆出现了折断或者折弯,会导致激振波传递的中断或者减弱激振辊对茎秆的激励作用,故为了

保证在激振过程不出现茎秆折断问题,要求激振辊产生的振幅不能过大,表现在文中即摘穗辊夹持输送茎秆过程,其激振角小于等于  $25.19^\circ$ ,即  $\varphi \leq 25.19^\circ$ 。

考虑如此配置的摘穗辊在图 4 所示实线位置,即一个摘穗辊短径处于  $y$  轴,另一个摘穗辊长径处于  $y$  轴为初始位置,假设茎秆处于两辊的切线位置,即在图 4 所示实线位置时,其夹持方向恰好为水平位置;当半轴与  $x$  轴夹角为  $-45^\circ$  的点转至与  $y$  轴重合的位置时,则过摘穗辊  $O_1$ 、 $O_2$  上该点的切线为  $a_1b_1$ 、 $a_2b_2$ ;当摘穗辊半轴与  $x$  轴的夹角为  $45^\circ$  的点转至  $y$  轴位置时,则过摘穗辊  $O_1$ 、 $O_2$  上该点的切线为  $c_1d_1$ 、 $c_2d_2$ ,显然,  $a_1b_1 \parallel a_2b_2$ 、 $c_1d_1 \parallel c_2d_2$ ,且  $a_1$ 、 $c_1$  共点,  $a_2$ 、 $c_2$  共点时,切线  $a_1b_1$  与  $c_1d_1$  所形成的角度为 2 倍的折弯角。即  $\angle b_1c_1d_1$  为  $2\varphi$ 。

为了更好地解决问题,以摘穗辊  $O_1$  为例,设其椭圆方程<sup>[21]</sup>为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (14)$$

取  $(x_1, y_1)$  为该椭圆上的任意一点,则过椭圆上该点的切线方程为

$$\frac{x_1x}{a^2} + \frac{y_1y}{b^2} = 1 \quad (15)$$

如上所述,当摘穗辊  $O_1$  的半轴与  $x$  轴夹角为  $-45^\circ$  的点转至  $y$  轴位置时,则过摘穗辊  $O_1$  上该点的切线为  $a_1b_1$ 。

则该点坐标为  $(x_0, y_0)$ ,且满足

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \\ y = -x \end{cases} \quad (16)$$

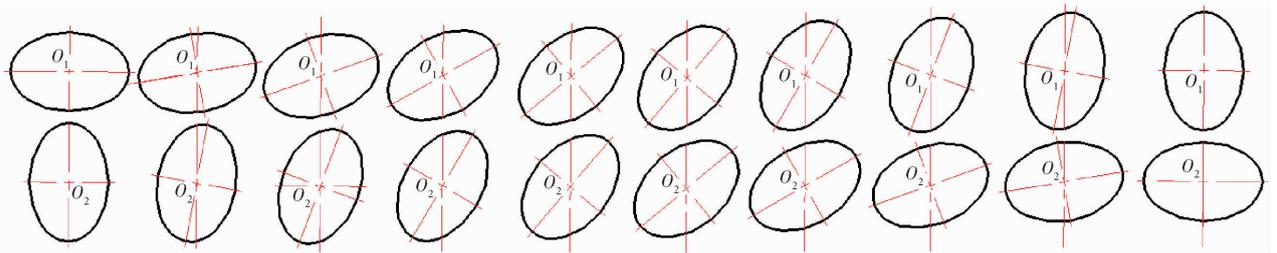


图 5 激振摘穗辊工作过程间隙变化规律

Fig. 5 Rule of gap change in excitation picking roller working process

一次激振过程,证明前述激振辊每转动一周,完成 4 次激振,且在转动到  $45^\circ$  时开始回振,即在该位置产生的振动最为剧烈,一般果穗在该位置完成果穗与茎秆的分离。

由图 6 可以看出,两摘穗辊的间隙变化呈正弦曲线变化,且振动频率为  $4n$ ;振幅为  $|a - b|$ 。其次,该间隙略呈现出正弦曲线的变化规律,且随着长短径之比的增加,其间隙变化增大,故确定摘穗辊外形

解之得

$$\begin{cases} x_0 = \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ y_0 = \frac{-ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{cases} \quad (17)$$

所以过该点的切线方程为

$$\frac{bx}{a\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{ay}{b\sqrt{a^2 + b^2}} = 1 \quad (18)$$

显然,该切线与  $x$ 、 $y$  轴的交点为  $(0, -\frac{b}{a} \cdot \sqrt{a^2 + b^2})$  和  $(\frac{a}{b} \sqrt{a^2 + b^2}, 0)$ 。

根据直线绕定点旋转的坐标变换方程

$$\begin{cases} x' = x\cos\theta - y\sin\theta \\ y' = x\sin\theta + y\cos\theta \end{cases} \quad (19)$$

有该切线绕摘穗辊  $O_1$  旋转  $-45^\circ$  的方程为

$$y = \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2}x - \frac{\sqrt{2}ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (20)$$

显然,该直线与  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ ,且

$$\tan\varphi = \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2} \leq \tan 25.19^\circ \quad (21)$$

取最小折弯角,则有  $b \geq 0.6a$ 。

### 3.3 摘穗间隙的变化规律研究

根据上述配置以及满足防止激振过度导致茎秆折弯对激振辊长短径的要求,采用解析方法对其按照每转  $10^\circ$  进行一次间隙确定,则结果如图 5、6 所示。

由图 5 可知,摘穗时两摘辊相对向内运动,在摘穗辊从初始位置转动  $90^\circ$  的过程中,激振方向由水平方向向上振动一次后恢复到水平方向,即为完成

结构对茎秆夹持输送具有较大的影响。

### 3.4 摘穗辊外形结构改造

考虑在激振摘穗过程中,必须保证摘穗辊对果柄有较强的抓取力,而该抓取力受到茎秆含水率和摘穗辊与茎秆之间摩擦力的影响。由于黄淮海地区一直采用小麦玉米轮作制度,所以玉米收获时期受到小麦播种的农时制约,导致玉米茎秆含水率很难控制,尽管国家针对该问题正在推行

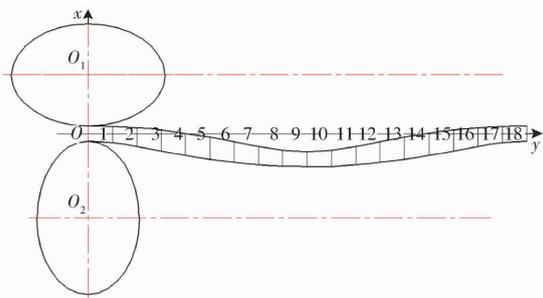


图6 摘穗辊工作间隙变化规律

Fig. 6 Changing rule of working gap of picking roller

成熟期快速脱水的新品种,但是品种更新的过程比较慢,所以本文暂不考虑茎秆含水率对抓取力的影响。

因此,现阶段只能采用增加茎秆与摘穗辊摩擦力的方法以保证摘穗辊对果柄的抓取力。为了解决摘穗辊对茎秆抓取不稳定的问题,对摘穗辊表面结构进行了改造,即该摘穗辊采用了表面打孔结构,使其摩擦系数提高到 $(1.3 \sim 1.6)f$ ,从而较好地解决了摘穗辊对茎秆夹持不稳的问题。

#### 4 试验设计与结果分析

为了探索椭圆激振辊在摘穗过程中对摘穗质量的影响规律,确定较优参数组合,对此开展相关试验并对试验结果进行了极差和方差分析。

由以上理论分析可知,影响摘穗质量的因素主要来源于激振辊的长短径之比、摘穗间隙和激振辊转速。考虑摘穗间隙受到激振辊长短径之比和激振辊基圆(即椭圆辊短轴的长度)直径的交错影响,因此最终选取激振辊的长短径之比、激振辊基圆直径和激振辊转速作为试验因素,以果穗啃伤率、落粒率和茎秆折断率为考察指标,在山东理工大学农业机械性能实验室进行了正交试验。

##### 4.1 试验材料与试验装置

试验材料选取山东省种植面积较大的玉米品种先玉335号,随机选取100株试验所用的玉米植株,通过实测,得到玉米植株的平均物理参数。其平均高度为253 cm;最低接穗高度为109.12 cm;茎秆直径为2.21 cm;果穗大端直径为4.93 cm,果穗下垂率为16.92%,籽粒含水率为34.51%,茎秆含水率为87.13%,果柄含水率为82.56%。

激振摘穗试验台如图7所示,通过更换不同基圆和不同长短径之比的激振辊进行摘穗试验,变频器用于调节驱动激振辊转动的电机转速,研究各试验因素的参数对摘穗效果的影响规律,摘穗效果如图8所示。

试验选取了果穗啃伤率、落粒率和茎秆折断率



图7 椭圆激振摘穗试验

Fig. 7 Ellipse excitation spike test

1. 激振辊 2. 变频器



图8 激振摘穗效果

Fig. 8 Vibration picking effect

为考察指标,其中,果穗啃伤率计算公式为

$$S_k = \frac{W_k}{W_z} \times 100\%$$

落粒率计算公式为

$$S_L = \frac{Y_L}{Y_Z} \times 100\%$$

茎秆折断率计算公式为

$$S_J = \frac{W_D}{W_Z} \times 100\%$$

式中  $W_k$ ——每组试验中果穗啃伤株数,株

$W_z$ ——每组试验中总的茎秆株数,株

$Y_L$ ——落地籽粒的质量,kg

$Y_Z$ ——籽粒总量,kg

$W_D$ ——每组试验茎秆折断株数,株

##### 4.2 试验设计与结果

为了研究各个试验因素对摘穗质量的影响规律,确定试验参数的较优组合,进行了三因素四水平正交试验。每组试验重复3次,取平均值为试验结果。试验因素与水平如表1所示,试验方案与结果如表2所示, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 为试验因素水平值。

表1 试验因素与水平

Tab. 1 Test factors and coding

水平	因素		
	激振辊的 长短径之比	激振辊基圆 直径/cm	激振辊转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )
1	0.6	6.5	950
2	0.7	7.0	1000
3	0.8	7.5	1050
4	0.9	8.0	1100

表 2 试验方案与结果  
Tab. 2 Test plan and results

序号	X	Y	Z	果穗啃伤率/%	落粒率/%	茎秆折断率/%
1	1	1	1	5	0.24	4
2	1	2	2	2	0.21	5
3	1	3	3	6	0.17	3
4	1	4	4	9	0.43	6
5	2	1	2	3	0.23	3
6	2	2	1	3	0.12	2
7	2	3	4	1	0.12	4
8	2	4	3	4	0.23	3
9	3	1	3	3	0.29	5
10	3	2	4	4	0.29	4
11	3	3	1	2	0.12	2
12	3	4	2	5	0.21	3
13	4	1	4	7	0.72	7
14	4	2	3	6	0.39	5
15	4	3	2	5	0.28	4
16	4	4	1	4	0.24	3

### 4.3 试验结果与分析

#### 4.3.1 极差和较优选择

各试验因素对摘穗质量影响的变化规律如图 9 所示。一般来说,造成极差最大的试验因素,为影响该考察指标的最重要的试验因素,为影响该考察指标的最重要的试验因素。由极差确定了影响摘穗质量的主次关系和参数较优组合如表 3 所示。由表 3 分析可知,影响果穗啃伤率指标的主次因素为激振辊长短径之比、激振辊基圆直径、激振辊转速;影响落粒率指标的主次因素为激振辊长短径之比、激振辊转速、激振辊基圆直径;影响茎秆折断率指标的主次因素为激振辊转速、激振辊长短径之比、激振辊基圆直径。通过极差分析可知,当激振辊长短径之比为 0.7,激振辊基圆直径为 7.5 cm,转速为 950 r/min 时对果穗啃伤率、落粒率以及茎秆折断率的影响均为最小。

#### 4.3.2 方差分析

为了进一步明确所选取的 3 个试验因素对考察指标的影响规律,对试验数据进行方差分析如表 4

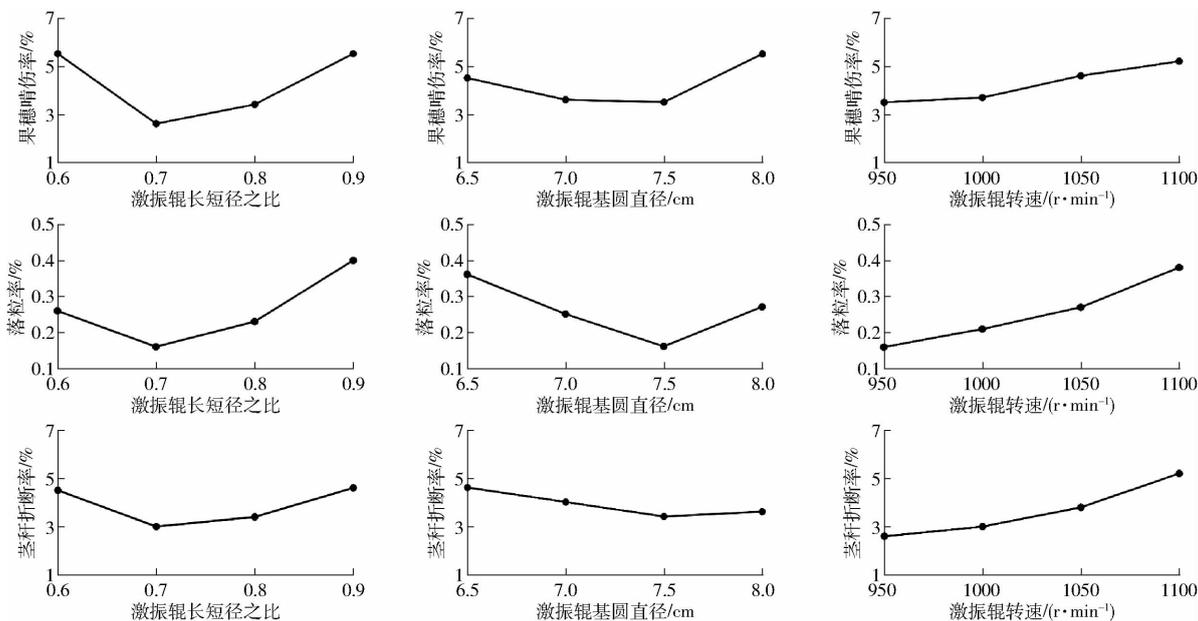


图 9 各因素对摘穗质量的影响规律

Fig. 9 Influence rule of various factors on quality of picking

表 3 极差和较优选择

Tab. 3 Range and better selection

极差	果穗啃伤率	落粒率	茎秆折断率
$R_{(X)}$	2.750	0.232	1.750
$R_{(Y)}$	2.000	0.197	1.500
$R_{(Z)}$	1.750	0.210	2.500
主次因素	X、Y、Z	X、Z、Y	Z、X、Y
较优组合	$X_2 Y_3 Z_1$	$X_2 Z_1 Y_3$	$Z_1 X_2 Y_3$

所示。由表 4 可知,激振辊长短径之比、激振辊基圆直径和激振辊转速对收获过程中的果穗啃伤率、落粒率以及茎秆折断率均有显著作用。

由分析可知:

(1) 激振辊长短径之比对果穗啃伤率有极显著的影响,激振辊长短径之比决定振幅的大小。在激振辊基圆直径和转速一定时,长短径之比不能过大,当长短径之比过大时,摘穗辊的结构接近圆辊状,这样必然导致振幅过小,不利于果穗与茎秆的分离,从而出现摘穗辊对果穗循环激振现象,增加了果穗的损伤;当长短径之比过小时,激振辊形成的间隙一致性变差,导致对茎秆的夹持效果变差,最终影响激振波的有效传递,出现一次激振不能保证果穗与茎秆的分离问题,所以果穗啃伤现象严重。激振辊长短

表4 方差分析结果

Tab.4 Analysis of variance results

试验指标	方差来源	离差平方和	自由度	F	显著性
果穗啃伤率	X	23.688	3	14.495	**
	Y	7.588	3	5.861	*
	Z	8.188	3	4.763	*
	误差	6.283	6		
落粒率	X	0.119	3	5.832	*
	Y	0.079	3	4.631	*
	Z	0.096	3	4.963	*
	误差	0.250	6		
茎秆折断率	X	8.188	3	9.103	*
	Y	4.688	3	7.569	*
	Z	12.688	3	14.691	**
	误差	3.474	6		

注: \* 表示显著, \*\* 表示极显著。

径之比对落粒率和茎秆折断率均有显著影响。长短径之比过大,产生的振幅过小,激振效果达不到分离茎秆和果穗的要求,导致果穗已到达激振摘取位置却还未被成功摘下,最终使果穗与摘穗辊直接接触,造成果穗啃伤、落粒,而茎秆被摘穗辊过度激励,造成茎秆折断,迫使试验台堵塞,停止作业;反之,长短径之比过小,导致激振辊产生的振幅过大,从而引起摘穗辊夹持茎秆不稳定,造成摘穗辊对茎秆的夹持力不足以稳定茎秆的夹持输送,对茎秆激励作用过度导致茎秆被折断,摘穗效果不理想。

(2) 激振辊基圆直径对果穗啃伤率、落粒率和茎秆折断率均有显著的影响,在激振辊长短径之比和转速一定时,基圆直径过大,摘穗间隙变小,在摘取果穗过程中,果穗易与激振辊碰撞引起啃伤,致落粒、茎秆折断现象增加,摘穗效果差;基圆直径过小使摘穗间隙变大,激振辊对茎秆的夹持效果不稳定、激振传递效果差而导致果穗啃伤落粒、茎秆折断现象严重,摘穗效果不佳。

(3) 激振辊转速对茎秆折断率有极显著的影响,当激振辊长短径之比和基圆直径一定时,激振辊转速不能过大,由  $f=4n$  可知,转速过大,激振频率越大,茎秆来回振动次数越大,茎秆折断的几率增加;转速过小,激振频率越小,茎秆来回振动次数越小,而茎秆从夹持开始输送到摘穗辊处的时间大约一致,也即要求在同一时间段内,激振辊带动茎秆振动的次数要达到一定的次数,才能够将果穗成功摘下,振动的频率过小,导致摘穗效果不理想。

通过对试验数据进行极差分析、择优选择以及方差分析,结果表明在激振摘穗过程中,激振辊

长短径之比、激振辊基圆直径和激振辊转速是影响果穗啃伤率、落粒率和茎秆折断率关键性因素,也是导致果穗收获损失的主要原因。综合对试验数据的极差和方差分析结果,最终将  $X_2Y_3Z_2$  确定为较优组合,即激振辊长短径之比为 0.7、激振辊基圆直径为 7.5 cm、摘穗辊转速为 1 000 r/min 时,摘穗效果最佳,此时,果穗啃伤率为 0.38%,落粒率为 0.12%,茎秆折断率为 0.49%,均低于国家玉米收获机械技术标准要求。

#### 4.4 试验验证

为了验证上述理论和试验结果分析的准确性,确定摘穗辊装置的最佳结构参数组合,对其进行了试验验证。将各试验参数值调整为激振辊长短径之比为 0.7、激振辊基圆直径为 7.5 cm、摘穗辊转速为 1 000 r/min,取 60 株整株玉米进行 3 次重复试验,并对试验结果取平均值,结果如表 5 所示。

表5 验证试验结果

Tab.5 Verification test results				%
试验序号	果穗啃伤率	落粒率	茎秆折断率	
1	0.37	0.11	0.50	
2	0.38	0.13	0.46	
3	0.42	0.12	0.49	
平均值	0.39	0.12	0.48	

结果表明,激振辊长短径之比为 0.7、激振辊基圆直径为 7.5 cm、摘穗辊转速为 1 000 r/min 时,果穗啃伤率为 0.39%,落粒率为 0.12%,茎秆折断率为 0.48%,与前期试验结果基本一致。

## 5 结论

(1) 对基于激振摘穗的椭圆辊结构进行了理论分析,确定了该型摘穗辊结构参数的设计方法。

(2) 建立了椭圆激振摘穗试验台,开展了正交试验,确定了影响摘穗质量(果穗啃伤率、落粒率和茎秆折断率)的主次因素为激振辊的长短径之比、激振辊基圆直径、激振辊转速;确定了较优组合,即当激振辊长短径之比为 0.7、激振辊基圆直径为 7.5 cm、摘穗辊转速为 1 000 r/min 时,果穗啃伤率为 0.38%,落粒率为 0.12%,茎秆折断率为 0.49%,均低于国家玉米收获机械技术标准要求。

(3) 在较优参数组合下进行了试验验证,结果表明,激振辊长短径之比为 0.7、激振辊基圆直径为 7.5 cm、摘穗辊转速为 1 000 r/min 时,果穗啃伤率为 0.39%,落粒率为 0.12%,茎秆折断率为 0.48%,与前期试验结果基本一致。

## 参 考 文 献

- [1] 张春雷. 玉米成为我国第一大粮食作物品种[J]. 农产品市场周刊, 2012(47):12.
- [2] 晋农. 国务院办公厅发布《全国新增 1 000 亿斤粮食生产能力规划(2009—2020 年)》[J]. 当代农机, 2009(11):46.
- [3] 陶莎, 张峭, 张晶. 2019 年中国饲料市场回顾及 2020 年展望[J]. 农业展望, 2020, 16(4):12-17.  
TAO Sha, ZHANG Qiao, ZHANG Jing. Review of China's feed market in 2019 and prospect in 2020[J]. Prospect of Agriculture, 2020, 16(4):12-17. (in Chinese)
- [4] 习银生. 玉米价格明显下跌 后期走势不乐观[J]. 种子科技, 2015, 33(10):28.
- [5] 王向博. 2019 年中国玉米市场分析[N]. 粮油市场报, 2020-02-25(B03).
- [6] 赵琨. 农业机械化发展对中国农业经济发展方式转变的影响研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2014.  
ZHAO Kun. Research on the influence of agricultural mechanization development on the transformation of China's agricultural economic development mode[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [7] 贺俊林, 佟金. 我国玉米收获机械的现状及其发展[J]. 农机化研究, 2006, 28(2):29-31, 36.  
HE Junlin, TONG Jin. Present situation and development of corn harvester in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(2):29-31, 36. (in Chinese)
- [8] 吴景文, 彭君峰. 玉米机械化收获损失原因及合理化作业思考[J]. 农机使用与维修, 2020(1):93.  
WU Jingwen, PENG Junfeng. Reason of corn mechanized harvest loss and rational operation[J]. Use and Maintenance of Agricultural Machinery, 2020(1):93. (in Chinese)
- [9] 于路路, 张付, 张强, 等. 国内玉米摘穗装置研究现状及思考[J]. 当代农机, 2017(10):74-77.  
YU Lulu, ZHANG Fu, ZHANG Qiang, et al. Research status and thinking of corn ear picking device in China[J]. Contemporary Farm Machinery, 2017(10):74-77. (in Chinese)
- [10] WANG Heng, CAO Shukun, XU Xiangqian, et al. Design of picking roller for corn harvester picking machine and selection of hydraulic motor[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 439(4):042028.
- [11] 郭焱, 张益, 占鹏, 等. 农户玉米收获环节损失影响因素分析[J]. 玉米科学, 2019, 27(1):164-168.  
GUO Yan, ZHANG Yi, ZHAN Peng, et al. Analysis on the influencing factors of farmers' corn harvest loss[J]. Corn Science, 2019, 27(1):164-168. (in Chinese)
- [12] 范国昌, 王惠新, 籍俊杰, 等. 影响玉米摘穗过程中籽粒破碎和籽粒损失率的因素分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4):72-74.  
FAN Guochang, WANG Huixin, JI Junjie, et al. Analysis of the factors affecting the rate of grain breakage and grain loss during corn ear picking[J]. Transactions of CSAE, 2002, 18(4):72-74. (in Chinese)
- [13] WANG Heng, CAO Shukun, XU Xiangqian, et al. Design of mathematical model of main working parts of grain combine harvester[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1213(4):042074.
- [14] 贺俊林, 佟金, 胡伟, 等. 辊型和作业速度对玉米收获机摘穗性能的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3):46-49.  
HE Junlin, TONG Jin, HU Wei, et al. Effect of roll type and operation speed on corn harvester's performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3):46-49. (in Chinese)
- [15] 佟金, 贺俊林, 陈志, 等. 玉米摘穗辊试验台的设计和试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11):48-51.  
TONG Jin, HE Junlin, CHEN Zhi, et al. Design and experiment of corn picking roller test bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11):48-51. (in Chinese)
- [16] 陈松涛, 周学建, 师清翔, 等. 玉米收获机摘穗装置运动参数特性研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2007, 28(1):64-66, 69.  
CHEN Songtao, ZHOU Xuejian, SHI Qingxiang, et al. Research on motion parameter characteristics of corn harvester ear picking device[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 28(1):64-66, 69. (in Chinese)
- [17] 耿端阳, 李玉环, 孟凡虎, 等. 玉米收获机多棱立辊式摘穗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3):84-91.  
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Fanhu, et al. Design and experiment of corn harvester multi edge vertical roller type ear picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):84-91. (in Chinese)
- [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 Duanyang, WANG Qian, LU Xiufeng, et al. Design and experiment of corn multi edge ear picking roller based on excitation theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):124-132. (in Chinese)
- [19] 陈睿鹏. 玉米茎秆倒伏角度和拉力角度实时测量方法研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2017.  
CHEN Ruipeng. Study on real time measurement method of corn stalk lodging angle and pulling angle[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [20] 王骞. 基于激振理论的玉米摘穗试验研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2020.  
WANG Qian. Experimental study on corn ear picking based on excitation theory[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] 马艳荣, 叶佳浩, 沈中宇. “椭圆及其标准方程”:从历史中寻找“火热的思考”[J]. 教育研究与评论(中学教育), 2020(1):30-37.  
MA Yanrong, YE Jiahao, SHEN Zhongyu. "Ellipse and its standard equation": looking for "hot thinking" from history[J]. Educational Research and Review (Middle School Education and Teaching), 2020(1):30-37. (in Chinese)