

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.014

基于激振理论的玉米多棱摘穗辊设计与试验

耿端阳¹ 王 骞¹ 鹿秀凤² 于兴瑞¹ 刘洋成¹ 金诚谦¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东理工职业学院机电工程学院, 济宁 272067)

摘要: 针对当前纵卧辊式玉米收获机作业存在籽粒啃伤严重和落粒损失大的问题,以激振理论为指导,以玉米果穗与茎秆分离为条件,建立了适于玉米机械化收获的玉米激振摘穗理论模型;以该激振摘穗模型为指导,构建并优化了适于玉米激振运动的摘穗辊外形结构和配置方式,开发了相应的激振摘穗试验台;采用 Box - Behnken 试验设计方法,研究了激振摘穗辊棱边数、振幅、摘穗辊转速对果穗摘穗过程籽粒破损率和落粒损失率的影响规律,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,激振摘穗装置中棱边数、振幅和摘穗辊转速对收获过程果穗籽粒破损率和落粒损失率有显著的影响。以非线性规划理论为指导,确定了最佳组合为摘穗辊转速 950 r/min、棱边数 8、振幅 0.75 cm,在该条件下进行了试验验证,得出平均籽粒破损率为 0.124%,平均落粒损失率为 0.228%,均低于国家玉米收获机械技术标准要求。

关键词: 玉米收获机; 激振; 摘穗; 籽粒破损率; 落粒损失率

中图分类号: S225.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)05-0124-09

Design and Experiment on Vertical Polygonal Roller Snapping Ears of Corn Harvester Based on Excitation Theory

GENG Duanyang¹ WANG Qian¹ LU Xiufeng² YU Xingrui¹ LIU Yangcheng¹ JIN Chengqian¹

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Science and Technology Career Academy, Jining 272067, China)

Abstract: Corn has become the first major crop in place of rice and wheat in recent years, thereby significantly influencing the lives of people given the increase in production of corn. Corn snapping roller is the main component of a corn harvesting machine and exerts a crucial effect on the quality of corn harvest. Aiming at the problems of serious grains gnawing and large loss of falling grains in the operation of vertical and horizontal roll corn harvester, a theoretical model of maize excitation heading suitable for mechanized harvesting was established under the condition of separation of ear and stalk of maize under the guidance of excitation theory. Under the guidance of the model, the shape structure and configuration of the picking roll suitable for the corn excitation movement were constructed and optimized, and the corresponding excitation heading test-bed was developed. Box - Behnken experimental design method was used to study the effects of key parameters such as edge number, amplitude and rotation speed of excitation picking roll on grain loss rate and gnawing rate during ear picking. The regression equation between experimental factors and inspection indexes was established, and the corresponding response surface was generated. The results showed that the number of edges, the amplitude and the rotation speed of the picking roll had significant effects on the grain loss rate and the gnawing rate during harvesting. Finally, under the guidance of the theory of non-linear programming, the best combination of the above three experimental factors was obtained, namely, the rotation speed of the picking roll of 950 r/min, the number of edges of 8, and the amplitude of 0.75 cm. Under these conditions, the average loss rate of corn grains during heading process was 0.228%, and the average breakage rate of corn grains was 0.124%, which was lower than the national technical standard of corn harvesting machinery. The research result provided theoretical support for the popularization and application of this technology.

Key words: corn harvester; exciting vibration; spikes; ear biting rate; grain loss rate

收稿日期: 2018-11-24 修回日期: 2019-02-08

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR201702180137)和山东省农机装备创新研发计划项目(2017YF004, 2016YF030)

作者简介: 耿端阳(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农机装备研究, E-mail: dygxt@sdu.edu.cn

0 引言

玉米收获是玉米生产环节中最重要、工作条件最艰苦的环节之一^[1-3],其机械化作业已成为降低收获成本、保障玉米安全贮存的关键^[4-7]。目前国内玉米收获机主要有两种摘穗结构^[8-9]:摘穗辊式结构和板式结构。摘穗辊式结构简单,摘穗效率高,但是由于果穗直接与高速转动、表面带有螺旋凸棱的摘穗辊持续接触,导致果穗啃伤和落粒损失较大^[10-11];板式结构虽然避免了果穗与旋转部件的直接接触,降低了果穗的啃伤率与落粒损失^[12-15],但带穗茎秆在拉茎辊作用下受到摘穗板的突然阻滞时,茎秆经常被拉断,易导致割台的堵塞^[16-17],特别是摘穗板间隙不合适时,该问题表现得尤为突出,严重影响玉米收获割台工作的可靠性^[18-19]。

为此,国内相关学者对新型摘穗原理与结构进行了研究^[20-21],张丽萍等^[22]研制的仿生掰穗装置,采用掰穗指自上而下掰断果柄,完成果穗与茎秆的分离,减小了摘穗过程的动力消耗,降低了籽粒的啃伤率;贺俊林^[18]从改进摘穗辊凸棱结构入手,将摘穗辊表面凸棱结构改为沿果穗运动方向的流线型结构,使其形状与玉米果穗根部外缘的统计形状相互切合,降低了螺旋凸棱对果穗的啃伤,取得了较好的试验效果;赵排航等^[23]采用惯性摘穗原理,研制了一种基于惯性力折断果柄的新型玉米摘穗机构,对低损摘穗方式进行了有益的探索。耿端阳等^[24]开发了基于激振摘穗的立辊式穗茎兼收玉米收获机,利用激振摘穗方式在保证割台工作可靠性的同时,果穗啃伤与落粒损失得到明显控制,且减小了作业过程的功率消耗,提高了果穗的收获效率。

为进一步完善玉米机械化收获理论,本文基于激振摘穗原理,对激振摘穗辊进行关键结构设计及参数确定,进而通过试验对激振摘穗辊的设计参数进行验证和优化,以为激振摘穗装置的设计提供理论依据。

1 低损高效激振摘穗原理

针对当前辊式玉米收获过程中果穗啃伤和籽粒啃落问题,本文基于激振原理,与雷沃重工国际股份有限公司联合开发了多棱立辊式摘穗玉米收获机,其摘穗原理如图1所示。

作业时,随着两摘穗辊的相对向内转动,茎秆被夹持输送通过两摘穗辊间隙,由于两摘穗辊结构为异形棱柱结构,所以在摘穗辊转动过程,夹持茎秆的两个棱边在不断变化其位置,进而带动茎秆左右高

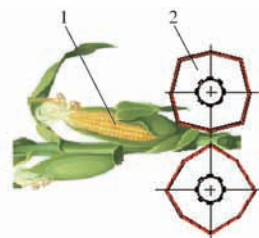


图1 多棱立辊摘穗原理示意图

Fig. 1 Schematic of vertical multi-polygonal snapping rollers

1. 玉米果穗 2. 多棱摘穗辊

频振动,特别是当果柄被摘穗辊夹持后,更强化了果穗的激振效果,当果穗获得大于果柄与果穗、果柄与茎秆之间连接的惯性力(折柄力矩)时,即可折断、挤断果柄完成果穗与茎秆的分离。因此研究激振摘穗机理,确定摘穗辊运动参数,优化摘穗辊结构成为优化摘穗结构、保证作业质量的关键。

2 果穗激振摘取理论与摘穗辊结构参数设计

由上述摘穗原理可知,激振摘穗的关键是由激振辊带动果穗产生高频振动,即茎秆在夹持输送过程受到摘穗辊夹持棱边位置不断变化的作用,使其产生高频振动,实现果穗与茎秆分离。为了简化分析,将茎秆振动过程描述为简谐运动。

2.1 简谐运动特性

简谐运动的运动学方程为

$$x = \delta \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中 δ ——简谐运动振幅, m

ω ——简谐运动角速度, rad/s

φ ——简谐运动初始相位, rad

该简谐运动波频特性如图2所示,图中 T 为简谐运动周期。

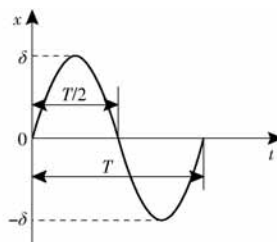


图2 简谐运动波频特性

Fig. 2 Wave-frequency characteristics of simple harmonic motion

由图2可知,简谐运动的波形变化主要受到振幅 δ 和频率 f 影响,其中振动频率

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2)$$

该简谐运动的速度和加速度为

$$x' = \delta \omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

$$x'' = -\delta \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

2.2 激振摘穗模型建立与参数确定

由式(4)可知,简谐运动过程果穗加速度 x'' 主要受到振幅 δ 和振动频率 f 影响,若要使果穗产生足够的惯性力,必须增大玉米茎秆振幅 δ 或者振动频率 f 。

玉米收获作业中,立式摘穗可以避免果穗与旋转摘穗辊的持续接触,且其转速较高,其中避免果穗与摘穗辊的持续接触可以减少果穗的啃伤和籽粒的啃落;而较高的转速不仅有利于提高作业效率,而且有利于果穗产生较大的激振力,保证了果穗与茎秆的可靠分离,因此本激振摘穗技术选择了高速立式割台配合能引起激振作用的激振摘穗方式完成果穗与茎秆的分离。

为使茎秆产生周期性的往复振动,该摘穗辊采用能够实现自激振动的异型多棱摘穗辊结构,即其棱边分别位于两个不同直径的同心圆周上,两圆的半径差即为茎秆振动的有效振幅 δ ,其中直径小的圆为基圆,直径大的为顶圆。设摘穗辊转速为 n_1 ,摘穗辊基圆直径为 d ,则顶圆直径为 $d+2\delta$ 。为简化模型,假设激振波的初始相位为 0 rad ,果穗与果柄之间的连接力为 F_1 ,果柄与茎秆之间的连接力为 F_2 ,果穗质量为 m ,则其激振摘穗模型可以近似描述为

$$y = d/2 + \delta \sin(\omega t) \quad (5)$$

茎秆夹持输送过程振动所产生的惯性力主要由振动频率 f 和振幅 δ 决定,该系统中,由于两摘穗辊棱边每转换一次,则茎秆振动方向改变一次,因此带穗茎秆振动频率由摘穗辊角速度和摘穗辊棱边数共同决定;为了防止摘穗辊转速过高导致的机器剧烈振动,设计时优先选择增加摘穗辊的棱边数来提高激振频率。设摘穗辊每转一周的激振频率为 n_2 (即摘穗辊棱边数 n),则摘穗辊工作过程产生的激振频率为

$$f_1 = \frac{n_1 n_2}{60} \quad (6)$$

根据振动力学^[25] 设 f_1 为外界激振频率, f_2 为玉米植株激振响应频率,可知

$$\begin{cases} f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} = \frac{\omega}{2\pi} \\ f_2 = f_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{得} \quad f_2 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{n_1 n_2}{60} \quad (8)$$

$$\text{因此} \quad \omega = \frac{2\pi n_1 n_2}{60} \quad (9)$$

进而可得激振作用下惯性力的振动周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{60}{n_1 n_2} \quad (10)$$

因此,满足上述条件的摘穗辊激振模型为

$$y = \frac{d}{2} + \delta \sin(\omega t) = \frac{d}{2} + \delta \sin\left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60} t\right) \quad (11)$$

相应地,摘穗辊运动过程的运动速度、加速度分别为

$$y' = \frac{2\pi n_1 n_2}{60} \delta \cos\left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60} t\right) \quad (12)$$

$$y'' = -\left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60}\right)^2 \delta \sin\left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60} t\right) \quad (13)$$

进而得果穗在摘穗辊激振作用下的惯性力为

$$F = ma = my'' = -m \left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60}\right)^2 \delta \sin\left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60} t\right) \quad (14)$$

式中 a ——加速度

由式(14)可以看出,玉米果穗在激振输送过程中,果穗质量 m 为玉米固有特性,视为常量,因此其惯性力 F 主要由振幅 δ 、摘穗辊转速 n_1 及摘穗辊每转一周的激振频率 n_2 (即摘穗辊棱边数 n) 决定,且该惯性力并非一个恒定值,而是一个周期性变化的值,激振摘穗效果主要由惯性力最大值决定,其最大值为

$$\begin{cases} F_{\max} = -m\delta \left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60}\right)^2 \\ F_{\min} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

即惯性力 $F \in \left[0, -m\delta \left(\frac{2\pi n_1 n_2}{60}\right)^2\right]$,其中“ $-$ ”表示力的方向。

结合玉米摘穗过程茎秆夹持摘穗的要求,摘穗辊间隙为茎秆直径的 $1/3 \sim 1/2$ ^[26];摘穗辊转速大,虽然可以提高摘穗效率,有利于提高激振效果,但是过大会导致茎秆的早期断裂,影响工作的可靠性,所以本文参考文献[26],初选激振辊转速为 950 r/min ;对于激振振幅 δ ,过小可能导致振动效果的下降,过大导致摘穗辊直径增大以及茎秆的过早断裂,所以激振波振幅根据试验初步确定为 $6 \sim 8 \text{ mm}$ 。

2.3 激振波优化

正弦激振波可能导致摘穗辊结构过于复杂,制造成本上升,且激振力主要由激振频率和振幅决定,其中间过程对摘穗效果影响相对较小,所以工程上对其波形进行简化,即在不改变激振频率和振幅的条件下,将激振波的峰值用直线连接起来,从而使正弦激振波变为锯齿激振波 $oabc$,如图3所示。

作业所需的激振波由一对摘穗辊产生,为保证摘穗过程中茎秆夹持输送的稳定性,尽量使两摘穗

辊间隙保持一致,因此两对置摘穗辊确定为异型辊,工作时所需的激振波形以锯齿激振波 $oabc$ 为基准,以摘穗辊间隙的一半为距离进行确定,即在 $oabc$ 上下两边绘制平行于 $oabc$ 的曲线 $o'a'b'c'$ 和 $o''a''b''c''$,所需激振波波形由 $o'a'b'c'$ 和 $o''a''b''c''$ 所形成的夹持通道决定,产生所需激振波形的两异型摘穗辊外形结构也分别由 $o'a'b'c'$ 和 $o''a''b''c''$ 曲线来确定,如图3所示。

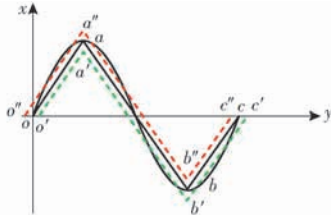


图3 激振波波形优化与实现

Fig.3 Optimization and realization of excitation wave shape

2.4 摘穗辊结构参数设计

摘穗辊的外形结构对茎秆的激振规律有很大的影响,需将上述激振波形落实到摘穗辊的结构上。

2.4.1 摘穗辊基圆直径

根据前期研究^[24,27],摘穗辊直径 d 取值范围可确定为 6.8 ~ 8.1 cm (即基圆直径)。

为保证玉米茎秆按照理论激振波形式振动,将摘穗辊外形设计为多棱柱形结构,以使夹持茎秆的棱边位置变化带动茎秆实现循环往复的激振作用,其激振摘穗辊外圆(顶圆)直径为 $d_1 = d + 2\delta$ 。

2.4.2 摘穗辊棱边数

对于不同基圆与顶圆直径,其棱边数和长度各不相同;为防止茎秆在挤压夹持过程缠绕在摘穗辊表面,要求摘穗辊外形结构为凸棱多边形。

如图4所示,内圆为摘穗辊基圆(即较小半径的棱边所在圆周),外圆为摘穗辊顶圆(即较大半径的棱边所在圆周),为了保证摘穗辊为凸棱多边形,先由外圆选取一点 A ,从 A 点向内圆作切线 AB ,连接 OB ,记 OA 与 OB 的夹角为 α ,棱边数确定后,内圆中

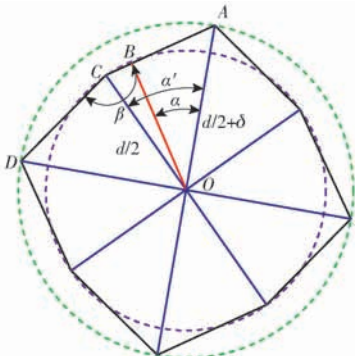


图4 摘穗辊棱边数与结构示意图

Fig.4 Determination of edge number and structure of spike roller

与 A 点相近较大棱角所在点取为点 C ,此时, OA 与 OC 夹角为 α' , AC 与 CD 夹角为 β , $\alpha' \geq \alpha$,且 β 取值范围为 $(90^\circ, 180^\circ)$ 。

由图4可知

$$\begin{cases} \tan\alpha = \frac{l_{AB}}{l_{OB}} \\ l_{AB} = \sqrt{l_{OA}^2 - l_{OB}^2} = \sqrt{\left(\frac{d}{2} + \delta\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \sqrt{\delta^2 + \delta d} \\ l_{OB} = \frac{d}{2} \end{cases} \quad (16)$$

式中 l_{AB} 、 l_{OA} 、 l_{OB} ——棱边 AB 、 OA 、 OB 的长度
所以

$$\alpha = \arctan \frac{\sqrt{\delta^2 + \delta d}}{\frac{d}{2}} = \arctan \frac{2\sqrt{\delta^2 + \delta d}}{d}$$

因 $\alpha' \geq \alpha$,所以棱边数 n 为

$$n \leq \text{int}\left(\frac{360}{\alpha}\right) = \text{int}\left(\frac{360}{\arctan \frac{2\sqrt{\delta^2 + \delta d}}{d}}\right) \quad (17)$$

结合前述分析,为了保证摘穗辊形成周期性激振效果,要求摘穗辊的棱边数为偶数,所以最终确定的最大棱边数 N 为

$$N = \begin{cases} n & (n \text{ 为偶数}) \\ n-1 & (n \text{ 为奇数}) \end{cases}$$

根据前文确定的摘穗辊基圆直径和激振波振幅所确定的初始值,当 d 为 6.8 ~ 8.1 cm, δ 为 6 ~ 8 mm 时,通过 Matlab 软件对式(17)进行计算,所得结果如图5所示,最大棱边数取值范围为 10 ~ 12。

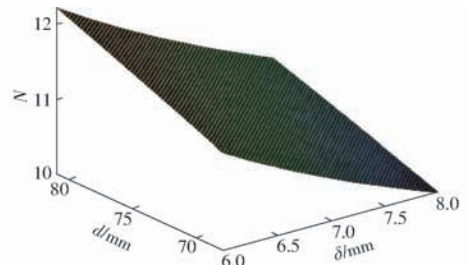


图5 最大棱边数取值范围

Fig.5 Range of maximum edge number

对棱边数和 β 的关系进行分析,当最大棱边数为 10 时, β 取值范围为 $[172.02^\circ, 179.9^\circ]$,见图 6a;当最大棱边数为 12 时, β 取值范围为 $[178.87^\circ, 180^\circ]$,见图 6b。显然,当棱边数为 12 时, A 、 C 、 D 接近共线,无法满足激振效果,因此确定最大棱边数为 10,其 β 最小为 172.02° ,振幅较小,但其同一速度下激振频率较大。在同一转速条件下,棱边数决定

了摘穗辊产生激振的频率和振幅,棱边数越多激振频率越高,但其振幅相对较小,确定合适的棱边数对产生理想的激振波,实现可靠的激振摘穗具有重要作用,结合前期研究,初步确定摘穗辊的棱边数为8,如图7所示,其 β 取值范围为 $[157.15^\circ, 163.52^\circ]$,最终棱边数通过试验进行优化确定。

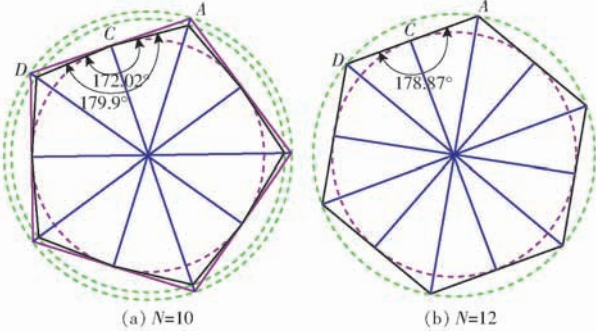


图6 最大棱边数下的 β 取值范围

Fig. 6 Range of angle β of maximum edge number

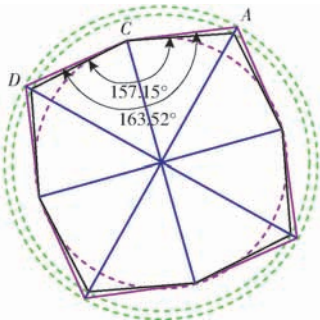


图7 $N=8$ 时的 β 取值范围

Fig. 7 Range of angle β at $N=8$

3 试验与分析

3.1 试验材料

试验在山东理工大学的多棱立辊摘穗装置试验台上进行,试验材料为山东省种植比较广泛的先玉335品种,试验时随机选取100株玉米为一组进行重复测量。其中试验用玉米植株的主要参数如表1所示。

表1 玉米植株参数

Tab. 1 Parameters of corn plant

参数	数值
株距/cm	22.92
植株高度/cm	246.03
最低结穗高度/cm	103.76
茎秆直径/cm	2.13
果穗大端直径/cm	4.53
果穗下垂率/%	16.89
籽粒含水率/%	34.57
茎秆含水率/%	87.67
果柄含水率/%	81.68

3.2 试验台及工作原理

多棱立辊摘穗装置试验台如图8所示,摘穗辊

由山东淄博长海调速电机有限公司生产的YCT112-4B型异步电磁阀调速电机进行驱动,转速调节范围 $0 \sim 1250 \text{ r/min}$,转速变化率小于3%。试验时,模拟大田作业中玉米茎秆先送到夹持输送装置与往复式切割器处,由往复式切割器将玉米茎秆从根部切断,夹持输送装置将切断后的玉米茎秆输送到多棱立辊处,由多棱立辊完成玉米摘穗过程。



图8 多棱立辊摘穗装置试验台

Fig. 8 Structure of polygonal vertical-roller shape test-bed

3.3 试验方法

为确定最优工作参数,寻找各参数对摘穗效果的影响规律,采用Box-Behnken响应曲面试验设计方法进行正交试验,结合前期预试验,选取影响摘穗效果的棱边数、振幅和摘穗辊转速为试验因素,以籽粒破损率和落粒损失率为试验指标,开展三因素三水平的Box-Behnken响应曲面试验^[28-29],各因素编码如表2所示,每组试验重复3次,取平均值作为试验结果。

表2 试验因素编码

Tab. 2 Factors and coding of experiment

编码	因素		
	振幅 x_1 / cm	棱边数 x_2	摘穗辊转速 x_3 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
-1	0.6	6	900
0	0.7	8	950
1	0.8	10	1000

试验中选择评价玉米收获质量的籽粒破损率和落粒损失率作为考核指标。其中籽粒破损率

$$Y_1 = \frac{W_s}{W_z} \times 100\% \quad (18)$$

落粒损失率

$$Y_2 = \frac{W_l}{W_z} \times 100\% \quad (19)$$

式中 W_s ——有损伤、明显裂纹以及破皮的籽粒质量,kg

W_l ——落地籽粒质量,kg

W_z ——籽粒总质量,kg

3.4 试验结果及分析

3.4.1 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,以籽粒破损率和落粒损失率作为试验考核指标。试验总次数共计17次,其中12组为析因点,5组作为零点,零点试验重复多次,以估计试验误差。试验方案和结果见表3(X_1 、 X_2 、 X_3 分别为振幅、棱边数、摘穗辊转速的编码值)。试验数据经 Design-Expert 软件处理后,得出籽粒破损率、落粒损失率的方差分析结果,如表4、5所示。

表3 试验方案与结果

Tab.3 Test design scheme and results

序号	振幅 X_1	棱边数 X_2	摘穗辊 转速 X_3	籽粒破损率 $Y_1/\%$	落粒损失率 $Y_2/\%$
1	-1	-1	0	0.30	1.04
2	1	-1	0	0.34	1.14
3	-1	1	0	0.19	0.71
4	1	1	0	0.56	0.92
5	-1	0	-1	0.12	0.23
6	1	0	-1	0.29	0.52
7	-1	0	1	0.11	0.22
8	1	0	1	0.34	0.58
9	0	-1	-1	0.42	0.97
10	0	1	-1	0.20	0.28
11	0	-1	1	0.34	1.22
12	0	1	1	0.23	0.48
13	0	0	0	0.25	0.78
14	0	0	0	0.28	0.81
15	0	0	0	0.30	0.78
16	0	0	0	0.29	0.82
17	0	0	0	0.27	0.77

表4 籽粒破损率方差分析结果

Tab.4 Variance analysis result of ear biting rate

变异来源	离均差 平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.160	9	0.017	4.520	0.0269*
X_1	0.082	1	0.082	21.500	0.0024**
X_2	6×10^{-3}	1	6×10^{-3}	1.590	0.2483
X_3	1×10^{-5}	1	1×10^{-5}	0.003	0.0240*
X_1X_2	0.027	1	0.027	7.140	0.0319*
X_1X_3	9×10^{-4}	1	9×10^{-4}	0.240	0.6420
X_2X_3	3×10^{-3}	1	3×10^{-3}	0.790	0.0280*
X_1^2	1×10^{-4}	1	1×10^{-4}	0.047	0.8352
X_2^2	0.024	1	0.024	6.370	0.0395*
X_3^2	0.013	1	0.013	3.520	0.0125**
残差	0.027	7	3×10^{-3}		
失拟	0.025	3	8×10^{-3}	22.730	1.2145
纯误差	1×10^{-3}	4	3×10^{-4}		
误差	0.18	16			

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

对表4、5中数据进行二次多元回归拟合,剔除不显著因素,得到籽粒破损率和落粒损失率与各因素编码值间的二次多元回归方程为

表5 落粒损失率方差分析结果

Tab.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	1.33	9	0.150	7.75	0.0066**
X_1	0.12	1	0.120	6.06	0.0434*
X_2	0.49	1	0.490	25.77	0.0014**
X_3	0.03	1	0.030	1.64	0.0247*
X_1X_2	3.0×10^{-3}	1	3.0×10^{-3}	0.16	0.7019
X_1X_3	1.2×10^{-3}	1	1.2×10^{-4}	0.06	0.8069
X_2X_3	6.2×10^{-4}	1	6.2×10^{-4}	0.03	0.8613
X_1^2	0.03	1	0.038	1.99	0.0214*
X_2^2	0.27	1	0.270	14.42	0.0067**
X_3^2	0.40	1	0.400	21.24	0.0025**
残差	0.13	7	0.019		
失拟	0.13	3	0.043	93.09	0.9714
纯误差	1.8×10^{-3}	4	4.7×10^{-4}		
误差	1.46	16			

$$Y_1 = 0.28 + 0.1X_1 + 0.012X_3 + 0.083X_1X_2 + 0.027X_2X_3 + 0.076X_2^2 - 0.057X_3^2 \quad (20)$$

$$Y_2 = 0.79 + 0.12X_1 - 0.25X_2 + 0.06X_3 - 0.095X_1^2 + 0.26X_2^2 - 0.31X_3^2 \quad (21)$$

由表4方差分析及回归方程可知,影响因子 X_1 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 对籽粒破损率的影响显著,其他因子影响不显著,且各因子对籽粒破损率的显著性由大到小依次为振幅、摘穗辊转速、棱边数。

由表5可知,影响因子 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对落粒损失率影响显著,其他因子影响不显著,且各因子对落粒损失率的显著性由大到小依次为棱边数、摘穗辊转速、振幅。

由方差分析结果可以看出,棱边数对籽粒破损率和落粒损失率均有显著影响,这是由于在摘穗辊转速一定的情况下,棱边数反映激振频率大小进而影响激振效果,这与多棱立辊摘穗装置设计中棱边数对玉米摘穗质量影响的研究结论一致^[24]。

3.4.2 响应曲面分析

应用响应曲面法分析各因素交互作用对籽粒破损率和落粒损失率的影响,即固定3个因素中1个因素为0水平,考察其他2个因素对籽粒破损率和落粒损失率的影响^[28]。

(1)当摘穗辊转速为950 r/min时,得到振幅与棱边数对籽粒破损率和落粒损失率的影响,如图9所示。随着振幅的增大,籽粒破损率和落粒损失率均呈上升趋势,这是因为激振摘穗过程中,振幅的增加导致果穗与摘穗辊的碰撞几率上升,造成摘穗质量下降;随着棱边数的增加,籽粒破损率和落粒损失率表现出先下降后上升的趋势,这是因为棱边数影

响了激振频率,随着棱边数的增加,激振频率逐渐升高,摘穗过程中激振惯性力增大,更容易折断果柄,降低了果穗与摘穗辊接触的几率,因此摘穗质量提高,但过多的棱边数会使果穗振动幅度过低,使激振过程中折柄效果下降,增大了挤断果柄的几率,造成摘穗质量下降。

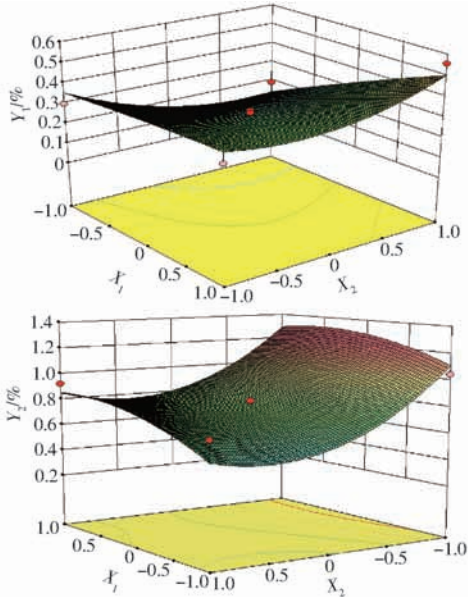


图9 棱边数和振幅的交互作用

Fig. 9 Interaction between edge number and amplitude

(2)当棱边数为8时,得到振幅与摘穗辊转速对籽粒破损率和落粒损失率的影响,如图10所示。随着振幅的增加,籽粒破损率与落粒损失率同样表现出上升的趋势,这是因为振幅对摘穗质量影响显著,振幅的增加增大了果穗与摘穗辊的碰撞几率,因此摘穗质量逐渐下降;随着摘穗辊转速的增加,籽粒破损率与落粒损失率呈先升高后降低的趋势,这是因为随着转速的增加,摘穗辊对玉米果穗的冲击也随之增大,进而造成籽粒破损与啃落,但过大的摘穗辊转速势必造成激振力过大,容易导致茎秆折断,玉米果穗伴随着折断的玉米茎秆掉落,籽粒破损率与落粒损失率又因此有所下降。

(3)当摘穗辊振幅为0.7 cm时,得到摘穗辊棱边数与摘穗辊转速对籽粒破损率和落粒损失率的影响,如图11所示。随着摘穗辊转速的增加,籽粒破损率及落粒损失率均表现出先升高、后降低的趋势,这是因为在振幅一定的情况下,摘穗辊转速对果穗的冲击影响显著,因此籽粒破损率及落粒损失率均随摘穗辊转速增大呈上升趋势,但过高的转速导致激振力过大,容易造成茎秆的折断,最终使籽粒破损率与落粒损失率表现出先升高后降低的结果;随着棱边数的增加,籽粒破损率和落粒损失率均先降低,后趋于稳定,这是因为在振幅一定的情况下,随着棱

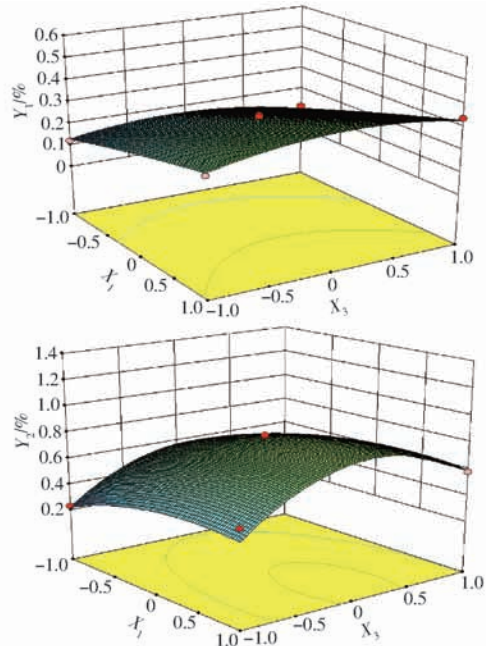


图10 摘穗辊转速和振幅的交互作用

Fig. 10 Interaction between rotation speed of picking roll and amplitude

边数的增加,果穗激振频率逐渐增加,因此更容易折断果柄,降低果穗与摘穗辊碰撞的几率,因此摘穗质量上升,当棱边数过多时,由于受摘穗辊转速交互作用的影响,导致摘穗能力受限,因此摘穗质量趋于稳定。

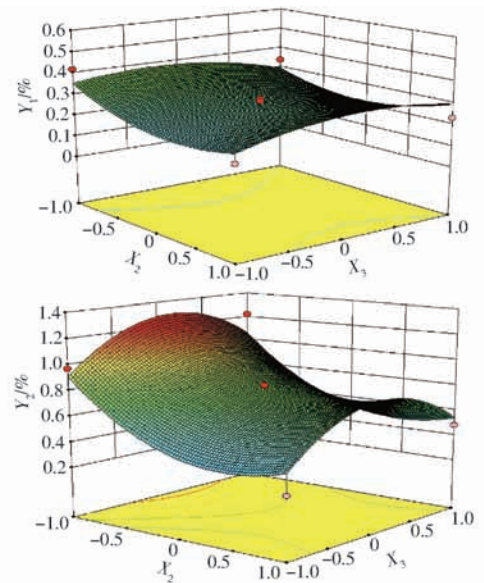


图11 棱边数和摘穗辊转速的交互作用

Fig. 11 Interaction between edge number and rotation speed of picking roll

3.4.3 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,即多棱立辊摘穗装置最佳设计参数,对试验进行优化设计,建立参数化数学模型,对籽粒破损率和落粒损失率的回归方程进行分析,创建目标函数

$F = Y_1 + Y_2$, 依据 GB/T 21962—2008《玉米收获机械技术条件》, 得到其非线性规划的数学模型

$$\begin{cases} \min F = Y_1 + Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} Y_1 \leq 1\% \\ F \leq 4\% \\ 0.6 \text{ cm} \leq x_1 \leq 0.8 \text{ cm} \\ 6 \leq x_2 \leq 10 \\ 900 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 1000 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

圆整优化结果可知, 当振幅为 0.75 cm, 棱边数为 8, 摘穗辊转速为 950 r/min 时, 玉米摘穗效果最优, 在该条件下籽粒破损率为 0.12%, 落粒损失率为 0.23%。

为验证优化分析结果的正确性, 在最优参数组合下对摘穗效果进行试验验证, 试验重复 5 次, 试验结果如表 6 所示, 对试验结果取平均值, 结果表明籽粒破损率为 0.124%, 落粒损失率为 0.228%, 圆整优化结果可信。

4 结论

(1) 借助简谐振动理论, 建立了激振摘穗的数学模型, 并分析了激振摘穗模型中 3 个主要参数对

摘穗效果的影响规律。根据激振摘穗模型, 确定了激振摘穗辊结构的设计方法。

表 6 验证试验结果

Tab. 6 Optimization test result

序号	籽粒破损率	落粒损失率
1	0.12	0.21
2	0.13	0.24
3	0.12	0.22
4	0.11	0.24
5	0.14	0.23

(2) 搭建了多棱立辊摘穗装置试验台, 并通过 Box - Behnken 试验建立了多棱立辊设计参数(包括摘穗辊棱边数、摘穗辊振幅和摘穗辊转速)与籽粒破损率和落粒损失率的回归方程。

(3) 选取摘穗辊棱边数、摘穗辊振幅和摘穗辊转速为主要因素, 利用 Box - Behnken 试验方法进行三因素三水平旋转正交试验, 确定了最优参数组合为摘穗辊振幅 0.75 cm、摘穗辊棱边数 8、摘穗辊转速 950 r/min, 并对最优参数组合进行了验证试验, 试验结果表明, 平均籽粒破损率为 0.124%, 平均落粒损失率为 0.228%。

参 考 文 献

- [1] 石柱春, 刘熙. 玉米加工利用的现状与途径[J]. 玉米科学, 1998, 6(4): 67 - 69.
SHI Guichun, LIU Xi. The present situation and channel of processing and utilizing maize[J]. Maize Science, 1998, 6(4): 67 - 69. (in Chinese)
- [2] 石庆龙. 我国发展特殊用途玉米经济的研究[J]. 吉林师范大学学报(人文社会科学版), 2006, 34(4): 32 - 35.
SHI Qinglong. Research on the developing special use of corn economy[J]. Journal of Jinlin Normal University (Humanities & Social Science Edition), 2006, 34(4): 32 - 35. (in Chinese)
- [3] 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 Xuewen. Study on the relationship between supply and demand in China's corn market[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [4] 杨红旗, 路凤银, 郝仰坤, 等. 中国玉米产业现状与发展问题探讨[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 368 - 373.
YANG Hongqi, LU Fengyin, HAO Yangkun, et al. Situation analysis and development strategy of maize industry in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6): 368 - 373. (in Chinese)
- [5] 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 Fuping, CHEN Zhi. Actuality of domestic and foreign corn harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(10): 206 - 208. (in Chinese)
- [6] 王瑛瑶, 张翠萍. 玉米收获机械发展现状及建议[J]. 农业工程, 2013, 3(5): 34 - 36.
WANG Yingyao, ZHANG Cuiping. Development status quo and suggestions of corn harvester[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(5): 34 - 36. (in Chinese)
- [7] 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 Lulu. The present situation of corn snapping device and its expectation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1): 228 - 231. (in Chinese)
- [8] 耿爱军, 杨建宁, 张姬, 等. 玉米摘穗收获机械损伤影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 56 - 62.
GENG Aijun, YANG Jianing, ZHANG Ji, et al. Influence factor analysis of mechanical damage on corn ear picking[J]. Transactions of the CASE, 2016, 32(22): 56 - 62. (in Chinese)
- [9] 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. Research and development of testing device with snapping rolls for corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 48 - 51. (in Chinese)
- [10] 梁晓军. 纵卧辊式玉米收获机收获损失试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

- LIANG Xiaojun. Experimental study of maize seed damage during operating of harvester with length ways-horizontal rollers [D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [11] 贾洪雷, 王刚, 赵佳乐, 等. 间距自适应差速玉米摘穗辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 97-102.
JIA Honglei, WANG Gang, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of space-adaptive differential snapping rollers for corn harvester [J/OL]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 97-102. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150314&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.014. (in Chinese)
- [12] SHINNERS K J, ADSIT G S, BINVERSIE B N, et al. Single-pass, split-stream harvest of corn and stover[J]. Transactions of ASABE, 2007, 50(2): 355-363.
- [13] SHINNERS K J, BOTTCHEER G C, HOFFMAN D S, et al. Single-pass harvest of corn grain and stover: performance of three harvester configurations[J]. Transactions of ASABE, 2009, 52(1): 51-60.
- [14] BREBECK J. Reliability the key for ready-to-go harvesters[J]. Engines & Drives, 1990, 56(9): 34-36.
- [15] 闫洪余, 陈晓光, 吴文福. 立辊式玉米收获机试验台的设计[J]. 农机化研究, 2008, 30(12): 75-78.
YAN Hongyu, CHEN Xiaoguang, WU Wenfu. Design of test bench on vertical-roll type corn harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(12): 75-78. (in Chinese)
- [16] 闫洪余. 立辊式玉米收获机关键部件工作机理及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
YAN Hongyu. Working mechanism and experimental research on key components of vertical roll-type corn harvester [D]. Changchun: Jinlin University, 2009. (in Chinese)
- [17] 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 Hongyu, WU Wenfu, HAN Feng, et al. Effects of the type of the snapping rolls of vertical corn harvester on harvesting performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 76-80. (in Chinese)
- [18] 贺俊林. 低损伤玉米摘穗部件表面仿生技术和不分行喂入机构仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
HE Junlin. Biomimetic surfaces of snapping rolls with lower damage action and simulation of no-row feed-in mechanism of maize harvesters [D]. Changchun: Jinlin University, 2007. (in Chinese)
- [19] 刘枫. 穗茎兼收型立式摘穗辊玉米收获机的关键部件研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
LIU Feng. Primary structure study on the vertical snapping roller of corn combine harvester for both ears and stalks [D]. Changchun: Jinlin University, 2007. (in Chinese)
- [20] 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, 2011.
WANG You. The basic research in the mechanism of the new corn picker [J]. Changchun: Jinlin University, 2011. (in Chinese)
- [21] 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, 2015.
ZHANG Li. The oretical analysis and simulation research on novel bionic corn-ear snapping mechanism [D]. Changchun: Jinlin University, 2015. (in Chinese)
- [22] 张丽萍, 李其昀. 仿生玉米掰穗装置掰穗速度与功耗试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 9-14.
ZHANG Liping, LI Qiyun. Speed of bionic breaking corn ear hand and experiment on power consumption [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 9-14. (in Chinese)
- [23] 赵排航, 王克印, 黄海英, 等. 一种新型玉米收获机摘穗装置设计与分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(3): 352-354, 360.
ZHAO Paihang, WANG Keyin, HUANG Haiying, et al. Design and analysis of a new type maize harvester ear picking device [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 352-354, 360. (in Chinese)
- [24] 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/OL]. 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 polygonal vertical-rollers snapping means [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 84-91. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170310&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.010. (in Chinese)
- [25] 赵军, 苗同臣. 振动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [26] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [27] 王骞, 何珂, 金诚谦, 等. 玉米激振摘穗机理分析与参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 249-257.
WANG Qian, HE Ke, JIN Chengqian, et al. Mechanism analysis and experiment optimization on parameters of maize exciting and picking [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 249-257. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s033&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.033. (in Chinese)
- [28] 王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报, 2005, 14(3): 236-240.
WANG Yongfei, WANG Chengguo. The application of response surface methodology [J]. Journal of Minzu University of China, 2005, 14(3): 236-240. (in Chinese)
- [29] FERREIRA S L C, BRUN R E, FERREIRA H S, et al. Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 597(2): 179-186.