

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.033

玉米激振摘穗机理分析与参数试验优化

王 骞¹ 何 珂¹ 金诚谦¹ 鹿秀凤² 耿端阳¹ 张国海¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东理工职业学院, 济宁 272067)

摘要: 针对玉米立式激振摘穗缺乏相应摘穗机理的深入研究,开展了玉米摘穗机理的探讨,确定了适合玉米高效低损摘穗的激振波频特性曲线,建立了激振摘穗模型,分析了夹持位置、激振频率和振幅对玉米摘穗效果的影响规律;采用激振试验台开展了夹持位置、振幅、频率对其摘穗性能影响规律的单因素试验,确定了满足玉米果穗摘穗的参数取值范围;通过响应面分析试验,确定了适合玉米高效摘穗的最佳参数组合,即在籽粒含水率 30.58% 情况下,其夹持位置距离果穗重心 10.8 cm、激振波振幅 0.6 cm、激振波频率 17.8 Hz 时,玉米摘穗断茎率为 2%,摘穗成功率为 98%,满足玉米收获的作业技术要求。

关键词: 玉米; 收获; 激振; 摘穗; 机理分析

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0249-09

Mechanism Analysis and Experiment Optimization on Parameters of Maize Exciting and Picking

WANG Qian¹ HE Ke¹ JIN Chengqian¹ LU Xiufeng² GENG Duanyang¹ ZHANG Guohai¹

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

2. Shandong Polytechnic College, Jining 272067, China)

Abstract: The theory of maize ear picking mechanism was studied based on the advantage of high efficiency and low-loss, and the influence of clamping position, vibration frequency and amplitude on the effect of maize ear picking was determined. The shocking spike model was established and the frequency characteristic curve suitable for the high efficiency and low-loss spike of maize was determined. The shocking and snapping experimental table designed by our own project team was adopted, the single factor influence rule of the clamping position, amplitude and frequency on the performance of snapping was carried out, and the parameter range was determined to satisfy the ear picking of corn. Under the condition of clamping position at 10.25 ~ 13.25 cm, amplitude at 0.5 ~ 1 cm and exciting frequency at 15 ~ 18.3 Hz, it had an ideal exciting effect. Based on the single factor test analysis and in order to ensure the best picking effect without breaking the stem, the response surface methodology was used to study the change rule of spike removal after coupling parameters. Through response surface ANOVA analysis, the response regression equation of the effect of clamping position, amplitude and frequency on stem breaking rate and picking success rate was obtained. And combined with the response surface image, the specific influence of clamping position, amplitude and frequency on stem breaking rate and picking success rate were obtained. Finally, through parameter optimization, the best parameter combination suitable for maize high efficiency spike removal was determined. When the moisture content of grain was 30.58%, its clamping position was 10.8 cm from the barycentric of the corn era. When the amplitude was 0.6 cm and the excitation frequency was 17.8 Hz. The stem breaking rate of maize was 2%, and the success rate of picking was 98%. The results fully met the technical requirements of corn harvest, and provided theoretical support for the development of corn harvester.

Key words: corn; harvest; exciting vibration; spiking; mechanism analysis

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR201702180137)和山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF037)

作者简介: 王骞(1992—),男,硕士生,主要从事现代农机装备研究,E-mail: 739075085@qq.com

通信作者: 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@sdut.edu.cn

0 引言

激振(周期性简谐振动)因具有特殊性能、可以完成特定功能而日益受到人们的重视^[1-3],在农业生产中的应用也越来越多^[4-6],在玉米收获领域^[7-10],国内相关学者也在振动学应用方面进行了尝试^[11],笔者所在课题组开发了基于激振摘穗的穗茎兼收玉米收获机^[12-14],作业效率得到较大提高、收获损伤得到明显控制,作业功耗降低 20% 以上,取得了重要的研究成果。为了进一步优化结构,完善玉米机械化收获理论,尚需对基于激振摘穗的摘穗机理进行深入研究。

本文通过建立激振摘穗边界条件,结合带穗茎秆振动模型,对玉米摘穗机理进行研究,得出影响带穗茎秆激振运动规律的主要参数,进而通过试验对影响激振摘穗的主要参数进行验证和优化,为激振摘穗优化设计提供理论参考。

1 激振摘穗机理分析

1.1 激振摘穗边界条件的建立

根据前期研究可知,通过激振作用可以实现玉米果穗与茎秆的分离,但为了促使该技术在玉米收获装备上的应用,优化摘穗效果和结构,还必须掌握激振波频特性对摘穗效果的影响规律。激振摘穗是在茎秆切断后由激振摘穗辊在茎秆夹持输送过程产生强烈的激振作用实现果穗与茎秆的分离,故对处于夹持输送过程产生激振运动的果穗进行受力分析,如图 1 所示。带穗茎秆在激振力 F' 的作用下做高频受迫振动,即简谐振动,此时该简谐运动的加速度可表示为

$$x'' = -4A\pi^2 f^2 \sin(2\pi ft + \varphi) \tag{1}$$

式中 A ——激振波振幅
 f ——振动频率 φ ——初相位
 t ——时间

由式(1)可知,带穗茎秆所受激振力由激振波振幅 A 与频率 f 共同决定^[12],由此位于茎秆上的果穗获得振动位移响应与加速度响应,进而获得摘穗惯性力 F ,当该惯性力 F 大于果柄与茎秆或者果穗与果柄的连接力 F_0 ,即 $F > F_0$ 时,即可实现果穗与茎秆的分离,完成摘穗作业。由于激振力必须通过茎秆才能传递到果穗,所以要保证成功摘穗,应以茎秆不折断为前提。由图 1 可知,设激振摘穗过程果穗所产生的摘穗惯性力 F 对回转中心 O 产生弯矩 M ,力臂为 R ,对茎秆的弯曲应力为 σ 。此时

$$M = FR \tag{2}$$

果柄所受的弯曲应力为

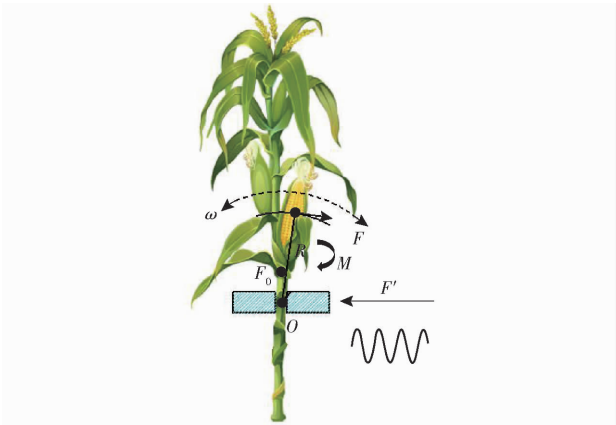


图 1 激振摘穗原理图

Fig. 1 Schematic of exciting spike

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{32FR}{\pi d^3} \tag{3}$$

式中 d ——果柄直径 W ——抗弯截面系数
显然,若要在茎秆不折断的情况下摘下果穗,则需弯曲应力 σ 小于茎秆的许用弯曲应力 $[\sigma]$,综上所述得到激振摘穗的边界条件为: $F_0 < F, \sigma < [\sigma]$ 。

1.2 带穗茎秆振动模型

由激振摘穗原理可知,激振摘穗过程玉米茎秆所受惯性力由摘穗辊提供,在该激振力作用下玉米果穗的运动可以看作是在简谐振动波激励下的单自由度强迫振动,其波形为图 2 所示的正弦激振波,因此,在保证能够描述系统行为的情况下,该激振摘穗物理模型可以描述为单自由度系统在周期激励下的强迫振动^[15],其周期激励下的振动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(x) \tag{4}$$

式中 m ——玉米果穗质量,kg
 x ——振动位移,cm
 c ——振动阻尼系数
 k ——刚度

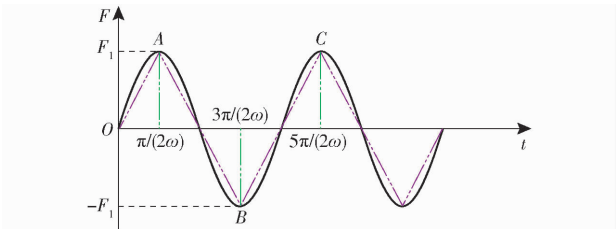


图 2 激振波优化图

Fig. 2 Excitation wave optimization diagram

其中激振力 $F(t)$ 是激振波周期为 T 的函数,其大小由激振波振幅及频率共同决定,考虑到振动过程中阻尼较小可忽略不计^[15],且该函数在周期 T 内可微,因此为分段光滑函数,用傅里叶级数展开后可表达为

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2n\pi}{T} t \tag{5}$$

其中
$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) dt \tag{6}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin \frac{2n\pi t}{T} dt \tag{7}$$

式中 a_0, b_n ——傅里叶变换展开系数
 n ——激振波周期数

由振动力学可知,玉米果穗在此条件下相对应的响应方程为

$$x(t) = \frac{a_0}{2k} + \sum_{n=1}^P \frac{\beta_n}{k} b_n \sin \frac{2n\pi t}{T} \tag{8}$$

$(P = 1, 3, 5, \dots)$

其中
$$\beta_n = \frac{1}{1 - n^2 r^2} \tag{9}$$

$$r = \frac{2\pi}{T\omega} \tag{10}$$

$$\omega = 2\pi f$$

式中 r ——频率比 ω ——角速度

由图 2 可得 $F(t)$ 函数表达式为

$$F(t) = \begin{cases} \frac{2\omega}{\pi} F_1 t & \left(\left[0, \frac{\pi}{2\omega} \right] \right) \\ 2F_1 \left(1 - \frac{\omega}{\pi} t \right) & \left(\left[\frac{\pi}{2\omega}, \frac{3\pi}{2\omega} \right] \right) \\ F_1 \left(\frac{2\omega}{\pi} t - 4 \right) & \left(\left[\frac{3\pi}{2\omega}, \frac{2\pi}{\omega} \right] \right) \end{cases} \tag{11}$$

此时

$$a_0 = \frac{F_1}{T} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} \frac{2\omega}{\pi} t dt + 2 \int_{\frac{\pi}{2\omega}}^{\frac{3\pi}{2\omega}} \left(1 - \frac{\omega}{\pi} t \right) dt + \int_{\frac{3\pi}{2\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} \left(\frac{2\omega}{\pi} t - 4 \right) dt \right] = \frac{7\pi F_1}{4\omega T} \left(\frac{\pi^2}{\omega^2} - 1 \right) \tag{12}$$

$$b_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} \frac{2\omega}{\pi} F_1 t \sin(n\omega t) dt + \frac{\omega}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2\omega}}^{\frac{3\pi}{2\omega}} \left(1 - \frac{\omega t}{\pi} \right) 2F_1 \sin(n\omega t) dt + \frac{\omega}{\pi} \int_{\frac{3\pi}{2\omega}}^{\frac{2\pi}{\omega}} \left(-4 + \frac{2\omega t}{\pi} \right) F_1 \sin(n\omega t) dt = \frac{8F_1}{n^2 \pi^2} \sin \frac{n\pi}{2} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \tag{13}$$

式中 F_1 ——最大激振力

代入式(8),可得玉米果穗在周期激振力作用下的强迫振动输出响应方程为

$$x(t) = \frac{7\pi F_1}{8k\omega T} \left(\frac{\pi^2}{\omega^2} - 1 \right) + \frac{8F_1}{k\pi^2} \sum_{n=1}^P \frac{\beta_n}{n} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{2n\pi t}{T} \tag{14}$$

$(P = 1, 3, 5, \dots)$

由式(14)可知,玉米果穗的振动输出响应由最大激振力 F_1 、激振波频率 f 以及玉米茎秆的刚度 k

共同决定。由于玉米自身的刚度属于其固有物理特性,激振波频率与外界激振力频率相同,所以玉米果穗在激振作用下的振动响应主要受外界最大激振力 F_1 ,即激振力振幅及频率的影响,因此可以通过控制激振力振幅 A 及频率 f 的方式控制果穗振动响应力,进而得出幅-频变化与激振摘穗效果的内在联系以及获得最佳激振响应方程。

结合激振摘穗边界条件,成功摘穗需在保证茎秆不断的条件下实现,因此,研究激振力振幅 A 、频率 f 及夹持位置力臂 R ,3 个参数耦合作用对摘穗效果的影响成为激振摘穗机理研究的关键。

2 试验方法

为了探索激振参数及其耦合条件对摘穗效果的影响,在山东理工大学农机性能实验室内开展了相关激振摘穗试验。

2.1 试验设备

建立了能实现激振摘穗效果的激振摘穗试验台,其结构如图 3a 所示,工作过程如图 3b 所示。该试验台由变频器、驱动圆盘、驱动电机、夹持装置、振幅可调摇杆、机架及连杆组成。工作时通过电机作用,带动驱动圆盘做圆周运动,进而驱动圆盘拉动连杆、连杆拉动振幅可调摇杆,摇杆带动夹持装置做高频往复摆动,由其对夹持的茎秆施加高频振荡。其振动频率由电机转速控制,振幅通过上下移动摇杆进而改变位置调整螺栓与摇杆的连接位置进行调整,其中连接位置为螺栓在摇杆长条孔上的固定位置,夹持位置通过人为改变玉米在夹持机构上的固定位置进行调整。

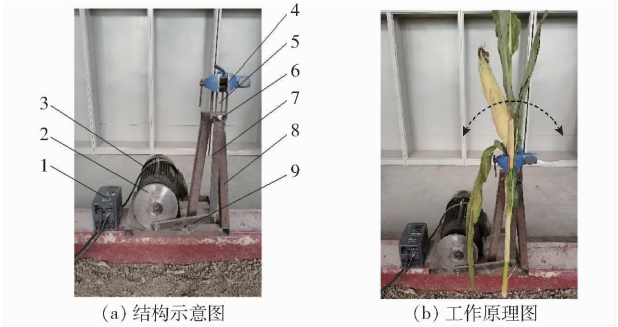


图 3 激振摘穗试验台

Fig. 3 Exciting spike test rig

1. 变频器 2. 驱动圆盘 3. 驱动电机 4. 夹持装置 5. 摇杆长条孔 6. 位置调整螺栓 7. 振幅可调摇杆 8. 机架 9. 连杆

2.2 试验材料

试验材料为山东省广泛种植的登海 6702,试验用玉米植株取自山东省淄博市周村区东马庄村,其物理特性通过实测方式确定,即随机抽取 100 株试验用玉米植株测量,重复 3 次,得到植株的主要物理

参数如表 1 所示。

表 1 玉米植株参数
Tab. 1 Maize plant parameters

参数	数值
植株高度/cm	256
最低结穗高度/cm	113
茎秆直径/cm	2. 2
果穗长度/cm	20. 5
果穗下垂率/cm	1. 22
籽粒含水率/%	30. 58

2.3 试验条件与方法

根据上述激振摘穗机理分析可知,激振摘穗过程中的茎秆夹持位置、激振波振幅、频率是影响摘穗效果的重要参数,因此试验选择上述 3 个参数为试验因素。

夹持位置:考虑夹持点位置不同,果穗产生的响应以及由激振作用产生激振力和折柄力矩也不相同,所以选取夹持点到果穗重心的距离为夹持位置,其调整通过人为改变茎秆夹持位置方式控制,根据前文分析,力臂 R 即为夹持距离,因此,该夹持位置的最小夹持极限取为果柄根部,即距离果穗重心 10.25 cm 处,结合前期试验结果,将调整范围控制为 10.25 ~ 22.25 cm。

激振波振幅:如前所述,激振波振幅对激振力和折柄力矩有很大影响,所以本试验通过调整摇杆长度实现激振波振幅的控制,考虑到实际摘穗过程中收获机割台条件限制,将激振波振幅调整范围控制为 0.5 ~ 3 cm。

激振波频率:激振波频率由曲柄转速来控制,其中曲柄由山东亚鲁电机有限公司生产的 Y112M-6 型三相异步电机驱动(转速由英威腾 CHF100A-2R2G-S2 型矢量通用性变频器测定),调节范围为 0 ~ 2 000 r/min,从而实现激振摘穗频率可控在 0 ~ 33.3 Hz,根据文献[12],将激振频率初步确定为 15 ~ 21.7 Hz。

2.4 评价指标

考虑玉米激振摘穗是在茎秆不折断条件下,摘穗惯性力大于果柄与茎秆或者果穗与果柄之间的连接力时完成果穗的收获,且激振过程中未出现明显籽粒磕碰、破损现象,籽粒破损率远低于国家标准 1% 的要求,所以本文选择了激振过程的断茎率和摘穗成功率作为评价指标。

其中,摘穗试验中的断茎率 W_1 为

$$W_1 = \frac{N_1}{N} \times 100\%$$
 (15)

摘穗成功率 W_2 为

$$W_2 = \frac{N_2}{N} \times 100\%$$
 (16)

式中 N_1 ——每组试验茎秆发生折断的株数
 N_2 ——每组试验中成功摘穗的株数
 N ——每组试验总的茎秆株数

3 试验结果与分析

为验证上述理论分析的正确性,寻求较优的参数组合,先通过单因素试验分析夹持位置、振幅、频率对其摘穗性能影响规律,为进行参数优化试验提供参数值的选择依据;进而采用旋转正交试验^[16-18]确定摘穗效果较佳的参数组合。

3.1 单因素试验

3.1.1 茎秆夹持位置

夹持位置对茎秆折断和果穗收获有很大的影响,借鉴前期研究结果^[12],选择激振波振幅为 1 cm、频率 15.8 Hz 条件下研究茎秆夹持位置对摘穗效果的影响规律。每组试验选取 50 株玉米,对其结果取平均值。其结果如图 4 所示。

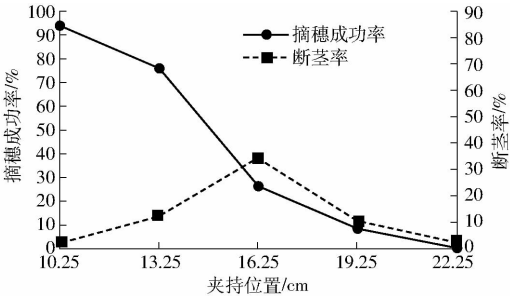


图 4 夹持位置对断茎率与摘穗成功率的影响

Fig. 4 Effect of clamping position on stem breaking rate and picking success rate

由图 4 可知,随着夹持位置的逐渐增大,断茎率先升高后降低,最终不再断茎;而摘穗成功率却在持续下降,这是由于在夹持位置较小时,由于夹持点距离果穗较近,所以激振作用得到茎秆和果穗的有效响应,且此时果柄已经被夹持,阻隔了果柄激振对茎秆的作用,所以表现出茎秆折断较少,而摘穗成功率较高;而当夹持位置继续增大时,由于激振作用主要由茎秆响应,果穗的响应变弱,所以出现了茎秆折断率上升、摘穗成功率下降的现象;随着夹持位置的进一步增加,则由于激振波在茎秆中的传递出现显著衰减,所以导致茎秆没有折断,且果穗也未能成功摘取的问题。由断茎率及摘穗成功率曲线变化趋势可知,夹持位置越小摘穗效果越好,但是,考虑到激振力振幅 A 及频率 f 与茎秆夹持位置之间可能存在交互影响关系且受到夹持装置的制约,故将夹持位置取 10.25 ~ 13.25 cm 作为响应面试验水平范围。

3.1.2 激振波频率

依据试验结果,夹持位置最佳为 10.25 cm,激振波振幅固定在 1 cm,每组试验取 50 株玉米,对其结果取平均值,其结果如图 5 所示。

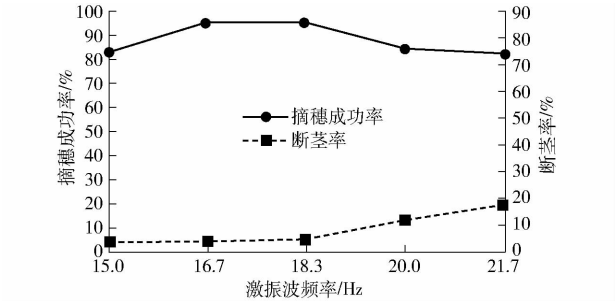


图 5 激振波频率对断茎率与摘穗成功率的影响
Fig.5 Effect of frequency of excitation wave on stem breaking rate and success rate of picking

由图 5 可知,随着激振波频率的增加,摘穗成功率呈现上升态势且渐趋下降,而断茎率呈先稳定后上升的趋势。表明在激振波频率较小时,摘穗惯性力所产生的折弯力矩能将果柄折断但并不足以折断茎秆;而当激振波频率继续增大时,折弯力矩对茎秆及果柄的折断效果均增大,此时茎秆及果柄均折断,所以出现了摘穗成功率上升而茎秆折断率先稳定后上升的现象;但随着激振波频率的进一步增加,断茎率出现明显升高,而摘穗成功率却开始下降,这是因为激振力过大后,果穗尚未受到来自茎秆的激振响应就已经随着茎秆的折断失去了激振响应的机会,从而使摘穗不能正常进行,故综合两方面结果考虑,将激振频率取 15 ~ 18.3 Hz 作为响应面试验水平范围。

3.1.3 激振波振幅

依前述试验结果,在夹持位置与激振波频率分别取单因素试验中的最佳值 10.25 cm 与 18.3 Hz 的条件下研究激振波振幅对摘穗效果的影响规律,每组试验取 50 株玉米,试验结果如图 6 所示。

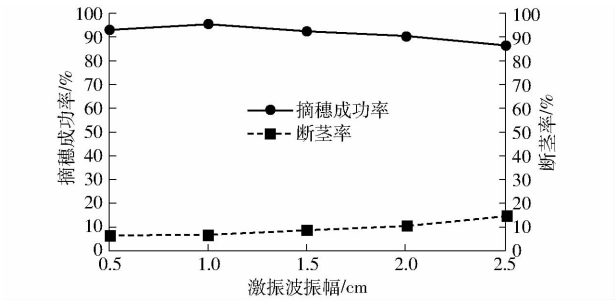


图 6 激振波振幅对断茎率与摘穗成功率的影响
Fig.6 Effect of vibration wave amplitude on stem breaking rate and success rate of picking

由图 6 可知,在前两组单因素试验所得最佳参数条件下探究激振波振幅对摘穗效果的影响,试验

结果整体趋于稳定,随着激振波振幅的增加,仍表现出摘穗成功率先升高后降低而断茎率持续升高的趋势,表明激振波振幅对摘穗效果的影响规律与激振波频率对摘穗效果的影响规律相同,且激振波振幅在某一范围内变化时,摘穗成功率仍表现出上升的态势,因此需对夹持位置、激振波频率和振幅三因素的交互影响规律做进一步的探究,进而得到最佳的参数组合。综上,将 0.5 ~ 1.0 cm 作为响应面试验水平范围。

3.2 响应面试验

由前述分析可知,激振摘穗效果是夹持位置、激振波振幅和频率综合作用的结果,因此为了保证茎秆不断折下最优的摘穗效果,采用响应面分析法^[19]对参数耦合后的摘穗效果变化规律进行了研究。根据 Box – Benhnken Design (BBD) 试验设计原理,对茎秆夹持位置 X_1 、激振波频率 X_2 、激振波振幅 X_3 进行三因素三水平的响应面试验分析,试验中以断茎率 Y_1 (%) 和摘穗成功率 Y_2 (%) 作为响应的考核指标。根据单因素试验所确定的参数范围,得到试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Factors and coding of experiment

编码	因素		
	茎秆夹持位置/cm	激振波频率/Hz	激振波振幅/cm
-1	10.25	15.0	0.50
0	11.75	16.7	0.75
1	13.25	18.3	1.00

3.2.1 试验结果及方差分析

根据 Design-Expert 软件中的响应面法进行试验方案设计,试验总计 17 次,每组取 50 株玉米作为试验对象,其中 12 组作为析因点,5 组作为零点,零点试验重复多次,以估计试验误差。选取断茎率和摘穗成功率作为评价指标,试验方案与结果如表 3 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。断茎率的方差分析结果如表 4 所示,摘穗成功率的方差分析结果如表 5 所示。

由表 4、5 可知,模型项 $P < 0.05$,失拟项 $P > 0.05$,表示两模型项均显著,失拟项均不显著,因此回归模型与所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映断茎率 Y_1 及摘穗成功率 Y_2 与茎秆夹持位置 X_1 、激振波频率 X_2 、激振波振幅 X_3 之间的数学关系。由表 4 与表 5 中所得数据进行二次多元回归拟合,将不显著项进行删除后,得到断茎率 Y_1 及摘穗成功率 Y_2 与各因素编码值间的多元二次回归方程为

表 3 响应面分析方案与试验结果

Tab.3 Response surface analysis scheme and test results

序号	茎秆夹持位置 X_1	激振波频率 X_2	激振波振幅 X_3	断茎率 $Y_1/\%$	摘穗成功率 $Y_2/\%$
1	-1	0	-1	6	94
2	0	0	0	14	86
3	0	-1	-1	10	78
4	0	1	-1	4	96
5	1	0	1	30	70
6	0	0	0	14	86
7	1	1	0	28	72
8	0	0	0	12	88
9	-1	-1	0	8	92
10	-1	1	0	10	90
11	1	0	-1	26	64
12	0	0	0	14	86
13	0	1	1	8	92
14	1	-1	0	28	62
15	0	0	0	12	88
16	-1	0	1	8	92
17	0	-1	1	6	94

表 4 断茎率方差分析

Tab.4 Variance analysis result of stem breaking rate

变异来源	离均差平方和	自由度	均方	F	P
模型	1152.20	9	128.02	56.72	<0.000 1
X_1	800.00	1	800.00	354.43	<0.000 1 ***
X_2	0.50	1	0.50	0.221 5	0.652 2
X_3	4.50	1	4.50	1.99	0.200 8
X_1X_2	1.00	1	1.00	0.443	0.527 0
X_1X_3	1.00	1	1.00	0.443	0.527 0
X_2X_3	16.00	1	7.09	7.09	0.032 4 *
X_1^2	262.78	1	116.42	116.42	<0.000 1 ***
X_2^2	28.46	1	12.61	12.61	0.009 3 **
X_3^2	54.57	1	24.18	24.18	0.001 7 **
残差	15.80	7			
失拟	11.00	3	3.67	3.06	0.154 4
纯误差	4.80	4	1.20		
误差	1168.00	16			

注:***表示极显著($P<0.001$),**表示很显著($P<0.01$),*表示显著($P<0.05$)。

$$Y_1=13.20+10X_1+2X_2X_3+7.9X_1^2-2.6X_2^2-3.6X_3^2$$

(17)

$$Y_2=86.80-12.5X_1+3X_2+2X_3+3X_1X_2-5X_2X_3-8.9X_1^2+2.1X_3^2$$

(18)

由表 4 可知,茎秆夹持位置、激振波振幅、激振波频率对断茎率均有一定影响;其中,茎秆夹持位置的影响极显著,激振波振幅及频率的交互影响显著;由表 5 可知,茎秆夹持位置、激振波振幅、激振波频率对摘穗成功率均具有显著影响,其中,茎秆夹持位

表 5 摘穗成功率方差分析

Tab.5 Variance analysis result of success rate of spikes

变异来源	离均差平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 852.96	9	205.88	63.21	<0.000 1
X_1	1 250.00	1	1 250.00	383.77	<0.000 1 ***
X_2	72.00	1	72.00	22.11	0.002 2 **
X_3	32.00	1	32.00	9.82	0.016 5 *
X_1X_2	36.00	1	36.00	11.05	0.012 7 *
X_1X_3	16.00	1	16.00	4.91	0.062 2
X_2X_3	100.00	1	100.00	30.70	0.000 9 ***
X_1^2	333.52	1	333.52	102.40	<0.000 1 ***
X_2^2	5.09	1	5.09	1.56	0.251 2
X_3^2	18.57	1	18.57	5.70	0.048 3 *
残差	22.80	7	3.26		
失拟	18.00	3	6.00	5	0.077 0
纯误差	4.80	4	1.20		
误差	1 875.76	16			

置影响极显著,激振波频率影响很显著,激振波振幅影响显著,且激振波振幅与频率的交互影响极显著。

3.2.2 试验结果响应面分析

(1)当茎秆夹持位置控制为 11.75 cm 时,得到激振波频率及激振波振幅与断茎率、摘穗成功率的关系为

$$Y_1=13.20+2X_2X_3-2.6X_2^2-3.6X_3^2$$

(19)

$$Y_2=86.80+3X_2+2X_3-5X_2X_3+2.1X_3^2$$

(20)

具体变化规律如图 7 所示,即当茎秆夹持位置固定为 11.75 cm 时,随着激振波频率及振幅的增大,断茎率与摘穗成功率呈现出不同的变化规律,其中,断茎率呈现出先微升高后微降低的趋势,而摘穗成功率持续上升,这是因为随着激振波振幅及频率的增大,摘穗惯性力呈正相关增大导致摘穗成功率持续上升,与此同时果穗响应力对茎秆的弯矩作用也会增强,当摘穗惯性力的增幅对摘穗成功率的影响程度高于断茎率时,断茎率开始下降,摘穗成功率稳步上升。

(2)当激振波频率控制为 16.7 Hz 时,得到茎秆夹持位置及激振波振幅与断茎率、摘穗成功率的关系为

$$Y_1=13.20+10X_1+7.9X_1^2-3.6X_3^2$$

(21)

$$Y_2=86.80-12.5X_1+2X_3-8.9X_1^2+2.1X_3^2$$

(22)

如图 8 所示,断茎率随夹持位置的增大呈现出先略微升高后显著提升,摘穗成功率先保持稳定后显著降低,这是因为当茎秆夹持位置在某一范围内变化时,摘穗惯性力对茎秆的弯矩作用不足以折断茎秆,当超出该范围时,对茎秆的折弯效果愈加明

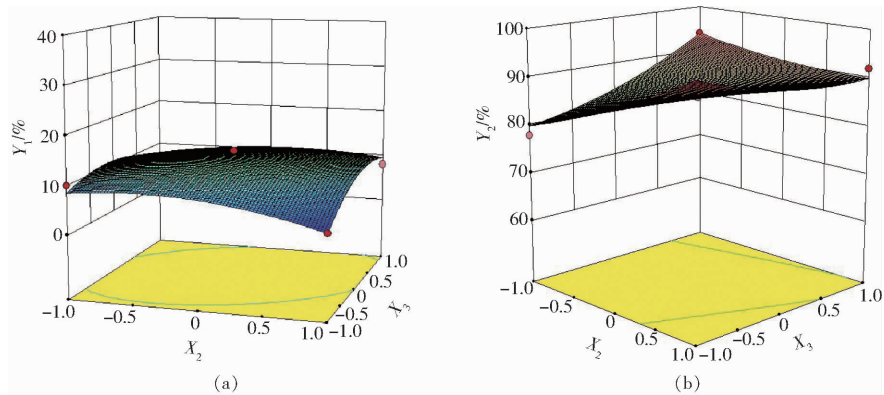


图 7 激振波频率与振幅对断茎率及摘穗成功率的影响面

Fig. 7 Response surfaces of frequency and amplitude of excitation wave to broken stem rate and spike success rate

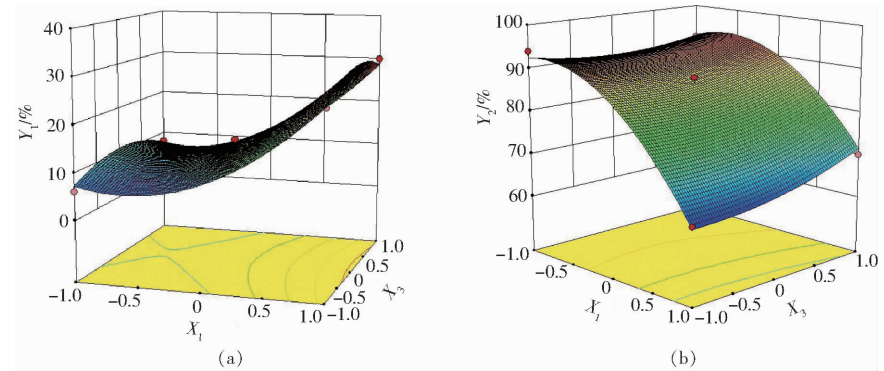


图 8 茎秆夹持位置与振幅对断茎率及摘穗成功率的影响面

Fig. 8 Response surfaces of stalk holding position and amplitude to broken stem rate and success rate of picking

显;断茎率随激振波振幅的提高变化幅度不明显但存在峰值,说明茎秆夹持位置与激振波振幅之间存在交互作用且断茎率主要受茎秆夹持位置的影响;摘穗成功率此时所受茎秆夹持位置的影响程度明显高于激振波振幅的影响,呈现出先略微降低后显著降低的态势,且仅观察激振波振幅影响,摘穗成功率基本保持稳定,说明在激振波频率为 16.7 Hz 的条件下,足以将果穗摘下,此时摘穗成功率受断茎率的影响明显。

(3)当激振波振幅控制为 0.75 cm 时,得到茎秆夹持位置及激振波频率与断茎率、摘穗成功率的关系为

$$\begin{aligned} Y_1 &= 13.20 + 10X_1 + 7.9X_1^2 - 2.6X_2^2 \quad (23) \\ Y_2 &= 86.80 - 12.5X_1 + 3X_2 + 3X_1X_2 - 8.9X_1^2 \quad (24) \end{aligned}$$

如图 9 所示,断茎率随夹持位置的增大呈现出先微升高后显著提升,而摘穗成功率先保持稳定后显著降低,这是因为当茎秆夹持位置在某一范围内变化时,摘穗惯性力对茎秆的弯矩作用不足以折断茎秆,当超出该范围时,对茎秆的折弯效果愈加明显,断茎率随激振波频率的提高变化幅度不明显但存在峰值,说明茎秆夹持位置与激振波振幅之间存在交互作用且断茎率主要受茎秆夹持位置的影响;摘穗成功率所受茎秆夹持位置的影响程度明显高于

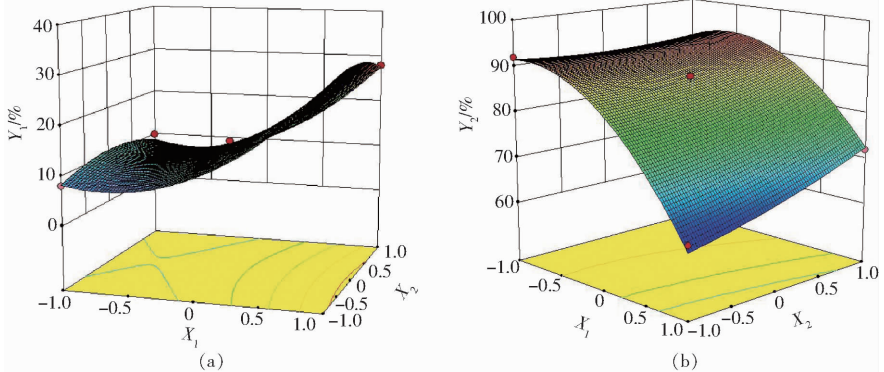


图 9 茎秆夹持位置与激振波频率对断茎率及摘穗成功率的影响面

Fig. 9 Response surfaces of stem holding position and frequency of excitation wave to broken stem rate and spike success rate

激振波振幅的影响,呈现出先略微降低后显著降低的趋势,且仅观察激振波振幅影响,摘穗成功率基本保持稳定,说明在激振波振幅为 0.75 cm 的条件下,足以将果穗摘下,此时摘穗成功率受断茎率的影响明显。

3.2.3 各因素的参数优化组合

由以上响应面分析可知,茎秆夹持位置、激振波频率与振幅三因素对断茎率及摘穗成功率均会产生显著的交互作用影响,因此,应用 Design-Expert 软件对回归模型进行该目标下的优化求解,得到最佳参数组合,优化约束条件为: $\min Y_1(X_1, X_2, X_3)$, $\max Y_2(X_1, X_2, X_3)$ 。变量区间为: $-1 \leq X_1 \leq 1$, $-1 \leq X_2 \leq 1$, $-1 \leq X_3 \leq 1$ 。计算得到最佳参数组合为:茎秆夹持位置 10.84 cm,激振波频率 17.8 Hz,激振波振幅 0.62 cm,断茎率 1.448%,摘穗成功率 99.702%。

3.2.4 试验验证

为了验证优化结果的可行性^[20-21],将激振试验台各参数调整到理论计算参数值^[22-23],其中茎秆夹持位置为 10.8 cm,激振波频率为 17.8 Hz,激振波振幅为 0.6 cm,取 50 株玉米进行 3 次重复试验,对其结果取平均值,断茎率为 2%,摘穗成功率为 98%,试验结果与预测值接近,表明所建模型基本符合实

际情况,满足玉米收获的性能技术要求。此时可得最佳激振响应方程为

$$x(t) = \frac{19.2}{k} \sin(111.78t + \varphi) - \frac{174.9 \sin(111.78t + \varphi)}{k\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n}{n} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{2n\pi t}{T} \quad (n=1, 3, 5, \dots) \quad (25)$$

4 结 论

(1) 分析了激振激励下玉米果穗振动响应运动规律,建立了相应的茎秆运动响应模型及激振响应方程,为激振摘穗试验研究提供了理论依据。

(2) 搭建了激振摘穗试验台并进行了室内台架试验。在开展单因素试验确定了每个参数对摘穗效果的影响规律以及参数取值的基础上,采用响应面分析方法,开展了夹持位置、振幅和频率的三因素三水平的组合试验,建立了不同条件下的回归模型,并通过显著性分析,证明了这些模型的正确性;确定了影响摘穗效果的三因素的组合作条件,即当茎秆夹持位置 10.8 cm、激振波频率 17.8 Hz、激振波振幅为 0.6 cm 时,玉米摘穗断茎率为 2%,摘穗成功率为 98%,满足玉米机械化收获作业的技术要求。

参 考 文 献

- 1 陈度,杜小强,王书茂,等. 振动式果品收获技术机理分析及研究进展[J]. 农业工程学报,2011,27(8):195-200.
CHEN Du, DU Xiaoqiang, WANG Shumao, et al. Mechanism of vibratory fruit harvest and review of current advance[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8):195-200. (in Chinese)
- 2 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/OL]. 农业机械学报,2012,43(12):44-50. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.009.
CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):44-50. (in Chinese)
- 3 耿端阳,张铁中,罗辉,等. 我国农业机械发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2004,35(4):208-210.
GENG Duanyang, ZHANG Tiezhong, LUO Hui, et al. An analysis of the development trend of agricultural machinery in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4):208-210. (in Chinese)
- 4 王海滨,郭艳玲,鲍玉冬,等. 振动式蓝莓采摘的机理分析与仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(12):40-46.
WANG Haibin, GUO Yanling, BAO Yudong, et al. Mechanism analysis and simulation of blueberry harvest by vibration mode[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12):40-46. (in Chinese)
- 5 张最,肖宏儒,丁文芹,等. 振动式枸杞采摘机理仿真分析与样机试验[J]. 农业工程学报,2015,31(10):20-28.
ZHANG Zui, XIAO Hongru, DING Wenqin, et al. Mechanism simulation analysis and prototype experiment of *Lycium barbarum* harvest by vibration mode[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):20-28. (in Chinese)
- 6 何苗,坎杂,李成松,等. 枸杞振动采收机理分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(11):47-53.
HE Miao, KAN Za, LI Chengsong, et al. Mechanism analysis and experiment on vibration harvesting of wolfberry[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11):47-53. (in Chinese)
- 7 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)
- 8 SHINNERS K J, BOETTCHER G C, HOFFMAN D S, et al. Single-pass harvest of corn grain and stover: performance of three harvester configurations[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(1):51-60.
- 9 JOHNSON P C, CLEMENTSON C L, MATHANKER S K, et al. Cutting energy characteristics of *Miscanthus giganteus* stems with varying oblique angle and cutting speed[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1):42-48.

- 10 耿端阳,马根众. 玉米收获机构造与使用维护[M]. 北京:中国农业出版社,2015.
- 11 赵排行,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)
- 12 耿端阳,李玉环,孟凡虎,等. 玉米收获机多棱立辊摘穗装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):84-91. http://www.j-csam.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. 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. (in Chinese)
- 13 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/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):130-136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171116&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.016. GENG Duanyang,LI Yuhuan,HE Ke,et al. Design and experiment on gripping delivery mechanism for vertical-rollers type of corn harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):130-136. (in Chinese)
- 14 何珂,姜萌,刘洋成,等. 多棱立辊式玉米收获机割台 FMECA 分析[J]. 农机化研究,2018,40(12):38-42. HE Ke,JIANG Meng,LIU Yangcheng,et al. The FMECA analysis to the polygonal vertical roller corn harvester head[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(12):38-42. (in Chinese)
- 15 赵军,苗同臣. 振动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- 16 张泽志,韩春亮,李成未. 响应面法在实验设计与优化中的应用[J]. 河南教育学院学报(自然科学版),2011,20(4):34-37. ZHANG Zezhi,HAN Chunliang,LI Chengwei. Application of response surface method in experimental design and optimization[J]. Journal of Henan Institute of Education(Natural Science Edition),2011,20(4):34-37. (in Chinese)
- 17 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2003:11-16.
- 18 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996:22-26.
- 19 徐中儒. 回归分析与实验设计[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- 20 陈莉,屠康,王海,等. 采用响应面法对采后红富士苹果热处理条件的优化[J]. 农业工程学报,2006,22(2):159-163. CHEN Li,TU Kang,WANG Hai,et al. Optimization of the conditions for hot-air treatment of postharvest Red Fuji apples using response surface method[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(2):159-163. (in Chinese)
- 21 刘曙光,尚书旗,杨然兵,等. 小麦播种机存种装置参数试验及优化[J]. 农业工程学报,2010,26(9):101-108. LIU Shuguang,SHANG Shuqi,YANG Ranbing,et al. Test and optimization of parameters for the storing device of plot seeder[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(9):101-108. (in Chinese)
- 22 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):83-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. DAI Fei,ZHAO Wuyun,MA Mingyi,et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):83-90. (in Chinese)
- 23 孙伟,那明君,冯江,等. 割前摘脱收获机立式离心分离复脱清选装置优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):73-81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180709&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.009. SUN Wei,NA Mingjun,FENG Jiang,et al. Optimization of centrifugal separating-rethreshing-cleaning apparatus for stripper combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(7):73-81. (in Chinese)