doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.019

基于 SPH－FEM 大蒜切茎装置动力学分析及参数优化

李　骅　高　涵　王永健　於海明　傅杰一　郭靳枭
（南京农业大学工学院，南京 211800）

摘要：针对目前大蒜联合收获机切茎装置切削性能较差、切割阻力较大、切割不及时易造成大蒜鳞茎损伤以及夹持输送装置堵塞等问题，基于 SPH－FEM 耦合算法设计了一种大蒜双圆盘式切茎装置，并进行了动力学分析及参数优化。根据大蒜茎秆的结构、物理参数和力学特性参数，确定了大蒜茎秆的材料模型。利用 ANSYS/LS－DYNA 构建大蒜切割过程仿真模型，通过有限元仿真结果确定最优圆盘刀结构参数，圆盘刀厚度 2 mm、圆盘刀刃角 15°和圆盘刀重叠量 15 mm。运用仿真模型进行单因素仿真试验，确定了大蒜切茎装置的喂入速度、圆盘刀转速、圆盘刀间距的取值范围分别为 1.5～2.5 km/h、400～600 r/min、1～3 mm；采用 Box－Behnken 设计三因素三水平正交组合试验方案，通过台架试验确定各因素水平下圆盘刀最大切割阻力，运用 Design-Expert 13 对试验结果进行方差和响应面分析，得到大蒜切茎装置实际最佳工作参数，喂入速度为 2.1 km/h、圆盘刀转速为 560 r/min、圆盘刀间距为 1 mm。台架试验结果表明，在最优工作参数下最大切割阻力为 7.33 N，误差为 7.5%。本文所设计的双圆盘式切茎装置切割阻力小、工作性能稳定，茎秆切割面较为平整，并且在试验过程中无鳞茎损伤，满足大蒜收获茎秆切割要求，可为大蒜联合收获机械的设计提供参考。

关键词：大蒜切茎；有限元；SPH－FEM 耦合算法；双圆盘式切茎装置；参数优化
中图分类号：S225.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)04-0192-11　　**OSID**：

Kinetic Analysis and Parameter Optimization of Garlic Stem Cutting Device Based on SPH－FEM

LI Hua　GAO Han　WANG Yongjian　YU Haiming　FU Jieyi　GUO Jinxiao
(*College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 211800, *China*)

Abstract: Aiming to address the current issues with garlic combined harvesters' stem-cutting devices, including suboptimal cutting performance, high cutting resistance, delayed cutting causing bulb damage, and clogging of gripping and conveying mechanisms, an SPH－FEM coupled algorithm was employed to design a dual-disc garlic stem-cutting device. Dynamic analysis and parameter optimization were subsequently conducted. Firstly, the material model for garlic stems was established based on their structural characteristics, physical parameters, and mechanical properties. A simulation model of the garlic cutting process was constructed by using ANSYS/LS－DYNA. Finite element simulation results determined the optimal blade disc parameters: disc thickness of 2 mm, blade angle of 15°, and blade overlap of 15 mm. Single-factor simulation tests were conducted by using the model to establish the operational ranges for the garlic cutting device: feed rate of 1.5～2.5 km/h, disc rotational speed of 400～600 r/min, and disc spacing of 1～3 mm. Finally, a Box－Behnken design, a three-factor, three-level orthogonal combination test plan was implemented. Bench tests determined the maximum cutting resistance of the disc under each factor level. Design-Expert 13 was employed to conduct variance analysis and response surface analysis on the test results, yielding the optimal operating parameters for the garlic stem-cutting device: feed rate of 2.1 km/h, disc rotational speed of 560 r/min, and disc spacing of 1 mm. Bench test results indicated that under optimal operating parameters, the maximum cutting resistance was 7.33 N with an error margin of 7.5%. This dual-disc cutting device exhibited low cutting resistance, stable performance, and produced relatively flat stem cross-sections. Crucially, no bulb damage occurred during testing, fulfilling the stem-cutting requirements for garlic harvesting. It provided

收稿日期：2024－11－01　修回日期：2024－11－27
基金项目：江苏省现代农业装备与技术示范推广项目(NJ2021－12、NJ2022－09)
作者简介：李骅(1972—)，男，教授，博士生导师，主要从事精准种收技术与装备研究，E-mail：lihua@njauedu.cn

valuable reference for designing combined garlic harvesting machinery.

Key words: garlic stem removal; finite element method; SPH－FEM coupled algorithm; double-disc stem removal apparatus; parameter optimisation

0　引言

大蒜作为我国重要的经济作物之一，总种植面积基本维持在 8×10^5 hm^2，近五年大蒜总产量保持在 2×10^7 t 以上，产量占世界大蒜产量的 70% 以上，其种植面积和产量均位居世界首位，是世界上最大的大蒜主产区[1]。但目前大蒜收获机仍是大蒜生产的薄弱环节，机械化水平较低，其中切茎装置作为大蒜收获机械关键部件之一，现有的大蒜切茎装置多以单圆盘式或固定刀片式为主[2]，主要存在切削性能较差、功耗过高、工作稳定性差等问题，导致切割过程中会出现切割不及时易造成大蒜鳞茎损伤，长时间工作会造成大蒜夹持输送装置堵塞，导致机器无法继续工作[3]。因此设计一种高效、稳定、低阻的大蒜切茎装置是保证大蒜联合收获机作业稳定性的基础。

目前国内外学者对圆盘式切割装置进行了一系列的研究，按圆盘的配置方式主要分为单圆盘式和双圆盘式 2 种，其中圆盘刀根据其刃口形状的不同可分为光刃型圆盘刀和锯齿形圆盘刀[4]。王金武等[5]以螳螂前肢胫节曲线为原型设计了一种锯齿型单圆盘胡萝卜对顶切割装置，确定切割机构-胡萝卜茎叶力学模型，并对切割过程进行动力学分析，得到胡萝卜收获机最佳工作参数，有效降低切割功耗，切净率可达 95.41%，损伤率为 0.53%。薛忠等[6]设计了一种新型圆盘式切割器，将刀片安装在圆盘式切割器上，圆盘旋转带动刀片进行切割，通过对圆盘刀上安装的刀片个数、圆盘刀转速以及机具作业速度等进行试验分析，得到了对切割效果影响的主要因素。然而目前切割装置的关键部件结构参数与试验装置的工作参数对切割系统性能的影响研究较为有限。因此，在大蒜切茎装置的设计过程中，需要对切割装置的结构参数与工作参数对切割性能的影响进行进一步的研究。

随着计算机处理技术的提高，数值分析技术被应用于农业工程领域中，考虑到计算的准确性与经济性，有限元法是研究切割系统在作业过程中受各因素影响的最佳方法之一。利用有限元法可对整个切割过程进行模拟，可为切割系统以及关键部件的设计提供研究工具和理论依据。KONG 等[7]设计了一种波浪式双圆盘蓖麻切割装置，利用 SPH－FEM 耦合算法分析了波浪形圆盘刀关键参数以及收获装置的工作参数对切割阻力的影响，得到了波浪式圆盘切割装置最佳工作参数，有效降低切割阻力。MENG 等[8]利用 ANSYS/LS－DYNA 软件建立不同因素水平下桑葚枝圆盘锯切割系统的三维有限元模型，通过动力学分析与计算，得到该切割系统最佳工作参数，在保证桑葚枝条切割断面质量的前提下工作效率也得到了提升。YANG 等[9]基于有限元和 SPH 耦合算法建立了甘蔗切割系统三维模型，并通过物理试验验证了该模型的合理性，通过动力学分析研究了甘蔗在切割过程根部的受力情况和作用效果，对进一步探索降低切割阻力和残差率具有重要意义。因此，可将有限元法应用于大蒜切茎装置的研究中，进一步探究大蒜茎秆切割过程作用机理，为大蒜联合收获机的研制提供研究工具。

切茎装置作为大蒜联合收获机的关键部件之一，有关大蒜切茎装置切割过程作用机理研究较少，该过程主要影响大蒜收获机的作业性能和工作稳定性。针对上述问题，本文基于大蒜茎秆的物理特性，采用 SPH－FEM 耦合算法对大蒜双圆盘式切茎装置进行仿真分析，并采用正交旋转组合试验对双圆盘式切茎装置的结构参数以及工作参数进行优化，以期为大蒜联合收获机的研制提供参考依据。

1　大蒜茎秆物理特性及切茎装置结构

1.1　大蒜茎秆本构参数

试验所选取大蒜品种为邳州大蒜，为更合理地设计出大蒜切茎装置，针对成熟较好的大蒜植株进行物理参数测量，采用五点法进行田间取样[10]。每个取样点选取 20 株大蒜植株，用卷尺测量蒜株高度为 320.2 ~ 379.3 mm，平均值为 351.4 mm，利用游标卡尺测量蒜株直径为 15.28 ~ 19.12 mm，平均值为 17.20 mm，鳞茎高度为 36.02 ~ 48.24 mm，平均值为 45.78 mm，茎秆密度为 0.696 ~ 0.738 g/cm^3，平均值为 0.722 g/cm^3。通过对大蒜茎秆截面观察，其截面可近似看成圆形，横截面由内到外分别是蒜心、幼叶、膜质叶鞘，如图 1 所示。

假定大蒜茎秆截面为圆形，其中各组分材料、直径、壁厚尺寸均匀，大蒜茎秆简化为圆柱体，由蒜心、幼叶、膜质叶鞘 3 部分不同材质组成。简化模型如图 2 所示。

由于大蒜茎秆各组分物理特性差别较大，运用复合材料力学理论建立大蒜茎秆力学模型[11]。利

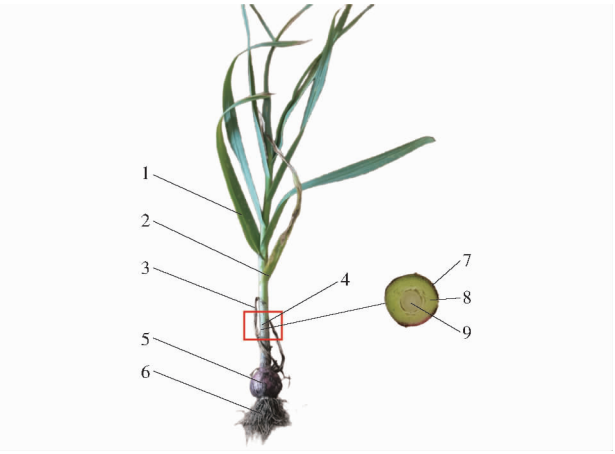


图 1 大蒜结构示意图

Fig. 1 Schematic of garlic structure

1. 叶身 2. 叶鞘 3. 枯叶 4. 茎秆 5. 鳞茎 6. 蒜根 7. 膜质叶鞘 8. 幼叶 9. 蒜心

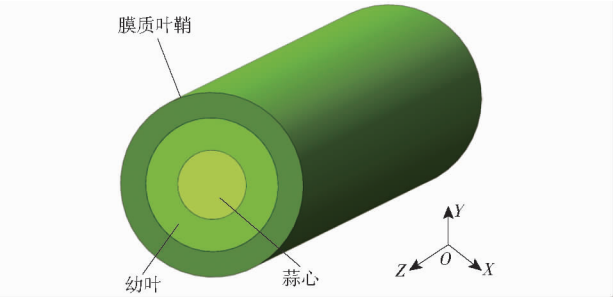


图 2 蒜茎简化模型

Fig. 2 Simplified model of garlic stems

用万能试验台分别对大蒜茎秆不同组分进行拉伸及剪切试验,根据试验数据并通过计算确定不同组分的弹性模量、剪切模量、泊松比等参数。由复合材料力学理论可知,正交各向异性材料各组分特性可以由 9 个工程弹性参数表征[12-13],分别为轴向弹性模量 E_Z,径向弹性模量 E_X、E_Y;同性平面轴向剪切模量 G_{XY},异性平面径向剪切模量 G_{YZ}、G_{XZ};同性平面泊松比 μ_{XY},异性平面泊松比 μ_{YZ}、μ_{XZ}。根据各组分所占茎秆比例,通过计算得到大蒜茎秆复合材料力学特性如表 1 所示。

表 1 大蒜茎秆力学特性参数

Tab. 1 Parameters of mechanical properties of garlic stalks

参数		数值
密度/(g·cm^{-3})		0.722
弹性模量/MPa	E_X	6.890
	E_Y	6.890
	E_Z	113.796
剪切模量/MPa	G_{XY}	2.659
	G_{XZ}	52.769
	G_{YZ}	52.769
泊松比	μ_{XY}	0.300
	μ_{XZ}	<0.077 2
	μ_{YZ}	<0.077 2

1.2 切茎装置与工作原理

本文设计的大蒜双圆盘式切茎装置主要包括夹持装置、拉齐装置、蜗杆手轮调节装置、伺服电机驱动装置、圆盘刀以及转矩测量装置,如图 3 所示。其中夹持输送部分采用浮动式柔性夹持装置,通过调节张紧螺杆改变弹簧的形变量改变皮带之间的夹持力,防止由于夹紧力过大导致大蒜茎秆被夹断不利于后续大蒜茎秆的拉齐,从而导致降低切割质量。蜗杆手轮调节装置以及高度调节装置调节主夹持装置的角度和高度,以达到最佳的夹持输送和拉齐效果。伺服电机驱动装置主要为夹持输送装置、拉齐装置和双圆盘切割器提供动力。动态转矩传感器测量在双圆盘式切割器作业过程产生的转矩,以此确定在切割过程中的最大切割阻力。

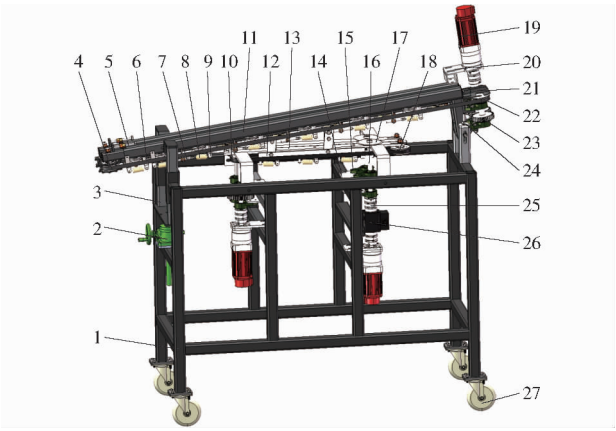


图 3 双圆盘式切茎装置结构图

Fig. 3 Structure of double disc type stem cutting device

1. 机架 2. 蜗杆手轮 3. 角度调节机构 4. 主夹持从动轮 5. 张紧螺栓 6. B 型三角皮带 7. 张紧螺杆 8. 张紧弹簧 9. 张紧轮浮动装置 10. 拉齐主动轮 11. 主夹持机架 12. 张紧调节装置 13. 拉齐装置安装板 14. 轴承座安装版 15. 带座球轴承 16. 刀轴 17. 圆盘刀 18. 拉齐从动轮 19. 伺服电机 20. 轴承安装座 21. 导秧板 22. 主动轮 23. 圆柱直齿轮 24. 高度调节螺栓 25. 双膜片式联轴器 26. JN-DN2 型动态转矩传感器 27. 脚轮

切茎装置工作过程主要包括蒜株夹持输送、鳞茎拉齐、茎秆切割以及茎叶抛送 4 个阶段,如图 4 所示。工作时由人工抓取蒜株顶部茎叶,竖直将蒜株送入夹持输送装置,由主夹持装置将蒜株运输至拉齐装置区域,拉齐区域下方空间仅允许蒜株茎叶通过,鳞茎无法通过,主夹持装置与拉齐装置之间存在一定角度,随着蒜株不断往后运动,主夹持装置对蒜株有向上拉拽的作用力,在此作用力下鳞茎被卡在拉齐装置下方。圆盘割刀在伺服电机的驱动下旋转,由夹持输送装置将拉齐后的蒜株运输至双圆盘割刀切割区,经两割刀配合作用完成大蒜鳞茎与茎叶的分离。

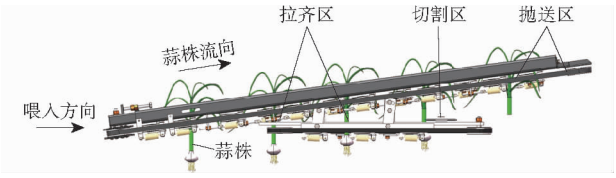


图 4　切茎装置工作示意图

Fig. 4　Schematic of working of stem-cutting device

2　双圆盘式切茎装置受力分析与仿真模型建立

双圆盘式切茎装置是大蒜联合收获机的关键工作部件之一，其工作性能决定着大蒜联合收获机的工作质量，其中圆盘刀结构参数直接影响大蒜茎秆的切割效果，为了研究圆盘刀结构参数对切割过程切割阻力的影响，利用 SPH－FEM 耦合仿真方法，模拟蒜茎切割动态过程，对其切割机理进行研究，并以此确定圆盘刀的结构参数。

2.1　蒜茎切割受力分析

双圆盘式切茎装置由上下 2 个圆盘刀片组成，两圆盘刀各自方向同速旋转。为了便于分析，假设被切割茎秆的横截面为规则圆形。大蒜茎秆在与圆盘刀接触阶段主要受到夹持输送皮带拉力的水平分量 T，圆盘刀作用于切割部位的法向力 F_{N1}、F_{N2}，以及圆盘刀在滑切过程产生的摩擦力 f_1、f_2。接触阶段运动及受力分析如图 5 所示。

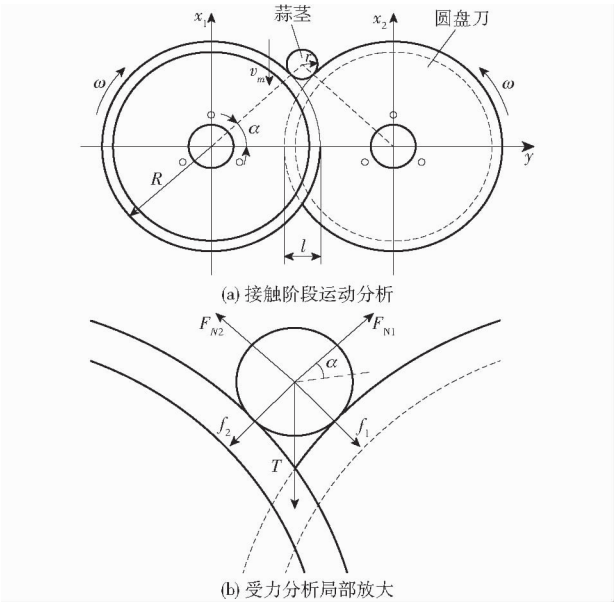


图 5　大蒜茎秆接触阶段运动及受力分析

Fig. 5　Motion and force analysis of garlic stalks in contact phase

为使大蒜茎秆与圆盘刀接触过程顺利被切断，且在与圆盘刀接触过程不被圆盘刀挤出，合力应该满足的条件为

$$T > F_{N1}\sin\alpha + F_{N2}\sin\alpha - f_1\cos\alpha - f_2\cos\alpha \tag{1}$$

其中

$$\alpha = \arccos\frac{R - l/2}{R + r} \tag{2}$$

式中　α——圆盘刀法向力与圆盘刀中心连线的夹角，(°)

l——圆盘刀重叠宽度，mm

R——圆盘刀半径，mm

r——大蒜茎秆半径，mm

切割阶段圆盘刀切入茎秆过程中，由接触阶段挤压力转变为茎秆的切割力，逐层破坏大蒜茎秆结构，同时切割过后茎秆会挤压圆盘刀的刀刃斜面以及上下表面产生摩擦力。因此在切割阶段主要受到刃口处及圆盘刀表面的切割阻力和摩擦力。以单侧圆盘刀为例受力分析如图 6 所示。

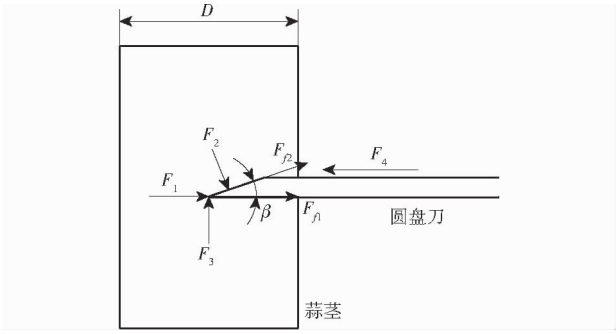


图 6　切割阶段受力分析

Fig. 6　Cutting stage force analysis

分别对水平方向及竖直方向列平衡方程为

$$\begin{cases} F_4 = F_1 + F_2\sin\beta + F_{f1} + F_{f2}\cos\beta \\ F_2\cos\beta = F_3 + F_{f2}\sin\beta \end{cases} \tag{3}$$

式中　F_1——茎秆对圆盘刀反作用力，N

F_2——圆盘刀对刀刃斜面压力，N

F_3——茎秆对圆盘刀下表面挤压力，N

F_4——圆盘刀对茎秆作用力，N

F_{f1}——茎秆对刀刃摩擦力，N

F_{f2}——茎秆对侧刃摩擦力，N

β——刃口角度，(°)

由受力分析可知，圆盘刀的刃口角度对切割过程的切割阻力和摩擦力有直接影响，圆盘刀厚度将会影响切割过程的挤压力大小，为圆盘刀结构的研究提供理论依据。

2.2　仿真模型建立

大蒜茎秆切割过程较为复杂，为了提高仿真效率和计算结果准确性，对双圆盘式切割模型进行简化[14]。将大蒜茎秆简化为垂直于地面的圆柱体，由于其切割过程中受到皮带的夹持力，对蒜茎顶部及底部进行约束，蒜茎与双圆盘切割装置距离应较小。根据前期对大蒜茎秆参数的测量，本文选用直径的平均值 17.2 mm 进行仿真分析。

利用 Solidworks 软件对简化后的大蒜切茎装置

以及蒜茎进行三维建模,将绘制好的模型保存为 step 格式并导入 HyperMesh 软件进行网格划分,其中网格的大小和网格的数量对仿真计算结果准确性以及仿真计算时间具有较大的影响。因此为了降低仿真计算时间同时保证仿真计算的准确性,对其主要切割区域进行网格加密处理,划分好的网格如图 7 所示。

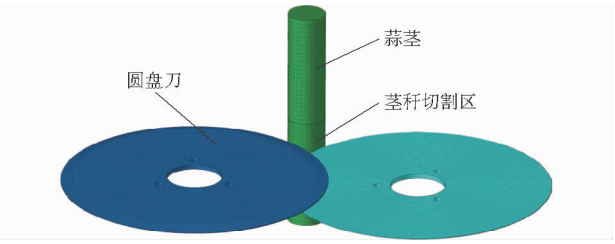


图 7 仿真网格划分

Fig. 7 Simulation meshing

将划分好的网格模型导出为 K 文件,利用 ANSYS/LS - DYNA 前处理软件建立切割系统的有限元模型。根据大蒜茎秆力学参数可知,大蒜茎秆为正交各项异性材料,选用材料库中 143_wood 材料模型,可准确反映在切割过程材料特性以及力学性能[15]。圆盘刀基体材料为 65Mn,材料参数如表 2 所示,其与茎秆材料刚度差距较大,设置为刚性体选用材料库中 020_rigid 材料模型[16]。

表 2 圆盘刀材料参数

Tab. 2 Blade material parameters

材料	密度/(kg·m⁻³)	弹性模量/GPa	屈服极限/GPa	切变模量/GPa	泊松比
65Mn	7 850	206	0.44	78.5	0.3

圆盘刀与茎秆的接触算法选用*CONTACT - AUTOMATIC - SURFACE - TO - SURFACE,设置圆盘刀为主接触体、茎秆为从接触体,静摩擦因数设置为 0.28,动摩擦因数设置为 0.14[17-18]。

有限元方法对切割过程仿真计算中,随着圆盘刀与大蒜茎秆接触,FEM(有限元法)单元会随着接触力的变大而发生形变,当形变量过大时单元会失效消失,忽略了守恒性问题,在一定程度上影响仿真计算的精度[19-21]。因此本文采用基于自适应 FEM - SPH 耦合算法,该算法会将计算过程超过应变阈值的 FEM 单元转化为 SPH(光滑粒子流体动力学)粒子并与相邻的网格相连[22]。SPH 算法可解决网格畸变和单元失效问题的同时也会增加计算时间,为了不过多降低计算效率,仅将茎秆切割区域设置为自适应 FEM - SPH 耦合算法,采用*DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH 关键字,选择茎秆切割区域,并设置每个失效单元生成 1 个 SPH 粒子[23-24]。最后将设置好的 K 文件导入到 LS_RUN 进行求解。

3 圆盘刀参数优化及仿真模型验证

3.1 圆盘刀结构参数确定

圆盘刀结构参数直接影响双圆盘切茎装置切割性能,因此需要对圆盘刀结构参数进行设计。由于大蒜联合收获机涉及到多行收获问题,为了在多行收获时双圆盘切茎装置能够顺利完成作业,每行大蒜植株对应的切割机构整体宽度应不大于行距。根据江苏省大蒜种植农艺要求大蒜播种行距在 240 mm 左右[25],圆盘刀半径 R 关系式为

$$4R - 2l \leqslant 240 \tag{4}$$

当圆盘刀半径较大时可使大蒜茎秆更好的喂入,因此将单个圆盘刀半径设置为 60 mm。

采用 ANSYS/LS - DYNA 软件对切割过程进行仿真,参照文献[26],考虑到圆盘刀厚度 d、刃角 β 以及重叠量 l 对切割性能有直接影响,选取上述影响因素为试验因素,取值范围分别为 1 ~ 3 mm、15° ~ 25°和 10 ~ 20 mm,以峰值切割力为评价指标进行三因素三水平正交试验,峰值切割力越小切割性能越好,试验因素水平如表 3 所示。

表 3 试验因素水平

Tab. 3 Experimental factors and levels

水平	因素		
	圆盘刀厚度/mm	圆盘刀刃角/(°)	圆盘刀重叠量/mm
1	1	15	10
2	2	20	15
3	3	25	20

3.2 仿真模型验证

为了确定仿真模型合理性,利用仿真模型对整个切割过程进行模拟。其中圆盘刀结构参数选取试验范围中间值,即圆盘刀厚度为 2 mm、刃口角度为 20°和圆盘刀重叠量为 15 mm。设置圆盘刀转速为 500 r/min,喂入速度为 2 km/h,圆盘刀间距为 2 mm,设置仿真时间为 0.2 s,切割过程不同时刻状态变化如图 8 所示。t = 0.006 9 s 时为切割接触阶段,圆盘刀与茎秆接触挤压,茎秆发生弹性形变,t = 0.033 8 s 时切割力达到峰值,最大切割力为 8.63 N,被切割茎秆单元由于形变量过大失效转变为 SPH 粒子飞出,t = 0.2 s 时仿真结束,茎杆被完全切断。利用 ANSYS/LS - DYNA 后处理软件得到切割过程中切割力曲线及切割部位应力云图,如图 9、10 所示。

由图 10 可知,茎秆与圆盘刀接触时,接触部位

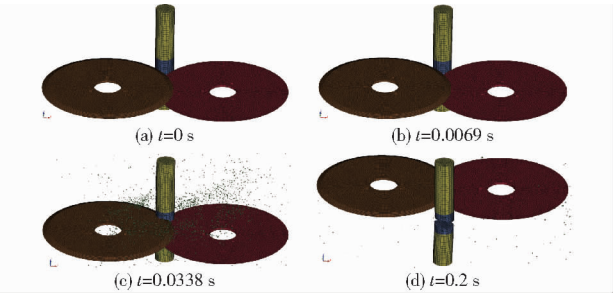


图 8　切割过程中不同时刻(t)的状态

Fig. 8　States at different moments (t) of cutting process

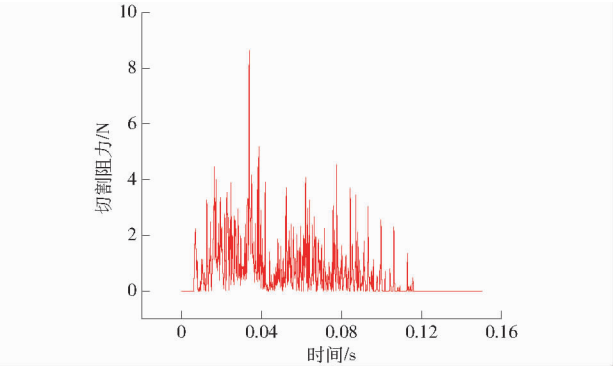


图 9　切割力变化曲线

Fig. 9　Cutting force variation curve

应力较大,随着茎秆继续喂入,挤压力不断增大,在 0.007 2 s 时应力达到最大值为 17.89 MPa。由于圆盘刀切割作用,部分失效单元转变成 SPH 粒子飞出。对切割部位应力云图分析可观察到圆盘刀对茎秆切割过程及作用效果,为后续对双圆盘式切茎装置参数优化提供理论依据。

利用试验台架进行验证试验,圆盘刀结构参数、圆盘刀转速、喂入速度、圆盘刀间距等参数均与仿真试验相同。为了降低试验误差,试验重复 3 次,取 3 株生长状态良好的成熟蒜株进行切割试验,通过动态转矩传感器对整个切割过程进行实时动态数据记录,如图 11 所示。

当圆盘刀转速为 500 r/min 时,空转转矩为 0.35 N·m,3 次转矩峰值分别为 0.92、0.88、0.89 N·m,根据转矩曲线计算最大切割阻力,平均值为 9.11 N,仿真计算结果与实际切割阻力相对误差为 5.3%,误差较小,证明了仿真模型可靠性,为后续使用该仿真模型进行多因素正交试验提供了依据。

3.3　仿真结果分析及参数优化

根据三因素三水平正交试验方案,分别对圆盘刀不同结构参数的仿真模型进行建模并展开仿真试验。根据试验结果进行极差分析如表 4 所示,A、B、C 为因素水平值。其中圆盘刀厚度对最大切割力影响最大,其次是圆盘刀刃角,圆盘刀重叠量影响最小,各因子影响主次为 A、B、C,最优组合为 $A_1B_1C_2$。

采用 SPSS 26 对仿真结果进行方差分析,结果如表 5 所示。圆盘刀厚度由 1 mm 增加至 2 mm 时对圆盘刀最大切割阻力影响较小,增加至 3 mm 时对圆盘刀的最大切割阻力显著增加,圆盘刀厚度对最大切割阻力的影响特别显著;随着圆盘刀刃角的增大,圆盘刀所受到的最大切割阻力显著增大,圆盘刀刃角对最大切割阻力的影响较为显著;圆盘刀重叠量对最大切割阻力影响显著,与极差分析结果一致。

通过极差分析与方差分析得出不同圆盘刀结构参数对最大切割阻力的影响程度。考虑到大蒜切茎

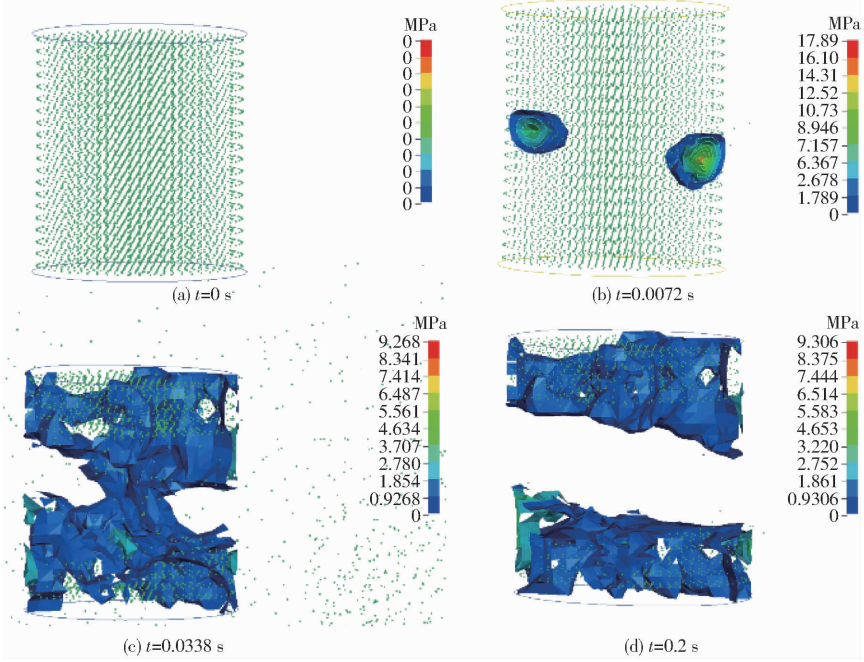


图 10　切割部位应力云图

Fig. 10　Cutting site stress maps

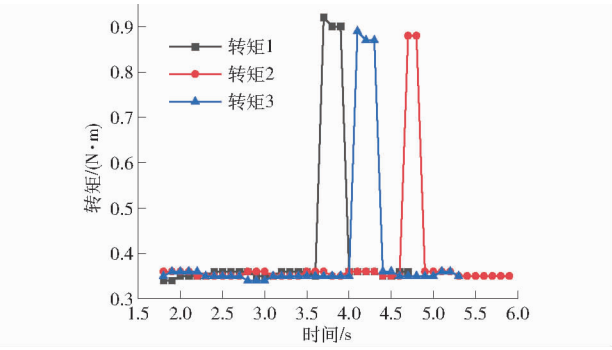


图 11 转矩测量结果

Fig. 11 Torque measurement results

表 4 试验结果与极差分析

Tab. 4 Experimental results and extreme variance analysis

序号	因素				最大切割阻力/N
	圆盘刀厚度 A	圆盘刀刃角 B	圆盘刀重叠量 C	空白列 D	
1	1	1	1	1	9.64
2	1	2	3	2	16.83
3	1	3	2	3	15.35
4	2	1	3	3	15.58
5	2	2	2	1	14.75
6	2	3	1	2	19.96
7	3	1	2	2	25.72
8	3	2	1	3	32.28
9	3	3	3	1	37.67
k_{1avg}	13.94	16.98	20.63	20.69	
k_{2avg}	16.76	21.29	18.61	20.83	
k_{3avg}	31.89	24.33	23.36	21.07	
R	17.95	7.35	4.75	0.38	
因子主次	1	2	3		
最优组合	$A_1B_1C_2$				

表 5 方差分析

Tab. 5 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	674.898	6	112.483	1 004.811	0.001 **
A	558.990	2	279.495	2 496.728	<0.001 **
B	81.762	2	40.881	365.192	0.003 **
C	34.146	2	17.073	152.512	0.007 **
误差	0.224	2	0.112		
总和	675.122	8			

注：** 表示影响极显著($P<0.01$)，下同。

装置为大蒜联合收获机的关键部件，长时间工作圆盘刀会造成一定的磨损甚至损坏，同时圆盘刀厚度较小易产生较大的振动，为了保证工作性能的稳定性，实际选用 2 mm 厚圆盘刀。因此所选用圆盘刀结构参数为厚度 2 mm、刃角 15°和重叠量 15 mm。

4 双圆盘切茎装置工作参数优化

4.1 试验材料与设备

选取成熟状况较好的邳州大蒜进行试验，通过测量可知蒜株高度 320.2 ~ 379.3 mm，蒜茎直径 15.28 ~ 19.12 mm，鳞茎高度 36.02 ~ 48.24 mm，茎秆密度 0.696 ~ 0.738 g/cm^3。试验仪器与试验设备主要包括大蒜双圆盘式切茎装置试验台架、JN - DN2 型动态转矩传感器、动态显示控制仪、电子秤、游标卡尺、卷尺等。切茎装置采用定制圆盘刀，厚度为 2 mm、刃角为 15°和重叠量为 15 mm。该装置可通过蜗杆手轮调节主夹持装置与拉齐装置之间的角度，同时调节高度调节螺母可调整主夹持装置与拉齐装置之间的高度。通过 PLC 控制面板调节伺服电机转速可控制蒜株的喂入速度与圆盘刀的转速。利用动态转矩传感器以及数据采集控制仪可对切割过程转矩进行记录。

4.2 试验方法

根据大蒜切茎装置的理论分析，并结合文献[27 - 31]，选取蒜株喂入速度、圆盘刀转速以及圆盘刀间距为试验因素，以最大切割阻力、切割完成率、鳞茎损伤率为评价指标，设计单因素试验确定工作参数试验范围，利用 Box - Behnken 试验确定最优的参数组合。考虑到不同蒜株直径、含水率等存在细微误差，试验过程中每组试验重复 3 次，试验结果取平均值，其中最大切割阻力计算式为

$$F_2 = \frac{T_1 - T_0}{R} \tag{5}$$

式中 F_2——切割阻力，N

T_1——峰值转矩，N·m

T_0——空转转矩，N·m

4.3 单因素试验

为了确定试验台架多因素正交工作参数试验范围，利用仿真试验对各工作参数进行单因素试验。通过查阅相关文献以及仿真预试验确定单因素试验范围[30 - 31]，其中喂入速度为 1 ~ 3 km/h、圆盘刀转速为 300 ~ 700 r/min、圆盘刀间距为 1 ~ 5 mm。各因素均选取等间距 5 水平进行单因素试验，当其他因素不作为主要影响因素的情况下，选取中间值为试验取值，各试验因素对最大切割阻力影响如图 12 所示。

大蒜切茎装置喂入速度对切割阻力的影响如图 12a 所示，蒜株喂入方向沿着 Y 轴喂入，Z 轴为垂直圆盘刀方向，因此 Y 轴方向分力较大，Z 轴方向分力较小，喂入速度对 Y 轴分力影响较为显著。随着喂入速度的增大，切割阻力不断增加，这是由于喂入速度的增加导致径向冲击力的增加，直接影响切割阻力的变化，圆盘刀受到冲击力的同时会对轴向产生一定的分力，轴向分力会引起圆盘刀的振动，因此随着喂入速度的增大切割阻力也随之增大。考虑到

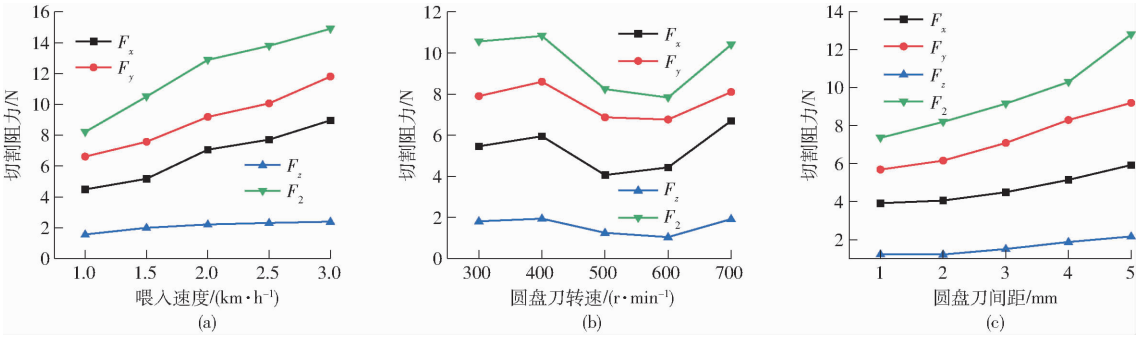


图 12　试验因素对切割阻力的影响

Fig. 12　Effect of test factors on cutting resistance

收获机械工作效率问题，适当增加喂入速度，选取喂入速度为 1.5 ~ 2.5 km/h。

圆盘刀转速对切割阻力的影响如图 12b 所示，切割阻力随着圆盘刀转速的增加呈先增大后减小再增大的趋势，当圆盘刀转速小于 400 r/min 时，圆盘刀转速较低，喂入速度一定，单位时间内进给量较大，导致部分材料未得到及时切割，切割过程由滑切转变为砍切，增大了圆盘刀与茎秆之间的摩擦力，蒜株的切割过程变得困难，切割阻力增大。当转速为 400 ~ 600 r/min 时，圆盘刀转速增加使茎秆能够顺利完成切割，切割阻力较小。当转速大于 600 r/min 时，转速过大导致圆盘刀片的横向振动，圆盘刀的稳定性降低，从而引起切割阻力再次增大。因此选取圆盘刀转速为 400 ~ 600 r/min。

圆盘刀间距对切割阻力影响如图 12c 所示，随着圆盘刀间距的不断增大切割阻力也逐渐增大，当圆盘刀间距较小时两圆盘刀之间对蒜茎起到支撑作用，其切割过程可近似为剪切状态，并且两圆盘刀切割面可近似为一个平面，圆盘刀与茎秆间摩擦力较小，切割阻力小，当圆盘刀间距较大时，蒜茎局部会产生一定的塑性变形，圆盘刀间的支撑作用减弱，塑性变形会对圆盘刀产生一定支反力的作用，同时由于圆盘刀间距过大，两圆盘刀切割平面不在一个平面上，导致圆盘刀与茎秆接触面积增大摩擦力也随之增大，因此切割阻力随着圆盘刀间距的增大而增大。选取圆盘刀间距为 1 ~ 3 mm。

4.4　多因素正交试验及响应面分析

根据单因素试验分析，选取各因素试验范围分别为喂入速度 1.5 ~ 2.5 km/h、圆盘刀转速 400 ~ 600 r/min 和圆盘刀间距 1 ~ 3 mm，利用 Design-Expert 13 软件进行 Box－Behnken 试验设计，试验因素编码如表 6 所示，根据所设计试验方案对不同因素水平进行台架试验，试验结果如表 7 所示，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

对表 7 数据进行多元线性回归拟合及方差分析，结果如表 8 所示。筛选出较为显著的因素，进而得出性能指标与因素编码之间的回归方程。

表 6　试验因素编码

Tab. 6　Experimental factors and levels

编码	因素		
	喂入速度 x_1/(km·h^{-1})	圆盘刀转速 x_2/(r·min^{-1})	圆盘刀间距 x_3/mm
－1	1.5	400	1
0	2.0	500	2
1	2.5	600	3

表 7　试验方案与结果

Tab. 7　Experimental programme and results

序号	因素			y/N
	X_1	X_2	X_3	
1	－1	－1	0	10.8
2	1	－1	0	11.7
3	－1	1	0	9.89
4	1	1	0	8.65
5	－1	0	－1	6.99
6	1	0	－1	8.02
7	－1	0	1	10.20
8	1	0	1	11.82
9	0	－1	－1	8.81
10	0	1	－1	6.97
11	0	－1	1	12.6
12	0	1	1	11.20
13	0	0	0	9.53
14	0	0	0	8.82
15	0	0	0	9.13
16	0	0	0	8.67
17	0	0	0	9.01

由表 8 可知，模型 $P = 0.000\,4 < 0.001$，表明最大切割阻力的回归模型显著；失拟项 $P = 0.110\,4 > 0.05$，失拟项为不显著，表明模型与试验结果拟合较好。最大切割阻力与试验因素的回归方程为

$$y = 27.998 + 0.571x_1 - 0.083x_2 + 1.05x_3 - 0.01x_1x_2 + 0.275x_1x_3 + 0.001x_2x_3 + 1.2x_1^2 - 0.066x_3^2 \quad (6)$$

为了更直观分析试验指标与各因素间的关系，

表 8 最大切割阻力方差分析

Tab. 8 Analysis of variance for maximum cutting resistance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	41.12	9	4.57	18.73	0.000 4 **
X_1	0.649 8	1	0.649 8	2.66	0.146 7
X_2	6.53	1	6.53	26.79	0.001 3 **
X_3	28.46	1	28.46	116.70	<0.000 1 **
X_1X_2	1.16	1	1.16	4.74	0.066 0
X_1X_3	0.075 6	1	0.075 6	0.310 1	0.595 0
X_2X_3	0.048 4	1	0.048 4	0.198 4	0.669 4
X_1^2	0.382 7	1	0.382 7	1.57	0.250 5
X_2^2	3.67	1	3.67	15.06	0.006 0 **
X_3^2	0.018 3	1	0.018 3	0.075 2	0.791 8
残差	1.71	7	0.243 9		
失拟项	1.27	3	0.424 4	3.91	0.110 4
纯误差	0.434 1	4	0.108 5		
总和	42.83	16			

运用 Design-Expert 13 软件得到响应曲面，如图 13 所示。

喂入速度和圆盘刀转速对最大切割阻力的影响如图 13a 所示。当圆盘刀间距不变时，圆盘刀转速越低，喂入速度越大其最大切割阻力越大，随着转速的增大最大切割阻力随之减小。当喂入速度较低时，刀片转速较大时切割阻力也会增大。其主要原因是喂入速度的增大，导致圆盘刀径向冲击力增大，直接影响切割阻力大小，圆盘刀转速小喂入速度大，单位时间内进给量较大，切割阻力变大；当转速增大时，圆盘刀顺利完成茎秆的滑切过程，同时转速过大圆盘刀会产生横向振动也会影响最大切割阻力。

喂入速度和圆盘刀间距对最大切割阻力的影响如图 13b 所示。当圆盘刀转速和喂入速度不变时，最大切割阻力随着圆盘刀间距的增大而增大。圆盘刀间距较小时，喂入速度对最大切割阻力影响较小，切割阻力基本相同。圆盘刀间距较大时，喂入速度对最大切割阻力影响较大。其原因是当圆盘刀间距较小时，局部塑性变形较小，破坏过程区域整体一次性断裂，随着喂入速度的增大，圆盘刀轴向振动较小，切割阻力增幅较小。当圆盘刀间距较大时，随着喂入速度的增加，茎秆对圆盘刀两圆盘刀切割面不在同一平面，大大增加切割接触面积，同时茎秆与圆盘刀接触发生较大的弹性形变，导致切割刀轴向振动增大，导致切割阻力大幅增加。

圆盘刀转速和圆盘刀间距对最大切割阻力的影响如图 13c 所示。喂入速度一定，当圆盘刀转速较小时，随着圆盘刀间距的增大，最大切割阻力增加幅度较大，切割阻力达到最大值。当圆盘刀转速较大时，随着圆盘刀间距的增大，最大切割阻力增加的幅度较小，整体切割阻力较小。其原因是圆盘刀间距较大时，低转速条件下切割蒜茎局部产生充分的弹性形变，其变形程度远比高转速切割时大，最大切割阻力也随之增大。

在 Design-Expert 13 软件中进行工作参数的优化求解，并设置相应的约束条件为

$$\begin{cases} \min y \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{7}$$

得到最优参数为喂入速度 2.16 km/h、圆盘刀转速 563.52 r/min、圆盘刀间距 1 mm，在此条件下模型预测最大切割阻力为 6.78 N。

5 台架试验验证

为了验证试验台架工作参数优化后的切割阻力是否与实际结果一致，根据实际可操作性，确定实际最优工作参数为喂入速度 2.1 km/h、圆盘刀转速 560 r/min、圆盘刀间距 1 mm。利用 PLC 控制器对输入伺服电机的脉冲数进行控制，改变传送带的喂入

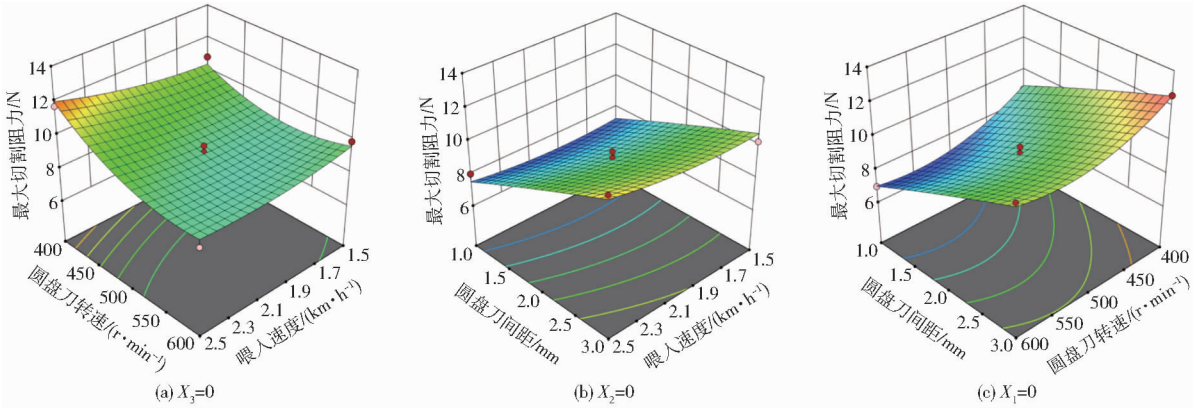


图 13 最大切割阻力响应面

Fig. 13 Maximum cutting resistance response surfaces

速度以及圆盘刀的转速。试验重复 3 次，转矩测量结果如图 14 所示，由图 14 可知，空转转矩为 0.36 N·m，3 次测量最大切割转矩分别为 0.8、0.78、0.82 N·m，优化后实际最优工作参数下最大切割阻力平均值为 7.33 N，试验结果与模型预测结果误差为 7.5%。

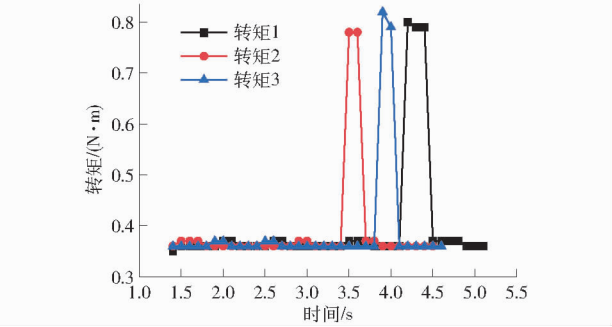
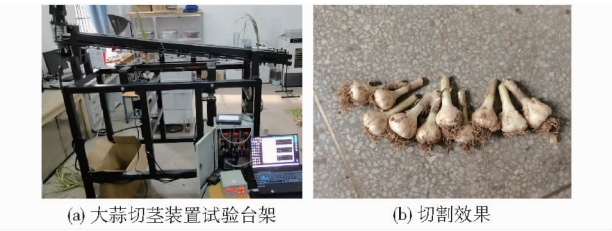


图 14　台架试验转矩测量结果

Fig. 14　Torque measurement results

试验样机及切割效果如图 15 所示，在多组台架试验过程中，双圆盘式切茎装置完成了对所有组试验大蒜茎秆的切割，无漏割现象，切割过程较为平稳，茎秆切割面均较为平整，且无鳞茎损伤现象，满足大蒜收获茎秆切割要求。



(a) 大蒜切茎装置试验台架　　(b) 切割效果

图 15　试验台架及切割效果

Fig. 15　Test stand and cutting effect

6　结论

(1)基于 SPH－FEM 耦合算法对大蒜双圆盘式切茎装置进行了仿真分析及参数优化，设计了一种双圆盘式大蒜切茎装置，相比于传统切茎装置具有切割阻力小、工作性能稳定、切割过程平稳等优点，减少圆盘刀磨损，避免了由于切割不及时造成的夹持输送装置堵塞以及大蒜鳞茎损伤等问题，实现低阻高效的茎秆切割作业。

(2)根据对大蒜茎秆物理参数以及力学参数，确定大蒜材料模型。利用 ANSYS/LS－DYNA 基于 SPH－FEM 耦合算法对大蒜茎秆切割过程进行动态仿真模拟，对圆盘刀结构参数进行仿真优化，根据受力分析确定以圆盘刀厚度、圆盘刀刃角、圆盘刀重叠量为影响因素，以最大切割阻力为试验指标进行茎秆切割仿真正交试验，通过极差分析与方差分析得到圆盘刀最佳结构参数为圆盘刀厚度 2 mm、刃角 15°、重叠量 15 mm。

(3)通过仿真模型进行单因素试验，确定大蒜切茎装置工作参数范围，并利用 Box－Behnken 设计三因素三水平正交试验，以最大切割阻力为评价指标，通过台架试验优化大蒜切茎装置的工作参数，结果显示实际最优工作参数为喂入速度 2.1 km/h、圆盘刀转速为 560 r/min 和圆盘刀间距为 1 mm，在此条件下模型预测最大切割阻力为 6.78 N。台架试验结果表明，最大切割阻力平均值为 7.33 N，与预测结果误差为 7.5%；该双圆盘式切茎装置切割阻力小、作业过程平稳，茎秆切割横截面平整，且工作过程中无鳞茎损伤，满足大蒜收获需求。

参　考　文　献

[1] 崔志超，刘先才，陈永生，等. 我国大蒜全程机械化生产现状、问题与对策[J]. 中国农机化学报，2023，44(6)：239－243，250.
CUI Zhichao, LIU Xiancai, CHEN Yongsheng, et al. Status, problems and countermeasures of whole mechanized production of garlic in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 239－243, 250. (in Chinese)

[2] 赵健，单立明，张欣，等. 大蒜收获机参数优化试验研究[J]. 农机化研究，2021，43(2)：169－173.
ZHAO Jian, SHAN Liming, ZHANG Xin, et al. Parameter optimization of garlic harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(2): 169－173. (in Chinese)

[3] 李胜兵，李骅，齐新丹，等. 大蒜收获机研究现状及展望[J]. 江西农业学报，2020，32(10)：99－104.
LI Shengbing, LI Hua, QI Xindan, et al. Research status and prospect of garlic harvester[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2020, 32(10): 99－104. (in Chinese)

[4] 金鑫，杜新武，王世光，等. 胡萝卜收获机根茎分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(3)：82－89.
JIN Xin, DU Xinwu, WANG Shiguang, et al. Design and test of root and stem separation device for carrot harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 82－89. (in Chinese)

[5] 王金武，关睿，高鹏翔，等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(9)：73－81.
WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and test of a single disc top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 73－81. (in Chinese)

[6] 薛忠，张留峰，宋刚，等. 基于圆盘式切割器的木薯茎秆切割试验研究[J]. 农机化研究，2019，41(6)：191－195，200.
XUE Zhong, ZHANG Liufeng, SONG Gang, et al. Experimental study on cassava stalk cutting based on disc cutter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 191－195, 200. (in Chinese)

[7] KONG F, WANG D, SHI L, et al. Dynamic analysis and parameter optimization of the cutting system for castor harvester picking devices[J]. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2116.

[8] MENG Y, WEI J, WEI J, et al. An ANSYS/LS－DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system

of mulberry cutting machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 38 - 48.
[9] YANG W, ZHAO W, LIU Y, et al. Simulation of forces acting on the cutter blade surfaces and root system of sugarcane using FEM and SPH coupled method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 105893.
[10] 杨玲,张原,何志远,等.旋转剪切式青花椒采摘装置设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(3):72 - 83.
YANG Ling, ZHANG Yuan, HE Zhiyuan, et al. Design and test of rotary shear type green pepper picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(3): 72 - 83. (in Chinese)
[11] 沈成, 李显旺, 田昆鹏, 等. 苎麻茎秆力学模型的试验分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 26 - 33.
SHEN Cheng, LI Xianwang, TIAN Kunpeng, et al. Experimental analysis of mechanical modelling of ramie stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 26 - 33. (in Chinese)
[12] 廖宜涛, 廖庆喜, 田波平, 等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 124 - 129.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, TIAN Boping, et al. Experimental study on the mechanical and physical characteristics of bottom stalks of reed bamboo during harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 124 - 129. (in Chinese)
[13] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 172 - 176.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Progress of research on mechanical properties of crop stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 172 - 176. (in Chinese)
[14] SOUZA S H V, SANTOS R A A, COSTA G L A, et al. Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 476 - 483.
[15] 陆亮. 基于 LS - dyna 的巨菌草锯切仿真与切割器参数优化[D]. 长沙:中南林业科技大学,2023.
LU Liang. Sawing simulation and cutter parameter optimisation of giant fungus grass based on LS - dyna[D]. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
[16] 孙健峰,邢凯峰,杨洲,等. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的果枝修剪过程仿真与试验研究[J]. 华南农业大学学报,2022, 43(4):113 - 124.
SUN Jianfeng, XING Kaifeng, YANG Zhou, et al. Simulation and experimental study of fruit pruning process based on ANSYS/LS - DYNA[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(4): 113 - 124. (in Chinese)
[17] 黄汉东,王玉兴,唐艳芹,等. 甘蔗切割过程的有限元仿真[J]. 农业工程学报,2011,27(2):161 - 166.
HUANG Handong, WANG Yuxing, TANG Yanqin, et al. Finite element simulation of sugarcane cutting process[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 161 - 166. (in Chinese)
[18] 张正中, 梁式, 吕焕培, 等. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的甘蔗切割动力学仿真分析[J]. 农机化研究, 2010, 32(1): 64 - 67.
ZHANG Zhengzhong, LIANG Shi, LÜ Huanpei, et al. Simulation and analysis of sugarcane cutting dynamics based on ANSYS/LS - DYNA[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(1): 64 - 67. (in Chinese)
[19] XIAO N, ZHOU X, GONG Q. The modelling of rock breakage process by TBM rolling cutters using 3D FEM - SPH coupled method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2017, 61: 90 - 103.
[20] ZHENG Z J, KULASEGARAM S, CHEN P, et al. An efficient SPH methodology for modelling mechanical characteristics of particulate composites[J]. Defence Technology, 2021, 17(1): 135 - 146.
[21] AFRASIABI M, KLIPPEL H, RÖTHLIN M, et al. An improved thermal model for SPH metal cutting simulations on GPU[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 100: 728 - 750.
[22] 叶纪元,杨扬,徐绯,等. 基于自适应 FEM - SPH 耦合算法的飞机典型部位破片冲击战伤的数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2024,44(6):134 - 145.
YE Jiyuan, YANG Yang, XU Fei, et al. Numerical study of fragmentation impact war damage in typical parts of aircraft based on adaptive FEM - SPH coupling algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(6): 134 - 145. (in Chinese)
[23] JOHNSON G R, STRYK R A, GERLACH C A, et al. A quantitative assessment of computational results for behind armor debris[C]// Proceedings of 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 2007.
[24] AHMADI E, BARIKLOO H, KASHFI M. Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 1 - 11.
[25] 戴尔健. 大蒜机械化播种农机农艺融合技术推广应用探析[J]. 江苏农机化,2021(4):20 - 22.
[26] 孔凡婷,王德福,石磊,等. 圆盘切割式蓖麻采摘装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(23):1 - 9.
KONG Fanting, WANG Defu, SHI Lei, et al. Design and test of disc cutting castor picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 1 - 9. (in Chinese)
[27] 于昭洋, 胡志超, 王海鸥, 等. 大蒜果秧分离机构参数优化及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 40 - 46.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Optimisation of parameters and test of garlic fruit and seedling separation mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 40 - 46. (in Chinese)
[28] 于昭洋, 胡志超, 王海鸥, 等. 大蒜果秧分离试验装置的设计与测试[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 7 - 15.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. Design and testing of a test device for separating garlic fruit and seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 7 - 15. (in Chinese)
[29] 侯加林, 李超, 娄伟, 等. 大蒜联合收获机浮动式夹持装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 137 - 145.
HOU Jialin, LI Chao, LOU Wei, et al. Design and test of floating clamping device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 137 - 145. (in Chinese)
[30] 于昭洋, 胡志超, 杨柯, 等. 大蒜收获机浮动切根装置作业机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 111 - 119.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, YANG Ke, et al. Mechanism analysis and parameter optimisation of floating root cutting device for garlic harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 111 - 119. (in Chinese)
[31] 李超. 手扶式大蒜联合收获机的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
LI Chao. Design and test of hand-held garlic combine harvester[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)