doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.010

面向切割过程仿真的小麦茎秆模型参数标定与试验验证

孙　凯　于建群　赵瑾汶　孙永昌　于亚军　梁留锁　王　扬
（吉林大学生物与农业工程学院，长春 130022）

摘要：基于离散元法的小麦植株切割过程仿真，对于小麦收获机械切割部件分析与优化具有重要的意义，而准确测量及标定小麦植株力学参数是仿真重要前提。本文基于 Hertz－Mindlin with Bonding 模型在自主研发的 AgriDEM 软件中建立小麦茎秆模型。搭建单摆切割试验装置并进行了茎秆动态切割试验，探究了茎秆相关物理特性及切割参数对茎秆切断力的影响，同时，基于 AgriDEM 软件进行了茎秆单摆动态切割仿真并与实际试验进行对比，结果表明利用准静态粘接力学参数进行动态切割仿真时，茎秆切断力仿真误差随着切割速度增大而增大。为降低不同切割速度下仿真误差，提出了 2 种茎秆粘接力学参数标定方法。①以刚度和临界应力为试验因素的多变量中心组合优化标定方法，得到摆切线速度为 1 m/s 的情况下，法向刚度、切向刚度、临界法向应力和临界切向应力优化值分别为 2.82×10^{11} N/m^3、1.32×10^{11} N/m^3、9.50×10^{6} Pa 和 6.46×10^{6} Pa。②以粘接半径放大因子为单变量的标定方法，得到摆切线速度为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s 时，粘接半径放大因子优化值分别为 0.997、1.106、1.163、1.213、1.323、1.439，并得到切割速度与粘接半径放大因子标定值间的拟合方程。通过最大切割速度为 1 m/s 的往复式切割试验与仿真对比可知，采用刚度和临界应力组合优化标定方法，茎秆切断力仿真误差由 22.55% 降低到 9.13%；采用粘接半径放大因子的方法，当粘接半径放大因子为 1.068 时，茎秆切断力仿真误差由 22.55% 降低至 6.58%。证明了本文提出的两种参数标定方法可有效降低茎秆动态切割仿真误差，且利用有效切割速度中间值对应的粘接半径放大因子标定值开展往复式切割作业仿真是准确且可行的方法，研究结果为小麦切割作业过程仿真和关键切割部件优化设计提供参考。

关键词：小麦茎秆；离散元法；AgriDEM 软件；动态切割；参数标定
中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0116-12　　**OSID**：

Parameter Calibration and Experimental Validation of Wheat Straw Model for Cutting Process Simulation

SUN Kai　YU Jianqun　ZHAO Jinwen　SUN Yongchang　YU Yajun　LIANG Liusuo　WANG Yang
(*School of Biological and Agricultural Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130022, *China*)

Abstract: Simulation analysis of wheat plant cutting process based on discrete element method (DEM) is of great significance for the optimization of cutting parts of wheat harvesting machinery, while accurate measurement and calibration of mechanical parameters of wheat plant is an important prerequisite for simulation. Firstly, a wheat straw model based on the Hertz－Mindlin with Bonding model was established in the self-developed AgriDEM software. Then a single pendulum cutting test device was built and dynamic cutting test was carried out to investigate the influence of straw-related physical properties and cutting parameters on the straw-cutting force. At the same time, a dynamic straw-cutting simulation was carried out based on the AgriDEM software. Comparing the simulation results with the actual test, the results showed that the simulation error of straw-cutting forces was increased with the increase of cutting speed when using quasi-static bonding parameters for dynamic cutting simulation. To reduce the simulation error at different cutting speeds, two calibration methods for the bonding parameters of wheat straws were proposed. The first method was a multi-variable central combination optimization calibration method with stiffness coefficient and critical stress as test factors, which obtained the optimized values of

收稿日期：2025－02－26　修回日期：2025－03－18
基金项目：国家自然科学基金重点项目(52130001)
作者简介：孙凯(1995—)，男，助理研究员，博士，主要从事农机数字化设计与仿真研究，E-mail：sunkai@jlu.edu.cn
通信作者：王扬(1987—)，男，高级工程师，博士，主要从事农机数字化设计与离散元软件研究，E-mail：ywang1987@jlu.edu.cn

the normal stiffness coefficient, tangential stiffness coefficient, critical normal stress, and critical tangential stress for a cutting speed of 1 m/s, respectively, as 2.82×10^{11} N/m^3, 1.32×10^{11} N/m^3, 9.50×10^6 Pa and 6.46×10^6 Pa, respectively. The second method was a single-variable calibration method with the bonding radius scaling factor, and the optimized values of the bonding radius scaling factor were obtained as 0.997, 1.106, 1.163, 1.213, 1.323 and 1.439 for the pendulum-cutting speeds of 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, and a fitting equation between the cutting speed and the calibration value of the bonding radius scaling factor was obtained. Finally, by comparing the reciprocating cutting test with simulation at cutting speed of 1 m/s, it was found that using the first calibration method with stiffness coefficient and critical stress, the simulation error of the straw cut-off force was reduced from 22.55% to 9.13%. Using the second calibration method, when the bonding radius scaling factor were 1.068, the simulation error of the straw cut-off force was reduced from 22.55% to 6.58%. This preliminary demonstrated that the two bonding parameter calibration methods proposed can effectively reduce the simulation error of straw-cut-off force, and the use of calibration value of the bonding radius scaling factor corresponded to the middle value of the effective cutting speed to simulate the reciprocating cutting operation was the most accurate and feasible method. The research result can provide a reference for the simulation of wheat cutting operation process and the optimized design of key cutting components.

Key words: wheat straw; discrete element method; AgriDEM software; dynamic cutting; parameters calibration

0　引言

小麦作为全国主要粮食作物，种植面积广且机械化作业程度高。小麦植株切割作业作为田间机械化收获作业的重要环节，其作业质量直接影响后续及整个收获作业过程，因此开展植株切割过程研究对切割器设计、分析及优化具有重要意义。

近年来，相关学者[1-3]在准静态条件下开展了茎秆切割试验，通常将自制切割夹具置于万能试验机或质构仪悬臂上，通过夹具相对运动完成切割试验，这类试验方法可有效地获取准静态条件下切割过程中力与位移曲线，一定程度上反映切割力学特性[4]。但准静态茎秆切割试验无法准确获取动态瞬时切割工况下茎秆力学参数及变化规律。

为了进一步研究作物茎秆动态切割力学特性，相关学者研制了多种形式的作物茎秆动态切割试验装置，以满足不同作物不同切割方式、切割速度及茎秆喂入速度等多种作业参数与结构参数的调节与测试。针对单茎秆动态切割试验，相关学者采用单摆切割试验台架[5-6]对水稻、玉米等作物茎秆的切割力学性能进行了试验，得到切割力和功耗与切割速度、切割位置及切割角度等作业参数相关关系[7]。为使台架试验可以更为真实地模拟田间切割作业情况，国内外学者进一步采用与实际作业一致的切割器并配备茎秆喂入装置，对苎麻[8]、小麦[9]、棉花[10]和沙棘枝条[11]等茎秆进行了多因素组合台架试验，得到了优化结构与工作参数组合。

茎秆作为粘弹性体，利用离散元法仿真模拟物料断裂及破碎过程具有良好的模型优势[12]。相关学者[13-14]基于离散元法建立了可弯曲或可破碎的植株（包括茎秆）模型[15]，并应用于切割[3,16]、输送[17]、脱粒[18-20]及分离清选[21-22]等收获过程的仿真模拟。

茎秆模型参数精度是确保切割仿真结果可靠性的关键，而茎秆模型部分参数通常难以直接测量得到。需要进一步对粘接参数进行标定试验。针对茎秆离散元模型粘接参数标定方法，大多数学者通常采用准静态弯曲、剪切等试验标定得到小麦[13,23]、水稻[3]、油菜[24]、棉花[25]和柑橘[26]等茎秆模型最佳粘接参数组合。而利用准静态试验标定得到的仿真参数进行动态切割仿真能否真实准确反映真实的切割性能有待进一步研究[15]。同时，不同切割作业速度下茎秆模型力学参数标定方法也需要深入研究。

课题组面向农业机械领域自主研发的 AgriDEM 软件[27]可自主实现 DEM - CFD - MBD/MBK 耦合功能，可以直接分析农机部件工作过程，如土壤深松[28]、播种[29]和脱粒等[30]。

针对茎秆切割作业仿真问题，同时为验证 AgriDEM 软件仿真结果准确与可靠性，本文基于离散元法建立小麦茎秆模型，分别在准静态及动态条件下进行切割试验及仿真，探究准静态粘接参数在不同切割速度下仿真误差。在此基础上，建立适用于动态切割仿真小麦茎秆模型粘接力学参数标定方法。并利用往复式茎秆切割试验与仿真对比验证粘接参数标定方法可行性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用在黄淮海地区主栽的山农 28、济麦 52 及中麦 23 小麦植株为研究对象,所采集的小麦植株均处于蜡熟期,其含水率为 12.46% ~17.78%,每个品种采样 200 株。3 个品种小麦植株平均高度为 626.97 ~654.90 mm。在田间作业过程中,割刀离地高度通常为 10 ~15 cm,可知切割部位通常为茎秆第 4 节间,故选择茎秆第 4 节间进行切割试验。

1.2 茎秆参数测量与标定

1.2.1 茎秆物理参数测定

随机选取 50 株小麦植株,利用游标卡尺测量茎秆第 4 节间外径及壁厚。由于小麦茎秆节间细长且质轻,其实际密度和泊松比较难测量,参照文献[31],选取小麦茎秆泊松比为 0.25,并利用线密度来表示茎秆节间密度分布,茎秆第 4 节间本征参数测量结果如表 1 所示。

表 1 小麦茎秆第 4 节间参数实际测量值和标定值

Tab.1 Actual measured and calibrated values of fourth internode parameters of wheat straw

参数		中麦 23	山农 28	济麦 52
外径/mm		3.97	3.95	3.69
壁厚/mm		0.56	0.59	0.52
线密度/(g·m^{-1})		3.83	5.24	5.22
碰撞恢复系数	茎秆-不锈钢	0.45	0.48	0.51
	茎秆-茎秆	0.18	0.24	0.21
静摩擦因数	茎秆-不锈钢	0.54	0.52	0.58
	茎秆-茎秆	0.58	0.61	0.67
滚动摩擦因数	茎秆-不锈钢	0.01	0.01	0.01
	茎秆-茎秆	0.018	0.016	0.021
茎秆弹性模量/GPa		1.098	0.909	0.748
茎秆轴向拉伸刚度/(N·mm^{-1})		118.79	94.56	98.66
茎秆轴向拉伸极限应力/MPa		13.26	11.25	7.06
茎秆径向剪切极限应力/MPa		4.89	3.78	5.05

1.2.2 茎秆接触力学参数测定

如图 1a、1b 所示,采用单摆法和跌落试验并借助高速摄像测量小麦茎秆间以及小麦茎秆与边界间的碰撞恢复系数。如图 1c 所示,采用自制斜面仪并借助高速摄像分别测量茎秆与茎秆、茎秆与边界间静摩擦因数,测量结果如表 1 所示。

小麦茎秆在斜面上滚动容易受静电作用影响,且在运动过程中难以确定质心,故基于能量守恒原理采用斜面法难以准确测量得到茎秆滚动摩擦因数。由文献[32-33]可知,茎秆与边界间的滚动摩擦因数对堆积角影响并不显著,因此参照文献[34]选取茎秆与边界间滚动摩擦因数为 0.01。同时利用

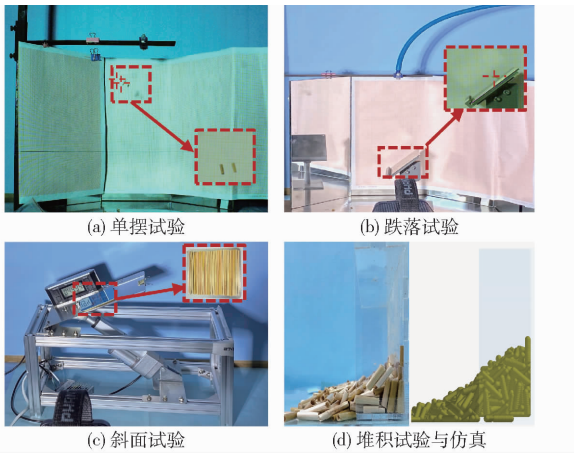


图 1 茎秆接触参数测量与标定

Fig.1 Measurement and calibration of straw contact parameter

堆积仿真与试验对比标定茎秆间的滚动摩擦因数,如图 1d 所示,以茎秆间滚动摩擦因数为试验因素进行茎秆堆积角仿真试验,得到对应堆积角仿真值,并对仿真值进行拟合,得到茎秆滚动摩擦因数与堆积角线性关系式,将茎秆堆积角实际试验值代入关系式,即可求得茎秆间的滚动摩擦因数标定值,如表 1 所示。

1.2.3 茎秆准静态连接力学参数测定

如图 2a 所示,将茎秆试样分别装夹在质构仪夹具两端,以速度 10 mm/min 进行准静态拉伸试验。图 2b 为试验测得的试样力与位移曲线,通过对弹性变形阶段曲线进行线性拟合,得到斜率即为茎秆试样轴向刚度 k_n,并可计算得到试样弹性模量 E_{straw} 为

$$E_{straw}=\frac{F_n}{\Delta L}\frac{L_{eff}}{A_s}=\frac{k_nL_{eff}}{A_s}=\frac{4k_nL_{eff}}{\pi(D_s^2-d_s^2)} \tag{1}$$

式中 L_{eff}——试样有效长度,m

F_n——茎秆拉伸力,N

ΔL——试样有效长度形变量,m

A_s——试样横截面积,m^2

D_s——试样外径,m

d_s——试样内径,m

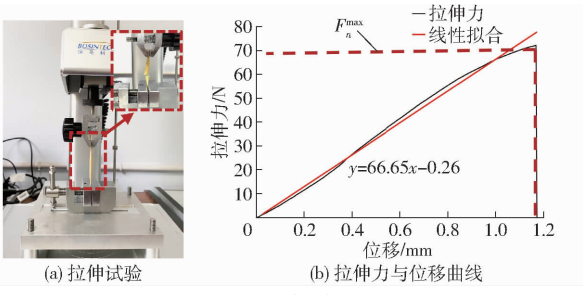


图 2 茎秆拉伸试验

Fig.2 Straw tensile test

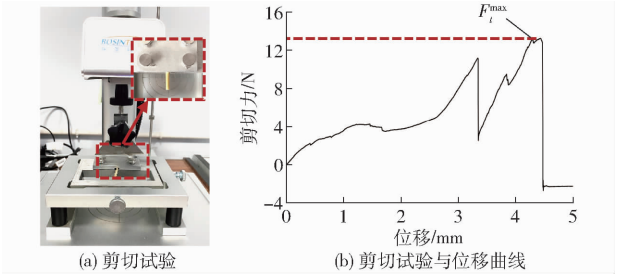
在拉伸试验中,当拉伸力大于茎秆拉断力 F_n^{max} 时,拉伸力突变趋于 0,试样断裂。则茎秆轴向拉伸

极限应力 $\sigma_{\max}$ 为

$$\sigma_{\max}=\frac{F_n^{\max}}{A_s} \tag{2}$$

如图 3 所示，将茎秆试样装夹在质构仪剪切夹具上进行准静态剪切试验，切刀以速度 10 mm/min 垂直向下运动，在剪切力作用下，小麦茎秆圆形截面开始扁平化，当茎秆上下内壁接触时，剪切力开始增大，直到茎秆上壁切断，剪切力突然减小，当切刀开始剪切下壁时，剪切力又逐渐增大至茎秆剪断力 $F_t^{\max}$，茎秆完全被切断。因此茎秆剪切极限应力 $\tau_{\max}$ 可表示为

$$\tau_{\max}=\frac{F_t^{\max}}{A_s} \tag{3}$$



(a) 剪切试验　　(b) 剪切试验与位移曲线

图 3　茎秆剪切试验

Fig. 3　Straw shear test

准静态条件下茎秆轴向拉伸刚度、轴向拉伸极限应力和径向剪切极限应力测量结果如表 1 所示。

1.3　基于离散元的小麦茎秆模型构建方法

1.3.1　基于离散元法的小麦茎秆几何模型

文献[33]提出了一种小麦植株通用建模方法，如图 4 所示。其中茎秆模型采用线性球排列方式，具有颗粒少，排列简单，模型参数易测量等优点，可通过若干个相同的球颗粒依次线性排列形成长度为 L_{straw}^j 的节间 j，故茎秆组成球颗粒坐标可表示为

$$\begin{cases} X_j^i = -(2i-1)R_{\text{straw}}^j - 2\sum_{j=1}^{j-1} N_{\text{straw}}^{j-1} R_{\text{straw}}^{j-1} \\ Y_j^i = 0 \\ Z_j^i = 0 \end{cases} \tag{4}$$

式中　N_{straw}^j——第 j 个节间组成球数量

R_{straw}^j——第 j 个节间组成球半径

X_j^i、Y_j^i、Z_j^i——茎秆第 j 节间第 i 个组成球颗粒坐标，$i=1,2,\cdots,N_{\text{straw}}^j$，$j=1,2,\cdots,5$

1.3.2　茎秆力学模型与参数测定

选用 Hertz－Mindlin 模型作为茎秆间接触模型，同时为体现茎秆柔性特征，模拟小麦茎秆弯曲、断裂等现象，采用平行粘接模型（Parallel Bonding model）作为球颗粒间粘接模型，如图 5 所示。

在 AgriDEM 软件中，平行粘接模型粘接力（力矩）由弹性力（力矩）和阻尼力（力矩）组成，考虑到农业物料各向异性特点，定义平行粘接模型法向粘接力 $f_X^{(t)}$ 为局部坐标系 X 方向，切向粘接力 $f_{Y(Z)}^{(t)}$ 分为局部坐标系的 Y 和 Z 两个方向，如图 5 所示。则法切向粘接力（力矩）可分别表示为

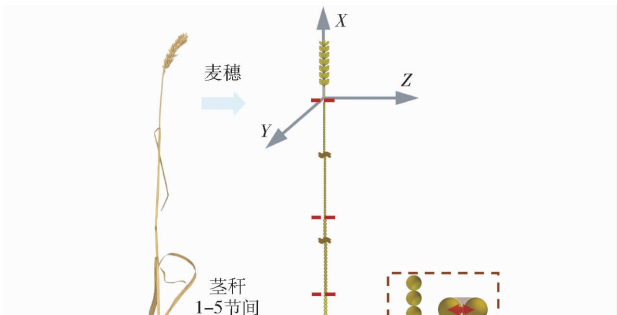


图 4　小麦植株实物与模型

Fig. 4　Wheat plant speciment and model

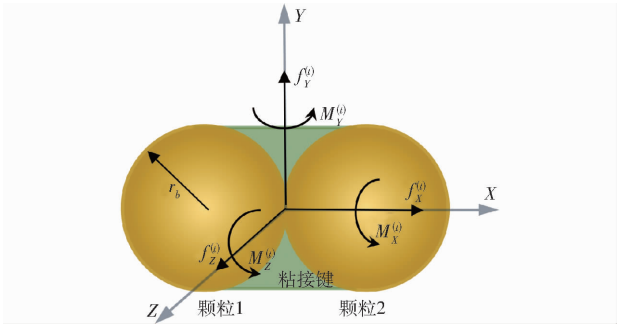


图 5　平行粘接模型

Fig. 5　Parallel bonding model

$$f_X^{(t)} = -k_X A_b(\delta_X^{(t)} - \delta_X^{(0)}) - \frac{c_X A_b \Delta u_X^{(t)}}{\Delta t} \tag{5}$$

$$f_{Y(Z)}^{(t)} = -f_{Y(Z)K}^{(t-\Delta t)} - k_{Y(Z)} A_b \Delta u_{Y(Z)}^{(t)} - \frac{c_{Y(Z)} A_b \Delta u_{Y(Z)}^{(t)}}{\Delta t} \tag{6}$$

$$M_X^{(t)} = -M_{XK}^{(t-\Delta t)} - k_{Y(Z)} J \Delta\varphi_X^{(t)} - \frac{c_{Y(Z)} J \Delta\varphi_X^{(t)}}{\Delta t} \tag{7}$$

$$M_{Y(Z)}^{(t)} = -M_{Y(Z)K}^{(t-\Delta t)} - k_X I \Delta\varphi_{Y(Z)}^{(t)} - \frac{c_X I \Delta\varphi_{Y(Z)}^{(t)}}{\Delta t} \tag{8}$$

其中

$$\begin{cases} J = \dfrac{\pi r_b^2}{2} \\ I = \dfrac{\pi r_b^4}{4} \end{cases} \tag{9}$$

式中　$f_X^{(t)}$——t 时刻颗粒间法向粘接力，N

$f_{Y(Z)}^{(t)}$——t 时刻颗粒间切向粘接力，N

$f_X^{(t-\Delta t)}$——前一时刻粘接两球法向位移增量，m

$f_{Y(Z)}^{(t-\Delta t)}$——前一时刻粘接两球切向位移增量，m

$M_X^{(t)}$——t 时刻颗粒间法向粘接力矩,N·m

$M_{Y(Z)}^{(t)}$——t 时刻颗粒间切向粘接力矩,N·m

k_X——粘接键单位面积法向刚度,N/m^3

$k_{Y(Z)}$——粘接键单位面积切向刚度,N/m^3

A_b——粘接键横截面积,m^2

$\delta_X^{(t)}$——t 时刻粘接两球法向叠合量,m

$\delta_X^{(0)}$——初始时刻粘接两球法向叠合量,m

c_X——粘接键单位面积法向阻尼系数,N·s/m^3

$c_{Y(Z)}$——粘接键单位面积切向阻尼系数,N·s/m^3

$\Delta u_X^{(t)}$——t 时刻粘接两球法向位移增量,m

$\Delta u_{Y(Z)}^{(t)}$——t 时刻粘接两球切向位移增量,m

$\Delta\varphi_X^{(t)}$——t 时刻粘接两球扭转角位移增量,m

$\Delta\varphi_{Y(Z)}^{(t)}$——$t$ 时刻粘接两球弯曲角位移增量,m

Δt——当前计算时间步长,s

J——粘接键截面极惯性矩,m^4

I——粘接键截面惯性矩,m^4

其中,粘接键横截面积 A_b 由粘接半径 r_b 决定,为 πr_b^2。粘接半径 r_b 又由粘接半径放大因子 λ_b 和粘接模型中最小组成球颗粒半径 $r_{\min}$ 决定,为 $\lambda_b r_{\min}$。

平行粘接模型中单位面积法向和切向阻尼系数可通过临界阻尼系数来确定,即

$$c_i = \frac{\beta_i c_i}{A_b} \tag{10}$$

式中 β_i——粘接阻尼比

c_i——临界阻尼系数

参照文献[35],选取粘接阻尼比 β_i 为 0.061 8,临界阻尼系数 c_i 与粘接模型质量 m_s 和刚度 k_i 有关,可表示为

$$c_i = 2\sqrt{m_s k_i} \tag{11}$$

计算可得 3 个品种茎秆第 4 节间法向临界阻尼系数 c_X 为 2 580.79 ~ 3 410.33 N·s/m^3,切向临界阻尼系数 $c_{Y(Z)}$ 为 1 735.86 ~ 2 158.79 N·s/m^3。

当 t 时刻粘接颗粒间的法向应力 $\sigma^{(t)}$ 大于法向临界(极限)应力 σ_c 或切向应力 $\tau^{(t)}$ 大于切向临界(极限)应力 τ_c 时,则粘接键断裂,即断裂准则可表示为

$$\sigma^{(t)} = \frac{|f_X^{(t)}|}{A_b} + \frac{\sqrt{(M_Y^{(t)})^2 + (M_Z^{(t)})^2}}{I} \quad (r_b \geqslant \sigma_c) \tag{12}$$

$$\tau^{(t)} = \frac{\sqrt{(f_Y^{(t)})^2 + (f_Z^{(t)})^2}}{A_b} + \frac{|M_X^{(t)}|}{J} \quad (r_b \geqslant \tau_c) \tag{13}$$

粘接力学参数测量及计算方法见文献[33]。在线性茎秆模型中,N 个组成球构成的茎秆模型法向刚度 K_n 可表示为

$$K_n = \frac{A_b k_X}{N-1} \tag{14}$$

故求得粘接键单位面积法向刚度 k_X 为

$$k_X = \frac{(N-1)K_n}{A_b} \tag{15}$$

使得切向法向刚度比取值和剪切模量与杨氏模量的比值相等,粘接键单位面积切向刚度可表示为

$$k_{Y(Z)} = \frac{k_X}{2(1+\mu)} \tag{16}$$

式中 μ——泊松比

粘接键临界法向应力和临界切向应力即为准静态条件下实际测量得到茎秆轴向拉伸极限应力和茎秆径向剪切极限应力(式(2)和式(3))。可测量并计算得准静态条件下茎秆模型粘接参数如表 2 所示。

表 2 准静态条件下茎秆模型粘接参数测量与计算值

Tab.2 Bonding parameters of straw models under quasi-static conditions

粘接参数	中麦 23	山农 28	济麦 52
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	2.82×10^{11}	2.35×10^{11}	2.02×10^{11}
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	1.13×10^{11}	1.16×10^{11}	7.72×10^{10}
临界法向应力/Pa	1.32×10^{7}	1.13×10^{7}	7.06×10^{6}
临界切向应力/Pa	4.9×10^{6}	3.78×10^{6}	5.05×10^{6}

2 茎秆单摆切割试验与仿真参数标定

2.1 茎秆单摆切割试验

图 6 为自制的单摆切割试验台,试验时,将小麦植株根部通过夹持机构固定,并将摆锤扬起一定角度往下释放,在重力作用下,动刀完成对茎秆冲击切割过程。并通过数据采集与分析软件实时记录动刀切割力。改变不同的摆锤扬起角度可获得不同切割速度,摆锤扬起角度和切割速度关系式可表示为

$$v_c = \sqrt{2gl(1-\cos\alpha)} \tag{17}$$

式中 l——动刀到摆杆旋转中心距离,m

α——摆锤扬起角度,(°)

v_c——切割速度,m/s

2.2 茎秆单摆切割仿真

为验证在准静态条件下得到的茎秆模型粘接力学参数是否能直接运用在动态切割仿真模拟中,采用准静态粘接参数进行单摆切割仿真。由于各品种间的切断力接近,故选取中麦 23 为例进行仿真,其接触参数如表 1 所示,准静态粘接力学参数如表 2 所示。

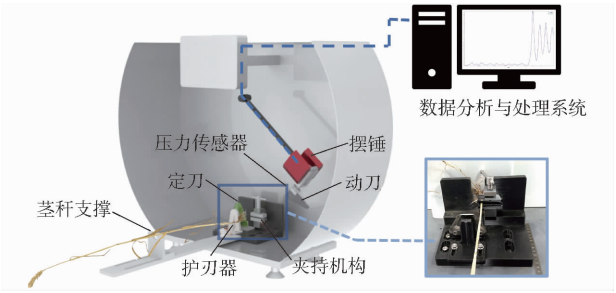
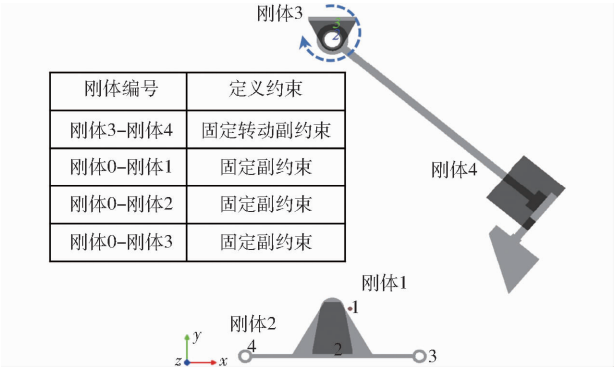


图 6　单摆切割试验装置

Fig. 6　Pendulum-cutting device for single straw

利用 AgriDEM 软件的 DEM－MBD 耦合模块对茎秆切割过程进行仿真。在软件前处理操作步骤如下：首先导入简化的茎秆切割装置三维模型. stl 文件，在三维模型部件中添加铰点，利用铰点编号定义刚体，设置地面为零号刚体，并手动添加刚体质量、转动惯量和初始相位角；再对刚体添加固定约束、固定转动约束、自由转动约束和滑移约束等，得到该多刚体系统约束方程和系统坐标；最后设置刚体与几何体相互对应，如图 7 所示。



刚体编号	定义约束
刚体3–刚体4	固定转动副约束
刚体0–刚体1	固定副约束
刚体0–刚体2	固定副约束
刚体0–刚体3	固定副约束

图 7　茎秆切割仿真设置

Fig. 7　Setup of straw cutting simulation

如图 8 所示，仿真完成后利用 AgriDEM 软件后处理可视化功能，观察不同时刻下切割过程茎秆模型速度变化。并利用后处理受力分析模块获取不同切割速度下茎秆切断力。

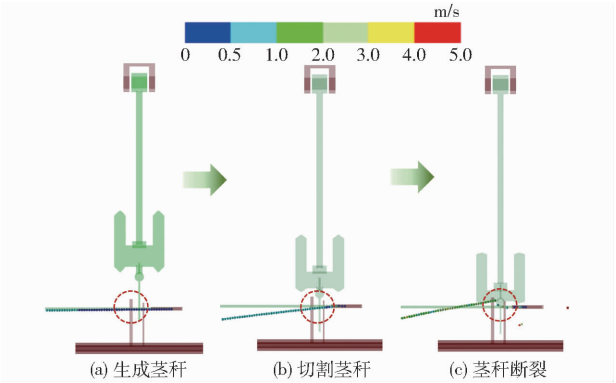


图 8　基于 AgriDEM 的茎秆切割仿真过程

Fig. 8　Simulation process of straw cutting based on AgriDEM

图 9 为不同切割速度下茎秆切断力仿真结果。由图 9 可知，随着切割速度增加，茎秆模型切断力仿真值逐渐较小，由 15.16 N 减小至 1.27 N，与试验结果趋势一致，且在各切割速度下，茎秆切断力仿真结果均小于试验值。由此表明，随着冲击速度提高，割刀冲击动能增大，割刀对茎秆的冲击作用越明显，切断力随之减小。当切割速度为 0.58 m/s 时，切断力仿真相对误差为 2.27%，而随着切割速度的增大，切断力仿真误差逐渐增大，当切割速度为 3.38 m/s 时，切断力仿真误差增大至 55.60%。由此表明，当低速切割仿真（v_c < 0.58 m/s）时，采用准静态粘接参数切割仿真结果与实际试验结果较为接近，而当切割速度较大（v_c ≥ 1.33 m/s）时，采用准静态粘接参数切割仿真结果与试验结果偏差较大，故需要进一步对茎秆模型粘接参数进行标定以减小仿真误差。

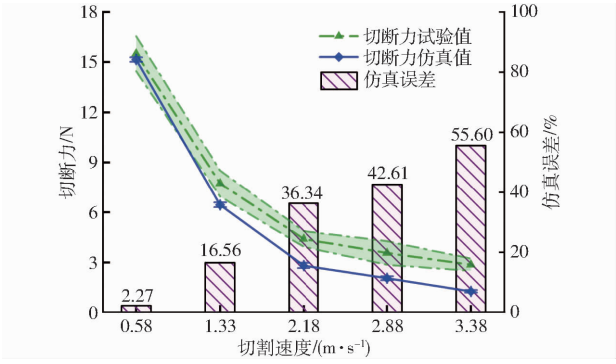


图 9　不同切割速度下切断力仿真与试验结果

Fig. 9　Simulation and test results of cut-off force at different cutting speeds

2.3　茎秆模型粘接参数标定方法

2.3.1　单因素仿真试验

由平行粘接模型断裂准则可知，粘接键切向断裂时切断力仅与粘接键切向临界应力有关，而与粘接键刚度、阻尼系数及法向临界应力并无直接关联，而在动态切割过程中粘接键受力过程比较复杂，并非单纯对切割点处粘接键剪切作用，还包括切割点周围粘接键弯曲及拉伸等作用。为探究茎秆模型中各个粘接参数对切断力的影响，首先对各个粘接参数进行单因素仿真试验。仿真试验选用切割速度为 1 m/s，每组仿真试验重复 10 次。

参考表 2 中参数测量与计算值为参数水平，通过预试验确定刚度和临界应力的试验因素水平，如表 3 所示。同时单位面积法向刚度、单位面积切向粘接刚度、临界法向应力和临界切向应力分别以 1×10^{11}、4.0×10^{10} N/m^3、1×10^{7}、1×10^{6} Pa 为间隔上下分别选取 9 个水平值，其他变量取固定值即表 2 值进行单因素仿真试验，得到切断力随粘接参数变化曲线，如图 10 所示。

表 3 单因素试验粘接参数水平

Tab. 3 Levels of bonding parameters for single-factor simulation tests

参数	最小值	最大值
单位面积法向刚度/(N·m^{-3})	1.0×10^{11}	9.0×10^{11}
单位面积切向刚度/(N·m^{-3})	4.0×10^{10}	3.6×10^{11}
临界法向应力/Pa	1.0×10^{7}	9.0×10^{7}
临界切向应力/Pa	3.0×10^{6}	1.1×10^{7}
粘接半径放大因子	0.8	1.6
法向粘接阻尼系数/(N·s·m^{-3})	2.0×10^{3}	1.5×10^{5}
切向粘接阻尼系数/(N·s·m^{-3})	1.3×10^{3}	1.0×10^{5}

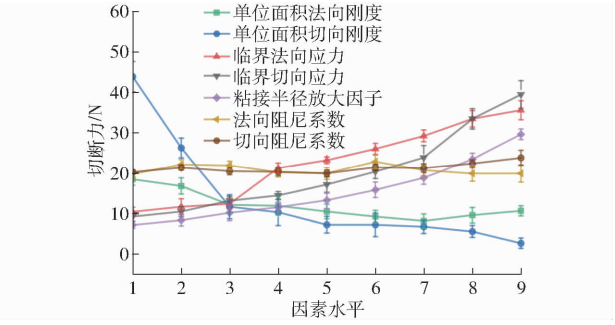


图 10 粘接参数单因素仿真试验结果

Fig. 10 Simulation results of single-factor tests for bonding parameters

从图 10 可看出,随着单位面积法向刚度和单位面积切向刚度增大,切断力总体呈逐渐减小趋势。当单位面积法向刚度为 $1.0\times10^{11}\sim5\times10^{11}$ N/m^3。单位面积切向刚度为 $4.0\times10^{10}\sim1.2\times10^{11}$ N/m^{3}时,切断力变化较为显著。随着临界法向应力、临界切向应力和粘接半径放大因子增大,切断力则随之增大,当临界法向应力为 $3\times10^{7}\sim7\times10^{7}$ Pa 时。临界切向应力为 $5\times10^{6}\sim1.1\times10^{7}$ Pa 时,切断力变化较为显著。而随着法切向粘接阻尼系数增大,切断力并无明显变化。由此表明,切断力与单位面积法切向刚度呈负相关关系,与临界法向应力、临界切向应力和粘接半径放大因子呈正相关关系,而与粘接阻尼系数则不存在显著相关关系。

在影响显著因素中,刚度和临界应力通常通过实际试验测量并计算得到,而粘接半径放大因子是平行粘接模型中对粘接键半径修正系数,以满足粘接模型中对粘接键半径的调节,没有实际物理意义。选用可通过试验测量得到的 4 个系数(单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力)进行中心组合标定试验。

2.3.2 中心组合参数标定方法

选用粘接键单位面积法向刚度(X_1)、单位面积切向刚度(X_2)、临界法向应力(X_3)及临界切向应力(X_4)作为试验因素,切断力(Y_s)作为响应值进行的正交组合试验,以图 10 中切断力变化显著的粘接参数区间段作为中心组合试验因素水平取值范围,探究各因素间交互作用对切断力的影响。试验因素水平编码如表 4 所示。中心组合仿真试验选用的切割速度为 1 m/s,选用切断力(Y_s)为试验指标,试验设计及结果如表 5 所示,x_1、x_2、x_3、x_4为因素编码值。

表 4 中心组合试验因素编码

Tab. 4 Factors and levels of central combination simulation tests

编码	因素			
	X_1/(N·m^{-3})	X_2/(N·m^{-3})	X_3/Pa	X_4/Pa
-1.414	1.00×10^{11}	5.00×10^{10}	3.00×10^{7}	3.00×10^{6}
-1	1.59×10^{11}	7.93×10^{10}	3.59×10^{7}	5.59×10^{6}
0	3.00×10^{11}	1.50×10^{11}	5.00×10^{7}	5.00×10^{6}
1	4.41×10^{11}	2.21×10^{11}	6.41×10^{7}	6.41×10^{6}
1.414	5.00×10^{11}	2.50×10^{11}	7.00×10^{7}	7.00×10^{6}

表 5 粘接参数中心组合仿真试验结果

Tab. 5 Results of simulation tests

编号	因素				Y_s/N
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	-1	-1	-1	-1	12.82
2	1	-1	-1	-1	12.04
3	-1	1	-1	-1	9.09
4	1	1	-1	-1	8.04
5	-1	-1	1	-1	17.08
6	1	-1	1	-1	16.65
7	-1	1	1	-1	13.58
8	1	1	1	-1	12.31
9	-1	-1	-1	1	23.84
10	1	-1	-1	1	22.58
11	-1	1	-1	1	18.98
12	1	1	-1	1	17.34
13	-1	-1	1	1	25.87
14	1	-1	1	1	24.28
15	-1	1	1	1	18.43
16	1	1	1	1	17.04
17	-1.414	0	0	0	14.59
18	1.414	0	0	0	12.04
19	0	-1.414	0	0	15.46
20	0	1.414	0	0	9.25
21	0	0	-1.414	0	9.22
22	0	0	1.414	0	17.74
23	0	0	0	-1.414	9.45
24	0	0	0	1.414	23.19
25	0	0	0	0	11.84
26	0	0	0	0	10.59
27	0	0	0	0	9.98
28	0	0	0	0	11.16
29	0	0	0	0	11.52
30	0	0	0	0	12.37

对中心组合仿真试验进行方差分析,如表 6 所

示。分析结果表明使用二次方程进行模型拟合，模型决定系数 R^2 为 0.989 6，模型显著（$P<0.000\ 1$），拟合性较好；失拟项不显著，表明试验数据可靠且无其他显著性因素影响试验值。其中，单位面积法向刚度平方项（x_1^2）、单位面积切向刚度（x_2）、临界法向应力（x_3）及其平方项（x_3^2）、临界切向应力（x_4）及其平方项（x_4^2）和临界法向应力和临界切向应力的交互项（x_3x_4）对切断力（Y_s）的影响极显著，单位面积法向刚度（x_1）及单位面积切向刚度和临界切向应力交互项（x_2x_4）及对切断力（Y_s）的影响显著，其余各项均不显著。

表 6　各因素对试验指标方差分析

Tab. 6　ANOVA of simulation test results

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	742.56	14	53.04	46.63	<0.000 1 **
x_1	8.47	1	8.47	7.45	0.015 5 *
x_2	120.7	1	120.7	106.11	<0.000 1 **
x_3	53	1	53	46.6	<0.000 1 **
x_4	371.36	1	371.36	326.48	<0.000 1 **
x_1x_2	0.104	1	0.104	0.091 4	0.766 5
x_1x_3	0.000 2	1	0.000 2	0.000 1	0.990 8
x_1x_4	0.345 2	1	0.345 2	0.303 4	0.589 8
x_2x_3	1.37	1	1.37	1.21	0.288 9
x_2x_4	5.3	1	5.3	4.66	0.047 5 *
x_3x_4	13.6	1	13.6	11.95	0.003 5 **
x_1^2	12.23	1	12.23	10.75	0.005 1 **
x_2^2	4.13	1	4.13	3.63	0.076 2
x_3^2	14.06	1	14.06	12.36	0.003 1 **
x_4^2	65.41	1	65.41	57.51	<0.000 1 **
残差	17.06	15	1.14		
失拟项	13.33	10	1.33	1.79	0.271
纯误差	3.73	5	0.746 3		
总和	759.62	29			

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

剔除各项影响不显著项，对回归模型进行优化，可得到优化后的二次回归模型拟合方程为

$$\begin{aligned}Y_s = {} & 11.16 - 0.650\ 8x_1 - 2.46x_2 + 1.63x_3 + \\ & 4.31x_4 - 0.921\ 9x_3x_4 - 0.575\ 6x_2x_4 + \\ & 1.14x_1^2 + 1.23x_3^2 + 2.65x_4^2\end{aligned} \tag{18}$$

根据优化后二次回归模型拟合方程可知，切断力的影响显著性由大到小为：临界切向应力、单位面积切向刚度、临界法向应力、单位面积法向刚度。

基于方差分析，以切断力实际值（11.43 N）为目标值对粘接参数进行优化。为避免产生多解，优化时固定 4 个参数中显著性较低的单位面积法向刚度参考表 2，并设定其余参数优化值为 0.5 ~ 2 倍的实际测量值，即约束方程为

$$\begin{cases}\min\{f(x) = Y_s - 11.43\} \\ \text{s.t.} \begin{cases}X_1 = 2.82\times10^{11}\ \text{N/m}^3 \\ 5.65\times10^{10}\ \text{N/m}^3 \leqslant X_2 \leqslant 2.26\times10^{11}\ \text{N/m}^3 \\ 6.60\times10^{6}\ \text{Pa} \leqslant X_3 \leqslant 2.64\times10^{7}\ \text{Pa} \\ 2.45\times10^{6}\ \text{Pa} \leqslant X_4 \leqslant 9.8\times10^{6}\ \text{Pa}\end{cases}\end{cases} \tag{19}$$

仿真试验优化得到粘接参数如表 7 所示，并采用标定后粘接参数进行切割仿真，得到切断力为 10.45 N，仿真误差仅为 8.57%，小于利用准静态条件下测量和计算得到的仿真误差（15.46%），由此表明利用中心组合试验对刚度和临界应力进行标定能够有效降低粘接参数仿真误差。

表 7　粘接参数测量值与优化标定值

Tab. 7　Measured and calibrated values of bonding parameters

参数	准静态测量值	标定值
单位面积法向刚度/（N·m^{-3}）	2.82×10^{11}	2.82×10^{11}
单位面积切向刚度/（N·m^{-3}）	1.13×10^{11}	1.32×10^{11}
临界法向应力/Pa	1.32×10^{7}	9.50×10^{6}
临界切向应力/Pa	4.90×10^{6}	6.46×10^{6}
相对误差/%	15.46	8.57

2.3.3　粘接半径放大因子标定方法

利用中心组合标定刚度和临界应力参数的方法，其过程繁琐，针对不同速度需重复优化试验极大地增加了仿真前期工作量。故提出改变粘接半径放大因子来修正切断力仿真值的标定方法。标定时，单位面积法切向刚度及临界法切向应力仍参考表 2，仅通过改变粘接半径放大因子修正切断力仿真值。

当切割速度为 0.5 ~ 3.0 m/s 时，进行预试验，初步确定粘接半径放大因子 λ_b 为 0.8 ~ 1.5。并在不同切割速度下进行粘接半径放大因子单因素仿真试验，仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知，在不同切割速度下，随着粘接半径放大因子增大，切断力均逐渐增大，且同一速度下仿真值与试验值误差呈先减小后增大趋势。为进一步寻求不同切割速度下粘接半径放大因子与切断力的关系，对各速度下粘接半径放大因子与切断力进行二次拟合，如表 8 所示。各拟合方程拟合度均大于 0.99，表明粘接半径放大因子与切断力呈二次相关关系。将切断力试验值作为优化值代入不同切割速度下拟合方程，即求得粘接半径放大因子标定值。

对切割速度与粘接半径放大因子进行拟合分析，可得到线性拟合方程为

$$\lambda_R = 0.166\ 3v_c + 0.916 \tag{20}$$

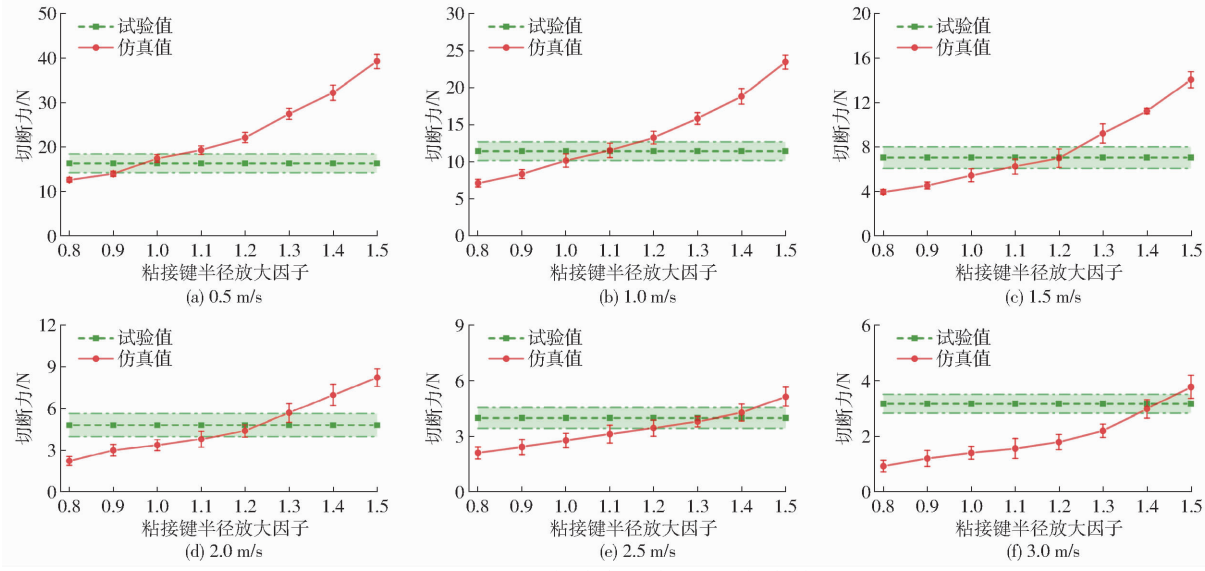


图 11 不同速度下粘接半径放大因子标定结果

Fig. 11 Calibrating bonding radius scaling factor at different speeds

表 8 不同速度下粘接半径放大因子标定值

Tab. 8 Calibration value of bonding radius scaling factor at different speeds

切割速度/(m·s^{-1})	拟合方程	切断力测量值 F_c/N	粘接半径放大因子标定值 λ_b
0.5	$F_c=27.096-47.474\lambda_b+36.701\lambda_b^2$	16.25	0.997
1.0	$F_c=16.049-28.617\lambda_b+22.095\lambda_b^2$	11.43	1.106
1.5	$F_c=12.179-22.920\lambda_b+15.921\lambda_b^2$	7.06	1.163
2.0	$F_c=5.412-10.216\lambda_b+8.003\lambda_b^2$	4.78	1.213
2.5	$F_c=2.224-2.233\lambda_b+2.692\lambda_b^2$	3.98	1.323
3.0	$F_c=3.997-7.69\lambda_b+4.934\,5\lambda_b^2$	3.15	1.439

该拟合方程拟合度为 0.975,表明粘接半径放大因子与切割速度关系有效。

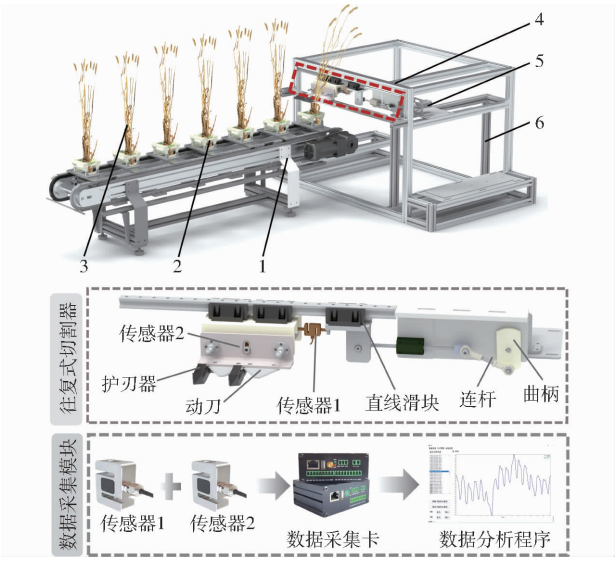


图 12 往复式切割台架结构图

Fig. 12 Structure diagram of overall structure of reciprocating cutting test platform

1. 植株输送装置 2. 植株柔性夹具 3. 小麦植株 4. 往复式切割装置 5. 调速电机 6. 机架

3 验证试验与仿真

3.1 往复式切割台架试装置结构及工作原理

为验证本文提出的小麦植株茎秆模型建模方法与粘接参数标定方法可行性与准确性,搭建了往复式切割台架装置,可实现模拟茎秆连续切割及模拟田间切割收获过程,如图 12 所示。

试验台架由植株输送装置、往复式切割装置、数据采集系统和调速电机等组成。茎秆输送装置由喂入调速电机、输送链条、夹具、链条工装板及机架等组成,链条工装板均匀排布在输送链条中间,并在每块工装板上安装植株柔性夹具,夹具可自动夹紧植株根部。调节输送装置电机可实现植株喂入速度(前进速度)为 0 ~ 1.2 m/s,调节输送装置的高度可实现切割高度为 50 ~ 200 mm。往复式切割器由曲柄连杆、直线滑块、动刀及护刃器等组成,曲柄连杆通过直线滑块带动动刀作往复周期性变速运动,动刀的有效切割速度为 0.84 ~ 1.0 倍最大瞬时切割速度 v_c^{max}。调节切割装置电机可实现有效切割速度最大值为 0 ~ 1.6 m/s。动刀通过直线轴承和拉压力传感器固定在直线滑块上,2 个压力传感器可分别测量动刀与植株茎秆间不同方向的相互作用力,数据采集系统可实时采集茎秆切割力。

3.2　往复式切割台架试验

试验时通过数据采集系统实时观察切割力的变化并记录且切断力，如图 13 所示。由于曲柄连杆往复惯性力影响，空载状态下动刀切割力曲线呈周期性波动，当动刀切割茎秆时，该周期内切割力突然增大，故实际茎秆切断力可看作该周期内茎秆切割作业峰值力测量值与空载峰值力之间差值。选取往复式切割最大速度为 1 m/s，其有效切割区间速度为 0.84 ~ 1 m/s，喂入速度为 0.4 m/s，切割高度为 100 mm，茎秆含水率为 10%。台架试验测量得到实际切断力为 14.90 N。

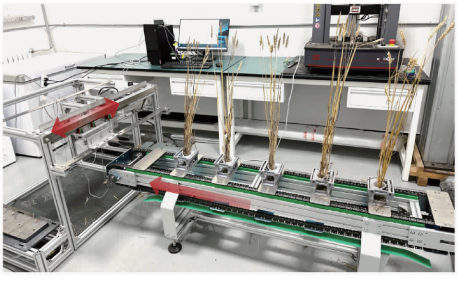


图 13　往复式切割台架试验

Fig. 13　Reciprocating cutting bench test

3.3　往复式切割仿真

如图 14 所示，将简化的往复式切割台架模型导入 AgriDEM 软件中，并参照表 2 以及两种粘接参数标定方法得到的粘接参数分别进行往复式茎秆切割仿真。采用刚度和临界应力正交组合标定方法得到的粘接参数仿真时，刚度和临界应力参照表 7 标定值。采用粘接半径放大因子参数标定方法得到的粘接参数仿真时，刚度和临界应力仍参考表 2，因往复式切割速度为变化区间，故在该有效切割区间内选取速度为 0.84、0.92、1 m/s 代入式(20)，可求得对应的粘接半径放大因子为 1.055、1.068 和 1.082，其余粘接参数均见表 2。

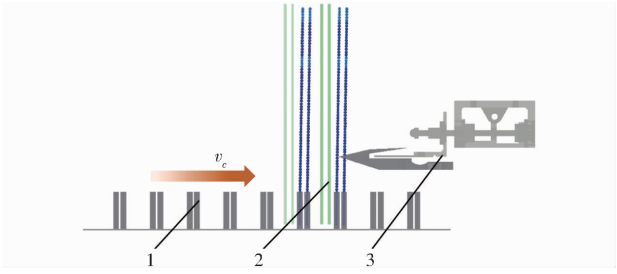


图 14　往复式切割仿真

Fig. 14　Reciprocating cutting simulation

1. 喂入装置　2. 小麦茎秆　3. 切割器

3.4　试验结果与分析

通过高速摄像对切割作业过程进行分析，如图 15a 所示，当植株喂入时，植株处于自由状态，茎秆间间距较大，当植株茎秆到达切割区域时，动刀对茎秆开始挤压，茎秆开始弯曲变形，直至在动刀和定刀及护刃器的夹持下被切断。由图 15b 可知，在植株生成阶段，植株模型处于无约束状态，与实际情况一致。当植株进入有效切割作业区域时，茎秆开始弯曲并在动刀的作用下倒向定刀一侧，当茎秆被推至定刀刃口时，茎秆被动刀从中间切断，完成切割作业过程。

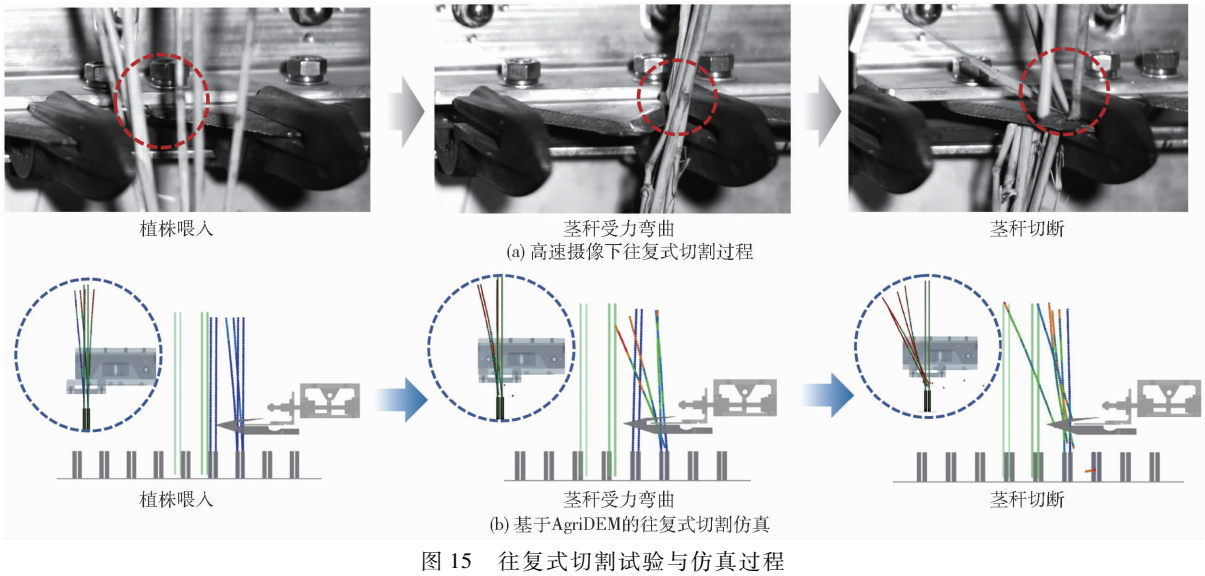


图 15　往复式切割试验与仿真过程

Fig. 15　Reciprocating cutting test and simulation process

对 3 种粘接参数仿真得到的切断力进行分析，如表 9 所示。由表 9 可知，采用粘接参数准静态测量值进行往复式切割仿真，其切断力为 11.54 N，仿真误差为 22.55%。采用刚度和临界应力标定值得到切断力为 16.26 N，仿真误差为 9.13%。采用粘接半径放大因子标定值得到切断力为 13.74 ~ 16.47 N，仿真误差为 6.58% ~ 10.54%，其中当粘接半径放大因子为 1.068 时，对应的切割力仿真误差最

表 9 茎秆切断力仿真结果

Tab. 9 Simulation results of straw cut-off force

参数		切断力/N	仿真误差/%
准静态测量值		11.54	22.55
刚度与临界应力标定值		16.26	9.13
粘接半径放大因子标定值	1.055	13.74	7.79
	1.068	15.88	6.58
	1.082	16.47	10.54

小。表明在往复式茎秆切割仿真中,采用 2 种标定方法均能有效地降低茎秆动态切割仿真误差,且利用有效切割速度中间值对应的粘接半径放大因子标定值来仿真往复式切割作业是最为准确且可行的方法。

4 结论

(1)以小麦茎秆第 4 节间作为研究对象,提出了基于离散元的小麦植株线性茎秆模型通用建模方法,通过准静态拉伸与剪切试验,测量得到小麦茎秆力学参数并计算得到粘接模型参数。

(2)茎秆单摆切割试验结果表明,当切割速度由 0.58 m/s 增至 3.38 m/s 时,切断力试验值与仿真值均逐渐减小,而仿真误差由 2.27% 增至 55.60%。表明采用准静态粘接参数不适用于动态切割仿真。提出适用于动态切割仿真的两种粘接参数标定方法,刚度和临界应力中心组合标定方法,得到切割速度为 1 m/s 下刚度与临界应力最优组合;粘接半径放大因子标定方法,通过寻求不同切割速度下粘接键半径放大因子与切断力的关系,建立粘接半径放大因子标定值与切割速度关系方程。

(3)根据最大切割速度为 1 m/s 的往复式切割试验与仿真结果可知,采用准静态粘接参数得到的切断力仿真值为 11.54 N,仿真误差为 22.55%。采用刚度和临界应力中心组合标定值得到的切断力仿真值为 16.26 N,仿真误差为 9.13%;采用粘接半径放大因子标定值得到切断力仿真值为 13.74 ~ 16.47 N,仿真误差为 6.58% ~ 10.54%,其中当粘接键半径放大因子为 1.068 时(对应切割速度为 0.92 m/s),对应的切割力仿真误差最小,为 6.58%。表明上述两种参数标定方法可有效降低茎秆动态切割仿真误差,且利用有效切割速度中间值(对应切割速度为 0.92 m/s)对应的粘接半径放大因子标定值进行仿真往复式切割作业是最为准确且可行的方法。

参 考 文 献

[1] 闫二伟, 王振伟, 韩柏和, 等. 含水率及切割滑切角对秸秆切割功耗影响规律[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 162 - 167.
YAN Erwei, WANG Zhenwei, HAN Baihe, et al. Effect of water content and cutting sliding angle on straw cutting power consumption[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 162 - 167. (in Chinese)

[2] 李玉道, 杜现军, 宋占华, 等. 棉花秸秆剪切力学性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 124 - 128.
LI Yudao, DU Xianjun, SONG Zhanhua, et al. Test of shear mechanical properties of cotton stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 124 - 128. (in Chinese)

[3] 夏俊芳, 张朋, 苑宏文, 等. 水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 174 - 184.
XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 174 - 184. (in Chinese)

[4] 王保爱, 戴飞, 辛尚龙, 等. 成熟期青稞茎秆切割力的测试与分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(2): 201 - 208.
WANG Baoai, DAI Fei, XIN Shanglong, et al. Test and analysis of cutting force of highland barley in mature stage[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(2): 201 - 208. (in Chinese)

[5] 唐忠, 李耀明, 徐立章, 等. 单茎秆切割试验台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2009, 31(12): 141 - 143.
TANG Zhong, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. The design and test of single stem cutting test-bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12): 141 - 143. (in Chinese)

[6] 李耀明, 秦同娣, 陈进, 等. 玉米茎秆往复切割力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 160 - 164.
LI Yaoming, QIN Tongdi, CHEN Jin, et al. Experimental study and analysis on mechanical property of corn stalk reciprocating cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 160 - 164. (in Chinese)

[7] 赵湛, 李耀明, 徐立章, 等. 超级稻单茎秆切割力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 72 - 75.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Experiment on cutting mechanical property of single super rice stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 72 - 75. (in Chinese)

[8] 沈成, 李显旺, 张彬, 等. 苎麻茎秆台架切割试验与分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 68 - 76.
SHEN Cheng, LI Xianwang, ZHANG Bin, et al. Bench experiment and analysis on ramie stalk cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 68 - 76. (in Chinese)

[9] 侯加林, 蒋韬, 吴彦强, 等. 小麦秸秆往复式切割试验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 101 - 106.
HOU Jialin, JIANG Tao, WU Yanqiang, et al. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 101 - 106. (in Chinese)

[10] 宋占华, 肖静, 张世福, 等. 曲柄连杆式棉秆切割试验台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 162 - 167.
SONG Zhanhua, XIAO Jing, ZHANG Shifu, et al. Design and experiment on crank-connecting rod cotton stalk cutting test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 162 - 167. (in Chinese)

[11] 王炳棚, 雷金, 秦新燕, 等. 双动刀沙棘枝条切割参数分析与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 26 - 36.

WANG Bingpeng, LEI Jin, QIN Xinyan, et al. Analysis and experiments of the cutting parameters for seabuckthorn branches double movable blades[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 26 - 36. (in Chinese)
[12] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1 - 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):1 - 20. (in Chinese)
[13] SHI Y, JIANG Y, WANG X, et al. A mechanical model of single wheat straw with failure characteristics based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 1 - 15.
[14] ZHAO W, CHEN M, XIE J, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of cotton stalk[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,204:107502.
[15] COETZEE C J, LOMBARD S G. The destemming of grapes: experiments and discrete element modelling[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(3): 232 - 248.
[16] 江涛, 吴崇友, 汤庆, 等. 基于 ANSYS 和 EDEM 的小麦茎秆切割仿真研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 231 - 234.
JIANG Tao, WU Chongyou, TANG Qing, et al. Simulation of wheat straw cutting based on ANSYS and EDEM [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(17): 231 - 234. (in Chinese)
[17] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 170 - 180.
WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):170 - 180. (in Chinese)
[18] SU Z, LI Y, DONG Y, et al. Simulation of rice threshing performance with concentric and non-concentric threshing gaps[J]. Biosystems Engineering, 2020, 197: 270 - 284.
[19] TANG H, XU C, ZHAO J, et al. Stripping mechanism and loss characteristics of a stripping-prior-to-cutting header for rice harvesting based on CFD - DEM simulations and bench experiments[J]. Biosystems Engineering, 2023, 229: 116 - 136.
[20] WANG Q, MAO H, LI Q. Modelling and simulation of the grain threshing process based on the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,178: 105790.
[21] HUO P, MA S, SU C, et al. Sugarcane leaf-stalk separating technology: a critical review[J]. Biosystems Engineering, 2023, 228: 120 - 148.
[22] MA X, ZHAO L, GUO B, et al. Simulation and experiment of rice cleaning in air-separation device based on DEM - CFD coupling method[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(5): 226 - 233.
[23] LI S, DIAO P, MIAO H, et al. Modeling the fracture process of wheat straw using a discrete element approach[J]. Powder Technology, 2024, 439: 119726.
[24] 谢伟, 彭磊, 蒋蘋, 等. 收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112 - 120.
XIE Wei, PENG Lei, JIANG Pin, et al. Discrete element model building and optimization of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112 - 120. (in Chinese)
[25] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76 - 84.
ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1):76 - 84. (in Chinese)
[26] WANG Y, ZHANG Y, YANG Y, et al. Discrete element modelling of citrus fruit stalks and its verification[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 400 - 414.
[27] 付宏, 王常瑞, 靳聪, 等. 农机部件数字化设计软件平台 AgriDEM 开发[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 1 - 9.
FU Hong, WANG Changrui, JIN Cong, et al. Development of digital design software platform AgriDEM for agricultural machinery parts[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 1 - 9. (in Chinese)
[28] 袁军, 于建群. 基于 DEM - MBD 耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 17 - 24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiler based on DEM - MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):17 - 24. (in Chinese)
[29] 李政权, 于建群, 张尉林, 等. 内充式排种器工作过程和性能的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 32 - 36.
LI Zhengquan, YU Jianqun, ZHANG Weilin, et al. Simulation analysis of working process and performance of inside-filling seed metering device by discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 32 - 36. (in Chinese)
[30] YU Y J, FU H, YU J Q. DEM-based simulation of the corn threshing process[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26(5): 1400 - 1409.
[31] ASABE S. Compression test of food materials of convex shape[S]. S368. 4. USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.
[32] SUN K, YU J, LIANG L, et al. A DEM-based general modelling method and experimental verification for wheat seeds[J]. Powder Technology,2022, 401: 117353.
[33] SUN K, YU J, ZHAO J, et al. A DEM-based general modeling method and experimental verification for wheat plants in the mature period[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108283.
[34] HORABIK J, MOLENDA M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering, 2016,147: 206 - 225.
[35] GUO Y, WASSGREN C, HANCOCK B, et al. Predicting breakage of high aspect ratio particles in an agitated bed using the discrete element method[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 158: 314 - 327.