

基于离散元的柔性作物茎秆振动响应仿真

王奇瑞¹ 毛罕平^{1,2} 李青林¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 建立考虑柔性作物茎秆振动响应特性的动力学模型,对探索谷草分离机理、分析谷物分离过程和联合收获机参数优化具有重要意义。本文提出考虑柔性作物茎秆振动响应特性的动力学仿真模型,研究了作物茎秆的动力学响应特性。首先,给出了作物柔性茎秆的动力学模型和动力仿真方法;以成熟期小麦第3节间为例,测量了茎秆的内外径、单位质量密度和弹性模量等参数;对茎秆的横向弯曲振动和纵向拉伸振动进行仿真,研究茎秆的动力学响应特性,并与理论计算结果进行比较。通过仿真获得长度108 mm、外径3.7 mm、内径1.9 mm、弹性模量5.27 GPa的小麦茎秆的横向振动频率和纵向振动频率分别为164.28、7 633.59 Hz,与理论计算结果的相对误差分别为0.28%和0.12%。最后,通过谷草分离仿真实验,验证了柔性作物茎秆模型的实用性。

关键词: 作物茎秆; 离散元; 柔性; 振动

中图分类号: S225.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)11-0131-07

OSID:



Simulation of Vibration Response of Flexible Crop Stem Based on Discrete Element Method

WANG Qirui¹ MAO Hanping^{1,2} LI Qinglin¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. High-tech Key Laboratory of Agricultural Equipment and Intelligentization of Jiangsu Province, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In the field of harvesting machinery, it is advantageous to consider the characteristics of crops in the design stage rather than through actual mechanical tests especially in terms of reducing costs and shortening the development cycle. By establishing a dynamic model that considered the vibration response characteristics of flexible crop stems, it was of great significance to explore the separation mechanism of grains and grass, analyze the grains separation process and optimize the parameters of the combine harvester. A dynamic simulation method for flexible crop stem was proposed, and the dynamic response characteristics of crop stem were studied. Firstly, the dynamic model and dynamic simulation method of crop flexible stem were given. Taking the third internode of the mature wheat as an example, important parameters such as the inner and outer diameter, unit mass density and elastic modulus of the stem were measured. Then, by simulating the lateral and longitudinal vibration characteristics of the stem, the basic dynamic response characteristics of the stem were studied, and the reliability of the simulation was verified by comparing with the theoretical calculation results. The lateral vibration frequency and longitudinal vibration frequency of the wheat stems with a length of 108 mm, an outer diameter of 3.7 mm, an inner diameter of 1.9 mm, and a Young's modulus of 5.27 GPa obtained by simulation were 164.28 Hz and 7 633.59 Hz, respectively. The relative errors of the theoretical calculation results were 0.28% and 0.12%, respectively. Finally, the practicability of the flexible stem model was verified by simulating the separation experiment. The simulation results were in good agreement with the theoretical calculation results.

Key words: crop stem; discrete element; flexibility; vibration

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)

作者简介: 王奇瑞(1983—),男,博士生,主要从事农业装备数字化设计与仿真技术研究,E-mail: wangqirui83@126.com

通信作者: 毛罕平(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与设施农业环境控制技术研究,E-mail: maohp@ujs.edu.cn

0 引言

在设计阶段考虑作物对联合收获机工作性能的影响,对降低研发成本和缩短研发周期非常有利^[1-2]。茎秆的动力学特性是影响联合收获机收获过程中作物动力学行为的主要因素。因此,建立考虑柔性作物茎秆振动响应特性的动力学模型,对探索谷草分离机理、分析谷物分离过程^[3]和联合收获机参数优化^[4-5]具有重要意义。

许多研究人员试图通过建立动力学模型来描述在联合收获机收获过程中作物的动力学行为。MIU等^[6-8]研究了联合收获机的脱粒原理,建立了轴流脱粒装置脱粒空间物料运动的动力学模型。该模型描述了被脱物在脱粒滚筒和脱粒凹板间的非均匀螺旋运动,但并未考虑秸秆动力学特性对被脱物运动的影响。QIAN等^[9]提出了柔性脱粒齿在脱粒过程中对谷物打击的动力学模型,分别建立了无碰撞、碰撞引发、粘撞和滑移撞击4个动力学方程。该模型仅分析了作物与机器的碰撞过程,未对作物的运动行为进行分析。HIRAI等^[1-2]采用小麦和水稻两种作物模型预测作物茎秆偏转力与偏转位移之间的关系,研究了拨禾轮作业时作物与机械之间的相互作用,但该模型只能用来分析作物在收割前的力学行为。文献[10-12]在DEMeter++软件中建立了刚性空心圆柱键合离散元模型。LEBLICQ等^[13]研究了其弯曲和拉伸/压缩性能。但是该模型采用的键是刚性的,而不是柔性的,不适合用于分析作物的振动响应特性。基于CUNDALL等^[14]提出的键合模型,GUO等^[15]建立了柔性纤维模型,并研究了单个纤维的力学性能,该模型可以用于分析柔性杆状物的振动响应特性^[16-17],但该离散元模型的虚拟键为圆柱形,不适用于空心茎秆的仿真。MAO等^[18]提出了一种柔性空心圆柱键秸秆模型,并研究了谷草分离特性,但并未对茎秆的动力学振动响应特性进行分析。

本文对作物茎秆的动态弯曲和拉伸力学行为进行仿真,研究作物茎秆的振动响应特性,并与理论计算结果进行比较。

1 柔性作物茎秆动力学模型与仿真

1.1 茎秆动力学模型

如图1所示,直线上的颗粒通过虚拟键连接,形成长度为 L 的茎秆。颗粒直径等于茎秆的外部。虚拟键的外径和内径等于茎秆的外径和内径。虚拟键的弹性模量和泊松比等于秆的弹性模量和泊松比。

茎秆中的颗粒运动导致虚拟键的变形,从而导

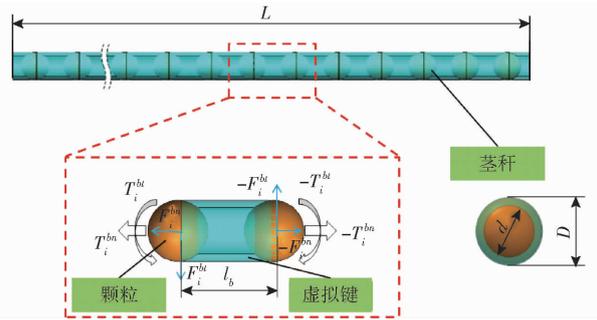


图1 茎秆模型示意图

Fig. 1 Illustration of stem model

致茎秆的变形。茎秆中每个颗粒的键合力和键合力矩计算式为

$$\begin{aligned} F_i^b &= F_i^{bn} + F_i^{bt} = \\ &F_{i-1}^{bn} + \Delta F_i^{bn} + F_{i-1}^{bt} + \Delta F_i^{bt} = \\ &F_{i-1}^{bn} - S^n A v_i^n \Delta t + F_{i-1}^{bt} - S^t A v_i^t \Delta t = \\ &F_{i-1}^{bn} - \frac{\pi E}{4 l_b} (D^2 - d^2) v_i^n \Delta t + F_{i-1}^{bt} - \\ &\frac{\pi E}{8 l_b (1 + \nu)} (D^2 - d^2) v_i^t \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_i^b &= T_i^{bn} + T_i^{bt} = T_{i-1}^{bn} + \Delta T_i^{bn} + T_{i-1}^{bt} + \Delta T_i^{bt} = \\ &T_{i-1}^{bn} - S^t J \omega_i^n \Delta t + T_{i-1}^{bt} - S^n \frac{J}{2} \omega_i^t \Delta t = \\ &T_{i-1}^{bn} - \frac{\pi D^4 E}{64 l_b (1 + \nu)} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \omega_i^n \Delta t + T_{i-1}^{bt} - \\ &\frac{\pi D^4 E}{64 l_b} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \omega_i^t \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

式中 F_i^b ——第 i 步计算颗粒的键合力, N
 F_i^{bn} 、 F_i^{bt} ——键合力在法向和切向的分量, N
 ΔF_i^{bn} 、 ΔF_i^{bt} ——第 i 步计算颗粒键合力在法向和切向的增量, N
 S^n 、 S^t ——键法向和切向刚度, N/m³
 v_i^n 、 v_i^t ——速度在法向和切向的分量, m/s
 Δt ——仿真时间步长, s
 E ——键弹性模量, GPa
 d 、 D ——键内、外径, m
 A ——键横截面面积, m²
 l_b ——键长度, m
 ν ——键泊松比
 T_i^b ——第 i 步计算颗粒键合力矩, N·m
 T_i^{bn} 、 T_i^{bt} ——键合力矩在法向和切向的分量, N·m
 ΔT_i^{bn} 、 ΔT_i^{bt} ——第 i 步计算颗粒键合力矩在法向和切向的增量, N·m
 ω_i^n 、 ω_i^t ——颗粒角速度在法向和切向的分量, rad/s
 J ——键极惯性矩, m⁴

茎秆中每个颗粒的动力学方程为

$$m^p \frac{\Delta v_i}{\Delta t} = F_i^b + F_i^c + m^p g$$

$$J^p \frac{\Delta \omega_i}{\Delta t} = T_i^b + T_i^c$$

式中 m^p ——颗粒质量, kg

F_i^c ——接触力, 根据 Hertz - Mindlin 理论计算, N

T_i^c ——接触力矩, 由 F_i^c 的剪切分量产生, N·m

J^p ——颗粒转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

Δv_i ——第 i 步颗粒速度增量, m/s

$\Delta \omega_i$ ——第 i 步颗粒角速度增量, rad/s

1.2 茎秆动力学仿真

作物茎秆受力可视为各种外力的叠加。因此, 可以将作物茎秆复杂的力学行为分解为弯曲、拉伸/压缩和扭转等基本力学行为。由于扭转对茎秆的动力学行为影响不大, 所以本文省略了对扭转的分析。

通过 EDEM 应用程序编程接口 (API) 进行二次开发, 使用 VS 分别编译颗粒工厂和作物秸秆动力学模型的源文件, 生成相应的 dll 文件, 在 EDEM 加载这些 dll 文件可以实现秸秆内颗粒的生成和动力学模型的导入。如图 2 所示, 柔性作物茎秆动力学仿真的流程为: 首先读取茎秆的属性; 生成离散元茎秆模型; 检测接触并导入动力学模型; 计算接触位移和接触力; 更新颗粒的运动和受力信息; 判断是否达到迭代次数, 如没有达到继续进行仿真, 如达到仿真结束。

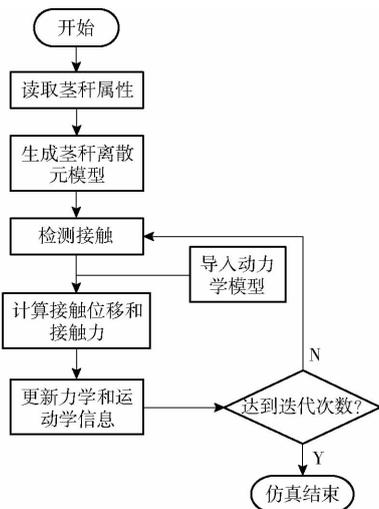


图 2 茎秆动力学仿真流程图

Fig. 2 Process of stem dynamics simulation

2 材料与方 法

2.1 作物茎秆特征指标

以成熟期小麦的第 3 节间为研究对象。如图 3 所示, 小麦茎秆通常由 4~6 个节间组成。使用游标

卡尺测量了 50 株小麦第 3 节间的内径和外径。对含水率 59% 的 10 份质量 1 kg 茎秆进行长度测量, 并计算每份样品的单位长度质量。选取小麦茎秆 20 根, 利用如图 4a 所示的三点弯曲法测得弹性模量。图 4b 为质构仪 (TA. XT plus, Stable Micro Systems) 测得茎秆的力-位移曲线。

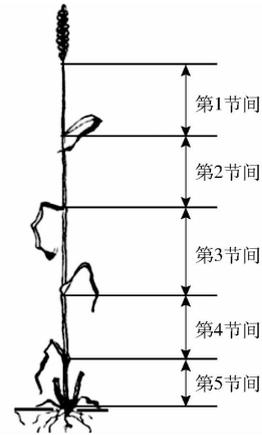
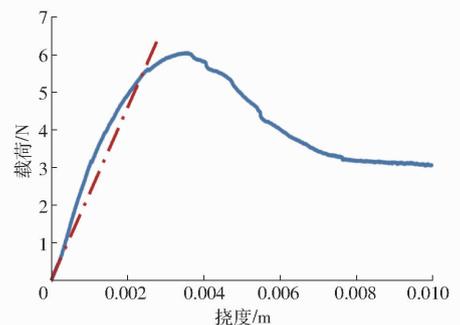


图 3 小麦茎秆节间

Fig. 3 Wheat straw identifying internodes



(a)



(b)

图 4 三点弯曲实验

Fig. 4 Three point bending experiment

茎秆弹性模量 E_s 计算式为

$$E_s = \frac{L_0^3}{48I} \frac{dF}{d\delta} \quad (3)$$

式中 L_0 ——支点跨距, m I ——试样弯矩, m^4
 F ——载荷, N δ ——试样挠度, m

式中 $\frac{dF}{d\delta}$ 为图 4b 中点划线的斜率。

2.2 柔性作物茎秆弯曲振动仿真与理论计算

2.2.1 茎秆弯曲振动仿真

如图 5a 所示,对茎秆进行了弯曲振动仿真。建立茎秆的离散元仿真模型,模型一端的球体被固定,另一端的球体中心受到垂直于茎秆轴线的荷载。加载过程如图 5b 所示,载荷逐渐增加到 $F_{(t_1)}^{bend}$ 保持不变。在 t_2 时刻释放荷载,茎秆呈现出横向自由振动状态。

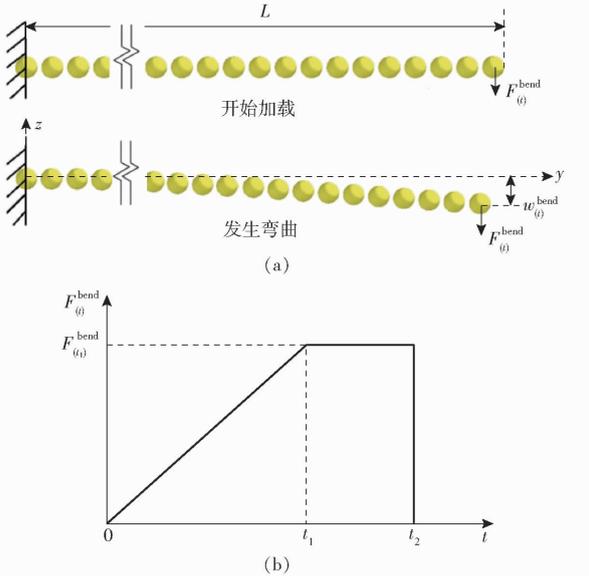


图 5 茎秆的悬臂梁仿真模型和加载过程

Fig.5 Cantilever bending simulation of stem bending model and loading process

2.2.2 茎秆弯曲振动理论计算

作物茎秆横向弯曲自由振动的控制方程为^[19]

$$E_s I \frac{\partial^4 Z(z,t)}{\partial z^4} = -\rho_l \frac{\partial^2 Z(z,t)}{\partial t^2} \quad (4)$$

式中 ρ_l ——茎秆线密度, g/m

$Z(z,t)$ ——茎秆横向弯曲挠度, m

边界条件为

$$\begin{cases} Z(0,t) = 0 \\ \frac{\partial Z(0,t)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial^2 Z(L_0,t)}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^3 Z(L_0,t)}{\partial y^3} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

方程的解为

$$Z(z,t) = \sum_{n=1}^{+\infty} A_n Z_n(z) \cos(\omega_n t) \quad (6)$$

其中 $Z_n(z) = \frac{1}{2} \left[\cos(\beta_n z) - \text{ch}(\beta_n z) + \right.$

$$\left. \frac{\text{sh}(\beta_n L_0) - \sin(\beta_n L_0)}{\text{ch}(\beta_n L_0) + \cos(\beta_n L_0)} (\text{sh}(\beta_n z) - \sin(\beta_n z)) \right] \quad (7)$$

$$A_n = \frac{\int_0^L Z(z,t=t_2) Z_n(z) dx}{\int_0^L Z_n^2(z) dx} \quad (8)$$

振动特性方程为

$$\cos(\beta_n L) \text{ch}(\beta_n L) = -1 \quad (9)$$

式中 β_n ——特征值

振动方程的根如表 1 所示。

表 1 悬臂梁前 4 个特征根值

Tab.1 The first four modes

参数	$\beta_1 L$	$\beta_2 L$	$\beta_3 L$	$\beta_4 L$
数值	1.875	4.694	7.855	10.996

茎秆弯曲固有圆频率为

$$\omega_n^{bend} = \beta_n^2 \sqrt{\frac{E_s I}{2\rho_l}} \quad (10)$$

作物茎秆第 1 阶弯曲振动频率为

$$f_1^{bend} = \frac{\omega_1^{bend}}{2\pi} = \frac{\beta_1^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E_s I}{2\rho_l}} \quad (11)$$

2.3 柔性作物茎秆拉伸振动仿真与理论计算

2.3.1 茎秆拉伸振动仿真

如图 6a 所示,对作物茎秆拉伸振动进行了仿真。将模型一端的球体固定,另一端球体中心受到轴向拉伸荷载。加载过程如图 6b 所示,逐渐增加到 $F_{(t_1)}^{stretch}$ 保持不变。在 t_2 时刻释放荷载,使茎秆处于纵向自由振动状态。

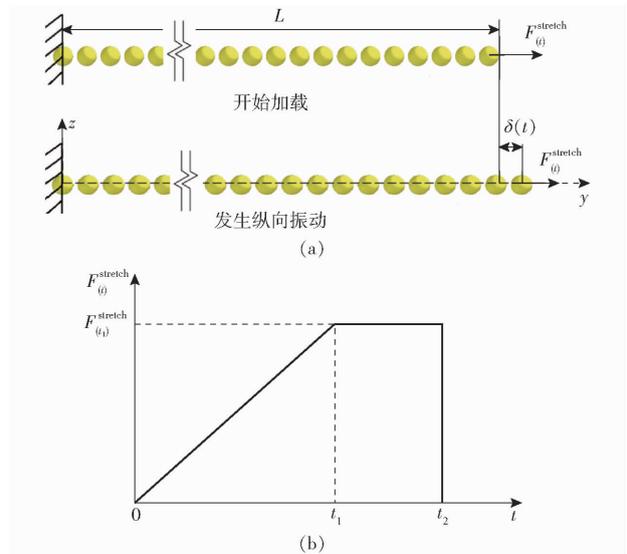


图 6 茎秆轴向拉伸模型和加载过程

Fig.6 Axial stretching simulation of stem stretching model and loading process

2.3.2 茎秆拉伸振动理论计算

作物茎秆纵向拉伸自由振动的控制方程为^[19]

$$E_s A \frac{\partial^2 \delta^{stretch}(y,t)}{\partial y^2} = \rho_l \frac{\partial^2 \delta^{stretch}(y,t)}{\partial t^2} \quad (12)$$

式中 $\delta^{\text{stretch}}(y, t)$ ——茎秆纵向拉伸位移, m
边界条件为

$$\begin{cases} \delta^{\text{stretch}}(0, t) = 0 \\ \frac{\partial \delta^{\text{stretch}}(L, t)}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

方程的解为

$$\delta^{\text{stretch}}(y, t) = \sum_{n=1}^{+\infty} B_n \sin\left(\frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{L} y\right) \cos(\omega_n^{\text{stretch}} t) \quad (14)$$

$$\text{其中 } B_n = \frac{8F_{(t_2)}^{\text{stretch}} L}{E_s A} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^2 \pi^2} \quad (15)$$

拉伸振动圆频率为

$$\omega_n^{\text{stretch}} = \frac{\left(n - \frac{1}{2}\right) \pi}{\sqrt{\frac{\rho_l}{E_s A} L}} \quad (16)$$

作物茎秆的拉伸第 1 阶振动频率为

$$f_1^{\text{stretch}} = \frac{\omega_n^{\text{stretch}}}{2\pi} = \frac{1}{\sqrt{\frac{16\rho_l L}{E_s A}}} \quad (17)$$

3 结果与讨论

3.1 作物茎秆特征指标测量结果

小麦第 3 节间茎秆的外径在 2.51 ~ 4.88 mm 之间, 内径在 1.52 ~ 2.38 mm 之间。茎秆单位长度质量在 3.35 ~ 4.27 g/m 之间。茎秆弹性模量在 4.67 ~ 6.85 GPa 之间。以测量结果的均值为虚拟茎秆模型的特征指标, 模型中虚拟键和颗粒参数如表 2 所示。

表 2 仿真中的茎秆参数

Tab. 2 Stem properties in simulation

	参数	数值
键	外径/mm	3.7
	内径/mm	1.9
	弹性模量/GPa	5.27
	泊松比	0.4
	键长/mm	6
颗粒	直径/mm	3.7
	密度/(kg·m ⁻³)	866
	弹性模量/GPa	5.27
	泊松比	0.4

3.2 柔性茎秆动力学仿真结果

图 5a 所示虚拟茎秆长度 L 为 108 mm, 缓慢地加载到 0.51 N 后保持载荷不变, 在图 5b 的 t_2 时刻释放载荷。图 7 为 t_2 时刻后茎秆自由端挠度随时间的变化曲线。通过仿真和理论计算获得的小茎秆的横向弯曲振动频率分别为 164.28、164.74 Hz, 两者

的相对误差为 0.28%, 仿真结果和理论计算结果吻合。

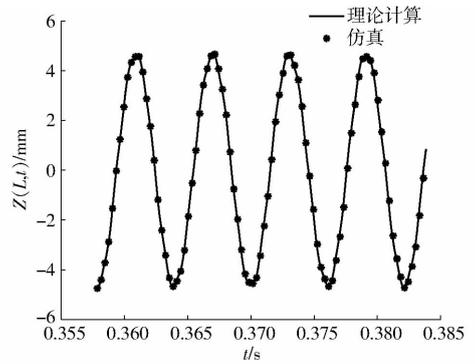


图 7 茎秆弯曲振动的时间-挠度曲线

Fig. 7 Deflection - time curve for vibration of stem cantilever beam

图 6a 中虚拟茎秆长度同样取 108 mm, 缓慢地加载到 134 N, 在图 6b 的 t_2 时刻释放载荷。图 8 为 t_2 时刻后茎秆自由纵向位移随时间的变化曲线。通过仿真和理论计算获得的茎秆的纵向振动频率分别为 7 633.59、7 642.98 Hz, 两者的相对误差为 0.12%, 仿真结果和理论计算结果吻合。

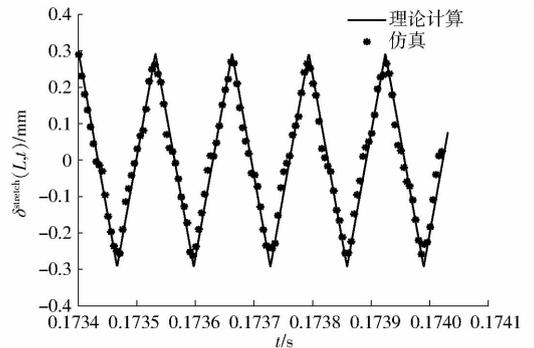


图 8 茎秆拉伸振动的时间-纵向位移曲线

Fig. 8 Normal displacement - time curve for axial vibration of wheat stem

3.3 柔性茎秆模型的实用性验证

通过对谷草分离进行仿真实验来验证柔性茎秆模型的实用性。如图 9a 所示, 谷草分离实验装置由曲柄滑块机构、振动箱、称量装置和台架组成。图中振动箱边长为 707 mm, 在曲柄滑块机构的驱动下, 以振幅 30 mm、频率 4 Hz 上下振动。振动箱底部是 10 mm × 10 mm 的格栅, 由直径为 1 mm 的金属丝编织成。振动箱下方放置称量装置, 称量传感器测量精度为 0.2 g, 采集频率为 50 Hz。谷草分离实验中采用的小麦茎秆长度约为 700 mm, 茎秆平均直径约为 5 mm, 茎秆平均壁厚约为 1 mm, 线密度约为 3.7 g/m, 弹性模量为 2.58 GPa。实验中小麦籽粒长轴直径约为 6 mm, 短轴直径约为 3 mm, 千粒质量约为 4.7 g。实验步骤如下: ①在盒子中填充面积密度为 2 kg/m² 的茎秆。②开启曲柄滑块的驱动电机, 使

茎秆在箱子内部随机分布。③从顶部往箱子里倒入面积密度为 0.5 kg/m^2 小麦籽粒。④通过称量装置记录谷物籽粒分离的累计质量。谷草分离仿真如图 9b 所示,振动箱同样以振幅为 30 mm ,频率为 4 Hz 上下振动,振动箱底部是 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的格栅,线径为 1 mm 。柔性虚拟茎秆长度为 701 mm ,虚拟键和颗粒其他参数见表 3。刚性虚拟茎秆的外形尺寸与柔性虚拟茎秆完全相同,刚性虚拟茎秆中颗粒的属性同柔性茎秆中颗粒属性也完全相同。不同的是刚性茎秆^[20-21]中所有颗粒粘成一个刚体。虚拟小麦籽粒长轴直径为 6 mm ,短轴直径为 3 mm ,千粒质量为 47 g 。仿真采用茎秆和籽粒面积密度为 $2, 0.5 \text{ kg/m}^2$ 。

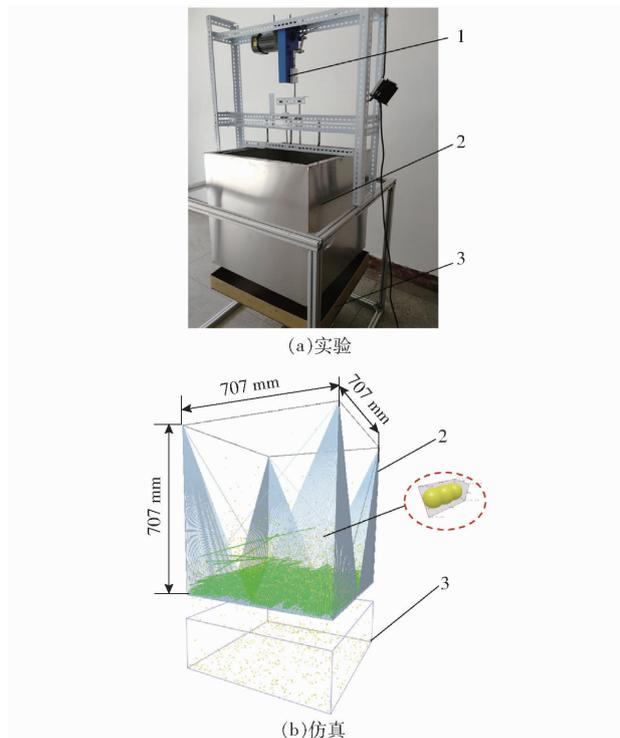


图 9 谷草分离实验与仿真

Fig. 9 Separation simulation and experiment

1. 曲柄滑块机构 2. 振动箱 3. 称量装置

谷草分离仿真和实验结果如图 10 所示,采用柔性茎秆进行仿真的结果和实验结果吻合,相关系数大于 0.99 。刚性茎秆的仿真结果和实验结果相差很大,谷草分离过程仅用 2 s ,而实际需要大约 9 s 。这表明对茎秆进行动力学仿真时,不考虑茎秆自身的振动响应特性,会导致较大的仿真误差。

表 3 谷草分离仿真中的茎秆属性

Tab. 3 Stem properties in separation simulation

	参数	数值
键	外径/mm	5
	内径/mm	1
	弹性模量/GPa	2.58
	泊松比	0.4
	键长/mm	6
颗粒	直径/mm	5
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	338
	弹性模量/GPa	2.58
	泊松比	0.4

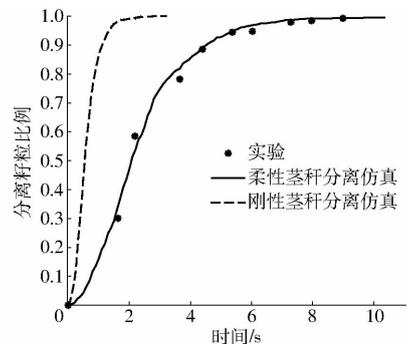


图 10 籽粒分离曲线

Fig. 10 Grain separation curves

通过柔性茎秆动力学模型可以获得和理论计算精度相似的茎秆基本动力学响应特性。理论计算只是一些简单的情况下才能求得解析解^[19],对于谷物脱粒和分离等复杂的工程实际问题^[22-24]无法进行精确地求解。然而柔性作物茎秆模型可以构造复杂的柔性作物体,可实现柔性作物体在多重碰撞复杂工况^[25]下的动力学仿真。

4 结论

(1) 采用空心圆柱形弹性虚拟键构建了考虑振动响应的柔性作物茎秆动力学仿真模型。

(2) 小麦茎秆横向振动频率和纵向振动频率的仿真结果和理论计算结果吻合,两者相对误差分别为 0.28% 和 0.12% 。

(3) 提出的柔性作物茎秆模型可以构造复杂的柔性作物体,可实现柔性作物体在多重碰撞复杂工况下的动力学仿真。

参 考 文 献

- [1] HIRAI Y, INOUE E, MORI K, et al. Pm—power and machinery: investigation of mechanical interaction between a combine harvester reel and crop stalks[J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(3):307–317.
- [2] HIRAI Y, INOUE E, MORI K. Application of a quasi-static stalk bending analysis to the dynamic response of rice and wheat stalks gathered by a combine harvester reel[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(3):281–294.
- [3] 宗望远, 廖庆喜, 黄鹏, 等. 组合式油菜脱粒装置设计与物料运动轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 41–46.
ZONG Wangyuan, LIAO Qingxi, HUANG Peng, et al. Design of combined rape threshing device and analysis of rape cane

- movement trail[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 41 - 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.009. (in Chinese)
- [4] 李耀明, 王建鹏, 徐立章, 等. 联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 68 - 75.
LI Yaoming, WANG Jianpeng, XU Lizhang, et al. Design and experiment on adjusting mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 68 - 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180808&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.008. (in Chinese)
- [5] 戴飞, 赵武云, 宋学锋, 等. 胡麻脱粒物料分离清选作业机参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 100 - 108.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Parameters optimization and experiment on separating and cleaning machine for flax threshing material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 100 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200712&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.012. (in Chinese)
- [6] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units: Part II. Application to tangential feeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 105 - 109.
- [7] MIU P I, KUTZBACH H D. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58(2): 93 - 99.
- [8] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units—Part I[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 96 - 104.
- [9] QIAN Z, JIN C, ZHANG D. Multiple frictional impact dynamics of threshing process between flexible tooth and grain kernel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 276 - 285.
- [10] BART L, THOMAS A, ENGELBERT T, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101: 24 - 33.
- [11] LEBLIG T, SMEETS B, VANMAERCKE S, et al. A discrete element approach for modelling bendable crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 141 - 149.
- [12] LEBLIG T, SMEETS B, RAMON H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 80 - 88.
- [13] LEBLIG T, RAMON H, VANMAERCKE S, et al. Mechanical analysis of the bending behaviour of plant stems[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 87.
- [14] CUNDALL P, POTYONDY D. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329 - 1364.
- [15] GUO Y, WASSGREN C, HANCOCK B, et al. Validation and time step determination of discrete element modeling of flexible fibers[J]. Powder Technology, 2013, 249: 386 - 395.
- [16] 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.
- [17] NGUYEN D H, KANG N, PARK J. Validation of partially flexible rod model based on discrete element method using beam deflection and vibration[J]. Powder Technology, 2013, 237: 147 - 152.
- [18] MAO H, WANG Q, LI Q. Modelling and simulation of the straw-grain separation process based on a discrete element model with flexible hollow cylindrical bonds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105229.
- [19] 贺利乐. 机械系统动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [20] MA Z, LI Y, XU L. Discrete-element method simulation of agricultural particles' motion in variable-amplitude screen box[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 92 - 99.
- [21] ZHAO Z, HUANG H, YIN J, et al. Dynamic analysis and reliability design of round baler feeding device for rice straw harvest[J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 10 - 19.
- [22] 王立军, 冯鑫, 武振超, 等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 115 - 123.
WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 115 - 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.013. (in Chinese)
- [23] 王立军, 李瑞, 于泳涛, 等. 玉米籽粒收获机双层非平行振动筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 130 - 139.
WANG Lijun, LI Rui, YU Yongtao, et al. Design and test of double-layer non-parallel vibrating screens[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 130 - 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190713&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.013. (in Chinese)
- [24] 王立军, 张志恒, 刘天华, 等. 玉米收获机割台砍劈式茎秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 109 - 117.
WANG Lijun, ZHANG Zhiheng, LIU Tianhua, et al. Design and experiment of device for chopping stalk of header of maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 109 - 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200713&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.013. (in Chinese)
- [25] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73 - 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73 - 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.008. (in Chinese)