doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.019

苜蓿草植株离散元模型建立与参数标定

李 涛[1] 王振华[1,2] 翟改霞[2] 田 丰[2] 邢 凯[2]

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院有限公司，呼和浩特 010010)

摘要： 苜蓿草收获装备作业性能影响草捆品质，需对苜蓿草物料的物理特性参数、接触特性参数和力学特性参数等特性进行实验测定。采用离散元方法，基于柔性纤维颗粒模型构建苜蓿茎秆离散元模型，基于柔性薄壳颗粒模型构建苜蓿叶片离散元模型，基于线弹性力学模型构建茎秆与叶片关节模型。以物料茎秆休止角、茎秆三点弯曲、叶片滑移角和叶片圆筒压缩实验结果为目标，通过Plackett-Burman实验、最陡爬坡实验、中心复合实验和单因素实验，对影响仿真实验结果的茎秆与叶片的力学和接触参数进行标定。结果表明,仿真茎秆挠度与物理实验平均值相等；仿真茎秆休止角与物理实验平均值相对误差为0.46%；仿真叶片圆筒压缩密度与物理实验平均值相对误差为0.82%；仿真叶片滑移角与物理实验平均值相对误差为0.15%。标定的参数能够真实反映苜蓿草的物料特性，研究结果可为苜蓿草收获机械优化设计提供理论依据和模型基础。

关键词： 苜蓿；离散元；柔性纤维颗粒；柔性薄壳颗粒；物理实验；参数标定

中图分类号： S541；TP391.9 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-1298(2024)S2-0187-13

Establishment and Parameter Calibration of Discrete Element Model of Alfalfa Plant

LI Tao[1] WANG Zhenhua[1,2] ZHAI Gaixia[2] TIAN Feng[2] XING Kai[2]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd.,Beijing* 100083, *China*

2. *Huhhot Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Co., Ltd.,Hohhot* 010010, *China*)

Abstract: The performance of harvesting equipment affects the quality of bales. The physical properties (geometry and density), contact properties (static friction coefficient, dynamic friction coefficient and collision recovery coefficient) and mechanical properties (blade elastic modulus and stalk deflection) of alfalfa materials were tested. Using the discrete element method, the clover stalk discrete element model was constructed based on the flexible fiber particle model, the clover blade discrete element model was constructed based on the flexible thin shell particle model, and the stalk and blade joint model was constructed based on the linear elasticity model. Aiming at the results of stalk resting angle, stalk three-point bending, blade slip angle and blade cylinder compression test, Plackett-Burman experiment, Steepest ascent experiment, center composite experiment and single factor experiment were used to calibrate the mechanics and contact parameters of stalk and blade that affected the simulation results. The results showed that the simulation stalk deflection was equal to the mean value of physical experiment. The relative error between the resting angle of simulated stalk and the mean value of physical experiment was 0.46%. The relative error between the compression density of simulated blade cylinder and the mean value of physical experiment was 0.82%. The relative error between the simulation blade slip angle and the physical experiment average was 0.15%. The calibration parameters can truly reflect the material characteristics of alfalfa, and the research results can provide theoretical basis and model basis for the optimal design of alfalfa harvesting machinery.

Key words: alfalfa; discrete element; flexible fibers particle; flexible shell particle; physical experiment; parameter calibration

收稿日期：2024-08-31 修回日期：2024-09-29

基金项目： 国家重点研发计划项目(2022YFD2001904)

作者简介： 李涛(1999—)，男，硕士生，主要从事农牧机械化装备研究，E-mail: litao5120127@163.com

通信作者： 王振华(1975—)，男，正高级工程师，博士生导师，主要从事农牧业装备与技术研究，E-mail: wzhh2008@yeah.net

0 引言

苜蓿作为优质牧草不仅推动了草食畜牧业持续健康发展,而且对保障国家粮食安全贡献巨大。随着苜蓿种植面积不断扩大,对苜蓿机械化收获提出高效高质要求,更加注重装备结构的合理性和科学性。传统机械设计方法研发周期长,不利于产品技术的快速升级。离散元理论因其在非连续性介质计算机模拟方面的突出成就在农业领域中逐步得到应用[1]。建立苜蓿植株的离散元模型,通过模拟仿真揭示苜蓿植株与接触部件之间的互作关系、苜蓿物料流在机械系统中的运动轨迹,可为指导苜蓿收获装备重要工作部件的结构设计提供重要的理论分析基础。但目前尚无苜蓿草植株离散元模型方面的研究。

离散元在农业领域主要应用于物料离散元模型的建立和参数标定,以多球体填充为主[2-3],柔性颗粒以EDEM软件的bond模型为基础。WANG等[4]建立了水稻植株的柔性离散元模型;徐常塑[5]基于Hertz-Mindlin with bonding模型建立了水稻田间直立状态的柔性离散元模型。

为减小模型计算量,提高保真度,球柱耦合填充模型得到应用。GUO等[6]建立了一种球柱形状的弹塑性模型理论,模拟大横纵比且表面光滑的柔性纤维的变形,该模型相比多球模型可大幅减少组合元素数量;LENAERTS等[7]在DEMeter++软件环境下构建由球体和圆柱体组成的分段可弯曲秸秆模型,通过修改弹簧和阻尼参数模拟真实茎秆在切向和法向上伸缩力学特性。此外,国内外学者对异形模型也开展了研究,马慧斌[8]系统研究了S形和U形纤维颗粒形状参数在堆积、压缩、拉伸和剪切过程中对力学性能的影响;LEBLICQ[9]建立一种可模拟管状柔性体大变形可逆的离散元力学模型;CRASSOUS[10]将纤维模拟成圆柱体段链,基于Crandall and Struck模型[11]提出一种模拟弹性纤维间摩擦接触的离散元算法。

国内扁平叶片离散元模型研究以多球体模型填充为主,LAI等[12]和郭无极[13]构建了甘蔗叶片模型,虎小雅[14]构建了枸杞叶片模型,ZHANG等[15]构建了鲜茶叶模型,穆桂脂等[16]建立了甘薯秧叶模型。在叶片异形颗粒的建模方面,秦宽等[17]建立了茶叶柔性多面体颗粒模型,金浩等[18]建立了柔性薄壳烟叶颗粒模型。

本文在分析苜蓿物理特性的基础上,基于模拟纤维形状的球柱和扁平形状的薄壳模型,建立初花期低含水率(≤20%)苜蓿草植株(含叶片)离散元模型,并标定物料参数,为苜蓿草收获装备设计改进奠定基础。

1 苜蓿草物料特性测定

选择初花期刈割后的紫花苜蓿,从物料中选取植株长度大于55 mm的15株,使用电热鼓风干燥箱进行含水率检测[19],测得茎秆中干物质占比为33.12%,叶片干物质占比为30.89%,其余物料自然晾晒至含水率为20%左右密封保存,以待进行物理特性、接触特性与力学特性参数测试。

1.1 苜蓿草植株物理特性参数测定

1.1.1 几何尺寸测量

使用游标卡尺对10株无明显损伤、长势良好的植株进行几何尺寸测量,测量结果如表1所示。

表1 苜蓿植株生物特性

Tab. 1 Biological characteristics of alfalfa plants mm

参数	主茎秆		附叶茎		叶长	叶短	叶片
	长度	直径	长度	直径	轴长	轴长	厚度
平均值	623.8	2.74	33.50	0.49	21.20	9.40	0.16
标准差	39.1	0.52	2.38	0.08	7.77	1.93	0.08

1.1.2 体积密度测量

采用浸入法对苜蓿草茎秆和叶片体积密度进行测量,将50 mL纯净水注入装有3 g物料的100 mL量筒中,保证所有被试材料均在液面以下,无浮起现象,平视观测液面数值,计算排水体积,代入公式计算体积密度,公式为

$$\rho = \frac{m_1}{V} \tag{1}$$

式中 ρ——苜蓿草物料体积密度,kg/m^3

m_1——苜蓿草物料质量,kg

V——排水体积,m^3

每组实验重复5次,测得苜蓿叶片体积密度为370~430 kg/m^3,苜蓿草茎秆体积密度为410~420 kg/m^3。

1.2 苜蓿草植株接触特性参数测定

接触参数包括不同材料间的静摩擦因数、动摩擦因数和碰撞恢复系数,动摩擦因数根据运动形式分为滚动摩擦因数和滑动摩擦因数。

1.2.1 静摩擦因数测定

使用自制的斜面仪对苜蓿茎秆与苜蓿茎秆、苜蓿茎秆与钢板、苜蓿茎秆与苜蓿叶片、苜蓿叶片与苜蓿叶片、苜蓿叶片与钢板间静摩擦因数进行测定。由于苜蓿草材质较轻,受外部环境影响较大,因此将苜蓿草茎秆和叶片粘连在不锈钢铁块的底部,同时制作较大面积的苜蓿叶片和苜蓿草茎秆面板,制作的苜蓿草茎秆和苜蓿叶片滑块、面板和钢板如图1a所示。

实验前,对实验台水平调零,以苜蓿叶片间的静摩擦因数测定为例,将苜蓿叶片滑块放置在苜蓿叶片面板上,通过提升无弹力鱼线使苜蓿叶片面板缓慢倾斜,同时使用高速摄影机以200 f/s进行记录,观察到苜蓿叶片滑块在苜蓿叶片面板上出现滑动趋势时,立即停止倾斜,静摩擦因数实验台如图1b所示。回放记录录像,使用ImageJ软件对苜蓿叶片板与水平方向的夹角进行测量。计算得到苜蓿叶片与苜蓿叶片的静摩擦因数,计算式为

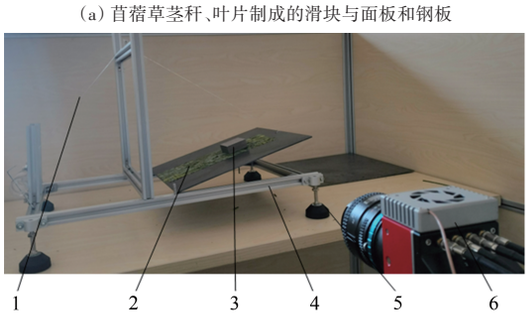
$$\mu = \tan\varphi \tag{2}$$

式中　μ——静摩擦因数

φ——物料滑动临界角，(°)



(a) 苜蓿草茎秆、叶片制成的滑块与面板和钢板



(b) 静摩擦因数实验台

图1　静摩擦因数测定实验台

Fig. 1　Static friction coefficient test bench

1. 无弹力鱼线　2. 苜蓿叶片面板　3. 苜蓿叶片滑块　4. 基座　5. 地脚螺栓　6. 高速摄影仪

以同样方法进行其余实验，每组实验重复5次，得到苜蓿茎秆间静摩擦因数为0.37~0.47，苜蓿叶片间静摩擦因数为0.43~0.63，苜蓿叶片与钢板间静摩擦因数为0.37~0.63，苜蓿茎秆与钢板间静摩擦因数为0.38~0.5，苜蓿茎秆与叶片间静摩擦因数为0.42~0.55。

1.2.2　滚动摩擦因数测定

苜蓿茎秆在斜面上滚动的过程中，滚动摩擦力偶矩与斜面对其支撑力成正比[20]，被试斜面倾斜使苜蓿茎秆产生滚动趋势时，由受力分析可得出滚动摩擦因数为

$$f=\frac{M}{F_N}=\frac{Gr\sin\alpha}{G\cos\alpha}=r\tan\alpha \tag{3}$$

式中　f——滚动摩擦因数

M——滚动摩擦力偶矩，N·m

F_N——斜面对苜蓿茎秆的支持力，N

G——苜蓿茎秆重力，N

α——苜蓿茎秆滚动摩擦临界角，(°)

r——苜蓿茎秆半径，mm

将高速摄影仪正对滚动摩擦因数测定实验台参考面，以200 f/s记录实验过程，缓慢增加斜面角度，观察苜蓿茎秆在钢板上发生纯滚动停止转动钢板，滚动摩擦因数测定实验台如图2所示。使用ImageJ软件对该时刻斜面角度进行测量，代入式(3)可得苜蓿茎秆与钢板间滚动摩擦因数，将钢板更换为茎秆板、苜蓿叶片板即可测量苜蓿茎秆间和苜蓿茎秆与苜蓿叶片的滚动摩擦因数，每组实验重复5次，得到苜蓿茎秆间滚动摩擦因数为0.18~0.28，苜蓿茎秆与钢板间滚动摩擦因数为0.19~0.39。

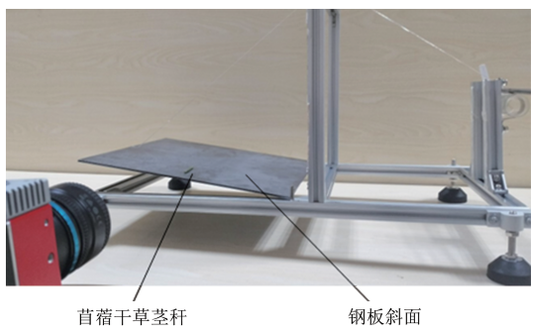


图2　滚动摩擦因数测定实验台

Fig. 2　Test bench for measuring coefficient of rolling friction

1.2.3　碰撞恢复系数

使用自搭实验台采用速度定义法[5]测量碰撞恢复系数，计算式为

$$e=\frac{v_t}{v_0} \tag{4}$$

式中　e——茎秆与被试材料间的碰撞恢复系数

v_t——碰撞后苜蓿茎秆反弹瞬时速度，m/s

v_0——碰撞前苜蓿茎秆下落瞬时速度，m/s

将高速摄影仪水平并正对空间参照壁面固定，根据镜面反射成像原理，固定反射镜面间与空间参照壁面夹角为135°，在空间参照壁面粘贴单位刻度为1 mm的坐标网格纸，碰撞恢复系数实验台如图3所示。对苜蓿茎秆下落及与水平材料面板碰撞过程进行运动学分析，建立水平空间直角坐标系XYZ，设碰撞瞬间的空间参考壁面中坐标值为(x_0,z_0)，在反射镜面中坐标值为(y_0,z_0)，因在碰撞前苜蓿茎秆在竖直方向作加速度为g的匀加速运动，所以碰撞前m帧苜蓿茎秆几何中心在空间参考壁面中坐标值为(x_0,z_m)，苜蓿茎秆几何中心在反射镜面中的坐标值为(y_0,z_0)。在竖直方向上苜蓿

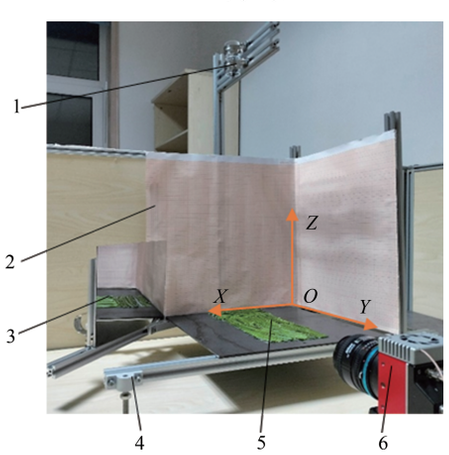


图3　碰撞恢复系数实验台

Fig. 3　Collision recovery coefficient test bench

1. 苜蓿茎秆落料口　2. 坐标纸　3. 镜面　4. 基座　5. 苜蓿茎秆面板　6. 高速摄影仪

茎秆做匀加速运动，则苜蓿茎秆与被试材料碰撞前瞬时速度为

$$v_0 = \frac{z_m - z_0}{t_m} + \frac{1}{2}gt_m \tag{5}$$

式中 t_m——茎秆运动m帧的时间，s

苜蓿茎秆在碰撞点弹起运动n帧后，设其运动时间为t_n，其在空间参考壁面中坐标值为(x_n, z_n)，在反射镜面中坐标值为(y_n, z_n)。在竖直方向上进行加速度为g的匀减速运动，其中间时刻瞬时速度等于此段时间内平均速度，则三轴方向上瞬时运动速度分别为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{x_n - x_0}{t_n} \\ v_y = \dfrac{y_n - y_0}{t_n} \\ v_z = \dfrac{z_n - z_0}{t_n} + \dfrac{1}{2}gt_n \end{cases} \tag{6}$$

对苜蓿茎秆碰撞后弹出的分离速度v_t进行分解，得到其在三维空间内沿三轴方向的分速度，即

$$v_t = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \tag{7}$$

将式(5)~(7)整理代入式(4)得

$$e = \frac{2t_m\sqrt{\dfrac{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 + (z_n - z_0)^2}{t_n^2} + g(z_n - z_0) + \dfrac{g^2t_n^2}{4}}}{2(z_m - z_0) + gt_m^2} \tag{8}$$

将不同被试材料板固定于碰撞平台上，测量苜蓿茎秆与不同材料间碰撞弹跳作用。每组实验重复5次，得苜蓿茎秆与苜蓿茎秆、苜蓿叶片、钢板的碰撞恢复系数分别为0.16~0.38、0.45~0.76和0.46~0.76。

1.2.4 茎秆休止角实验

采用“圆筒提升法”对苜蓿茎秆休止角进行测量，直径为50 mm的圆筒竖直放置在水平铁板上，将17 g长度为20 mm茎秆放置其中，由万用拉力机以速度0.05 m/s将圆筒提升，直至圆柱筒内茎秆在重力的作用下自然散落成堆积状态，对堆积体进行正视拍照记录，苜蓿草茎秆休止角实验如图4所示。使用ImageJ软件提取堆积体图像休止角θ，实验重复5次，测得苜蓿茎秆休止角平均值为30.56°，变异系数为3.08%。

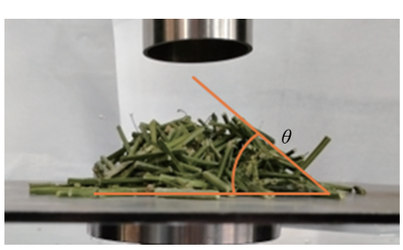


图4 苜蓿草茎秆休止角物理实验

Fig. 4 Physical experiment of alfalfa stalk resting angle

1.2.5 叶片滑移实验

将3 g苜蓿叶片装入直径为50 mm的圆筒内，缓慢提升取出圆筒，苜蓿叶片在重力作用下自然散落堆积，苜蓿叶片滑移实验台如图5所示，通过提升无弹力鱼线使底板缓慢倾斜，同时用高速摄影仪记录实验过程，直至苜蓿叶片完全滑落出底板，回放录像数据对此刻的底板与水平的夹角进行测量，实验重复5次，得到苜蓿叶片滑移角γ平均值为35.77°，变异系数为2.41%。

1.3 苜蓿草植株力学特性参数测定

1.3.1 茎秆三点弯曲实验

牧草茎秆是一种典型的多相、筛状、不连续、不均匀和各向异性的复合材料[21]，苜蓿茎秆具有柔性纤维的特征，在捡拾过程中主要以弯曲变形为主，整个弯曲过程可以分为线弹性、椭圆化和屈曲3个阶段[22]。使用万用拉力机(3342型，INSTRON公司)采用三点弯曲法对苜蓿茎杆挠度进行测量，实验如图6a所示。将拉力机设置至压缩模式，下降速度为0.3 mm/s，将茎秆切割成80 mm的节距，将其放置在2个半圆头间距为50 mm的支架顶部，由半径为5 mm的半圆形探头，将茎秆压至变形，设置最大加载距离为30 mm，计算机记录探头位移和受载数据，并以摄影仪记录压缩过程，重复实验5次。回放摄影仪数据，使用ImageJ软件对茎秆弯曲角度进行测量，并对此刻探头受力数据进行提取，以计算弯曲扭矩。弯曲扭矩计算公式为

$$M_1 = FL \tag{9}$$

其中

$$\begin{cases} F = F_1 \sin\dfrac{180° - \theta_R}{2} \\ L = \dfrac{l}{\sin\dfrac{180° - \theta_R}{2}} \end{cases} \tag{10}$$

式中 F——扭矩有效力，N

F_1——探头检测的力，N

l——一侧压杆支点至中心的距离，m

L——扭矩有效力臂长度，m

θ_R——茎秆弯曲角，(°)

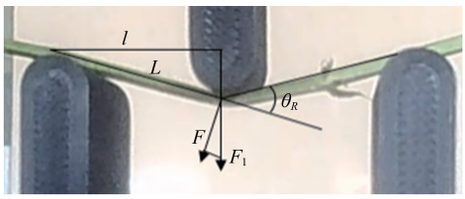
M_1——茎秆一侧的扭矩，N·m



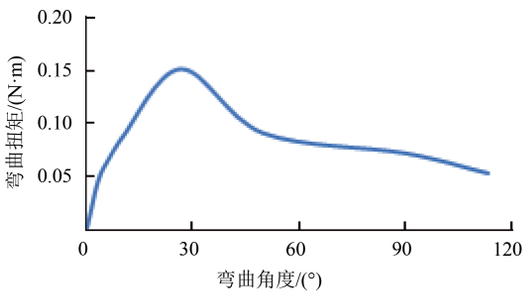
图5 苜蓿叶片滑移实验

Fig. 5 Alfalfa blade sliding experiment

拟合出茎秆弯曲角度与扭矩的关系如图6b所示，得出线弹性阶段茎秆的弯曲角度与弯曲扭矩呈线性关系，当压杆铅锤方向受力为3.5 N时，苜蓿茎秆平均挠度为1.67 mm。



(a) 苜蓿茎秆三点弯曲实验示意图



(b) 茎秆弯曲角度与扭矩的关系

图6　苜蓿茎秆三点弯曲实验

Fig. 6　Three-point bending experiment of alfalfa stalk

1.3.2　苜蓿叶片圆筒压缩实验

实验台水平调零后，将5 g苜蓿叶片放入直径为50 mm、高度为100 mm的不锈钢铁筒中，然后将330 g直径为49.5 mm的圆柱形铁块从铁筒顶部缓慢落下，测量圆块底面与底板的距离，以此计算压缩后的苜蓿叶片的密度，苜蓿叶片圆筒压缩实验如图7所示。经过5次重复实验，得苜蓿叶片密度η平均值为274 kg/m^3，变异系数为2.36%。

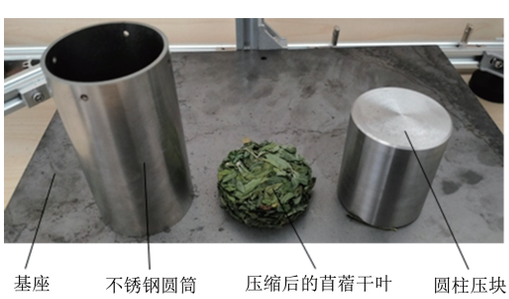


图7　苜蓿叶片圆筒压缩实验

Fig. 7　Alfalfa blade cylinder compression experiment

1.3.3　叶片拉伸实验

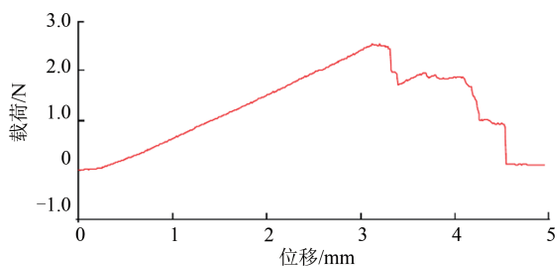
将苜蓿叶片两侧以双面胶粘连，夹装在万用拉力机夹具上，以速度0.1 mm/s进行拉伸，记录拉伸过程的载荷与位移数据，叶片在拉伸部位断裂视为有效数据[23]，苜蓿叶片拉伸实验及拉伸数据如图8所示，得到苜蓿叶片弹性模量最大值为15.68 MPa，最小值为7.13 MPa，平均值为11.60 MPa。

2　苜蓿草植株离散元模型构建

分析苜蓿植株特性，将苜蓿分解为纤维状茎秆和薄形叶片分别建立模型，本文拟采用柔性纤维模型和柔性薄壳模型两种离散元线性弹性模型。



(a) 苜蓿叶片拉伸实验



(b) 苜蓿叶片拉伸结果

图8　苜蓿叶片拉伸实验

Fig. 8　Tensile test of alfalfa blade

2.1　柔性纤维和薄壳模型

柔性纤维模型的柔性纤维颗粒(Flexible fibers particle)由多个球柱单元(Sphero-cylinder element[6])和关节(Joint)组成，球柱单元两端呈半球、中间呈圆柱，相邻球柱单元在端部球心处重合相连形成关节，重合的多对关节可模拟多分支纤维模型，多分支柔性纤维模型简图如9图所示，点A为3对关节的重合点。关节处，球柱单元间的相对平移和旋转体现了柔性纤维的形变和位移[24]。关节连接的相邻单元上的力和力矩等值反向，如图10所示。

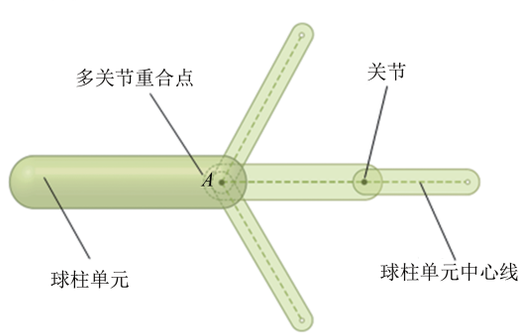


图9　多分支柔性纤维模型简图

Fig. 9　Multi-branch flexible fiber model diagram

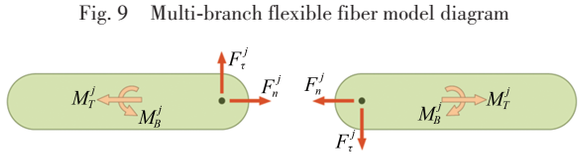


图10　球柱模型关节点的力学模型

Fig. 10　Mechanical model of joint of sphero-cylinder element model

柔性薄壳颗粒[23](Flexible shell particle)由多个圆柱－三角板单元(Sphero-triangle element[25])和关节(Joint)组成，通过将连续的复杂曲面离散为三角形网格后，再双侧拉伸形成具有一定厚度的三角板，且三边均

由半圆柱体闭合。相邻圆柱-三角板单元的圆柱体中心线重合，关节位于圆柱体中心线的中点上，柔性薄壳模型如图11所示。与柔性纤维模型相比，柔性薄壳仅在关节点处多一对弯曲扭矩。

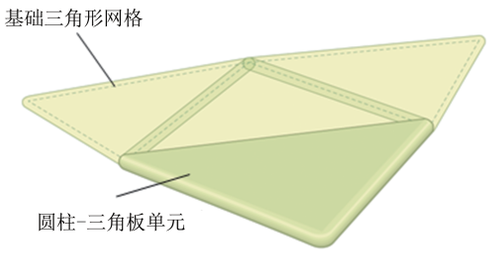


图11 柔性薄壳模型

Fig. 11 Flexible thin shell model

2.2 线性弹性模型

线性弹性模型(Linear elastic model)中力和力矩与线位移和角位移成正比，以柔性薄壳模型为例，其关节处的法向力 F_n^j、切向力 F_τ^j、弯曲扭矩 M_B^j 和扭转扭矩 M_T^j 的计算公式为

$$\begin{cases} F_n^j = r_e^n K_n'' A d_n^{rel} \\ F_\tau^j = r_e^\tau K_\tau'' A d_\tau^{rel} \\ M_B^j = r_e^B K_n'' I \theta_B \\ M_T^j = r_e^T K_\tau'' J \theta_T \end{cases} \tag{11}$$

式中 K_n''、K_τ''——单位面积法向和切向刚度

A——面积，m^2

J——转动惯量，$kg \cdot m^2$

I——惯性矩，m^4

r_e^n、r_e^τ、r_e^T、r_e^B——法向、切向、扭转和弯曲弹性比，值相等时表示各项同性材料；值不等时表示各向异性材料

d_n^{rel}——连接单元关节处法向线位移，m

d_τ^{rel}——连接单元关节处切向线位移，m

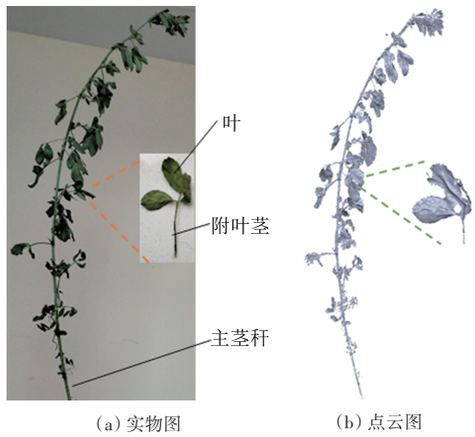
θ_T——连接单元关节处扭转角位移，(°)

θ_B——连接单元关节处弯曲角位移，(°)

2.3 苜蓿植株离散元模型建立

苜蓿草植株实物图如12a所示。使用三坐标扫描仪(QE740型，FARO公司)扫描测量，得到整株点云数据，苜蓿草植株点云图如12b所示。

使用Solidworks软件中从上文点云数据文件中提取茎秆三维坐标和叶片的曲面数据，以此建立苜蓿茎秆的球柱和叶片的薄壳离散元颗粒模型，由150个球柱颗粒构建的苜蓿茎秆离散元模型和由60个薄壳颗粒构建的苜蓿叶片模型如图13所示。



(a) 实物图 (b) 点云图

图12 苜蓿草植株

Fig. 12 Diagrams of alfalfa plant

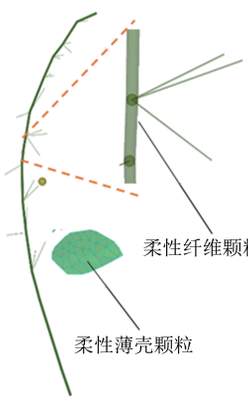


图13 苜蓿草植株离散元模型

Fig. 13 Discrete element model of alfalfa plant

3 仿真参数标定实验

3.1 接触力模型

离散元仿真模拟中将接触力分为法向力和切向力。选择法向接触力 F_n 为迟滞弹性阻尼模型，由线弹性斥力和阻尼力两部分组成，即

$$F_n = K_{nl} s_n + C_n \dot{s}_n \tag{12}$$

式中 K_{nl}——粒子间在法向上接触刚度

C_n——法向阻尼系数

s_n——接触粒子在法向上重叠量

选择切向接触力 $F_{\tau,e}^t$ 为库伦极限线弹性模型，该模型下的切向力为摩擦力，即

$$F_{\tau,e}^t = F_\tau^{t-\Delta t} - r_K K_{nl} \Delta s_\tau \tag{13}$$

式中 $F_\tau^{t-\Delta t}$——前一时刻切向力

r_K——切向刚度与法向刚度比，取0~1

K_{nl}——粒子间在法向上接触刚度

Δs_τ——粒子斜向相对位移

重力加速度方向设置为 Y 轴负方向，取9.81 m/s^2。

3.2 苜蓿茎秆力学参数标定实验

为进一步确定上文物理实验测定的苜蓿茎秆力学参数仿真模拟中的最优取值组合，展开苜蓿茎秆的三点弯曲仿真实验。关节模型设置为线弹性模型，使用定义颗粒坐标法于支架顶部生成一个直径为2.74 mm、长度为80 mm的球柱颗粒。半圆头压杆以速度0.005 m/s沿 Y 轴负方向移动。设置仿真数据输出步长 t 为0.01 s，监测压杆在 Y 轴方向上的受力，仿真总时长为3 s，设置茎秆为各项异性材料，苜蓿草茎秆挠度仿真实验如图14所示。

对压杆受力为3.5 N时刻的茎秆挠度进行计算，计

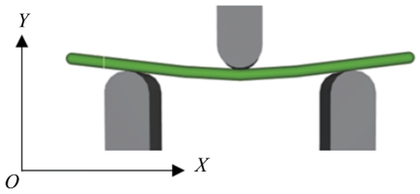


图 14　苜蓿草茎秆挠度仿真实验

Fig. 14　Deflection simulation of alfalfa stalk

算式为

$$y=\left[T_1-T_0+\frac{t(3.5-N_1)}{N_2-N_1}\right]v \tag{14}$$

式中　y——挠度，mm

T_0——压杆与茎秆接触时刻，s

T_1——受力3.5 N的上一时刻，s

N_1——T_1时刻压杆受力，N

N_2——T_1+t时刻压杆受力，N

v——压杆移动速度，m/s

3.2.1　茎秆挠度影响参数Plackett-Burman实验

为快速筛选出显著影响苜蓿茎秆挠度的参数，应用Minitab软件对其中9个不确定因素展开Plackett-Burman实验设计，根据文献[26-28]和前期物理实验确定9个实验因素的取值范围，将实验因素的最小值、最大值分别设为-1、1水平，如表2所示。实验方案与结果如表3所示，X_1~X_9为因素水平值。显著性检验结果如表4所示。根据表4可知，苜蓿茎秆弯曲弹性比x_8对挠度有显著影响，其余因素对挠度的影响不显著。

表 2　挠度影响参数Plackett-Burman实验因素水平

Tab. 2　Deflection affects parameters Plackett-Burman experimental factor level

参数	编码	
	-1	1
苜蓿草茎秆泊松比x_1	0.3	0.5
苜蓿茎秆弹性模量[28]x_2/GPa	3.04	3.95
极限法向应力x_3/MPa	22.87	41.29
极限切向应力x_4/MPa	8.85	14.58
苜蓿茎秆球柱元素数量*x_5	6	30
苜蓿茎秆法向弹性比x_6	1	10
苜蓿茎秆切向弹性比x_7	1	10
苜蓿茎秆弯曲弹性比x_8	3.25	7.75
苜蓿茎秆扭转弹性比x_9	1	10

注：*表示苜蓿茎秆长度为80 mm所填充的球柱元素数量。

3.2.2　茎秆挠度影响参数单因素实验

为准确得到物理茎秆挠度所对应的苜蓿茎秆弯曲弹性比x_8的最佳取值，展开单因素回归实验，实验方案及结果如表5所示，方差分析结果如表6所示。

该拟合模型P=0.009，决定系数为0.990 7，调整决定系数为0.981 4，与1非常接近，说明此茎秆挠度回归模型显著，表明该模型拟合程度较好，无失拟现象发生。此模型能够准确地反映真实的情况，可以用于茎秆挠度的预测。得到苜蓿茎秆挠度二阶回归方程为

表 3　挠度影响参数Plackett-Burman实验方案与结果

Tab. 3　Scheme and results of Plackett-Burman experiment on deflection influence parameters

序号	因素									挠度
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	y/mm
1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1.146
2	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1.034
3	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	2.172
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3.100
5	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	3.063
6	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	2.807
7	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	3.397
8	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1.192
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1.332
10	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	2.310
11	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0.919
12	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1.557

表 4　挠度影响参数Plackett-Burman实验结果方差分析

Tab. 4　Variance analysis of deflection influence parameters of Plackett-Burman experiment results

来源	自由度	平方和	均方	F	P
x_1	1	0.005 32	0.005 32	0.03	0.869
x_2	1	0.882 49	0.882 49	5.76	0.138
x_3	1	0.011 95	0.011 95	0.08	0.806
x_4	1	0.062 91	0.062 91	0.41	0.587
x_5	1	0.059 49	0.059 49	0.39	0.597
x_6	1	0.003 20	0.003 20	0.02	0.898
x_7	1	0.072 85	0.072 85	0.48	0.562
x_8	1	7.791 55	7.791 55	50.84	0.019*
x_9	1	0.000 35	0.000 35	0	0.966
误差	2	0.306 52	0.153 26		
合计	11	9.196 63			

注：*表示影响显著（0.01≤P<0.05），下同。

表 5　茎秆挠度影响参数单因素实验方案及结果

Tab. 5　Experimental scheme and results of single factor influencing parameters of stalk deflection

序号	x_8	挠度y/mm	误差/%
1	3.250	2.907 97	74.13
2	4.375	1.878 89	12.51
3	5.500	1.476 00	-11.62
4	6.625	1.125 83	-32.59
5	7.750	1.054 00	-36.89

表 6　茎秆挠度影响参数单因素实验结果方差分析

Tab. 6　ANOVA analysis of single factor experimental results of influencing parameters of stalk deflection

来源	自由度	平方和	均方	F	P
模型	2	2.266 48	1.133 24	106.80	0.009**
x_8	1	0.478 07	0.478 07	45.05	0.021*
x_8^2	1	0.276 43	0.276 43	26.05	0.036*
误差	2	0.021 22	0.010 61		
合计	4	2.287 70			

注：**表示影响显著（P<0.01），下同。

$$y = 6.947 - 1.618x_8 + 0.111x_8^2 \quad (15)$$

以物理实验的茎秆挠度平均值1.67 mm为目标，应用Minitab软件的响应优化模块，对回归模型(15)进行优化求解，得到x_8最优解为4.929。计算得出茎秆挠度拟合值为1.67 mm，与物理实验挠度平均值相等。说明所建立的苜蓿茎秆挠度的预测回归模型较为准确。

3.3 苜蓿茎秆接触参数标定实验

为进一步确定上文物理实验测定的苜蓿茎秆的接触参数于仿真模拟中的最优取值组合，展开苜蓿茎秆的休止角仿真实验。柔性球柱颗粒模型在不使用黏结力模型下，通过滚动阻力矩提高球柱颗粒的稳定性[24]，设置固定滚动阻力模型的滚动阻力系数为1。设置4个颗粒生成面生成直径为2.74 mm的球柱颗粒，球柱颗粒方向分别沿X轴与Z轴，均为两组，颗粒生成方向为绕Y轴60°的范围内随机角度生成，颗粒长度均为20 mm，颗粒生成时间位于仿真开始前0.5 s内，最终颗粒数量为540个，0.5~3.5 s内以速度0.03 m/s提升圆筒，使颗粒在重力作用下自然堆积，3.5~4.5 s内使颗粒形成稳定的休止角。采用ImageJ软件对休止角进行测量，苜蓿草茎秆休止角仿真实验如图15所示。

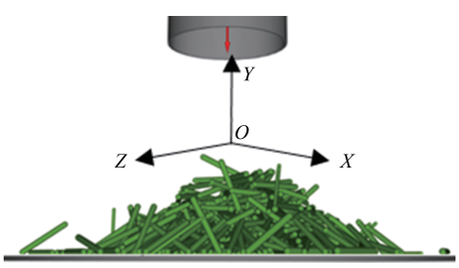


图15 苜蓿草茎秆休止角仿真实验

Fig. 15 Simulation of alfalfa stalk resting angle

3.3.1 茎秆休止角Plackett-Burman实验

为了快速筛选出显著影响苜蓿茎秆休止角参数的因素，应用Minitab软件对其中9个不确定因素展开Plackett-Burman实验设计，根据参考文献[26,28]和前期物理实验确定9个实验因素的取值范围，将实验因素最小值、最大值分别设为-1、1编码，如表7所示。实验方案与结果如表8所示，X_{10}~X_{18}为因素编码值。显著性检验结果如表9所示，根据Plackett-Burman实验显著性检验结果可知，苜蓿茎秆-苜蓿茎秆静摩擦因数x_{11}和苜蓿茎秆-钢板滚动摩擦因数x_{14}因素对休止角有显著影响，其余因素对休止角的影响不显著。

3.3.2 茎秆休止角最陡爬坡实验

为缩小显著因素的最佳取值区域，以两个显著因素为实验因素，休止角为评价指标进行最陡爬坡实验，其他影响不显著的因素取中间值。最陡爬坡实验方案和结果如表10所示。由实验结果可知，在序号4时相对误差最小，则茎秆休止角最优取值组合在序号4附近。

3.3.3 茎秆休止角中心复合实验

为确定苜蓿茎秆-苜蓿茎秆静摩擦因数x_{11}和苜蓿茎秆-钢板滚动摩擦因数x_{14}对茎秆休止角的最优取值组合，以4号水平为中心点，3号和5号水平分别作为低水平和高水平进行后续的中心复合实验，显著接触参数的中心复合设计实验编码如表11所示，中心复合设计实验方案与结果如表12所示，采用Minitab软件对中心复

表7 茎秆休止角Plackett-Burman实验因素水平

Tab. 7 Factors level of stalk repose angle parameters for Plackett-Burman experiment

仿真参数	编码	
	-1	1
苜蓿茎秆体积密度x_{10}/(kg·m^{-3})	410	420
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆静摩擦因数x_{11}	0.37	0.47
苜蓿茎秆-钢板静摩擦因数x_{12}	0.38	0.5
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆滚动摩擦因数x_{13}	0.18	0.28
苜蓿茎秆-钢板滚动摩擦因数x_{14}	0.19	0.39
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆碰撞恢复系数x_{15}	0.16	0.38
苜蓿茎秆-钢板碰撞恢复系数x_{16}	0.46	0.76
苜蓿茎秆-苜蓿茎秆切向刚度比x_{17}	0.1	1.0
苜蓿茎秆-钢板切向刚度比x_{18}	0.1	1.0

表8 茎秆休止角Plackett-Burman实验方案与结果

Tab. 8 Scheme and results of Plackett-Burman experiment on stalk repose angle parameters

序号	因素									休止角
	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	θ/(°)
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	21.60
2	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	22.40
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	30.91
4	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	32.80
5	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	36.34
6	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	28.64
7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	20.66
8	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	34.12
9	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	37.00
10	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	30.00
11	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	29.25
12	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	24.64

表9 茎秆休止角Plackett-Burman实验结果方差分析

Tab. 9 ANOVA analysis of Plackett-Burman experiment results of stalk resting angle parameters

来源	自由度	平方和	均方	F	P
x_{10}	1	6.225	6.225	1.10	0.404
x_{11}	1	201.466	201.466	35.74	0.027*
x_{12}	1	19.715	19.715	3.50	0.202
x_{13}	1	94.770	94.770	16.81	0.055
x_{14}	1	144.276	144.276	25.59	0.037*
x_{15}	1	34.541	34.541	6.13	0.132
x_{16}	1	20.309	20.309	3.60	0.198
x_{17}	1	5.859	5.859	1.04	0.415
x_{18}	1	6.388	6.388	1.13	0.399
误差	2	11.276	5.638		
合计	11	544.823			

表 10　茎秆休止角最陡爬坡实验方案与结果

Tab. 10　Experimental scheme and results of the steepest climb of stalk resting angle

序号	因素		休止角θ/(°)	误差/%
	x_{11}	x_{14}		
1	0.370	0.190	24.001	21.67
2	0.395	0.240	26.281	14.14
3	0.420	0.290	26.348	13.91
4	0.445	0.315	31.147	1.94
5	0.470	0.390	32.513	6.45

合设计实验结果进行方差分析，分析结果如表13所示，由结果可知，x_{11}、x_{14}、x_{11}^2、x_{14}^2对茎秆休止角有显著影响，$x_{11}x_{14}$对休止角的影响不显著。

表 11　茎秆休止角中心复合实验因素编码

Tab. 11　Stalk repose angle center composite test code

编码	因素	
	x_{11}	x_{14}
−1	0.420	0.290
0	0.445	0.315
1	0.470	0.390

表 12　茎秆休止角中心复合实验方案与结果

Tab. 12　Experimental scheme and results of center of stalk repose angle

序号	因素		休止角θ/(°)	误差/%
	x_{11}	x_{14}		
1	0.470	0.315	31.36	2.62
2	0.445	0.315	31.14	1.90
3	0.470	0.290	28.04	8.25
4	0.420	0.315	29.28	4.19
5	0.470	0.390	32.51	6.38
6	0.445	0.290	28.01	8.34
7	0.445	0.390	32.45	6.18
8	0.420	0.390	30.14	1.37
9	0.420	0.290	26.62	12.89

该拟合模型的P=0.001，决定系数为0.996 5，调整决定系数为0.990 8，均与1非常接近，说明此休止角回归模型极显著，表明该模型拟合程度较好，无失拟现象发生，说明此模型能够准确地反映真实情况，可以用于茎秆休止角的预测，得到苜蓿草茎秆仿真休止角与两个显著参数的二阶回归方程为

$$\theta = -375.3 + 1\,233x_{11} + 693.4x_{14} - 1\,402x_{11}^2 - 1\,066.3x_{14}^2 + 164.2x_{11}x_{14} \quad (16)$$

以物理实验的休止角平均值30.56°为目标，应用Minitab软件的响应优化模块，对回归模型(16)进行优化求解，得到x_{11}、x_{14}的最优组合为0.422和0.389。计算得出休止角拟合值为30.42°，与物理实验休止角平均值相对误差为0.46%。说明所建立的苜蓿草茎秆的休止角预测回归模型较为准确。

3.4　苜蓿叶片力学参数标定实验

为进一步确定上文物理实验测定的苜蓿叶片的力学参数于仿真模拟中的最优取值组合，展开苜蓿叶片的圆筒压缩仿真实验。“落雨法”生成5 g薄壳颗粒在直径为50 mm的圆筒内，圆柱体压块以速度0.008 m/s沿Y轴负方向移动，对柱形压块在Y轴方向的受力进行监测，计算压块受力在8.66 N(上文物理实验压块的重力)时刻与底板的距离，由此计算薄壳颗粒的密度η，设置苜蓿叶片为各向同性材料，苜蓿叶片圆筒压缩仿真实验如图16所示。

表 13　茎秆休止角中心复合实验结果方差分析

Tab. 13　ANOVA analysis of stalk repose angle center composite experiment results

来源	自由度	平方和	均方	F	P
模型	5	35.037 4	7.007 48	172.44	0.001**
x_{11}	1	1.474 7	1.474 69	36.29	0.009**
x_{14}	1	4.724 6	4.724 61	116.26	0.002**
x_{11}^2	1	1.536 3	1.536 29	37.80	0.009**
x_{14}^2	1	7.379 2	7.379 16	181.58	0.001**
$x_{11}x_{14}$	1	0.182 6	0.182 59	4.49	0.124
误差	3	0.121 9	0.040 64		
合计	8	35.159 3			

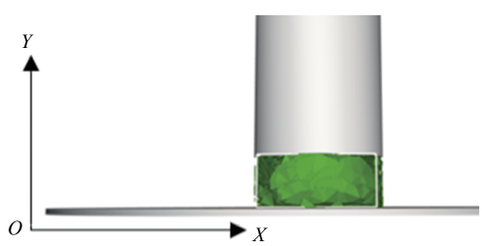


图16　苜蓿叶片圆筒压缩仿真实验

Fig. 16　Simulation experiment of cylinder compression of alfalfa dried blade

3.4.1　叶片力学参数Plackett-Burman实验

为快速筛选出显著影响苜蓿叶片的力学参数的因素，应用Minitab软件对其中8个不确定因素展开Plackett-Burman实验设计，根据文献[18,25,29]和前期物理实验确定8个实验因素取值范围，将影响因素最小、最大值分别设为−1、1编码，如表14所示。实验方案与结果如表15所示，X_{19}~X_{26}为因素编码值。显著性检验结果如表16所示。由分析结果可知苜蓿叶片弹性模量x_{20}、苜蓿叶片元素数量x_{21}、苜蓿叶片弹性比x_{22}、苜蓿叶片关节阻尼系数x_{23}和苜蓿叶片间切向刚度比x_{25}对密度η有显著影响，其余因素对苜蓿叶片圆筒压缩的密度影响不显著。

3.4.2　苜蓿叶片力学显著参数最陡爬坡仿真实验

为缩小显著因素的最佳取值区域，以5个显著因素为实验因素，苜蓿叶片的密度为评价指标进行最陡爬坡实验，其他影响不显著的因素取中间水平。最陡爬坡实验方案和结果如表17所示，由实验结果可知最优参数在3、4号实验参数水平的范围内。

由于显著因素较多，开展响应曲面实验次数较多，

表14 叶片力学参数Plackett-Burman实验因素水平

Tab. 14 Factors level of mechanical parameters of blade Plackett-Burman experiment

因素	编码	
	−1	1
苜蓿草叶片泊松比x_{19}	0.2	0.5
苜蓿叶片弹性模量x_{20}/MPa	7.12	15.17
苜蓿叶片元素数量x_{21}	4	20
苜蓿叶片弹性比x_{22}	0.001	0.050
苜蓿叶片关节阻尼比*x_{23}	0.1	1.0
苜蓿叶片元素阻尼比**x_{24}	0.1	1.0
苜蓿叶片间切向刚度比x_{25}	0.1	1.0
苜蓿叶片-钢材切向刚度比x_{26}	0.1	1.0

注:*关节阻尼用以减少柔性颗粒的高频振荡[30];**元素阻尼可有效降低元素的相对速度,以消除颗粒的低频振荡。

表15 叶片力学参数Plackett-Burman实验方案与结果

Tab. 15 Plackett-Burman experiment scheme and results of mechanical parameters of blade

序号	因素								密度η/(kg·m^{-3})
	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	
1	−1	1	1	1	−1	1	1	−1	397
2	1	1	−1	1	1	−1	1	−1	393
3	1	−1	1	−1	−1	−1	1	1	677
4	1	1	1	−1	1	1	−1	1	697
5	1	−1	1	1	−1	1	−1	−1	575
6	1	1	−1	1	−1	−1	−1	1	368
7	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	544
8	−1	1	1	−1	1	−1	−1	−1	713
9	−1	−1	1	1	1	−1	1	1	571
10	1	−1	−1	−1	1	1	1	−1	606
11	−1	1	−1	−1	−1	1	1	1	373
12	−1	−1	−1	1	1	1	−1	1	525

表16 叶片力学参数Plackett-Burman实验显著性检验结果

Tab. 16 Significance test results of Plackett-Burman experiment on mechanical parameters of blade

来源	自由度	平方和	均方	F	P
x_{19}	1	0.539 2	0.539 2	4.88	0.114
x_{20}	1	16.491 4	16.491 4	149.40	0.001**
x_{21}	1	17.290 5	17.290 5	156.64	0.001**
x_{22}	1	13.903 5	13.903 5	125.96	0.002**
x_{23}	1	9.943 1	9.943 1	90.08	0.002**
x_{24}	1	0.075 6	0.075 6	0.69	0.469
x_{25}	1	4.787 1	4.787 1	43.37	0.007**
x_{26}	1	0.138 0	0.138 0	1.25	0.345
误差	3	0.331 1	0.110 4		
合计	11	63.499 4			

为进一步逼近显著影响因素对密度的最优取值组合,以3号实验参数为低水平、以4号实验数为高水平再次进行爬陡坡实验,第2次爬最陡破实验方案、结果和误差如表18所示。由表18可知,当苜蓿叶片弹性模量x_{20}、苜蓿叶片元素数量x_{21}、苜蓿叶片弹性比x_{22}、苜蓿叶片关节阻尼比x_{23}和苜蓿叶片切向刚度比x_{25}分别为11.42 MPa、12、0.027、0.52和0.58时仿真叶片圆筒压缩密度为276 kg/m^3,与物理实验仿真误差为0.82%。

表17 叶片力学显著参数最陡爬坡实验方案与结果

Tab. 17 Experimental scheme and results of the steepest climb of significant parameters of blade mechanics

序号	因素					密度η/(kg·m^{-3})	误差/%
	x_{20}/MPa	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{25}		
1	7.12	20	0.001 0	1.00	0.10	446	62.85
2	8.73	17	0.010 8	0.82	0.28	320	16.90
3	10.34	14	0.020 6	0.64	0.46	282	3.00
4	11.95	11	0.030 4	0.46	0.64	260	−4.92
5	13.56	8	0.040 2	0.28	0.82	231	−15.54
6	15.17	4	0.050 0	0.10	1.00	197	−27.99

表18 叶片力学显著参数第2次爬最陡破实验方案与结果

Tab. 18 Experimental scheme, results and error of the second climb steepest break of significant parameters of mechanics

序号	因素					密度η/(kg·m^{-3})	误差/%
	x_{20}/MPa	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{25}		
1	10.34	14	0.020 6	0.64	0.46	282	3.00
2	10.88	13	0.023 8	0.58	0.52	281	2.79
3	11.42	12	0.027 0	0.52	0.58	276	0.82
4	11.95	11	0.030 4	0.46	0.64	260	−4.92

3.5 苜蓿叶片接触参数标定实验

为进一步确定上文物理实验测定的苜蓿叶片的接触参数于仿真模拟中的最优取值组合,展开苜蓿叶片的滑移角仿真实验。在直径为50 mm的圆筒内生成3 g柔性薄壳颗粒,颗粒生成后以速度0.2 m/s提升圆筒,柔性颗粒在底板上自然散落,以角速度0.175 rad/s使底板绕Z轴旋转4.4 s,对柔性薄壳颗粒完全滑出时刻底板与水平夹角γ进行测量,苜蓿叶片滑移仿真实验如图17所示。

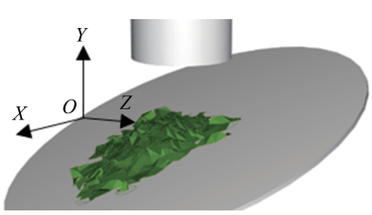


图17 苜蓿叶片滑移实验

Fig. 17 Alfalfa blade sliding experiment

3.5.1 叶片接触参数Plackett-Burman实验

为快速筛选出显著影响苜蓿叶片接触参数的因素,应用Minitab软件对其中7个不确定因素展开Plackett-Burman实验设计,根据文献[18]和前期物理实验确定7个实验因素取值范围,将影响因素最小、最大值分别设为-1、1编码,如表19所示。实验方案与结果如表20所示,X_{27}~X_{33}为因素编码值。显著性检验结果如表21所示。由表21可知,叶片与钢板滑动摩擦因数x_{31}对叶片滑移角度有显著影响,其余因素对叶片滑移角的影响不显著。

表 19　叶片接触参数 Plackett−Burman 实验因素水平

Tab. 19　Blade contact parameters Plackett−Burman experimental factors level

仿真参数	编码	
	−1	1
苜蓿叶片体积密度x_{27}/(kg·m^{-3})	370	420
苜蓿叶片–苜蓿叶片静摩擦因数x_{28}	0.43	0.63
苜蓿叶片–钢材静摩擦因数x_{29}	0.37	0.63
苜蓿叶片–苜蓿叶片滑动摩擦因数x_{30}	0.30	0.60
苜蓿叶片–钢材滑动摩擦因数x_{31}	0.30	0.60
苜蓿叶片–苜蓿叶片碰撞恢复系数x_{32}	0.10	0.50
苜蓿叶片–钢材碰撞恢复系数x_{33}	0.10	0.50

表 20　叶片接触参数 Plackett−Burman 实验设计

Tab. 20　Design of Plackett−Burman experiment on blade contact parameters

序号	因素							滑移角γ/(°)
	X_{27}	X_{28}	X_{29}	X_{30}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	
1	−1	1	1	−1	1	1	−1	36.778
2	−1	−1	−1	−1	1	1	1	36.981
3	1	−1	1	−1	−1	−1	1	25.089
4	−1	1	−1	1	−1	−1	−1	24.395
5	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	25.580
6	1	−1	1	1	−1	1	−1	20.846
7	1	1	−1	−1	−1	1	1	26.268
8	1	1	1	−1	1	−1	−1	39.809
9	1	1	−1	1	1	−1	1	37.789
10	−1	−1	1	1	1	−1	1	40.525
11	−1	1	1	1	−1	1	1	23.937
12	1	−1	−1	1	1	1	−1	27.610

表 21　叶片接触参数 Plackett−Burman 实验结果方差分析

Tab. 21　ANOVA of Plackett−Burman experiment results on blade contact parameters

来源	自由度	平方和	均方	F	P
x_{27}	1	9.693	9.693	1.75	0.257
x_{28}	1	12.700	12.700	2.29	0.205
x_{29}	1	5.826	5.826	1.05	0.363
x_{30}	1	19.771	19.771	3.57	0.132
x_{31}	1	448.682	448.682	80.96	0.001**
x_{32}	1	35.939	35.939	6.49	0.064
x_{33}	1	20.205	20.205	3.65	0.129
误差	4	22.167	5.542		
合计	11	574.982			

3. 5. 2　叶片接触参数单一因素回归方程建立

为准确得到物理叶片滑移角所对应的苜蓿叶片与钢板的滑动摩擦因数x_{31}的最佳取值，展开单因素回归实验，实验方案及结果如表 22 所示，方差分析结果如表 23 所示。

该拟合模型P=0.001，决定系数为 0.999 2，调整决定系数为 0.998 5，与 1 非常接近，说明此叶片滑移角回归模型显著，表明该模型拟合程度较好，无失拟现象发生。说明此模型能够准确地反映真实情况，可以用于叶片滑移角预测。得到苜蓿叶片与钢板滑移角的二阶回归方程为

表 22　叶片接触参数单因素实验方案与结果

Tab. 22　Single factor experiment scheme and results of blade contact parameters

序号	x_{31}	滑移角γ/(°)	误差/%
1	0.300	23.070	−35.50
2	0.375	27.423	−23.34
3	0.450	31.156	−12.90
4	0.525	34.656	−3.11
5	0.600	36.769	2.79

表 23　叶片接触参数单因素实验结果方差分析

Tab. 23　ANOVA of single factor experiments results of blade contact parameters

来源	自由度	平方和	均方	F	P
模型	2	121.517	60.758 6	1 310.12	0.001**
x_{31}	1	5.420	5.420 2	116.87	0.008**
x_{31}^2	1	1.587	1.586 6	34.21	0.028*
误差	2	0.093	0.046 4		
合计	4	121.610			

$$\gamma = -1.61 + 100.04x_{31} - 59.8x_{31}^2 \quad (17)$$

以物理实验叶片滑移角平均值 35.77°为目标，应用 Minitab 软件的响应优化模块，对回归模型(17)进行优化求解，得到x_{31}最优解为 0.56。计算得出叶片滑移角拟合值为 35.826°，与物理实验滑移角平均值相对误差为 0.15%。说明所建立的苜蓿叶片的滑移角预测回归模型较为准确。

4　结论

(1)系统对苜蓿草的物理特性、接触特性和力学特性进行测量，测得苜蓿草茎秆间、苜蓿叶片间、苜蓿茎秆与叶片、苜蓿叶片与钢板和苜蓿茎秆与钢板间静摩擦因数为 0.37~0.47、0.43~0.63、0.42~0.55、0.37~0.63 和 0.38~0.5；苜蓿茎秆间和苜蓿茎与钢板滚动摩擦因数为 0.18~0.28 和 0.19~0.39；苜蓿茎秆与苜蓿茎秆、苜蓿叶片、钢板碰撞恢复系数为 0.16~0.38、0.45~0.76 和 0.46~0.76。

(2)基于柔性纤维模型和柔性薄壳模型建立柔性茎秆和叶片的离散元模型，并开展物理休止角实验、三点弯曲实验、圆筒压缩实验和斜面滑移实验，与物理实验条件设置相同，对仿真实验中茎秆接触特性参数、茎秆力学特性参数、叶片力学特性参数和叶片接触特性参数进行标定。

(3)通过 Plackett-Burman 实验对茎秆与叶片的接触和力学特性参数进行筛选，对于显著性参数进行中心复合实验或最陡爬坡实验，以各项物理实验的平均值为目标进行寻优，得到影响苜蓿茎秆挠度的显著因素为苜蓿茎秆弯曲弹性比，其最优解为 4.929，得出挠度拟合值为 1.67 mm，与物理实验平均值相等；影响休止角的显著因素为苜蓿茎秆间静摩擦因数和苜蓿茎秆–钢板滚动摩擦

因数，其最优解组合为0.422和0.389，得出休止角拟合值为30.42°，与物理实验平均值相对误差为0.46%；影响叶片密度的显著因素有苜蓿叶片弹性模量、苜蓿叶片元素数量、苜蓿叶片弹性比、苜蓿叶片关节阻尼系数和苜蓿叶片切向刚度，其最优解组合为11.42 MPa、12、0.027、0.52和0.58，得出苜蓿叶片圆筒压缩密度为276 kg/m^3，与物理实验平均值相对误差为0.82%；影响苜蓿叶片滑移角的显著因素为苜蓿叶片与钢板滑动摩擦因数，其最优解为0.56，得出苜蓿草滑移角拟合值为35.826°，与物理实验平均值相对误差为0.15%。

参 考 文 献

[1] ZHAO H, HUANG Y, LIU Z, et al. Applications of discrete element method in the research of agricultural machinery: a review[J]. Agriculture, 2021, 11(5): 425.

[2] LIU Wanru, ZHANG Guozhong, ZHOU Yong, et al. Establishment of discrete element flexible model of the tiller taro plant and clamping and pulling experiment[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 257-271.

[3] DIELS E, ODENTHAL T, KERESZTES J, et al. Development of a visco-elastoplastic contact force model and its parameter determination for apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 120: 157 - 166.

[4] 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.

[5] 徐常塑. 割前脱粒凹体梳齿增流式割台梳运机理研究与试验[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2023.
XU Changsu. Research and experiment on the stripping mechanism of concave combs and increasing flow header for stripping prior to cutting[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2023.(in Chinese)

[6] GUO Y, WASSGREN C, CURTIS J S, et al. A bonded sphero-cylinder model for the discrete element simulation of elasto-plastic fibers [J]. Chemical Engineering Science, 2018, 175: 118 - 129.

[7] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, 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.

[8] 马慧斌. 颗粒形状对纤维颗粒材料力学性能的影响研究[D]. 杭州：浙江工业大学，2023.
Ma Huibin. An investigation on effects of fiber shape on mechanical properties of fiber assemblies[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology,2023.(in Chinese)

[9] LEBLICQ 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.

[10] CRASSOUS J. Discrete-element-method model for frictional fibers[J]. Physical Review E, 2023, 107(2): 025003.

[11] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47 - 65.

[12] LAI Z, CHEN Q, HUANG L. Machine-learning-enabled discrete element method: contact detection and resolution of irregular-shaped particles[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2022, 46(1): 113 - 140.

[13] 郭无极. 基于CFD-DEM的甘蔗收获机排杂作业仿真研究[D]. 南宁：广西大学，2019.
GUO Wuji. Simulation study of sugarcane havester impurity removal based on CFD-DEM[D]. Nanning:Guangxi Unversity,2019.(in Chinese)

[14] 虎小雅. 基于CFD-DEM的枸杞采收平台风选装置的研制[D]. 银川：宁夏大学，2024.
HU Xiaoya. Development of CFD-DEM-based wind sorting device for woolfberry picking platform[D]. Yinchuan:Ningxia Unveristy,2024.(in Chinese)

[15] ZHANG X, ZHU X. Simulation and experiment on the falling pattern of fresh tea leaves based on discrete elements[J]. HortScience, 2023, 58(9): 1057 - 1067.

[16] 穆桂脂，亓协腾，张万枝，等. 碎甘薯秧离散元仿真参数测量与标定[J]. 中国农机化学报，2021，42(11)：72 - 79.
MU Guizhi, QI Xieteng, ZHANG Wanzhi, et al. Parameter measurement and calibration in discrete element simulation of broken sweet potato seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2021,42(11):72-79.(in Chinese)

[17] 秦宽，步坤亭，沈周高，等. 连续复式茶叶理条机优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：382 - 393.
QIN Kuan, BU Kunting, SHEN Zhougao, et al. Optimization design and experiment of continuous compound tea leaf barber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(3): 382 - 393.(in Chinese)

[18] 金浩，蒋明洋，徐超，等. 基于离散元法的柔性片烟建模及仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报，2023，54(5)：563 - 571.
JIN Hao, JIANG Mingyang, XU Chao, et al. Modeling and simulation parameters calibration of flexible tobacco strips based on discrete element[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2023, 54(5): 563 - 571.(in Chinese)

[19] 林业生物质原料分析方法 含水率的测定：GB/T 36055—2018[S]. 2018.

[20] 陈涛，衣淑娟，李衣菲，等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报，2023，54(5)：91 - 100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding

stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91 - 100.(in Chinese)

[21] 赵春花, 韩正晟, 师尚礼, 等. 新育牧草茎秆收获期力学特性与显微结构[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 179 - 183.
ZHAO Chunhua, HAN Zhengsheng, SHI Shangli, et al. Mechanical properties and microstructure of new species forage stems in harvesting period[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 179 - 183. (in Chinese)

[22] LEBLICQ T, VANMAERCKE S, RAMON H, et al. Mechanical analysis of the bending behaviour of plant stems [J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 87 - 99.

[23] HAN J. Discrete element simulations of flexible ribbon-like particles[J]. Powder Technology, 2023,429:118950.

[24] LANGSTON P, KENNEDY A R, CONSTANTIN H. Discrete element modelling of flexible fibre packing [J]. Computational Materials Science, 2015, 96: 108 - 116.

[25] MATHIAS L. Packing simulation of thin flexible particles using a novel discrete element model[J]. Computational Particle Mechanics, 2022,9(3):407 - 420.

[26] 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.

[27] 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.

[28] NAZARI M, JAFARI A, MOHTASEBI S S, et al. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 199 - 208.

[29] POTAPOV V, HOPKINS A, CAMPBELL S. A two-dimensional dynamic simulation of solid fracture part 1:description of the model[J]. International Journal of Modern Physics C, 1995, 6(3): 371 - 398.

[30] NAN W, WANG Y, TANG H. A viscoelastic model for flexible fibers with material damping[J]. Powder Technology, 2015, 276: 175 - 182.

(上接第103页)

[19] 左志严, 格日乐, 常玉山, 等. 内蒙古中西部6种乡土植物枝条抗拉力学特性[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 55 - 60.
ZUO Zhiyan, Gerile, CHANG Yushan. 6 Kinds of native plants in central and western inner mongolia branch tensile mechanical properties[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 36(4): 55 - 60. (in Chinese)

[20] 韩明兴, 李淼, 段宏兵, 等. 植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2):109 - 118.
HAN Mingxing, LI Miao, DUAN Hongbing, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experiment of plant stem clamping device based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2): 109 - 118. (in Chinese)

[21] 张博文, 李爱潮, 郑志安, 等. 川麦冬往复切割式剪果装置设计与仿真试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 81 - 90.
ZHANG Bowen, LI Aichao, ZHENG Zhian, et al. Design and simulation experiments of reciprocating cutting tuber removal device for *Ophiopogon japonicus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 81 - 90. (in Chinese)

[22] 张方东, 吴志光, 董宇豪, 等. 基于曲柄滑块机构的多地形种植机翻转装置结构设计与仿真[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(6): 195 - 197.
ZHANG Fangdong, WU Zhiguang, DONG Yuhao, et al. Structure design and simulation of multi-terrain planter turnover device based on crank slider mechanism[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2023, 59(6): 195 - 197. (in Chinese)

[23] WANG S, MAO L, XUE T. Dynamic modeling and optimizing analysis of rigid-flexible coupling for bundling manipulator based on ADAMS[C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2019: 1442 - 1447.

[24] LI C, XING J, XU L, et al. Design and experiment of wine grape threshing mechanism with flexible combing striping monomer [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 290 - 296.

[25] WANG R, ZHENG Z, LU X, et al. Design, simulation and test of roller comb type Chrysanthemum (*Dendranthema morifolium* Ramat) picking machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106295.

[26] 刘溯源. 滚筒式野菊花采摘平台的设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
LIU Suyuan. Design and experimental study of drum type wild chrysanthemum picking device [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)

[27] 韩力春, 王黎明, 薛毓铨, 等. 新型刚柔耦合爬壁机器人虚拟样机建模与仿真分析[J]. 机械设计, 2024, 41(3): 42 - 51.
HAN Lichun, WANG Liming, XUE Yuquan, et al. Modeling and simulation analysis of new rigid "flexible coupling wall" climbing robot's virtual prototype[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(3): 42 - 51. (in Chinese)

[28] 吴小伟, 张璐, 唐莉莉, 等. 基于Box-Behnken模型大蒜机播成本影响因素分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 211 - 217.
WU Xiaowei, ZHANG Lu, TANG Lili, et al. Influencing factors analysis of garlie mechanized sowing cost based on Box-Behnken model [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(5): 211 - 217. (in Chinese)

[29] 王方艳, 张钦, 张振宇, 等. 梳齿式甜菜清缨切顶机研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 69 - 79.
WANG Fangyan, ZHANG Qin, ZHANG Zhenyu, et al. Development of comb type leaves clearing and top cutting machine for beets[J]. Transactions of the CASE, 2021, 37(4): 69 - 79. (in Chinese)