

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.012

水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验

鹿芳媛¹ 马旭¹ 谭穗妍² 陈林涛¹ 曾令超¹ 安沛¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642)

摘要: 水稻播种时芽种含水率高、种芽长度差异大,表现出与其他作物种子不同的物理特性。为减小仿真分析时芽种参数设置不准确而形成的模拟系统误差,本文基于水稻芽种摩擦角的试验与仿真测定,标定出不同含水率下的水稻芽种离散元主要接触参数。通过芽种的摩擦角(两种休止角及滑动摩擦角)离散元仿真试验,建立了芽种-不锈钢板静摩擦因数、芽种-芽种静摩擦因数、芽种-芽种滚动摩擦因数与3个摩擦角之间的三元回归方程。以芽种的3个摩擦角试验结果作为修正指标,对回归方程数值求解,得到当仿真结果与试验结果的拟合误差达到允许范围内的3个主要接触参数。将标定后的参数进行试验验证,分别对不同含水率下的芽种摩擦角的仿真测定与实测结果进行对比分析,相对误差均小于2.75%,表明水稻芽种离散元模型与实际颗粒物料体现出相同的摩擦特性,建立的回归模型满足不同含水率芽种参数的标定要求。对其他5个品种的水稻芽种摩擦角实测值与仿真结果进行对比分析,相对误差均在5.54%以内。该水稻芽种的离散元模型及接触参数可为水稻精密播种装置的动态仿真提供参考。

关键词: 芽种; 休止角; 离散元法; 接触参数; 标定

中图分类号: TP391.9; O347.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0093-07

Simulative Calibration and Experiment on Main Contact Parameters of Discrete Elements for Rice Bud Seeds

LU Fangyuan¹ MA Xu¹ TAN Suiyan² CHEN Lintao¹ ZENG Lingchao¹ AN Pei¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Electronics Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Rice bud seeds exhibit different physical properties from other crop seeds as high moisture content and large length difference of rice buds. Therefore, it is essential to calibrate the main discrete elements contact parameters of rice bud seeds with different moisture contents, and reduce the simulation system error that caused by inaccurate parameters of rice bud seeds. Three main contact parameters were calibrated, including coefficient of static friction between bud seeds and stainless plate (X_1), coefficient of static friction between bud seeds (X_2) and coefficient of rolling friction between bud seeds (X_3), through experimental determination combined with simulation test of rice bud seeds friction angle. Two dynamic repose angles α and β and slipping friction angle γ were formed with three devices, and measured with the software In-Sight Explorer based on image processing technology. Then through discrete element simulation test of bud seeds frictions with EDEM, the ternary regression equation between the three coefficients X_1 , X_2 and X_3 and the three friction angles was established. The experimental results of the three frictions were the correction index, and the regression equation was numerically solved to obtain the three main content parameters. The verification test of the calibration parameters showed that the relative error between simulation and experiment results of the bud seeds friction angles with different moisture contents was less than 2.75%. So the discrete element model of rice bud seeds and the actual particle material reflected the same friction characteristics, and the

收稿日期: 2017-06-27 修回日期: 2017-07-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700802)、国家自然科学基金项目(51675188)、广东省科技计划项目(2014B020207002)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-01-33)和广东省公益研究与能力建设项目(2014A020208112)

作者简介: 鹿芳媛(1990—),女,博士生,主要从事农业机械化与装备工程研究,E-mail: lufy0127@163.com

通信作者: 马旭(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业技术装备研究,E-mail: maxu1959@scau.edu.cn

regression model satisfied the calibration requirements for bud seeds parameters with different moisture contents. Furthermore, the relative error of the other variety rice bud seeds was less than 5.54%, which indicated that the calibrated discrete element model and contact parameters of the bud seeds can be applied to the dynamic simulation of the precision sowing device.

Key words: bud seeds; repose angle; discrete element method; contact parameters; calibration

0 引言

采用水稻精密播种装置播种时,水稻芽种在播种装置中的运动属于一种散体物料的运送过程^[1]。利用离散元法^[2-5](Discrete element method)探究水稻芽种在播种装置中的充填机理及分离特性问题时,特征参数设置的合理性直接影响到仿真结果的准确度。由于水稻特殊的生长特性,要求催芽处理后再进行育秧或水田播种,浸种催芽使得芽种的含水率增大,因此芽种的物理特性尤其是摩擦特性,会随自身含水率的变化而发生改变。现有的水稻离散元模型及参数多为水稻干种^[6-8],探究种子在精密播种装置中的运动规律时,仿真拟合值与实际值存在一定差异。因此,有必要对不同含水率的水稻芽种离散元接触参数进行标定。

水稻颗粒的本征参数包括形状尺寸、密度、泊松比和剪切模量,可通过查阅文献或试验测得;颗粒的接触参数包括碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数,较难直接测量,通常需要采用虚拟试验标定。目前,国内外已逐渐开展了关于离散元仿真参数标定的研究。UCGUL等^[9]、ASAF等^[10]通过休止角和贯入度试验分别标定了土壤干、湿颗粒离散元模型的摩擦因数和恢复系数;张学朋等^[11]、李守巨等^[12]分别采用试错法和响应面法标定了岩石的接触刚度系数和恢复系数;夏鹏等^[13]、张锐等^[14]通过堆积角试验分别测量并标定了煤粉和沙土的离散元参数。然而,相关研究主要集中于岩石、煤炭、土壤等散体物料,对于谷物的离散元参数标定方面的研究主要集中于玉米、小麦等干燥作物颗粒。COETZEE等^[15]利用剪切试验和压缩试验测量并校准了料仓流动模式下的玉米颗粒摩擦因数和刚度系数;刘凡一等^[16]基于堆积试验通过响应面法优化了小麦的离散元接触参数;王云霞等^[17]通过建立数学回归模型主动寻找目标参数的方法标定了玉米的静摩擦和滚动摩擦因数。综合国内外参数标定发展现状,鲜有关于水稻芽种不同含水率的离散元接触参数标定的相关文献报道。

针对水稻精密播种过程中芽种主要呈密相堆积或振动^[6,18-20]流动状态,在离散元仿真分析时,接触参数中的芽种-接触材料静摩擦因数、芽种-芽种静摩擦因数以及芽种-芽种滚动摩擦因数,对模拟结

果有重要影响,因此本研究将标定上述3个主要接触参数。由于物料颗粒间的静摩擦和滚动摩擦特性可通过物料堆积角体现出来^[21-22],上述学者多采用物料堆积的试验方法进行参数匹配。在谷物休止角的测量方法上,采用图像处理技术可有效减小直尺测量法产生的人为误差^[23-25]。因此,本研究针对水稻芽种的物理特性,采用图像处理技术测定芽种不同含水率下的休止角,通过休止角与滑动摩擦角的实测结果定量对比仿真结果,分别对不同含水率下芽种的3个主要接触参数进行标定。旨在减小仿真分析时由于种子接触参数设置不准确导致的模拟系统误差,并为其他含水率较高的湿颗粒物料的离散元模拟参数标定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验方法

通过水稻芽种的2种休止角及滑动摩擦角的实测试验与虚拟试验相结合,标定芽种-接触材料静摩擦因数、芽种-芽种静摩擦因数、芽种-芽种滚动摩擦因数这3个参数。采用两种方法测量水稻芽种休止角,图1a所示为使用内部坍塌法测定休止角 α ,图1b所示为使用侧壁坍塌法^[26]测定休止角 β 。采用重力平衡法测量芽种在不锈钢板(以水稻精密播种装置较常用材料不锈钢为例)上的滑动摩擦角 γ ^[24,27],即将单粒芽种放置在不锈钢平板上,通过步进电动机和抬升部件将平板一端匀速提起,使平板缓慢倾斜,待芽种开始滑动时,平板倾斜角度即为芽种在不锈钢板的滑动摩擦角 γ 。

以芽种的3个摩擦角实测值作为修正指标,标定当仿真值与实测值的拟合误差达到允许范围时,芽种的3个关键接触参数,从而使建立的芽种离散元模型与实际物料表现出相同的物理特性。设计不同待标定参数组合下的水稻芽种摩擦角仿真试验,通过回归分析建立3个摩擦角关于芽种-不锈钢板静摩擦因数、芽种-芽种静摩擦因数、芽种-芽种滚动摩擦因数的三元回归方程,然后求解关系方程得到芽种的仿真实接触参数。

1.2 仿真模型

1.2.1 水稻芽种颗粒模型

选用精密播种常用水稻品种培杂泰丰(超级杂

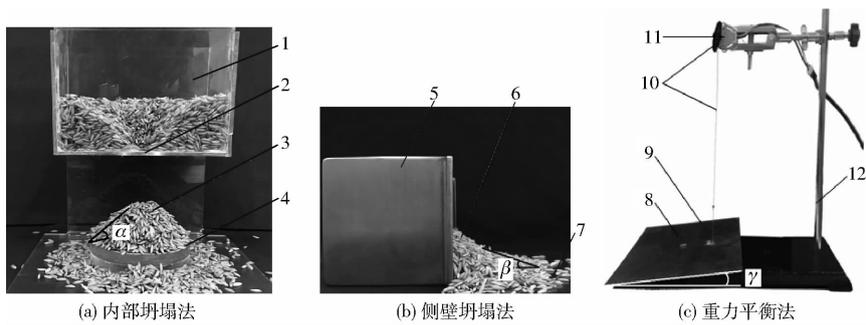


图 1 芽种摩擦角测量装置

Fig. 1 Test devices of bud seeds friction angles

1. 有机玻璃槽 2. 漏料孔 3. 水稻堆 4. 不锈钢圆台面 5. 不锈钢立方盒 6. 水稻堆 7. 不锈钢承接板 8. 水稻芽种 9. 不锈钢板 10. 抬升装置 11. 步进电动机 12. 支架

交稻), 催芽处理至 90% 以上的种子“破胸、露白”。种芽过长影响种子在播种装置中的流动性, 且易受排种部件伤芽, 因此根据水稻精密播种要求控制种芽长度小于 1 mm。随机选取水稻芽种 100 粒, 使用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量其长、宽、高 3 个方向上的尺寸, 统计后得到芽种的三轴尺寸符合正态分布^[28], 其平均尺寸为 8.89 mm × 2.06 mm × 2.75 mm, 标准偏差分别为 0.13、0.06、0.10 mm。

在离散元软件 EDEM 中创建颗粒模型时, 颗粒模型还原程度越高, 建模所需基础球形颗粒单元的数量越多, 则仿真所需时间越长、效率越低^[29], 因此建模时在保证模型误差较小的前提下尽量减少充填球的数量。基于芽种的形状及尺寸可将其模型简化近似为扁椭球体^[8, 25], 通过球体单元堆叠形成芽种外形, 并构建出种芽, 球体单元数量为 23, 模型三轴尺寸为 9.00 mm × 2.00 mm × 2.70 mm。图 2 所示为水稻芽种实物图及模型图, 可以看出该芽种模型与水稻芽种的外形相似程度高。



图 2 水稻芽种模型

Fig. 2 Model of rice bud seed

1.2.2 几何体模型及参数设置

水稻芽种颗粒及几何体的离散元模拟参数设置

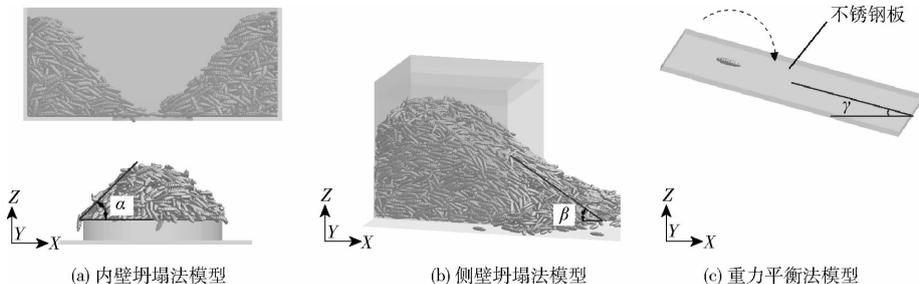


图 3 水稻芽种摩擦角仿真试验

Fig. 3 Simulation tests of rice bud seeds friction angles

见表 1。在 EDEM 颗粒工厂中设置芽种模型的球体单元半径尺寸按正态分布生成, 其中半径平均值为 1 mm, 标准差为 0.06 mm。

表 1 水稻及几何体模拟参数

Tab. 1 Simulation parameters of rice and geometry

参数	水稻芽种	不锈钢板
密度/(kg·m ⁻³)	1 045 ~ 1 098 *	7 850
泊松比	0.25	0.30
剪切模量/Pa	1.08 × 10 ⁸	7.90 × 10 ¹⁰
恢复系数 (与水稻芽种)	0.42	0.52
静摩擦因数 (与水稻芽种)	0.42 ~ 0.56 **	0.48 ~ 0.52 **
滚动摩擦因数 (与水稻芽种)	0.01 ~ 0.09 **	0.01

注: * 芽种不同含水率时的密度范围; ** 试验变量。

1.2.3 仿真试验方案

根据水稻芽种两种休止角 α 、 β 和滑动摩擦角 γ 的测量试验方法要求, 以 1:1 的比例建立 3 个几何模型(图 3), 分别为由扁平漏料盒及承接圆台组成的内部坍塌装置, 由单侧可抽拉立方盒及承接板组成的侧壁坍塌装置, 以及旋转不锈钢板。

设计芽种-不锈钢板静摩擦因数 X_1 、芽种-芽种静摩擦因数 X_2 和芽种-芽种滚动摩擦因数 X_3 的仿真试验因素编码表, 根据文献[6-8, 24-25]及前期仿真经验确定各因素编码, 如表 2 所示。仿真接触

模型选用 Hertz - Mindlin (no slip), rayleigh 时间步长设为 20%, 计算时间步长为 0.01 s。休止角 α 、 β 的仿真测定分为颗粒填充和坍塌堆积 2 个过程, 颗粒填充过程中设置内部坍塌法和侧壁坍塌法的芽种颗粒总数量分别为 6000 和 8000。滑动摩擦角 γ 测定时设置种盘绕 Y 轴匀速转动, 转速为 0.3 r/min, 观察种子在种盘上开始滑动的时刻, 该时间步长种盘倾斜的角度即为滑动摩擦角 γ 。

表 2 仿真试验因素编码

Tab. 2 Factors and levels of simulation test

编码	因素		
	芽种-不锈钢板 静摩擦因数 X_1	芽种-芽种静 摩擦因数 X_2	芽种-芽种滚动 摩擦因数 X_3
-1	0.48	0.42	0.01
0	0.50	0.49	0.05
1	0.52	0.56	0.09

2 结果与分析

2.1 摩擦角的试验测定

将催芽后的水稻芽种进行晾晒(室温约 28℃)以降低含水率, 晾晒时从芽种湿度开始满足播种条件起每隔 40 min 测定一组芽种摩擦角, 并采用高温干燥法测定此时芽种含水率, 共进行 5 组试验。为减小休止角测量的人为误差, 通过图像处理技术提取并测量休止角试验结果。

使用数码相机 (IXUS 1000HS, Canon) 采集两种试验条件下的休止角图像, 图像分辨率为 640 像素 \times 480 像素, 如图 4 所示, 左图为内部坍塌法结果, 右图为侧壁坍塌法结果。采用软件 In - Sight Explorer 4.9.3 对测量结果进行图像处理, 依次对图像进行灰度化、二值化处理, 然后通过边缘检测提取休止角边缘曲线, 对曲线边缘点进行线性拟合, 拟合的直线与水平面的夹角 α 、 β 如图 4e 所示。通过 In - Sight Explorer 的几何测量功能, 可直接测量出该角度。

在相同条件下每组试验分别对 2 种休止角重复测量试验 5 次, 并求取平均值 α_s 、 β_s 。使用精度为 0.1° 的数显倾角仪, 平行放置在滑动摩擦角测量装置的不锈钢板上读取示数, 分次取 10 粒水稻芽种, 进行重复测量求取平均值 γ_s , 得到芽种在不锈钢上的滑动摩擦角。实测结果见表 3, 可以看出随着水稻芽种含水率的降低, 芽种的两种休止角及滑动摩擦角均随之减小, 表明含水率的变化对摩擦特性影响较大。因此, 针对不同含水率的水稻芽种需分别标定它们的主要接触参数。

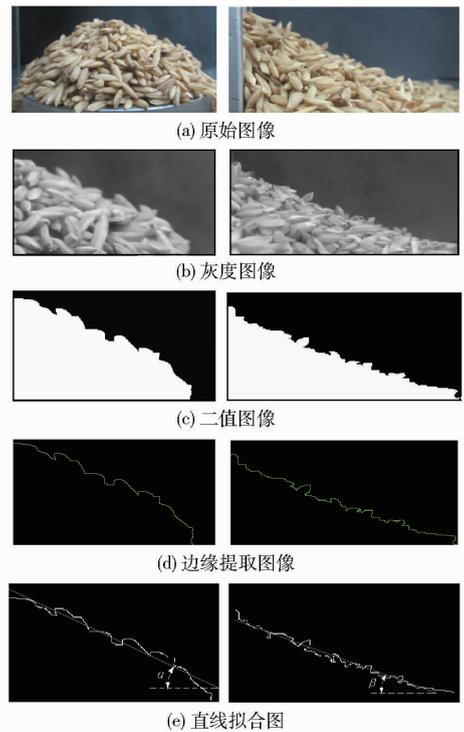


图 4 芽种休止角图像处理结果

Fig. 4 Image analysis results of bud seeds repose angles

表 3 不同含水率芽种的摩擦角测定结果

Tab. 3 Testing results of bud seeds frictional angle with different moisture contents (°)

摩擦角	芽种含水率/%				
	28.25	27.30	26.75	25.79	24.05
α_s	40.68	32.40	31.82	31.05	30.23
β_s	28.32	24.35	23.60	21.93	20.10
γ_s	28.40	26.50	25.10	22.30	19.80

2.2 摩擦角的仿真测定与分析

根据试验要求共设计 15 组仿真试验, 仿真完成后对每一组结果进行处理统计。休止角的测量方法为: 通过 EDEM 后处理模块的 Clipping 功能对芽种仿真结果进行切片, 然后在 Tools 中采用分度器测量切片的角度。图 5 所示为 2 种测量方法所形成的休止角。图 5a 为通过芽种堆最高点对 XOZ 平面切片, 切片厚度为 5 mm, 测量休止角切片左右两侧角度 α_n 。为了尽量减小误差, 同理对 YOZ 平面进行切片并测量取其平均值 α 。图 5b 所示为侧壁坍塌法休止角的 XOZ 平面切片, 测量平行的 4 个位置, 取平均值得到休止角 β ; 滑动摩擦角仿真结果通过分度器功能直接测量读取, 如图 5c 所示, 每组做 4 次

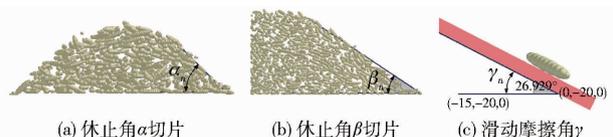


图 5 芽种摩擦角仿真测量方法

Fig. 5 Simulation method of bud seeds friction angles

重复求取平均值 γ 。仿真试验的结果见表 4 (x_1, x_2, x_3 为因素编码值)。

表 4 芽种摩擦角仿真测定试验安排与结果

Tab. 4 Test arrangement and result of bud seeds

frictional angle simulation

序号	x_1	x_2	x_3	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$
1	-1	-1	0	41.35	29.37	28.87
2	1	-1	0	44.86	31.25	28.07
3	-1	1	0	48.31	34.46	29.05
4	1	1	0	49.86	30.63	26.81
5	-1	0	-1	46.04	25.29	30.87
6	1	0	-1	49.42	20.92	27.04
7	-1	0	1	47.76	30.39	26.87
8	1	0	1	50.96	33.43	29.11
9	0	-1	-1	40.79	26.58	28.71
10	0	1	-1	48.90	25.30	28.02
11	0	-1	1	49.35	33.60	28.65
12	0	1	1	52.08	32.74	28.53
13	0	0	0	48.68	31.39	27.96
14	0	0	0	48.29	30.86	28.07
15	0	0	0	48.94	31.04	28.36

基于逐步回归分析法预判对仿真结果 α, β, γ 影响显著的因素及交互项。由仿真试验数据的回归分析结果(表 5)可知,确定了对休止角 α 影响极显著的因素项为 $x_1, x_2, x_3, x_2x_3, x_1^2x_2^2$, 对休止角 β 影响极显著的因素项为 x_3, x_3^2, x_1x_3 , 对滑动摩擦角 γ 影响极显著的因素项为 x_1, x_1x_3 。决定系数 R^2 (取值范围 0~1) 越大,表明自变量对因变量的解释程度

表 5 芽种摩擦角仿真测定试验数据回归分析

Tab. 5 Test data regression analysis of bud seeds

frictional angle simulation

	因素项	回归系数	标准误差	t	P
休止角 α	常量	48.292	0.352	137.129	<0.001**
	x_1	1.455	0.413	3.523	0.006**
	x_2	2.850	0.413	6.902	<0.001**
	x_3	1.875	0.413	4.541	0.001**
	x_2x_3	-1.345	0.584	-2.303	0.047**
	$x_1^2x_2^2$	-2.197	0.682	-3.221	0.010**
		$R^2 = 0.915$	$R_{adj}^2 = 0.867$		
休止角 β	常量	31.286	0.578	54.168	<0.001**
	x_3	4.009	0.540	7.420	<0.001**
	x_3^2	-2.754	0.791	-3.483	0.005**
	x_1x_3	1.853	0.764	2.425	0.034**
		$R^2 = 0.869$	$R_{adj}^2 = 0.833$		
滑动摩擦角 γ	常量	28.333	0.123	229.596	<0.001**
	x_1	-0.579	0.169	-3.425	0.005**
	x_1x_3	1.518	0.239	6.350	<0.001**
		$R^2 = 0.813$	$R_{adj}^2 = 0.781$		

注: **差异极显著 ($P < 0.01$)。

越高,休止角 α, β 的决定系数 R^2 和调整后的 R_{adj}^2 均接近 0.9,表明拟合方程的可靠度高,滑动摩擦角 γ 的决定系数 R^2 和调整后的 R_{adj}^2 均接近 0.8,表明拟合方程的可靠度较高。

在保证因素项极显著、模型拟合可靠度较高的条件下,根据各因素回归系数分别得到休止角 α 、休止角 β 及滑动摩擦角 γ 的最优回归方程

$$\alpha = 48.292 + 1.455x_1 + 2.850x_2 + 1.875x_3 - 1.345x_2x_3 - 2.197x_1^2x_2^2 \quad (1)$$

$$\beta = 31.286 + 4.009x_3 - 2.754x_3^2 + 1.853x_1x_3 \quad (2)$$

$$\gamma = 28.333 - 0.579x_1 + 1.518x_1x_3 \quad (3)$$

将表 3 中每组含水率下的芽种摩擦角实际试验测定结果作为已知量,通过 Matlab 对上述回归方程组分别进行求解,标定出不同含水率下的芽种-不锈钢板静摩擦因数、芽种-芽种静摩擦因数以及芽种-芽种滚动摩擦因数如表 6 所示。结果表明,芽种含水率不同则其 3 个离散元接触参数也有较大差别,因此在设置水稻芽种接触参数时需依据含水率进行相应的参数设定。

表 6 不同含水率芽种的参数标定结果

Tab. 6 Parameter calibration result of bud seeds with different moisture contents

参数	芽种含水率/%				
	28.25	27.30	26.75	25.79	24.05
X_1	0.499	0.520	0.464	0.429	0.398
X_2	0.363	0.354	0.447	0.434	0.397
X_3	0.028	0.016	0.018	0.020	0.021

3 验证试验

通过上述试验方法标定了不同含水率下水稻芽种的关键离散元接触参数。为了验证已标定参数的准确性,对标定参数进行芽种摩擦角仿真验证分析。分别以标定后的每组参数进行芽种摩擦角仿真试验,将摩擦角仿真测定结果与同一含水率下的芽种摩擦角实测结果(表 3)进行对比,结果见表 7。可以看出仿真模型与不同含水率芽种摩擦角之间的相

表 7 标定参数验证结果

Tab. 7 Confirmation result of calibration parameters

参数	芽种含水率/%				
	28.25	27.30	26.75	25.79	24.05
$\alpha_i/(\circ)$	40.12	31.56	31.20	31.68	31.01
相对误差/%	1.38	2.59	1.95	2.03	2.52
$\beta_i/(\circ)$	27.60	24.77	23.03	21.38	20.50
相对误差/%	2.54	1.72	2.42	2.57	1.99
$\gamma_i/(\circ)$	29.00	27.23	25.77	21.83	20.32
相对误差/%	2.11	2.75	2.67	1.97	2.63

对误差均不超过 2.75%，表明通过仿真试验建立的回归模型适用于不同含水率的芽种参数标定，且通过该回归模型标定的接触参数可靠性高，满足校准要求。

本研究以超级杂交稻培杂泰丰为研究对象对水稻芽种进行了颗粒模型创建及接触参数标定。为验证标定结果是否适用于其他水稻品种，选取其他 5 个水稻品种：国稻 1 号（超级杂交稻）、恒丰优 1179、软华优 1179（杂交稻）、华航 38 号、华航 31 号（常规稻），分别测量试验条件下芽种含水率较高（27.00% ± 0.50%）及含水率较低（25.00% ± 0.50%）时，芽种的休止角 α_s 、 β_s 和滑动摩擦角 γ_s 。实测结果与表 7 仿真验证结果进行对比：当芽种含水率较低时，5 个品种的水稻芽种摩擦角实测值与标定后的仿真结果之间的相对误差均小于 2.79%；当含水率较高时，华航 38 号、华航 31 号的水稻芽种摩擦角实测结果与标定后的仿真结果之间的相对误差小于 3.08%，其余 3 个品种相对误差最大为 5.54%。结果表明，当水稻芽种含水率较低时其离散元接触参数可直接参考表 6 进行设置，当含水率较高时，对于相对误差较大的国稻 1 号、恒丰优 1179、软华优 1179，可通过最优回归方程式(1)~(3)求解芽种的接触参数，结果见表 8。综上，在误差允许的范围内，该芽种颗粒模型及标定的参数可应用于其他水稻品种，可为水稻芽种的离散元参数设置提供参考。

4 结论

(1) 建立了水稻芽种离散元颗粒模型，以及主

表 8 不同品种水稻芽种接触参数

Tab. 8 Contact parameters of variety rice bud seeds

参数	国稻 1 号	恒丰	软华	国稻 1 号、	华航 38 号、	
		优 1179	优 1179	恒丰优 1179、 软华优 1179	华航 31 号	
含水率/%	26.95	27.43	27.06	24.16	27.38	24.08
X_1	0.471	0.478	0.507	0.398	0.520	0.398
X_2	0.385	0.362	0.389	0.397	0.354	0.397
X_3	0.022	0.015	0.010	0.021	0.016	0.021

要接触参数与芽种摩擦角之间的回归模型，通过仿真与实测试验相结合，分别标定了水稻芽种在不同含水率下的芽种-不锈钢板静摩擦因数、芽种-芽种静摩擦因数、芽种-芽种滚动摩擦因数 3 个关键参数。

(2) 系统地进行了不同含水率的水稻芽种休止角和滑动摩擦角的验证试验研究，仿真与试验结果对比最大误差小于 2.75%，精度较高，表明建立的回归模型满足不同含水率芽种参数的标定要求。

(3) 进行了不同品种的水稻芽种摩擦角的验证试验对比。当芽种摩擦角与本文建立的模型仿真值之间相对误差小于 3.08% 时，可直接参考不同含水率芽种的参数标定值；当相对误差大于 3.08% 时，可通过最优回归方程进行参数求解来减小误差。结果表明，本研究建立的水稻芽种离散元颗粒模型及接触参数模型适用于其他水稻品种，可为水稻芽种精密播种装置的动态仿真提供理论依据。

参 考 文 献

- 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1-6. YU Jianqun, FU Hong, LI Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 1-6. (in Chinese)
- ZHU H P, ZHOU Z Y, YANG R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: a review of major applications and findings [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(23): 5728-5770.
- TIJSKENS E, RAMON H, BAERDEMAEKER J D. Discrete element modelling for process simulation in agriculture [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 493-514.
- YU A B. Discrete element method: An effective method for particle scale research of particulate matter [J]. Engineering Computations, 2004, 21(2-4): 205-214.
- CUNDALL A B, STRACK O D L. A discrete numerical mode for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83, 100. CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis on rice seeds motion on vibrating plate using EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83, 100. (in Chinese)
- 鹿芳媛,马旭,齐龙,等. 基于离散元法的杂交稻振动匀种装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 17-25. LU Fangyuan, MA Xu, QI Long, et al. Parameter optimization and experiment of vibration seed-uniforming device for hybrid rice based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 17-25. (in Chinese)
- ZHAO Zhan, WU Yafang, YIN Jianjun, et al. Monitoring method of rice seeds mass in vibrating tray for vacuum-panel precision seeder [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 114(3): 25-31.
- UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modeling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil [J]. Biosystems Engineering, 2014, 121(2): 105-117.
- ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1-2): 227-242.

- 11 张学朋,王刚,蒋宇静,等.基于颗粒离散元模型的花岗岩压缩试验模拟研究[J].岩土力学,2014,35(增刊1):99-105.
ZHANG Xuepeng, WANG Gang, JIANG Yujing, et al. Simulation research on granite compression test based on particle discrete element model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Supp.1): 99-105. (in Chinese)
- 12 李守巨,李德,于申.基于宏观实验数据的堆石料细观本构模型参数反演[J].山东科技大学学报:自然科学版,2015,34(5):20-26.
LI Shouju, LI De, YU Shen. Meso-parameter inversion of constitutive model for rockfill materials based on macro experimental data [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2015, 34(5): 20-26. (in Chinese)
- 13 夏鹏,李郁,杨公波.散粒物料堆积角离散元仿真研究[J].起重运输机械,2015(2):107-110.
XIA Peng, LI Yu, YANG Gongbo. Study on the discrete element simulation of scattered materials [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2015(2): 107-110. (in Chinese)
- 14 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等.离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J].农业机械学报,2017,48(3):49-56. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170306&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49-56. (in Chinese)
- 15 COETZEE C J, ELS D N J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 198-212.
- 16 刘凡一,张舰,李博,等.基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J].农业工程学报,2016,32(12):247-253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247-253. (in Chinese)
- 17 王云霞,梁志杰,张东兴,等.基于离散元的玉米种子颗粒模型间接触参数标定[J].农业工程学报,2016,32(22):36-42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36-42. (in Chinese)
- 18 李志伟,邵耀坚.电磁振动式水稻穴盘精量播种机设计与试验[J].农业机械学报,2005,31(5):32-34.
LI Zhiwei, SHAO Yaojian. Study and test of electromagnetic vibrating type rice seeder for hill seedling nursery box [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 31(5): 32-34. (in Chinese)
- 19 王淑铭,魏天路,周海波.气动振动式精密排种器工作参数的分析与仿真[J].农业工程学报,2010,26(13):56-60.
WANG Shuming, WEI Tianlu, ZHOU Haibo. Theoretical research and simulation analysis on operation parameters of pneumatic vibration precision seed-metering [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(13): 56-60. (in Chinese)
- 20 齐龙,谭祖庭,马旭,等.气动振动式振动匀种装置工作参数的优化及试验[J].吉林大学学报:工学版,2014,44(6):1684-1691.
QI Long, TAN Zutong, MA Xu, et al. Optimization and test of operational parameters of pneumatic vibration uniform-seeds device [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(6): 1684-1691. (in Chinese)
- 21 张民,姚珺,李明.种子休止角与静滑动摩擦系数测量仪[J].农业装备与车辆工程,2012,50(11):42-45.
ZHANG Min, YAO Jun, LI Ming. An angle of repose and static coefficient of friction measurement device for seeds [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2012, 50(11): 42-45. (in Chinese)
- 22 赵永志,江茂强,徐平,等.颗粒堆内微观力学结构的离散元模拟研究[J].物理学报,2009,58(3):1819-1825.
ZHAO Yongzhi, JIANG Maoqiang, XU Ping, et al. Discrete element simulation of the microscopic mechanical structure in sandpile [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(3): 1819-1825. (in Chinese)
- 23 田晓红,李光涛,张淑丽.谷物自然休止角测量方法的探究[J].粮食加工,2010,35(1):68-71.
TIAN Xiaohong, LI Guangtao, ZHANG Shuli. Determination of angle of repose [J]. Grain Processing, 2010, 35(1): 68-71. (in Chinese)
- 24 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等.颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J].物理学报,2014,63(17):173-179.
HAN Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 173-179. (in Chinese)
- 25 贾富国,韩燕龙,刘扬,等.稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J].农业工程学报,2014,30(11):254-260.
JIA Fuguo, HAN Yanlong, LIU Yang, et al. Simulation prediction method of repose angle for rice particle materials [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 254-260. (in Chinese)
- 26 田晓红,谭斌,刘明,等.漏斗法粮食休止角测量结果的影响因素研究[J].中国粮油学报,2011,26(10):108-113.
TIAN Xiaohong, TAN Bin, LIU Ming, et al. Study on influence factors of grain angle of repose by funnel method [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(10): 108-113. (in Chinese)
- 27 许琼萍,王德荣,陆渝生.测定某种花岗岩静摩擦系数的试验[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2008,9(3):269-273.
XU Qiongping, WANG Derong, LU Yusheng. Experimental study on static friction coefficient of granite survey [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 9(3): 269-273. (in Chinese)
- 28 袁月明,吴明,马旭,等.水稻芽种物料特性的研究[J].吉林农业大学学报,2003,25(6):682-684.
YUAN Yueming, WU Ming, MA Xu, et al. A study on material characteristics of rice budded seeds [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(6): 682-684. (in Chinese)
- 29 JIN F, XIN H, ZHANG C, et al. Probability-based contact algorithm for non-spherical particles in DEM [J]. Powder Technology, 2011, 212(1): 134-144.