doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.010

双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验

侯加林[1,2]　黄圣海[1]　牛子孺[1]　吴彦强[1]　李天华[1,2]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对当前大蒜机械化播种鳞芽正头率较低的问题,测定了苍山大蒜的物理属性参数及几何参数,采用离散元技术,建立双鸭嘴式大蒜正头机构播种动力学模型;仿真研究了蒜种在 3 种正头机构中的运动规律,分析了不同接种鸭嘴曲线形状、蒜种重心、插播转速及蒜种二次弹跳对正头率的影响规律,明确了蒜种正头机理。试制了室内播种试验台及大田样机,开展了播种试验,采用可视化方法提取了试验过程中蒜种运动动态图像,结果与仿真过程基本一致,试验正头率与仿真正头率的误差在 5% 以内,表明采用离散元法对播种过程中蒜种的运动规律进行分析是可行的;田间试验蒜种正头率最高可达 95.67%,提高了 4.67 个百分点。

关键词: 大蒜播种机; 正头装置; 双鸭嘴式; 机理分析; 离散元

中图分类号: S223.2+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0087-10

Mechanism Analysis and Test of Adjusting Garlics Upwards Using Two Duckbill Devices

HOU Jialin[1,2]　HUANG Shenghai[1]　NIU Ziru[1]　WU Yanqiang[1]　LI Tianhua[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment*, *Taian* 271018, *China*)

Abstract: Due to the problem of low rate of garlic bulbil with upward direction after mechanical sowing in China recently, the physical and geometric parameters of Cangshan garlic were measured, and the discrete element method was used. The dynamics model of mechanism with double duck bill shape adjusting the direction of the garlic bulbil was established. The movement law of garlic in three kinds of garlic adjusting mechanism and different factors' influences on the rate of garlic bulbil with upward direction were studied, such as the different curves of duck bill, gravity of garlics, speed of seeding and the secondary bouncing of garlics. Besides, the principle of adjusting the garlics to upward direction was also studied. The indoor planting test-bed and the field prototype were manufactured. The seeding experiment was carried out, and the dynamic images of garlics' movement at one point were recorded by visual method. It was found that the result was consistent with the simulation process, and the deviation between the rate of garlic bulbil with upward direction of the experiment and that of the simulation was less than 5%. The results showed that it was effective to use the discrete element method to analyze the movement of garlics during sowing. The rate of garlic bulbil with upward direction of the test in field can be up to 95.67%, which was increased by 4.67 percentage points.

Key words: garlic planter; devices of adjusting garlics; double duckbill; mechanism analysis; discreet element method

0　引言

我国是世界上大蒜种植面积最大的国家,据统计 2017 年大蒜种植面积达 37.9 ~ 40.5 万 hm^2[1]。目前我国大蒜生产仍以人工为主,劳动强度大、效率低、成本高,现有的大蒜生产机械存在无法满足农艺

收稿日期: 2018-05-24　修回日期: 2018-07-26

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系项目(CARS-24-D-01)、山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF001)和山东省蔬菜产业技术体系项目(SDAIT-02-021-09)

作者简介: 侯加林(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jlhou@sdau.edu.cn

通信作者: 李天华(1976—),男,副教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 13518683945@163.com

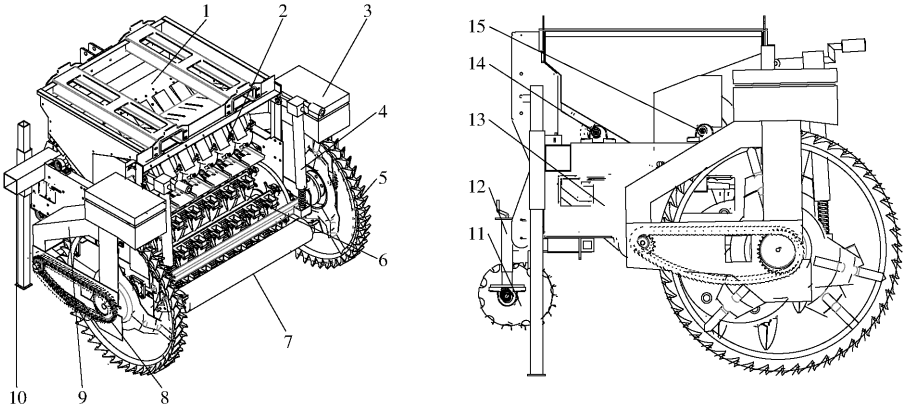
要求、作业效果不佳等缺点,播种后鳞芽正头率低,已经成为制约大蒜机械化直立播种的关键因素[2-10]。

离散元技术可有效分析颗粒状物质的动力学行为,在多个领域已广泛运用[11]。在播种机械中采用离散元技术,对玉米排种以及玉米颗粒参数标定进行模拟仿真,分析其影响因素,所获得的仿真结果与试验数据基本一致[12-14]。在施肥机械中利用离散元技术对施肥装置关键部件进行关键影响因素分析以及参数优化,仿真与验证试验结果相吻合[15-16]。在物料输送机械中采用离散元技术对输送机械性能的影响因素进行分析,以及对输送机械参数设计进行优化[17-18]。另外在物料筛分、食品加工机械中,对多组分混合物的筛选以及粘结模型的破碎过程进行仿真,分析工作过程中物料的运动规律,及影响其运动规律的主要因素[19-21]。

目前国内外学者对蒜种鳞芽正头的研究以结构创新居多,对影响鳞芽正头率的主要因素研究较少[22]。本文以苍山大蒜为研究对象,采用离散元技术分析大蒜在双鸭嘴大蒜正头装置内的调头过程,着重研究蒜种运动轨迹及在运动中特定点蒜种姿态的变化,得到影响鳞芽正头率的主要因素,通过室内试验及大田试验验证上述分析的正确性,为大蒜播种机械正头部件的设计优化,提供一种新的研究手段。

1 双鸭嘴式大蒜播种机基本结构

双鸭嘴式大蒜播种机结构如图 1 所示,由机架、种箱、排种装置、插播装置、圆盘耙、传动系统、压平辊及地轮组成。采用悬挂式结构与拖拉机配套,播种时一次性完成整地、排种、插播、覆土镇压等多道工序。



(a) 整体图 (b) 正视图

图 1 双鸭嘴式大蒜播种机结构图

Fig. 1 Structure diagrams of garlic planter with two duckbill devices

1. 种箱 2. 排种装置 3. 工具箱 4. 耕深调节器 5. 地轮 6. 插播装置 7. 压平辊 8. 传动系统 9. 车轮护罩 10. 机架 11. 圆盘耙 12. 耙深调节器 13. 左支撑板 14. 种箱转轴轴承座 15. 排种器转轴轴承座

播种作业时大蒜播种机在拖拉机的带动下前进,圆盘耙在播种机的最前方将地面整平,并将杂草切割,防止杂草缠绕插播鸭嘴。地轮与地面摩擦输出动力至主轴,再经调速机构将动力分别传递至调向齿轮与插播装置,调向齿轮改变转向后将动力传递至种箱与排种器,如图 2(图中 i 表示传动比)所示。排种器上的取种指夹转动至种箱时打开并夹住一粒大蒜,实现单粒取种;随着排种盘的旋转,单粒蒜种转到接种鸭嘴上方时取种指夹打开,大蒜落入双鸭嘴调头装置中的接种鸭嘴;随后双鸭嘴调头装置中的插播鸭嘴将接种鸭嘴打开,大蒜在重力的作用下落入插播鸭嘴,并在此过程中实现正头,即实现鳞芽向上的种植农艺要求,插播鸭嘴随插播装置转动并将大蒜插进土壤;播种后的地面由压平辊压实,整个种植过程完成。

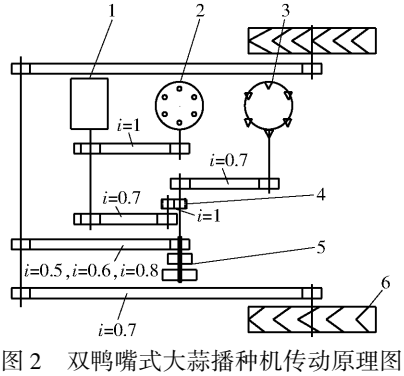


图 2 双鸭嘴式大蒜播种机传动原理图

Fig. 2 Transmission schematic of garlic planter with two duckbill devices

1. 种箱 2. 排种器 3. 插播装置 4. 调向齿轮 5. 调速机构 6. 地轮

2　双鸭嘴式正头装置结构与工作原理

2.1　调头装置结构

双鸭嘴式调头装置是播种机的关键部件，该装置能够将大蒜在植入土壤之前将其调至鳞芽向上，从而满足大蒜种植时农艺要求。该调头装置主要由接种鸭嘴与插播鸭嘴组合构成，其结构如图 3 所示。其中接种鸭嘴包括长接种鸭嘴与短接种鸭嘴，二者各自通过连接轴安装在接种鸭嘴支架的轴孔上，并用复位弹簧将二者闭合。插播鸭嘴包括插播鸭嘴支架、前插播鸭嘴、后插播鸭嘴；前插播鸭嘴与后插播鸭嘴分别与插播支架铰接，并用复位弹簧将二者闭合。

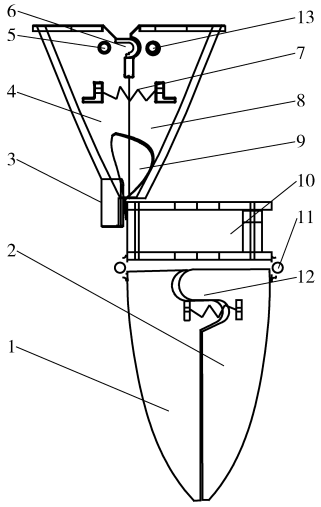


图 3　调头装置结构图

Fig. 3　Structure diagram of adjusting mechanism

1. 前插播鸭嘴　2. 后插播鸭嘴　3. 驱动挡块　4. 长接种鸭嘴　5、13. 连接轴　6. 接种鸭嘴驱动臂　7. 复位弹簧　8. 短接种鸭嘴　9. 大蒜　10. 插播鸭嘴支架　11. 轴销　12. 插播鸭嘴驱动臂

播种作业时，插播鸭嘴组合随转盘做圆周运动，插播鸭嘴支架与长接种鸭嘴的驱动挡块碰撞并推动长接种鸭嘴运动，此时在接种鸭嘴驱动臂的作用下，短接种鸭嘴以轴销为中心反方向运动，鸭嘴打开；此时，接种鸭嘴内的大蒜，若其鳞芽朝下，如图 3 所示，鳞芽就被挡块与插播鸭嘴支架夹住，由于大蒜重心在上部，大蒜会以鳞芽为中心旋转 180°左右，接着落入插播鸭嘴组合内，完成正头；相反，若大蒜鳞芽向上，由于重心在下，大蒜会落入插播鸭嘴后，鳞芽依旧朝上。

2.2　调头装置工作原理

下面对双鸭嘴式调头装置调头过程中关键时刻进行力学分析。对于大蒜落入接种鸭嘴后鳞芽向下时，大蒜在调头装置中的调头过程分为 3 种状态，如图 4 所示。

状态 1 为蒜种在接种鸭嘴中静止，如图 4a 所示，此时蒜种受力平衡，即

$$F_{N1}\cos\frac{\theta}{2}+F_{N2}\cos\frac{\theta}{2}=G \tag{1}$$

$$F_{N1}\sin\frac{\theta}{2}=F_{N2}\sin\frac{\theta}{2} \tag{2}$$

式中　F_{N1}——短接种鸭嘴对大蒜支持力，N

F_{N2}——长接种鸭嘴对大蒜支持力，N

θ——支持力 F_{N1} 与 F_{N2} 之间的夹角，(°)

G——大蒜重力，N

状态 2 时，蒜种处于缓慢旋转状态，接种鸭嘴在插播鸭嘴推动力的作用下打开，如图 4b 所示，蒜种鳞芽尖部受长接种鸭嘴的驱动挡块与插播鸭嘴的推力 F 夹持，由于鳞芽尖部具有一定的韧性，可认为蒜种绕鳞芽旋转，即绕蒜种矩心 O 点转动，蒜种受到自身重力 G 向下的转矩和短接种鸭嘴的支持力 F_{N1}、摩擦力 F_f 的阻力矩。由图 4b 可计算出蒜种绕 O 点转动的力矩

$$M_O=GH\cos\alpha-F_{N1}L_1-F_fL_2 \tag{3}$$

式中　F_f——蒜种与短接种鸭嘴之间摩擦力

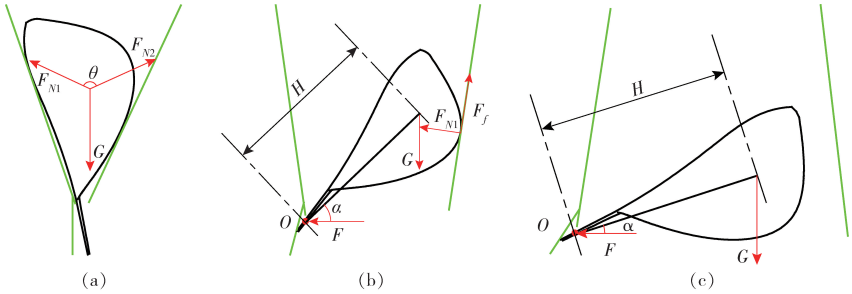
L_1——支持力 F_{N1} 的力臂，mm

L_2——摩擦力 F_f 的力臂，mm

H——蒜种重心到鳞芽尖部的距离，mm

α——蒜种重心与 O 点的连线和水平面夹角，(°)

状态 3 时，蒜种处于快速旋转状态，短接种鸭嘴与蒜种脱离，阻力矩消失，且角 α 越来越小，力臂越来越大，蒜种在自身重力的作用下快速旋转，如图 4c 所示。当蒜种脱离接种鸭嘴后在惯性的作用



(a)　(b)　(c)

图 4　蒜种运动过程受力图

Fig. 4　Force analysis diagrams of garlic in process of movement

下继续旋转,完成调头。

$$M_O = GH\cos\alpha \tag{4}$$

由式(3)、(4)可知,重心到鳞芽的距离 H 越大其转矩 M_O越大,蒜种调头效果越好,即蒜种重心越靠近蒜种底部,其调头效果越好。

3 调头过程 EDEM 虚拟仿真与分析

双鸭嘴式调头装置在调头的工作过程中与大蒜发生多次干涉碰撞,大蒜的运动较为复杂,无法完全通过试验或者理论计算来分析大蒜的运动过程,研究其调头机理。本研究选用离散元数值模拟仿真软件(EDEM)研究大蒜调头过程的动力学规律。

3.1 双鸭嘴式调头装置最大作业速度计算

大蒜插播效率由调头装置的工作效率决定,而调头装置的工作效率由插播装置的转动速度决定。大蒜从接种鸭嘴到插播鸭嘴组合的运动过程为:从排种器落入接种鸭嘴,经过反弹后稳定,当接种鸭嘴被插播鸭嘴组合打开后,大蒜做自由落体运动,其运动过程如图 5 所示。

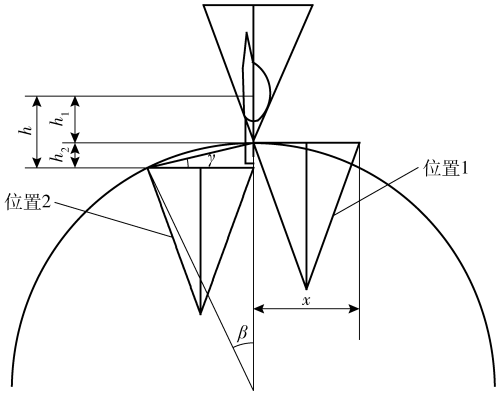


图 5 大蒜正头运动过程图

Fig. 5 Moving process of adjusting garlic upwards

插播鸭嘴在 t_1时刻从位置 1 逆时针旋转,经过时间 Δt 后到达位置 2,此时,时间为 t_2,旋转角度为 β;在此过程中大蒜从接种鸭嘴落入到插播鸭嘴中,忽略机具与大蒜的整体移动,若要满足大蒜落入插播鸭嘴,则接种鸭嘴水平方向上的位移必须小于 x。

图 5 中 h_1为位置 1 时,大蒜质心到接种鸭嘴上的竖直距离,h_2为接种鸭嘴位置 1 与位置 2 的竖直距离,由图 5 可得

$$h_2 = x\tan\frac{\beta}{2} \tag{5}$$

$$\sin\beta = \frac{x}{r} \tag{6}$$

$$h = h_1 + h_2 \tag{7}$$

$$h = \frac{1}{2}g\Delta t^2 \tag{8}$$

$$\beta = \omega\Delta t \tag{9}$$

$$\gamma = \frac{1}{2}\beta \tag{10}$$

式中 r——圆盘半径,mm

ω——圆盘角速度,rad/s

由式(5)~(10)可解得

$$\omega = \frac{\arcsin\dfrac{x}{r}}{\sqrt{\dfrac{2h_1 + 2x\tan\dfrac{x}{r}}{g}}}$$

即为插播装置最大角速度。

3.2 接种鸭嘴关键部位设计

大蒜调头机构中最重要的是接种鸭嘴的设计,调头工作的正常进行必须满足以下条件:①保证大蒜鳞芽竖直向上或向下。②当鳞芽向下时,保证鳞芽能够伸出接种鸭嘴。③鳞芽向上时,当插播支架与长接种鸭嘴驱动挡块相接触时,为保证大蒜能够竖直下落,插播支架不得与大蒜根部相接触。以上功能主要通过设计一对锥形仿形接种鸭嘴实现,如图 6 所示。

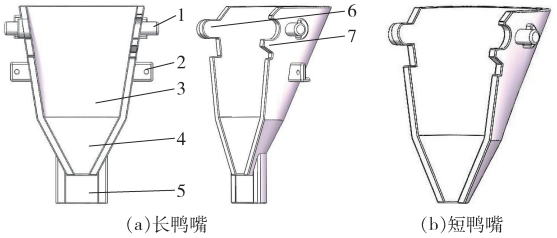


图 6 接种鸭嘴结构图

Fig. 6 Structure diagrams of duckbill device for catching garlics

1. 转轴 2. 弹簧座 3. 扩容区 4. 仿形区 5. 驱动挡块 6. 驱动臂 7. 驱动臂挡块

长接种鸭嘴分为转轴、弹簧座、扩容区、仿形区、驱动挡块、驱动臂、驱动臂挡块。长接种鸭嘴去除驱动挡块后即为短接种鸭嘴。短接种鸭嘴与长接种鸭嘴对称分布,共同组成一个锥形接种鸭嘴。

每对接种鸭嘴的仿形区以图 7 中 A 型所示结构为基础,并设计 B 型和 C 型两种不同的形状结构以优化锥形鸭嘴,从而更好地满足条件②、③。A 型为圆锥形基准鸭嘴,B 型鸭嘴是将开口角度随高度增加不断增大,C 型是仿照大蒜形状设计。

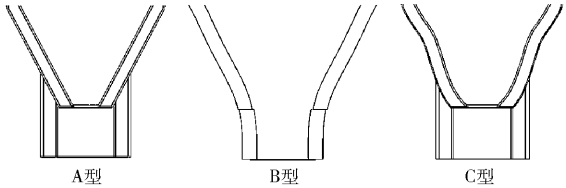


图 7 不同类型的接种鸭嘴仿形区结构图

Fig. 7 Profiling structure diagrams of different kinds of duckbill devices for catching garlics

3.3　大蒜颗粒 EDEM 仿真模型的建立

本研究选用山东省苍山大蒜，由于大蒜外形的不规则特征，首先要对大蒜进行分类以便对大蒜建模仿真。根据对大蒜种子调研分析，对 500 粒种子样本进行测量，按照图 8 所示的大蒜长、宽、厚以及鳞芽的尺寸规格，将大蒜分为 3 个等级，并计算了各类大蒜在样本中所占比例，结果见表 1。

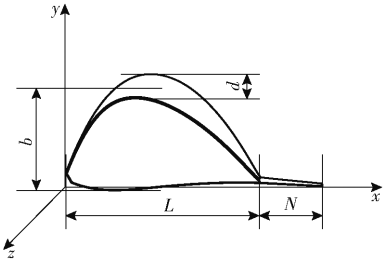


图 8　大蒜结构图

Fig. 8　Structure diagram of garlic

表 1　大蒜分级

Tab. 1　Classification of garlics

等级	蒜体长度区间/mm	蒜体宽度区间/mm	蒜体厚度区间/mm	鳞芽长度区间/mm	比例/%
Ⅰ	34.6 ~ 39.6	34.6 ~ 39.6	20.5 ~ 25.5	16.4 ~ 20.4	34
Ⅱ	29.6 ~ 34.6	16.0 ~ 20.0	15.5 ~ 20.5	12.4 ~ 16.4	35
Ⅲ	24.6 ~ 29.6	12.0 ~ 16.0	10.5 ~ 15.5	8.4 ~ 12.4	31

取每个等级中长、宽、厚的平均值在三维建模软件中建立大蒜的三维模型，共建立 3 级大蒜模型，并将 3 个模型转换为 x_t 格式导入 EDEM 软件中，用球形颗粒填充。图 9 为各类型大蒜实物图与 EDEM 软件仿真模型对比图。

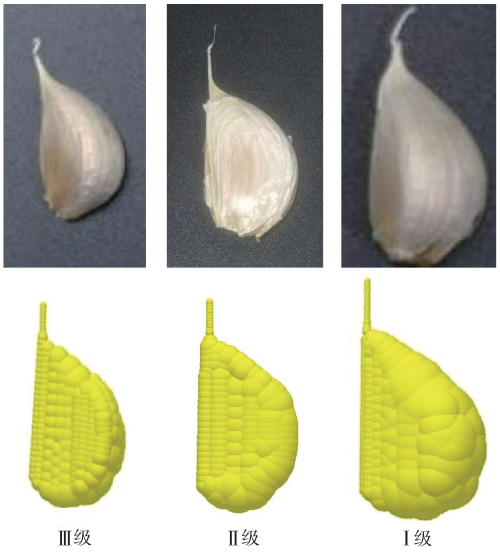


图 9　大蒜实物与 EDEM 模型

Fig. 9　Objects of garlic and models by EDEM

应用三维建模软件对大蒜调头机构进行实体建模，为了减少 EDEM 仿真模拟时间，将与大蒜运动过程中不发生接触的部件去除，将调头结构简化为接种支架、接种鸭嘴、插播支架、插播鸭嘴、行星齿轮托架、中间传动轴、3 根六角传动轴等。将建立好的模型转换为 x_t 格式导入 EDEM 软件中，如图 10 所示。

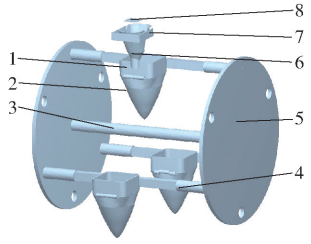


图 10　鸭嘴式大蒜调头机构仿真模型

Fig. 10　Simulation model of adjusting mechanism

1. 插播支架　2. 插播鸭嘴　3. 中间传动轴　4. 六角传动轴　5. 行星齿轮托架　6. 接种鸭嘴　7. 接种支架　8. 颗粒工厂

根据调头机构所用材料，将接种鸭嘴、接种支架、插播鸭嘴、插播支架设置为有机玻璃，将中间传动轴、六角传动轴、行星齿轮支架统一设置为 45 号钢。由于调头机构调头时是单粒蒜种，不存在大蒜颗粒间接触，因此大蒜间接触参数在此处略去。大蒜颗粒、有机玻璃的物性参数及接触参数如表 2 所示。

表 2　大蒜调头仿真参数

Tab. 2　Simulation parameters of adjusting garlics upwards

参数	有机玻璃	大蒜颗粒
密度/(kg·m^{-3})	1 180	1 080
泊松比	0.25	0.23
弹性模量/MPa	68 935.24	23.82
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.432	
静摩擦因数(与颗粒)	0.466	
动摩擦因数(与颗粒)	0.214	

3.4　大蒜颗粒 EDEM 仿真

根据双鸭嘴式调头装置最大作业速度计算公式计算后，设置行星齿轮盘工作转速分别为 10、15、20、25 r/min，共 12 组虚拟仿真，颗粒工厂设置在接种鸭嘴的上方，每次生成一粒大蒜，生成速度分别为 1、1.5、2、2.5 粒/s，每组鸭嘴不同速度共下落 300 粒大蒜，每种类型的大蒜按照表 1 所示比例，分别设置：Ⅰ级 102 粒、Ⅱ级 105 粒、Ⅲ级 93 粒。设置大蒜下落初速度为 200 mm/s，方向向下，角速度为 0 rad/s；大蒜鳞芽朝向设置为随机，时间步长为 5.2×10^{-6} s。图 11 为大蒜仿真过程图，其中图 11a、11b、11c 为大蒜鳞芽竖直向上时仿真过程，图 11d、11e、11f 为大蒜鳞芽竖直向下时仿真过程，该过程与上述原理分析一致。

如图 12 所示，以不同状态下的大蒜为研究对象

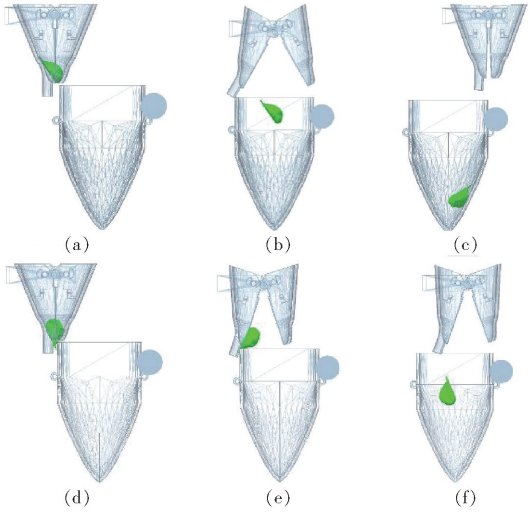


图 11 鸭嘴式大蒜调头机构仿真过程

Fig. 11 Simulation process of adjusting mechanism

对大蒜的运动进行分析,设置其以流线型显示,图中彩色流线表示被跟踪大蒜颗粒质心的运动轨迹。图 12a 为大蒜鳞芽向上时,大蒜从颗粒工厂竖直下落至接种鸭嘴与接种鸭嘴发生碰撞后改变运动轨迹,随后落至接种鸭嘴底端并经过短暂的轻微振荡后静止,在大蒜振荡后插播鸭嘴支架将接种鸭嘴打开,大蒜下落至插播鸭嘴,图中箭头方向为大蒜运动方向。图 12b 为大蒜下落至接种鸭嘴底端后鳞芽朝下,大蒜质心以鳞芽为中心旋转约 180°后落入插播鸭嘴,可观察到接种鸭嘴底部有一半圆形轨迹,图中箭头方向为大蒜运动方向。图 12c 为鳞芽朝下时大蒜调头失败,大蒜在接种鸭嘴底部稳定后,在插播鸭嘴支架的碰撞下向上运动,接着自由下落,图中箭头方向为大蒜运动方向。图 12d 为大蒜在接种鸭嘴底部绕鳞芽转动的轨迹放大图,箭头方向代表大蒜质心运动到该位置时鳞芽朝向。

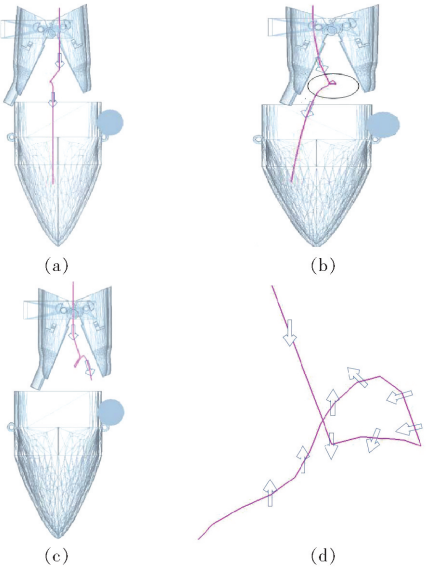


图 12 大蒜轨迹图

Fig. 12 Movement trajectory of garlic

3.5 仿真结果与分析

在仿真过程中发现 4 个影响大蒜鳞芽正头率的因素:接种鸭嘴形状;大蒜重心位置;插播装置转动速度;二次弹跳。

3.5.1 EDEM 仿真受力校核

在 EDEM 中对仿真过程中 3 种状态所受力的大小进行测量,并将 EDEM 中所测数据(表 3),代入公式(1)~(4)中。由表 3 可知,将重力 G 与支持力 F_{N1}、支持力 F_{N2} 代入公式(1)、(2)后,公式两边相等;式(3)代入数据后 M_O =1.323 N·mm,大于 0,蒜种处于旋转状态;公式(4)代入数据得 M_O =2.207 N·mm,力矩大于 0,且大于状态 2 时的力矩;从力学的角度上说明了用 EDEM 仿真是可信的。

表 3 蒜种受力仿真结果

Tab. 3 Value of force simulations of garlics

状态	重力 G/N	支持力 1 F_{N1}/N	支持力 2 F_{N2}/N	摩擦力 F_f/N	α/(°)	θ/(°)
1	0.068	0.068	0.068	0	90	120
2	0.068	0	0.023	0.065	38	138
3	0.068	0	0	0	20	146

3.5.2 总体样本分析

图 13 为 300 粒大蒜在插播转盘工作速度分别为 10、15、20、25 r/min 时,图 7 中 A、B、C 型接种鸭嘴的鳞芽正头率变化曲线。

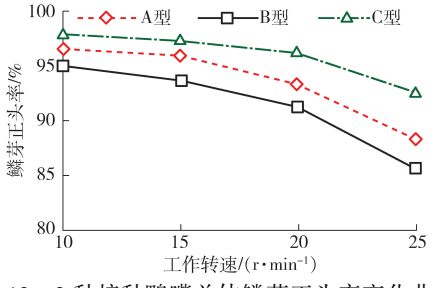


图 13 3 种接种鸭嘴总体鳞芽正头率变化曲线

Fig. 13 Variation curves of rate of garlic bulbil with upward direction for three kinds of mechanisms

由图 13 可知,随速度从 10 r/min 到 25 r/min 不断增加,A、B、C 型接种鸭嘴的鳞芽正头率不断降低,在 10~15 r/min 之间 3 种接种鸭嘴的鳞芽正头率下降缓慢,在 20~25 r/min 之间下降迅速,说明转速影响大蒜鳞芽正头率。在调头装置相同转速下,C 型接种鸭嘴的鳞芽正头率最高,B 型接种鸭嘴的鳞芽正头率最低,说明接种鸭嘴的形状是影响大蒜鳞芽正头率的因素之一。

3.5.3 对不同级别蒜种样本分析

图 14 为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 种级别的大蒜以及总样本的鳞芽正头率随工作转速的变化曲线。由图 14 可知,Ⅰ、Ⅲ两种级别的大蒜在同种接种鸭嘴中的鳞芽

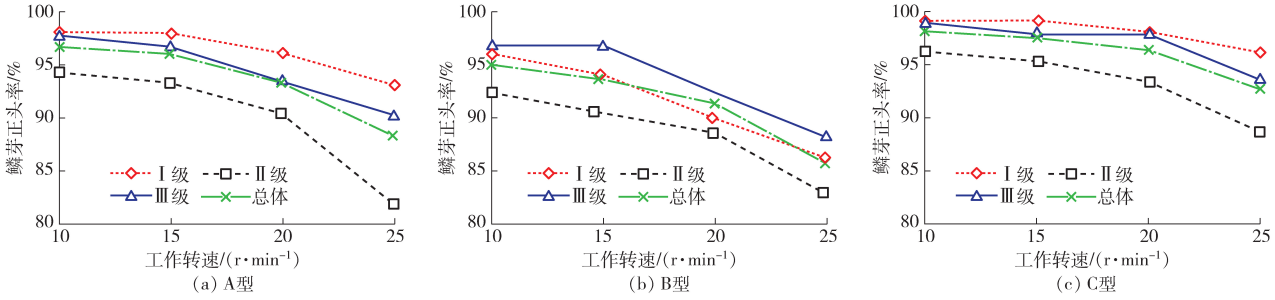


图 14　3 种接种鸭嘴鳞芽正头率变化曲线

Fig. 14　Variation curves of three kinds of duckbill devices adjusting garlics upwards respectively

正头率相近，Ⅱ级大蒜鳞芽正头率较低，由表 1 可知，Ⅱ级大蒜的尺寸在Ⅰ、Ⅲ两种类型之间，说明在同种接种鸭嘴中大蒜的尺寸与鳞芽正头率无关。对比图 9 中 3 种大蒜外形发现Ⅱ级大蒜的中心靠近鳞芽，Ⅰ、Ⅲ两种级别的大蒜中心远离鳞芽，可知重心位置是影响大蒜鳞芽正头率的一个因素。

3.5.4　对大蒜二次弹跳现象分析

根据图 14 数据走向可知 20 ~ 25 r/min 之间鳞芽正头率下降较快，对各个大蒜的运动轨迹进行分析发现，速度为 20 r/min 与 25 r/min 时存在大蒜二次反弹而导致大蒜调头失败，如图 12c 所示。对 A、B、C 3 种接种鸭嘴发生二次弹跳而导致大蒜调头失败的比率进行统计，如图 15 所示，B 型鸭嘴发生二次反弹的比率最高，C 型鸭嘴最低；在速度 20 r/min 之前 C 型接种鸭嘴不会因二次弹跳而导致调头失败，可以确定二次弹跳对 C 型接种鸭嘴影响较小。

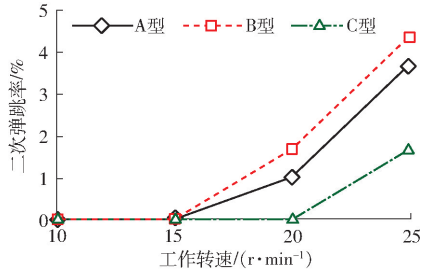


图 15　3 种接种鸭嘴二次弹跳率变化曲线

Fig. 15　Variation curves of the secondary bounce rate for three kinds of mechanisms

3.5.5　大蒜正头率影响因素分析

由以上分析可知：①影响鳞芽正头率的主要因素为插播鸭嘴工作转速、蒜种重心位置、鸭嘴类型，而蒜种大小对鳞芽正头率基本无影响。其中 C 型接种鸭嘴鳞芽正头率最高，且工作转速越高，蒜种重心位置越靠近鳞芽，正头率越低。②工作转速提高引起的蒜种二次弹跳会进一步降低正头率，且转速越高二次弹跳率越高，正头率越低。在插播鸭嘴工作速度低于 20 r/min 时，不会出现蒜种的二次弹跳现象，当插播鸭嘴工作转速大于 20 r/min，开始出现二次弹跳现象。

4　试验验证

4.1　室内试验

试制了试验样机，在室内进行播种试验，如图 16 所示，对 3 种接种鸭嘴在 10、15、20、25 r/min 的 4 种不同转速下进行试验，样机对应运动速度分别为 0.72、1.08、1.44、1.8 km/h，每种试验采集 300 粒蒜种，重复 3 次，取平均值。采用高速摄像机提取了播种过程蒜种运动过程，并记录因二次弹跳导致调头失败的大蒜数目。

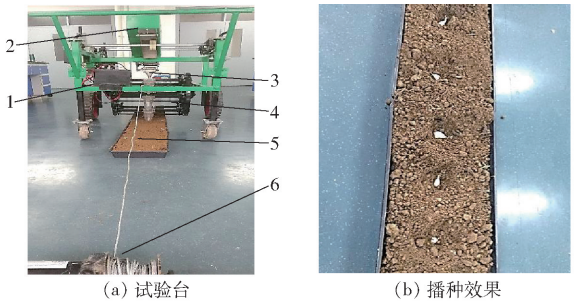


图 16　调头装置试验台与播种效果

Fig. 16　Test bed of adjusting mechanism and seeding effect

1. 移动电源　2. 排种装置　3. 接种鸭嘴　4. 插播装置　5. 土槽　6. 绞盘

4.1.1　大蒜调头过程

图 17 为用高速摄像机记录的大蒜调头运动过程，其中图 17a、17b、17c 为大蒜鳞芽竖直向下时工作过程，图 17d、17e、17f 为大蒜鳞芽竖直向上时工作过程。为便于观察将大蒜鳞芽染成红色，图 17 中所示的试验调头过程与图 12 中仿真调头过程一致，说明离散元技术可以很好地模拟此过程。

4.1.2　重心位置分析

为探究重心位置对大蒜调头的影响，随机选取 300 粒大蒜对其进行水浴试验，即将蒜种放进盐水中，鳞芽向下者其重心位置靠近鳞芽。对 300 粒大蒜统计，重心靠近蒜种鳞芽的数量为 16 粒，占总体样本的 5.3%。挑选出 100 粒重心靠近鳞芽的大蒜和 100 粒重心靠近蒜种底部的大蒜，选用 C 型鸭嘴

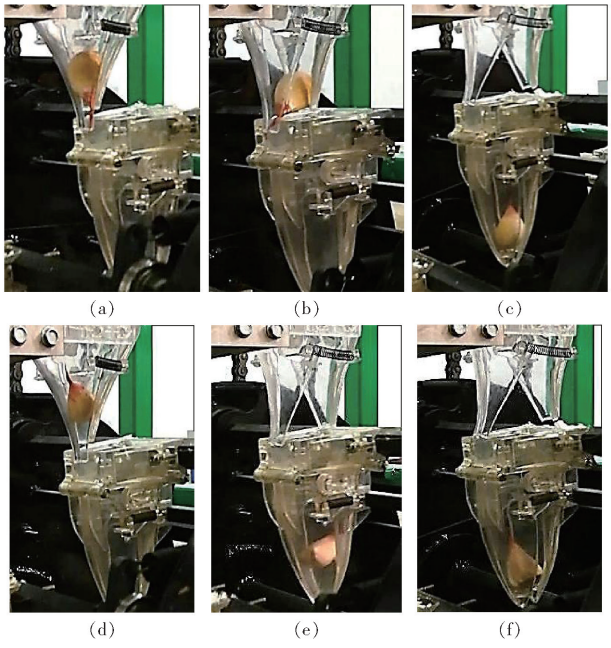


图 17 大蒜调头工作过程

Fig. 17 Process of mechanism adjusting garlic

在插播鸭嘴转速为 20 r/min 时对其做单因素试验，重复 3 次，取其平均值。试验结果为，重心靠近鳞芽的大蒜调头率为 93.33%，重心靠近蒜种底部的大蒜调头率为 95.67%，两者相差 2.34 个百分点，但因蒜种重心位置靠近鳞芽的大蒜在总体样本中所占比例为 5.3%，所以重心位置对总体蒜种调头率影响不显著。

4.1.3 室内试验分析

图 18 为 3 种接种鸭嘴仿真与试验鳞芽正头率随调头装置工作转速变化的曲线。大蒜鳞芽正头率随装置工作转速的增加而减小，且下降速度越来越大，试验数据与仿真数据变化趋势一致，最大误差为 2.66%，证明了用 EDEM 软件对大蒜调头仿真的可行性。

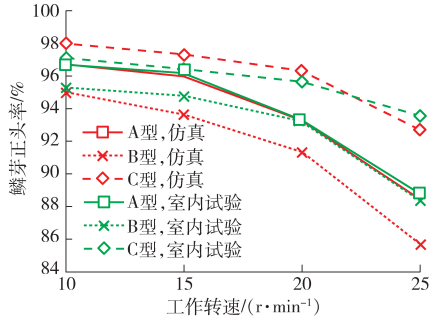


图 18 3 种接种鸭嘴仿真与室内试验正头率变化曲线

Fig. 18 Simulation and laboratory experiment variation curves of garlic upwards by three kinds of mechanisms

为探究工作转速与接种鸭嘴类型对大蒜正头率影响的显著性，以及确定二者最优组合，对上述室内试验数据进行双因素试验的极差与方差分析。以工作速度与鸭嘴类型两因素进行分析，对插播装置的工作转速选取正头率较高的 10、15、20 r/min 进行分析，接种鸭嘴的 3 水平分别为 A、B、C 型接种鸭嘴，其试验因素水平如表 4 所示。

表 4 试验因素水平

Tab. 4 Factors and levels of experiments

水平	因素	
	工作转速/(r·min⁻¹)	鸭嘴类型
1	10	A 型
2	15	B 型
3	20	C 型

试验方案及结果见表 5，A、B 为工作转速和鸭嘴类型的水平值，由表可知，因素 A 的极差 R 为 6.89，因素 B 的极差 R 为 5.90，即 $R_A > R_B$，因此，对鳞芽正头率影响程度由大到小为：工作速度、鸭嘴类型；以鳞芽正头率最高为最优指标，最优的因素水平组合为：工作转速为 10 r/min，鸭嘴类型为 C 型，即 A_1B_3。

表 5 试验方案及结果

Tab. 5 Design and results of experiment

试验号	A	B	正头率/%
1	1	1	96.67
2	1	2	95.33
3	1	3	97.11
4	2	1	96.22
5	2	2	94.78
6	2	3	96.45
7	3	1	93.33
8	3	2	93.22
9	3	3	95.67
K_1	289.11	286.22	
K_2	287.45	283.33	
K_3	282.22	289.23	
R	6.89	5.90	
因素主次顺序		A、B	
较优方案		A_1B_3	

利用方差分析法对试验结果进行分析，结果见表 6，由表可知，因素 A 的 P 值为 0.019（小于 0.05），因素 B 的 P 值为 0.037（小于 0.05），因此工作速度与鸭嘴类型对鳞芽正头率均有显著影响。另外，从上述数据中可知，在 A、B、C 3 种鸭嘴中，选用 C 型鸭嘴时，调头率最高；确定选用 C 型鸭嘴，当工作速度分别为 10、15、20 r/min 时，正头率分别为 97.11%、96.45%、95.67%，可满足农艺要求；由单因素试验结果（图 18）可知，选用 C 型鸭嘴、工作速度为 25 r/min 时，正头率为 93.55%，正头率相对较低；因此，为提高工作效率，同时满足农艺要求，最优组合应选为：工作转速为 20 r/min，鸭嘴类型为 C 型，即 A_3B_3。

表 6　正头率方差分析

Tab. 6　ANOVA of rate of garlics upwards

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	*F*	*P*
A	8. 620	2	4. 310	12. 445	0. 019
B	5. 802	2	2. 901	8. 377	0. 037
误差	1. 385	4	0. 346		

4. 1. 4　二次弹跳分析

图 19 为仿真与室内试验时大蒜发生二次弹跳的比率。二次弹跳率随调头装置工作速度的增加而增加，试验数据与仿真数据变化趋势一致。

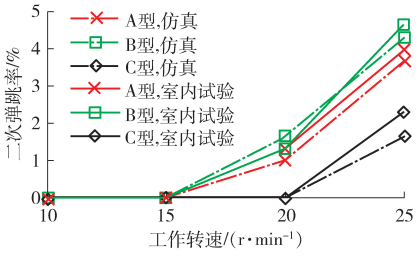


图 19　3 种接种鸭嘴仿真与室内试验二次弹跳率变化曲线

Fig. 19　Variation curves of the secondary bounce rates of garlics by simulation and laboratory experiment for three kinds of mechanisms

4. 2　田间试验

为进一步确定试验效果，对室内试验中调头率较高的 C 型接种鸭嘴进行田间试验。于 2018 年 3 月在山东省泰安市山东农业大学蔬菜试验基地进行了试验，土壤类型为壤土，面积约 0. 5 hm^2，对地块进行旋耕处理。选用本团队试制的大田样机，配套动力为轮式拖拉机，采用三点悬挂的挂接方式牵引播种机，如图 20 所示。拖拉机作业速度分别为 0. 72、1. 08、1. 44、1. 8 km/h，以对应插播装置工作速度 10、15、20、25 r/min。每种作业速度下采集蒜种样本 300 粒，统计 C 型接种鸭嘴在工作转速为 10、15、20、25 r/min 时，蒜种正头率分别为 95. 67% 、95. 33% 、93. 67% 、89. 33% ，可知 C 型接种鸭嘴的正头率随工作转速的增大而降低，与仿真和室内试验变化趋势一致。田间试验正头率低于室内试验与仿真，最大误差为 5% ，原因可能是田间工作时地势复杂，且插播鸭嘴与地面接触时蒜种会与土壤发生干涉，影响正头率。在预试验中，B 型接种鸭嘴在 3 种接种鸭嘴中正头率最低，在 10 r/min 的工况下进行田间试验，鳞芽正头率最高，为 91% ，C 型鸭嘴与 B 型鸭嘴相比提高了 4. 67 个百分点，说明鸭嘴优化是可行的。



图 20　播种机作业现场

Fig. 20　Operation diagram of seeder

5　结论

(1)运用离散元方法建立了双鸭嘴式大蒜正头机构播种动力学模型，分析了蒜种在 3 种不同类型正头机构中的运动规律并进行了试验，仿真结果与试验基本一致，试验正头率与仿真正头率误差在 5% 以内，证明了离散元方法分析蒜种运动规律是可行的。

(2)田间试验结果显示，选用 C 型鸭嘴、作业速度在 0. 72 ~ 1. 8 km/h 之间时，大蒜鳞芽正头率为 89. 33% ~ 95. 67% ，相比 A、B 型接种鸭嘴，C 型接种鸭嘴正头率较高，且最为稳定。

参　考　文　献

1　栗晓宇，耿爱军，侯加林，等. 大蒜播种机研究现状及展望[J]. 农业机械，2017(2)：105 - 107，109.

2　林悦香，尚书旗，杨然兵. 大蒜生产机械的现状与发展[J]. 农机化研究，2012，34(3)：242 - 245.
LIN Yuexiang，SHANG Shuqi，YANG Ranbing. Status and development of garlic production machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2012，34(3)：242 - 245. (in Chinese)

3　郭毅，张祖立，于丽颖，等. 大蒜播种机械的研究现状[J]. 农机化研究，2009，31(6)：221 - 223.
GUO Yi，ZHANG Zuli，YU Liying，et al. The present situation of the garlic planting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2009，31(6)：221 - 223. (in Chinese)

4　耿爱军，张兆磊，宋占华，等. 蒜种盒机械投放过程运动学分析与参数优化试验[J]. 农业工程学报，2016，32(5)：29 - 35.
GENG Aijun，ZHANG Zhaolei，SONG Zhanhua，et al. Kinematic analysis and parameter optimized experiment of garlic box putting process[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(5)：29 - 35. (in Chinese)

5　林悦香，尚书旗，杨然兵，等. 大蒜直立播种机设计[J]. 农机化研究，2013，35(10)：87 - 89，94.
LIN Yuexiang，SHANG Shuqi，YANG Ranbing，et al. The design of upright garlic planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2013，35(10)：87 - 89，94. (in Chinese)

6 DENG Quanzhang, YAN Juanwu, CHUIANG Kaizhang. Vertical planting structure design for planter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 654: 87 - 90.

7 邢立冉,李汝莘,王铁新,等. 分置式大蒜收获机设计与仿真[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):137 - 140,111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2012s27&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.027.
XING Liran, LI Ruxin, WANG Tiexin, et al. Design and analysis of split garlic harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):137 - 140, 111. (in Chinese)

8 荐世春,赵峰,李青,等. 旋转式蒜瓣单粒定向取种器的研究设计[J]. 农业装备与车辆工程,2009(2):18 - 20.
JIAN Shichun, ZHAO Feng, LI Qing, et al. Research and design on rotary garlic single-clove directional seed metering device [J]. Transactions of the Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2009(2): 18 - 20. (in Chinese)

9 何岳平,陈青春,何瑞银,等. 大蒜栽植机栽植系统优化设计与运动分析[J]. 农业机械学报,2011,42(2):88 - 93,119.
HE Yueping, CHEN Qingchun, HE Ruiyin, et al. Optimal design and kinematic analysis for planting system of garlic planting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):88 - 93, 119. (in Chinese)

10 金诚谦,袁文胜,吴崇友,等. 大蒜播种时鳞芽朝向对大蒜生长发育影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):155 - 158.
JIN Chengqian, YUAN Wensheng, WU Chongyou, et al. Experimental study on effects of the bulbil direction on garlic growth [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4):155 - 158. (in Chinese)

11 杨军伟,孙慧男,张卓青. 离散元法及其在农业工程中的应用综述[J]. 现代食品,2015(15):28 - 33.
YANG Junwei, SUN Huinan, ZHANG Zhuoqing. A review on fundamentals of distinct element method and its applications in agricultural engineering realm[J]. Grain Distribution Technology, 2015(15):28 - 33. (in Chinese)

12 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):43 - 50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):43 - 50. (in Chinese)

13 WANG Lijun, LI Rui, WU Baoxin, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations [J]. Particuology, 2018, 38: 185 - 195.

14 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM - CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):43 - 51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171106&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM - CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):43 - 51. (in Chinese)

15 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(7):36 - 42.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, FENG Yining, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 36 - 42. (in Chinese)

16 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14):32 - 39.
LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14):32 - 39. (in Chinese)

17 闫银发,孟德兴,宋占华,等. 槽轮式补饲机颗粒动力学数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(增刊):249 - 253. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s038&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.038.
YAN Yinfa, MENG Dexing, SONG Zhanhua, et al. Particle kinetic simulation and experiment for flute-wheel feeding[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):249 - 253. (in Chinese)

18 JUSTIN W, PAUL W, WILLIAM. Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(22): 5585 - 5601.

19 ZHAO Lala, ZHAO Yuemin, BAO Chunyong, et al. Optimisation of a circularly vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design[J]. Powder Technology, 2017, 310:307 - 317.

20 LI Hua, WANG Jinshuang, YUAN Jianbo, et al. Analysis of threshed rice mixture separation through vibration screen using discrete element method [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6):231 - 239.

21 ZENG Yong, JIA Fuguo, MENG Xiangyi, et al. The effects of friction characteristic of particle on milling process in a horizontal rice mill[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(5): 1280 - 1291.

22 林吉靓,朱峰. 拾取式大蒜播种机的总体设计及研究[J]. 开封大学学报,2017,31(3):89 - 94.
LIN Jijing, ZHU Feng. General design and research of picking-up style garlic seeder[J]. Journal of Kaifeng University, 2017, 31(3):89 - 94. (in Chinese)