

# 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究<sup>\*</sup>

陈进<sup>1</sup> 周韩<sup>1</sup> 赵湛<sup>2</sup> 李耀明<sup>2</sup> 龚智强<sup>1</sup>

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

**【摘要】** 基于离散元法的基本方法, 采用 Hertz - Mindlin 接触模型, 运用 EDEM 软件对气吸式精密播种机振动种盘中水稻种群运动进行模拟仿真。分析了不同频率、振幅、种层厚度对种群空间分布密度的影响。对仿真区域垂直于种盘方向进行均匀分层, 得到不同时间种群在每一层的分布情况。仿真结果表明: 种盘振动频率 11 ~ 12 Hz、振幅 12 ~ 13 mm、初始种层数 3 ~ 5 时, 种群在振动种盘中的空间离散程度较为理想。在播种机试验台上进行试验验证, 选取种盘振动频率、振幅、初始种层数、吸种距离为试验因素进行正交试验, 得出振动频率为 11 Hz、振幅为 12 mm、初始种层数约为 4、吸种距离为 30 mm 时吸种效果理想。

**关键词:** 气吸式 精密播种机 超级稻 种群运动 仿真

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)10-0079-05

## Analysis of Rice Seeds Motion on Vibrating Plate Using EDEM

Chen Jin<sup>1</sup> Zhou Han<sup>1</sup> Zhao Zhan<sup>2</sup> Li Yaoming<sup>2</sup> Gong Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education and Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

Rice seeds motion on a vibrating plate was simulated using discrete element method software EDEM. The mechanical interaction forces, both between seed and the plate and among the seeds were modeled by Hertz - Mindlin (no slip). With the variation of vibration frequency, amplitude and seeds initial thickness, their effects on the seeds spatial distribution were analyzed. The simulation area was divided into uniform layers in vertical direction and the seeds spatial distribution in layers at different time was obtained. The simulation results showed that with the plate vibration frequency of 11 ~ 12 Hz, vibration amplitude of 12 ~ 13 mm and seeds initial layer number of 3 ~ 5, the ideal seeds spatial distribution which was beneficial to improve suction precision could be received. Plate vibration frequency, vibration amplitude, seeds initial thickness and sucking distance were selected as influencing factors, then orthogonal experiments were carried out on test-rig and results indicated that the precision suction ratio was greater than 93% with the plate vibration frequency of 11 Hz, vibration amplitude of 12 mm and seeds initial layer number of 4.

**Key words** Air-suction, Precision seeder, Super rice, Seeds motion, Simulation

### 引言

育秧移栽是我国水稻种植的主要形式<sup>[1]</sup>, 秧盘秧苗的质量是影响移栽性能的主要因素之一, 排种器是实现秧盘均匀播种的关键部件。随着超级稻种

植的推广, 对播种技术提出了更高的要求, 要求每穴播种 1 ~ 2 粒。气吸式排种器具有对种子尺寸要求不高、不需精选分级、伤种率低、对种子适应性强、可靠性高、节约种苗、节约成本、能进行较高速度的播种的优点<sup>[2-6]</sup>。散粒体动力学理论表明: 为使物料

收稿日期: 2010-12-31 修回日期: 2011-03-16

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20103227120010)

作者简介: 陈进, 教授, 博士生导师, 主要从事机器系统监测与控制技术研究, E-mail: chenjinjd126@126.com

运动更均匀、稳定,必须减小散粒体的内摩擦因数,增加流动性。特定物料的内摩擦因数是常数,要在不改变其物态的情况下改变其内摩擦因数是是不可能的。因此,为改善其流动性,广泛采用振动使物料形成准流体,使其增加流动性<sup>[7]</sup>。

种盘振动使得盘内种子“沸腾”,减小了种子间摩擦力<sup>[8]</sup>,可以提高排种器的吸种精度。目前,有学者研究了种群的运动状态,但是模拟的种子数目较少,不能真实反映种群的运动情况。随着计算机技术的日趋成熟,计算机软件模拟应用也越来越广泛,本文通过离散元仿真软件 EDEM,分析振动种盘中种群的运动情况,寻求振动种盘与吸种盘之间的最佳参数组合。

## 1 种群运动分析

### 1.1 接触力学模型

随着可视化技术和计算方法的发展,英国 DEM-Solutions 公司开发出基于离散单元法模拟和分析颗粒系统运动过程的 CAE 软件 EDEM,它可以管理每个粒子的个体信息(质量、温度、速度等)并计算作用于粒子上的力,可以建立不规则几何形状的粒子模型,通过跟踪每个粒子的运动轨迹获取粒子群整体的运动状态。本文将超级稻种子简化为椭球体,在此软件中该模型由若干个大小不等的圆球形颗粒组合而成,运用软件计算垂直往复振动激励下种子间相互作用力,研究激振参数对种子运动状态和空间分布影响。为了研究种子在空间分布情况,将种子分布区域进行分层,从而得到各层种子数,分析其对排种器吸种性能的影响。

接触模型是离散单元法的重要基础,本文采用 Hertz-Mindlin 接触模型,如图 1 所示。该模型假设离散单元为刚性体,离散单元之间为点接触,其接触特性为软接触,即刚性离散单元在接触点处允许有一定的重叠量,在所有时间中任何离散单元所受合力可由与其接触的离散单元之间的相互作用确定。

颗粒间法向力  $F_n$ 、切向力  $F_t$ 、法向阻尼力  $F_n^d$ 、切向阻尼力  $F_t^d$  分别为<sup>[9]</sup>

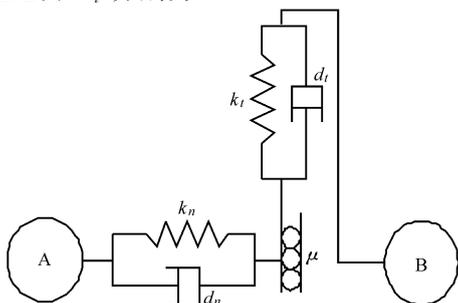


图 1 接触力学模型

Fig. 1 Model of contact force

$$F_n = \frac{4}{3}E^* \sqrt{R^* \alpha^3} \quad (1)$$

$$F_t = -S_t \delta \quad (2)$$

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}} \quad (3)$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* v_t^{rel}} \quad (4)$$

其中

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \quad (5)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \mu_B^2}{E_B} \quad (6)$$

$$\alpha = R_A + R_B - |\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B| \quad (7)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \alpha} \quad (8)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \alpha} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \quad (10)$$

$$m^* = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B} \quad (11)$$

$$v_n^{rel} = (\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B) \cdot \mathbf{n} \quad (12)$$

$$v_t^{rel} = (\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B) \cdot \mathbf{t} \quad (13)$$

$$G^* = \frac{2 - \mu_A^2}{G_A} + \frac{2 - \mu_B^2}{G_B} \quad (14)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B}{|\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B|} \quad (15)$$

式中  $E^*$  ——等效弹性模量, Pa

$R^*$  ——等效粒子半径, m

$\alpha$  ——法向重叠量, m

$\delta$  ——切向重叠量, m

$S_t$  ——切向刚度, N/m

$S_n$  ——法向刚度, N/m

$m^*$  ——等效质量, kg

$v_n^{rel}$  ——法向相对速度, m/s

$v_t^{rel}$  ——切向相对速度, m/s

$m_A, m_B$  ——颗粒 A、B 质量, kg

$\mu_A, \mu_B$  ——颗粒 A、B 泊松比

$E_A, E_B$  ——颗粒 A、B 弹性模量, Pa

$R_A, R_B$  ——颗粒 A、B 半径, m

$\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B$  ——颗粒 A、B 球心位置矢量, m

$\mathbf{v}_A, \mathbf{v}_B$  ——颗粒 A、B 碰撞前速度矢量, m/s

$\mathbf{n}$  ——颗粒 A、B 碰撞时的法向单位矢量

$\mathbf{t}$  ——颗粒 A、B 碰撞时的切向单位矢量

$G^*$  ——等效剪切模量, Pa

$\varepsilon$  ——恢复系数

$G_A, G_B$  ——颗粒 A、B 剪切模量, Pa

模型中切向力与摩擦力  $\mu_s F_n$  有关,  $\mu_s$  为静摩擦因数,滚动摩擦可以通过接触表面上的力矩来表

示,即

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (16)$$

式中  $\mu_r$ ——滚动摩擦因数

$R_i$ ——质心到接触点的距离, mm

$\omega_i$ ——接触点处物体单位角速度矢量, rad/s

### 1.2 建模及运动仿真

超级稻种子呈现椭球体,其模型长、宽、高即三轴尺寸为 9 mm × 3 mm × 3 mm,种子力学特性及物理特性参数为:泊松比 0.3、剪切模量 181.5 MPa、密度 1 239 kg/m<sup>3</sup>、种子间恢复系数 0.3、静摩擦因数 0.56、滚动摩擦因数 0.15<sup>[10-12]</sup>。

种盘长度  $l = 600$  mm,宽度  $d = 400$  mm,高度  $h = 150$  mm,建立仿真实间三维坐标系,坐标原点与种盘底面中心重合, $X$ 轴平行于种盘长度方向, $Y$ 轴平行于种盘宽度方向, $Z$ 轴垂直于种盘底面,种群随着种盘在  $Z$ 轴方向运动。种盘力学特性及物理特性参数为:泊松比 0.28、剪切模量 82 GPa、密度 7 890 kg/m<sup>3</sup>、种盘与种子间恢复系数 0.52、静摩擦因数 0.5、滚动摩擦因数 0.1<sup>[10]</sup>。

根据上述 Hertz - Mindlin 接触模型,种盘在小幅高频振动下模拟种群运动,种盘激振结构可简化为如图 2 所示的对心曲柄滑块机构。由于连杆长度  $l_2$  远远大于曲柄长度  $l_1$ ,由机械原理相关知识可知,滑块运动趋近于简谐运动,滑块与振动种盘固结在一起,在竖直方向运动,因此振动种盘运动也趋近于简谐运动,振幅  $A = l_1$ ,频率为  $\omega$ ,位移方程为<sup>[13]</sup>

$$S = A \sin \omega t \quad (17)$$

式中  $S$ ——种盘在竖直方向位移, mm

$A$ ——种盘在竖直方向振幅, mm

$\omega$ ——振动圆频率, rad/s  $t$ ——时间, s

种子由所建种盘模型内部颗粒工厂产生,距离种盘底部 75 mm,产生的种子依靠自重自由分布到种盘底部。种群产生过程和种盘激振下的“沸腾”状态分别如图 3、4 所示。

EDEM 软件在仿真过程中记录数据的时间间隔为 0.01 s,由于种群运动具有周期性,因此只需研究某几个周期各层种子运动状态,就可分析出种群在激振下的总体分布情况,得出种群的分布规律。

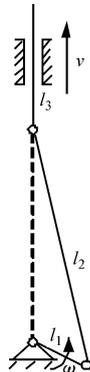


图 2 曲柄滑块机构  
Fig.2 Slider-crank mechanism

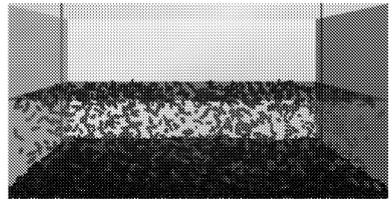


图 3 种群产生过程

Fig.3 Generation process of seeds

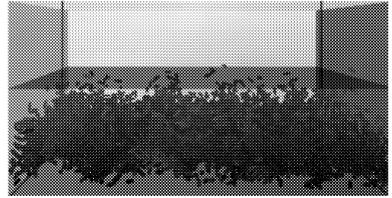


图 4 种群“沸腾”状态

Fig.4 ‘Boiling’ state of seeds

## 2 仿真结果讨论

### 2.1 频率对种群空间分布影响

种群通过种盘激振产生“沸腾”,运用 EDEM 后处理功能将仿真区域在  $Z$ 轴方向均匀分层,每 10 mm 一层,各层对应的实际坐标范围如表 1 所示,通过分析每层种子数目,选择合适的种子数目以及仿真区域层数,从而为计算吸种盘吸种距离提供了理想的参考条件。

表 1 仿真区域各层坐标

Tab.1 Coordinates of layers of simulation area

仿真区域 层数	1	2	3	...	18	19
Z 轴坐标 /mm	-20 ~ -10	-10 ~ 0	0 ~ 10	...	150 ~ 160	160 ~ 170

种盘在振幅  $A$  为 12 mm,频率  $f$  为 10、11、12、13 Hz 下运动,种群在此不同频率下离散情况如图 5 所示。在频率为 10 Hz 时,种群抛掷高度较低且空间分布相对集中,随着频率的逐渐增大,种群离散程度加剧,在频率 11 ~ 12 Hz 时种群离散程度比较理想。随着频率进一步加大至 13 Hz,种盘振动强度相对较大造成种群空间分布密度减小,种子在各层分布的波动显著,易产生漏吸,导致吸种精度不高。可以看出,在相同种层数、振幅下,频率对于种子的运动影响显著,增大频率能有效增大种盘振动强度。因此,振动频率控制在 11 ~ 12 Hz,选择合适的其他相关参数,使得种子相互分离达到“沸腾”,从而得到种群的分布规律以及相应的分布区域。

### 2.2 振幅对种群空间分布影响

在相同的频率下选择不同振幅,分析其对种子离散程度的影响。在频率  $f = 11$  Hz,分别选择振幅  $A$  为 11、12、13、14 mm。由图 6 可知,相同振动频率

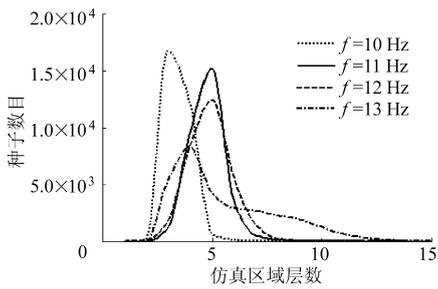


图5 不同频率下种群空间分布曲线

Fig.5 Spatial distribution curves of seeds under different frequencies

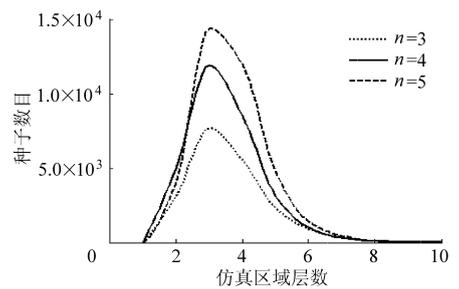


图7 不同种层下种群空间分布曲线

Fig.7 Spatial distribution curves of seeds under different seeds thickness

下,随着振幅的逐渐加大种群抛掷高度以及离散程度也相应增大。在振幅为 11 mm 时,种群抛掷高度以及离散程度不够,随着振幅增大到 12 mm,种群离散程度及抛掷高度比较理想,在振幅为 13 mm 时,种群离散程度及抛掷高度稍有增大,随着振幅进一步增大至 14 mm,种群离散程度过大,因此振幅可选为 12~13 mm。

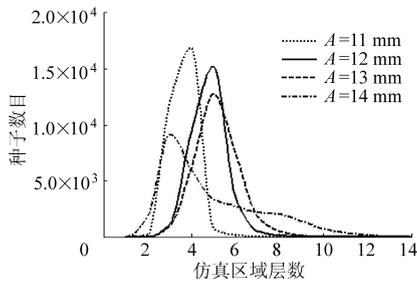


图6 不同振幅下种群空间分布曲线

Fig.6 Spatial distribution curves of seeds under different amplitudes

### 2.3 种层数对种群空间分布影响

种群在不同种层而其他相关参数不变的情况下运动,离散程度有所差异,即种群在空间分布密度不同。分别选择种群层数  $n$  为 3、4、5,分析种群在空间分布情况。由图 7 可知,种群在此 3 种不同层数下运动,离散程度相近,种层不同导致在仿真区域种子数目有区别。当  $n=2$  时,离散过大易造成漏吸, $n>6$  时离散程度不够。因此,种层数的选择范围可以取为 3~5,在此参数范围内选择合适的其他相关参数,能够使得种群离散程度比较理想,种群在不同时间点、相同空间区域分布状态相近,比较利于吸种。

### 2.4 种群在定参数下分布情况

由图 5、6 可知,种盘振动频率  $f$  可选为 11~12 Hz,振幅  $A$  可选为 12~13 mm,结合图中种群空间分布曲线,选择振动频率  $f=11$  Hz,振幅  $A=12$  mm,由图 7 选择种群初始层  $n=4$ ,在此参数下对种群运动进行仿真。

在该参数下种群离散程度理想,空间分布均匀,

利于吸种。由图 8 可知,种子在不同时间各仿真区域层分布具有一定的规律性,且种子数目最大值与最小值差异并不显著。种群主要分布在仿真区域层  $c=2\sim5$ ,种子数量随着时间的变化有一定的波动。由于 2、3、4 层在第 5 层下面,吸盘难以吸种。因此,选择  $c=5$  为吸种层数,对应的吸种盘吸种距离为  $Z$  轴方向距离种盘平衡位置上方 30 mm 左右。在此基础上设计吸种盘吸种定位装置,从而使得吸种效果理想且便于吸种操作。

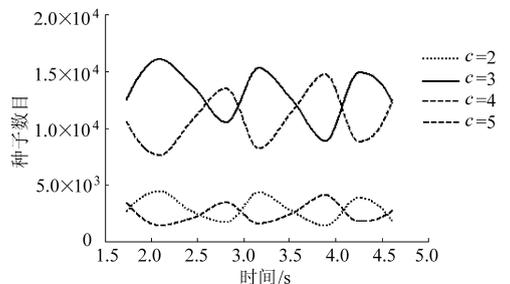


图8 固定参数下种群在各仿真区域层分布曲线

Fig.8 Distribution curves of seeds under different simulation areas with fixed parameters

## 3 播种器吸种性能试验

选取振动频率、振幅、种层数、吸种距离为试验因素,选用  $L_{16}(4^5)$  表在播种机试验台上进行正交试验,试验结果如表 2 所示。

由正交试验结果分析可知,各因素对吸种率的影响由大到小排序为吸种距离、振动频率、振幅、种层数。最优水平为频率  $f=11$  Hz、振幅  $A=12$  mm、 $n=4$ 、吸种距离为 30 mm,与理论分析结果相符。

基于正交试验结果,在气吸振动式播种机试验台上进行吸种性能试验,选取振动种盘频率范围为 8~12.5 Hz,振幅为 12 mm,初始种层数约为 4,吸种距离为 30 mm;吸种盘尺寸为 560 mm×325 mm,吸种孔为直径 2 mm 直孔,孔间距为 15 mm;气源选用最大风压为 0.02 MPa 的气泵。排种器吸种率与振动频率之间关系如图 9 所示。可以看出,吸种率随着种盘振动频率先增大,当增至 11 Hz 时,种子的吸

表 2 正交试验设计及结果

Tab. 2 Results of orthogonal experiments

试验号	振动频率	振幅	初始	吸种距离	吸种率
	/Hz	/mm	种层数	/mm	/%
1	10	11	3	25	72.27
2	10	12	4	30	83.73
3	10	13	5	35	75.47
4	10	14	6	40	61.60
5	11	11	4	35	82.13
6	11	12	3	40	76.53
7	11	13	6	25	84.27
8	11	14	5	30	89.07
9	12	11	5	40	65.07
10	12	12	6	35	74.67
11	12	13	3	30	81.87
12	12	14	4	25	75.47
13	13	11	6	30	76.53
14	13	12	5	25	72.53
15	13	13	4	40	62.13
16	13	14	3	35	68.27
I	293.07	296.00	298.94	304.54	
II	332.00	307.46	303.46	331.20	
III	297.08	303.74	302.14	300.54	
IV	279.46	294.41	297.07	265.33	
R	52.54	13.05	6.39	65.87	

种率达到最大,随着种盘振动频率的继续增大,种群离散程度加剧,空间分布密度减小,导致吸种盘的漏吸,吸种率随之下降。该试验结果与仿真结果吻合,证明了离散元分析的准确性。

## 4 结论

(1) 在相同振幅下,频率对种群空间分布密度

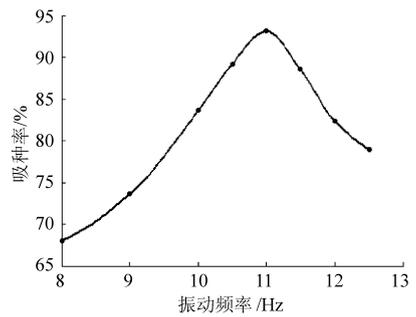


图 9 吸种率与种盘振动频率关系曲线

Fig. 9 Relationship between pickup ration and vibration frequency

影响显著,当频率为 11 ~ 12 Hz 时种群离散程度较理想,利于吸种盘吸种。

(2) 在振动频率相同情况下,振幅对种子离散程度具有一定的影响,由分析可知振幅选择范围为 12 ~ 13 mm。

(3) 种群在不同种层数下运动离散程度不同,种层数少导致离散剧烈,造成种子易漏吸,种层数过多离散程度不够,不能让种子“沸腾”。当种层数为 3 ~ 5,种群能够“沸腾”,且此时种群离散程度理想。

(4) 当频率为 11 Hz、振幅为 12 mm、初始种层数为 4 时,运用 EDEM 软件对种群运动情况进行仿真,得出在该参数下种群能够“沸腾”且在不同时间各区域种子分布趋于均匀,比较利于吸种。

(5) 选取种盘振动频率、振幅、种层数、吸种距离为试验因素进行正交试验,得出频率为 11 Hz、振幅为 12 mm、初始种层数为 4、吸种距离为 30 mm 时吸种效果理想。利用该参数在播种机试验台上进行吸种性能试验,吸种效果良好。

## 参 考 文 献

- 周海波,马旭,姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报,2008,24(4):301~306.  
Zhou Haibo, Ma Xu, Yao Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(4):301~306. (in Chinese)
- Karayel D, Barut Z B, Özmerzi A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder [J]. Biosystems Engineering,2004,87(4):437~444.
- 陈进,李耀明,王希强,等. 气吸式排种器吸种孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(9):59~62.  
Chen Jin, Li Yaoming, Wang Xiqiang, et al. Finite element analysis for the sucking nozzle air field of air-suction seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(9):59~62. (in Chinese)
- 袁月明,马旭,梁旭,等. 气吸式水稻芽种直播排种器性能的试验研究[J]. 吉林农业大学学报,2004,26(6):690~693.  
Yuan Yueming, Ma Xu, Liang Xu, et al. Study on direct seeding mechanism of air suction with rice bud-sowing [J]. Journal of Jilin Agricultural University,2004,26(6):690~693. (in Chinese)
- Sigh R C, Singh G, Saraswat D C. Optimization of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds [J]. Biosystems Engineering,2005,92(4):429~438.

(下转第 100 页)

## 参 考 文 献

- 1 Frost A R. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1990, 46: 55 ~ 70.
- 2 Ghate S R, Perry C D. Ground speed control of pesticide application rates in a compressed air direction pesticide sprayer[J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(1): 33 ~ 38.
- 3 Ghate S R, Phatak S C. A compressed air direct injection pesticide sprayer[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 1991, 7(2): 158 ~ 162.
- 4 邱白晶,徐溪超,杨宁,等. 射流混药装置主参数分析的数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6): 76 ~ 79,69.  
Qiu Baijing, Xu Xichao, Yang Ning, et al. Numerical simulation on main structure parameters of jet-mixing apparatus[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6): 76 ~ 79,69. (in Chinese)
- 5 Vondricka J, Hloben P, Lammers P S. Optimization of direct nozzle injection system for site-specific herbicide application [C]. 2007 ASABE Annual Meeting, Paper Number 071085, 2007.
- 6 Vondricka J, Lammers P S. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems[J]. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(1): 61 ~ 66.
- 7 刘志壮,徐汉虹,洪添胜,等. 在线混药式连续可变量喷雾系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 93 ~ 96,129.  
Liu Zhizhuang, Xu Hanhong, Hong Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(12):93 ~ 96,129. (in Chinese)
- 8 John D, Nalewaja G, Robert G R, et al. Pesticide formulations and application systems: 18th vol. (STP 1347) [M]. ASTM International, 1998.
- 9 Downey D, Crowe T G, Giles D K, et al. Direct nozzle injection of pesticide concentrate into continuous flow for intermittent spray applications[J]. *Transactions of the ASABE*, 2005, 49(4): 865 ~ 873.
- 10 Kooijman H A. A modification of the stokes-einstein equation for diffusivities in dilute binary mixtures [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002, 41(13): 3 326 ~ 3 328.
- 11 Vondricka J, Lammers P S. Real-time controlled direct injection system for precision farming[J]. *Precision Agriculture*, 2009, 10(5): 421 ~ 430.
- 12 Pianthong K, Seehanam W, Behnia M. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(9): 2 556 ~ 2 564.
- 13 Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic, 1972.
- 14 Mickailly-Huber E S, Bertrand F, Tanguy P, et al. Numerical simulations of mixing in an SMRX static mixer[J]. *Chemical Engineering Journal*, 1996, 63(2): 117 ~ 126.

## (上接第 83 页)

- 6 赵湛,李耀明,陈进,等. 种群空间分布状态对排种器吸种性能的影响[J]. *江苏大学学报:自然科学版*,2009,30(6): 559 ~ 563.  
Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Influence of seeds spatial distribution on suction performance of precision vacuum seeder [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*,2009,30(6):559 ~ 563. (in Chinese)
- 7 吴爱祥,孙业志,刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- 8 刘彩玲,宋建农. 种盘振动对气吸振动式精量播种装置工作性能的影响[J]. *中国农业大学学报*,2004,9(2):12 ~ 14.  
Liu Cailing, Song Jiannong. Influence of seed tray vibration on work performance of suction-vibration type precision seed device[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(2):12 ~ 14. (in Chinese)
- 9 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- 10 杨玲,杨明金,李庆东,等. 包衣稻种物理特性的试验研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(9):7 ~ 11.  
Yang Ling, Yang Mingjin, Li Qingdong, et al. Experimental study on physical properties of coated rice seed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2005,21(9):7 ~ 11. (in Chinese)
- 11 张石平,陈进,李耀明. 振动气吸式穴盘精量播种装置种子“沸腾”运动分析[J]. *农业工程学报*,2008,24(7):20 ~ 24.  
Zhang Shiping, Chen Jin, Li Yaoming. Analysis of seeds ‘Boiling’ motion on vibrational air-suction tray seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7):20 ~ 24. (in Chinese)
- 12 李季成,权龙哲,罗立娜. 稻米含水率对其弹性模量的影响[J]. *东北农业大学学报*,2008,39(4):1 ~ 3.  
Li Jicheng, Quan Longzhe, Luo Li'na. Influences of brown rice grain's water ratio on elastic modulus [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*,2008,39(4):1 ~ 3. (in Chinese)
- 13 华大年. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社 1994.