

气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析^{*}

李耀明¹ 赵湛¹ 陈进² 徐立章¹

(1. 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; 2. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 根据离散元法的基本思想, 采用线性弹簧-阻尼-滑动接触力学模型, 编写 Matlab 模拟程序, 分析了气吸振动式精密排种器振动种盘内种群的三维运动规律。为了描述籽粒离散分布程度, 给出了体积膨胀系数的计算公式。结果表明, 种盘作小幅高频振动, 种群可以产生向上抛掷运动而有效分离; 膨胀系数随着振动强度的增加而增大, 随种层厚度的增加而减小。分析了摩擦因数和碰撞恢复系数对不同层厚种子膨胀系数的影响。在初始层厚参数 $h_s \approx 3.8$ 、振动强度 $k_v = 5.65$ 时, 种子具有理想的运动状态, 通过性能试验得到排种器的吸种率达 98%。

关键词: 精密排种器 种群三维运动 离散元法 数值模拟 性能试验

中图分类号: S126; O347.7

文献标识码: A

Discrete Element Method Simulation of Seeds Motion in Vibrated Bed of Precision Vacuum Seeder

Li Yaoming¹ Zhao Zhan¹ Chen Jin² Xu Lizhang¹

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

A Matlab program based on the discrete element method was developed to simulate the seeds motion in a 3-D vibrated seeder bed. The mechanical interactions force between seeds and also between seeds and the bed were modeled by linear springs, dash-pots and friction sliders. The cubic expansion coefficient, H , was calculated to describe the discrete distribution level of seeds. The simulation results show that, the seeds are separated effectively while the bed vibrated with high frequency and small amplitude, H increases with the increasing vibration strength, k_v , and decreases with the seeds initial thickness, h_s . The influences of friction coefficient and recovery coefficient on H were analyzed. The ideal active state was obtained at $h_s \approx 3.8$ and $k_v = 5.65$. The experimental results also show that the seeds pickup ratio is more than 98%.

Key words Precision seeder, Seeds 3-D motion, Discrete element method, Numerical simulation, Performance tests

引言

精密播种是现代化农业发展的一个重要方向, 精密排种器是实现穴盘机械化育苗的核心部件。气吸式排种器具有对种子尺寸要求不高、不伤种子、通用性好和适应性强的特点, 可以大大提高播种速度, 是一种较为先进的排种装置, 成为当前农业机械研

究的热点^[1~3]。通过对种盘施加振动, 种子产生向上的抛掷运动而相互分离, 可以减小籽粒间的摩擦力, 提高吸种性能。目前, 气吸式排种器的理论研究还很不完善, 对其工作性能的分析主要还是依赖于试验方法^[4~5]。

种子在种盘内的运动具有类似于流体的力学特性, 存在着复杂的相互碰撞和摩擦作用力, 对单粒种

收稿日期: 2008-05-01 修回日期: 2008-06-16

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060299004)和江苏大学现代农业装备与技术江苏省重点实验室开放基金资助项目(NZ200703)

作者简介: 李耀明, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业机械设计及理论研究, E-mail: ymli@ujs.edu.cn

子运动规律的研究不能很好地反映实际工作情况^[4]。本文利用离散元法(discrete element method, 简称DEM)数值模拟种群在振动种盘中的三维运动,分析模拟参数对种子离散程度的影响。

1 离散元法

离散元法被广泛地应用于散粒体在复杂物理场作用下的力学行为、多相混合材料介质或具有复杂结构的材料力学特性的研究以及模拟边坡、滑坡、地下水渗流等力学过程的计算中^[6~8]。复杂三维散体模型的本构关系很难建立,数据结构也非常烦琐,要求计算机具有较大的容量和很快的速度。本文根据种子的几何形状,假设单元模型为大小、质量均匀一致的球体,其碰撞过程受力如图1所示。

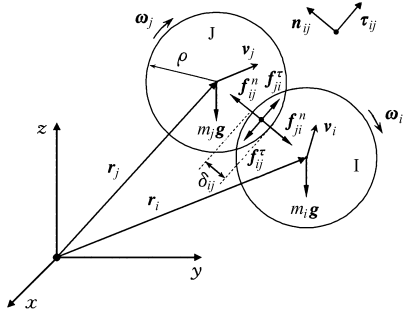


图1 种子碰撞过程受力图

Fig.1 Impact force diagram of seeds

种子 I 的运动微分方程为

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^n (\mathbf{f}_{ij}^n + \mathbf{f}_{ij}^\tau) + m\mathbf{g} \quad (1)$$

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \rho \mathbf{n}_{ij} \times \mathbf{f}_{ij}^\tau \quad (2)$$

式中 m ——种子质量,kg n ——籽粒数
 ρ ——种子半径,m \mathbf{r}_i ——中心位置矢量
 I ——转动惯量,kg·m²
 $\boldsymbol{\omega}_i$ ——转动角速度,rad/s
 \mathbf{f}_{ij}^n ——法向接触力,N
 \mathbf{f}_{ij}^τ ——切向接触力,N

2 种子接触模型

接触力学模型是离散元分析的核心,其中弹簧-阻尼-滑动模型(spring-dashpot-slider model)在农业机械工作部件的设计研究中被广泛采用^[9~11]。如图2所示,该模型假定离散单元为准刚性,即每个单元在计算过程中保持其形状和体积不变,接触力通过弹簧、阻尼和滑动摩擦器的变形所产生,用动态松弛法进行循环叠代计算,计算按照时步进行,在每一个时步都更新单元的位置,通过对系统中每个单元的微观运动过程进行跟踪,从而得到整个系统的宏

观运动规律。

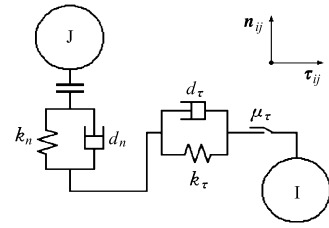


图2 接触力学模型

Fig.2 Models of contact forces

接触力的法向和切向分量可以表示为

$$\mathbf{f}_{ij}^n = k_n \delta_{ij} \mathbf{n}_{ij} - d_n \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_{ij}^\tau = -\min(k_\tau \boldsymbol{\xi}_{ij} + d_\tau \mathbf{v}_{ij}, \mu_\tau |\mathbf{f}_{ij}^n|) \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (4)$$

式中 k_n ——法向接触刚度,N/m

k_τ ——切向接触刚度,N/m

d_n ——法向阻尼系数,N·m/s

d_τ ——切向阻尼系数,N·m/s

δ_{ij} ——法向重合量,m

$\boldsymbol{\xi}_{ij}$ ——切向位移,m

μ_τ ——籽粒间滑动摩擦因数

\mathbf{n}_{ij} ——法向单位向量

$\boldsymbol{\tau}_{ij}$ ——切向单位向量

\mathbf{v}_{ij} ——相对速度,m/s

其中 $\delta_{ij} = 2\rho - |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| \cdot \mathbf{n}_{ij} \quad (5)$

$$\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j + \mathbf{n}_{ij} \times \rho(\boldsymbol{\omega}_i + \boldsymbol{\omega}_j) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j$ ——籽粒 I、J 的速度

阻尼系数为

$$d_{n,\tau} = -2 \ln e \sqrt{\frac{k_n, m_0}{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (7)$$

其中 $k_n = \frac{k_i k_j}{k_i + k_j}$ $k_\tau = \lambda k_n$ $m_0 = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$

式中 e ——碰撞恢复系数

λ ——系数,一般取 2/3~1^[11]

3 数值模拟

根据上述离散元分析,利用显式中心差分求解法编写 Matlab 模拟程序,迭代位移和速度关系为

$$\mathbf{v}_i(t) = \frac{1}{2} [\mathbf{v}_i(t + \Delta t/2) + \mathbf{v}_i(t - \Delta t/2)] \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i(t) = \frac{1}{2} [\boldsymbol{\omega}_i(t + \Delta t/2) + \boldsymbol{\omega}_i(t - \Delta t/2)] \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_i(t + \Delta t/2) = \mathbf{v}_i(t - \Delta t/2) + \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} \Delta t \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i(t + \Delta t/2) = \boldsymbol{\omega}_i(t - \Delta t/2) + \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} \Delta t \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_i(t + \Delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{v}_i(t + \Delta t/2) \Delta t \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{ij}(t + \Delta t) = \boldsymbol{\xi}_{ij}(t) + \mathbf{v}_{ij} \Delta t \quad (13)$$

式中 Δt ——迭代时间步长

为使迭代运算稳定,应设定 Δt 小于固有振动周期 $T=2\pi\sqrt{m/k}$,时步也不宜选得过小,以免系统出现振荡并使计算时间延长,通常取 $\Delta t=(1/8\sim 1/20)T$ 。

根据油菜种子的一般力学特性,选择模拟参数^[7,12]: $\rho=1.4\text{ mm}$, $k_n=15\ 000\text{ N/m}$, $d_n=0.236\ 0\text{ N}\cdot\text{m/s}$, $k_\tau=10\ 000\text{ N/m}$, $d_\tau=0.192\ 7\text{ N}\cdot\text{m/s}$, $\mu_\tau=0.2$, $m=0.02\text{ g}$, 种子与种子的碰撞恢复系数 $e=0.5$, 种子与种盘的法向接触刚度 $30\ 000\text{ N/m}$ 、法向阻尼系数 $0.333\ 8\text{ N}\cdot\text{m/s}$ 、切向接触刚度 $20\ 000\text{ N/m}$ 、切向阻尼系数 $0.272\ 5\text{ N}\cdot\text{m/s}$ 、碰撞恢复系数 0.5 、摩擦因数 0.3 , 迭代时间步长 $\Delta t=0.01\text{ ms}$ 。

首先,在种盘上方随机生成 600 粒种子,如图 3a 所示。在重力作用下,种子自然下落,经过一段时间后稳定堆积于台面,如图 3b 所示。文献[4]分析得到了种盘振动微分方程,在频率为 18 Hz 、振幅 4.3 mm 时,振动强度 $k_v=5.65$,种子被抛起后分布如图 3c 所示。

从图 3 中可以看出,种盘作小幅高频振动可以使种子产生向上的抛掷运动而相互分离。从数值模拟结果发现,种子的离散状态与种盘振动强度、种层厚度、种子摩擦因数以及碰撞恢复系数都有关系。本文采用体积膨胀系数 H 来描述种子的离散程度, H 为一个无量纲数,定义为

$$H = \frac{1}{th_s} \int_0^t h_v(t) dt \quad (14)$$

$$h_{s,v} = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \min(z_i))}{n\rho} + 1 \quad (15)$$

式中 h_s ——经过振动密实后的种子初始层厚参数

h_v ——振动过程中的种子平均层厚参数

z_i ——种子在种盘垂直方向坐标

t ——采样时间

由于 h_v 是与振动参数有关的变化量,因此取振

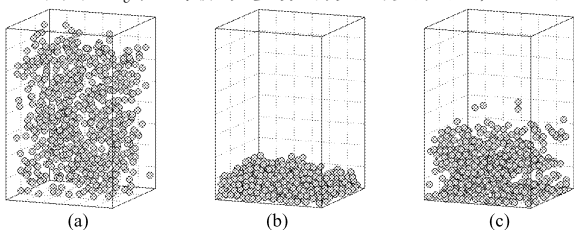


图 3 种群运动状态

Fig. 3 Motion state of seeds

(a) 随机生成籽粒空间分布状态 (b) 籽粒自然堆积状态

(c) 振动过程籽粒运动状态

动稳定后 t 时间段内的平均值。

4 模拟参数对膨胀系数的影响

根据散粒体力学理论,种子在运动过程中发生碰撞的几率以及触点作用力均与层厚有关。模拟结果也显示,在相同振动参数条件下,不同层厚种子的运动状态和膨胀系数也不同。本文选择 3 种初始层厚参数 h_s 为 1.95 、 3.78 和 6.73 ,分析各参数与膨胀系数的关系。

4.1 振动强度

种盘在振动强度分别为 1.67 、 2.49 、 4.19 、 5.65 和 7.08 (频率 13.3 、 15.0 、 17.0 、 18.0 和 18.7 Hz , 振幅 2.3 、 2.7 、 3.6 、 4.3 和 5.0 mm) 时,种子的膨胀系数如图 4 所示。

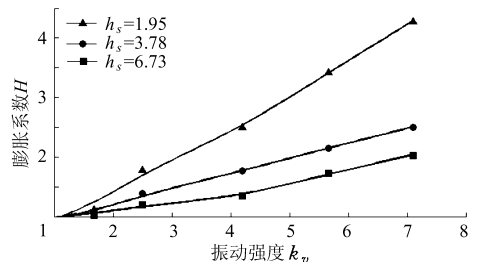


图 4 膨胀系数随振动强度的变化曲线

Fig. 4 Expansion coefficient change with vibration intensity

可以看出,对于不同层厚的种子,膨胀系数均随振动强度的增加而增大;在相同振动强度下,膨胀系数随种子层厚的增加而减小。由于增加振动强度,种子的抛掷高度和波动也随之加剧,而种层过薄,种子的空间分布密度减小,均可能造成漏吸,不利于提高吸种精度。因此,排种器种盘内初始层厚 h_s 应选择在 $3\sim 5$ 范围内,对于不同厚度的种群,可以通过控制种盘振动强度实现种群的空间离散分布,膨胀系数 H 应控制在 $2\sim 3$ 范围内,种子能够相互分离呈“沸腾”运动状态,是比较理想的工作情况。

4.2 籽粒间摩擦因数

在振动强度 $k_v=5.65$ 时,种子间摩擦因数分别取 0.05 、 0.20 、 0.35 、 0.50 和 0.75 ,种子的膨胀系数如图 5 所示。在强振动条件下,由于假设种子为大小、质量均匀一致的球体,籽粒以原地垂直抛掷运动为主,在台面的水平方向滑动位移较小,种子间的摩擦因数对种子离散度的影响并不显著。

4.3 恢复系数

种子在种盘中振动时,主要存在 2 种碰撞运动,即种子与种盘之间的碰撞和种子之间的碰撞。图 6 为在振动强度 $k_v=5.65$ 时,碰撞恢复系数与膨胀系数的关系曲线。其中,图 6a 中籽粒间碰撞恢复系数

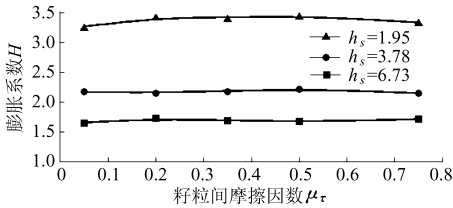


图 5 摩擦因数对膨胀系数的影响曲线

Fig.5 Friction coefficient effect on expansion coefficient

为 0.50, 种子与种盘的碰撞恢复系数为 0.20、0.35、0.50、0.65 和 0.80; 图 6b 中, 种子与种盘的碰撞恢复系数为 0.50, 籽粒间碰撞恢复系数为 0.20、0.35、0.50、0.65 和 0.80。可以看出, 对于薄层种子, 随着恢复系数的增加, 膨胀系数有明显的增大趋势, 随着种层厚度的增加, 恢复系数的影响逐步减弱。

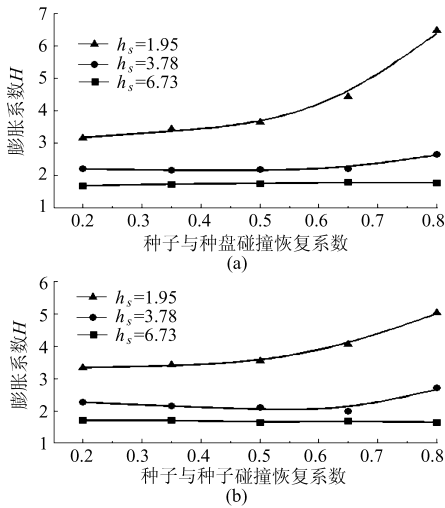


图 6 碰撞恢复系数对膨胀系数的影响曲线

Fig.6 Recovery coefficient effect on expansion coefficient

(a) 种子与种盘 (b) 种子与种子

5 排种器性能试验

以油菜种子为对象, 进行排种器性能试验。在种盘内铺设均匀薄层种子, 测得初始层厚 $h_s \approx 3.8$, 采用直径为 1 mm 的锥形吸孔元件, 调节气压差为 2 kPa, 种盘振动频率范围 13~20 Hz, 排种器吸种率

如图 7 所示。可以看出, 吸种率首先随着种盘振动频率的增大而逐步增加, 在频率 18 Hz、振幅 4.3 mm、振动强度 5.65 时, 种子运动出现“沸腾”状态, 此时的吸种效果最好, 吸种率达 98%。随着振动频率的进一步增大, 种子的抛掷高度增加, 空间分布密度降低, 吸种率呈现明显下降趋势。试验结果与理论分析基本一致, 从而验证了离散元方法分析的正确性。

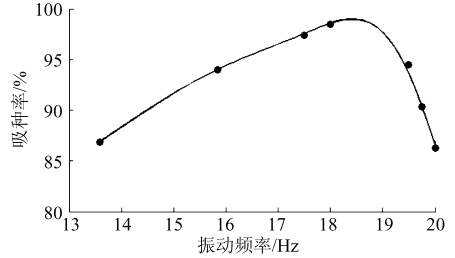


图 7 吸种率与种盘振动频率的关系曲线

Fig.7 Relationship between pickup ratio and vibration frequency

6 结论

(1) 种盘采用小幅高频振动, 可以使种子相互分离, 且离散程度随着振动强度的增加而增大。种层厚度对种子运动规律影响显著, 薄层种子更容易分离。

(2) 排种器种盘内初始层厚 h_s 应选择在 3~5 范围内, 通过控制种盘振动强度实现种群的空间离散分布, 膨胀系数 H 控制在 2~3 范围内。

(3) 在强振动条件下, 籽粒以原地垂直抛掷运动为主, 种子间的摩擦因数对其运动状态影响不明显。

(4) 对于薄层种子, 随着种子与种盘、种子与种子之间的碰撞恢复系数的增大, 膨胀系数有明显增大的趋势, 随着层厚的增加, 这一趋势逐渐减弱。

(5) 排种器性能试验表明: 在油菜种子初始层厚参数 $h_s \approx 3.8$ 、振动强度 $k_v = 5.65$ 时, 排种器的吸种率达 98%, 这与理论分析结论相互吻合。

参 考 文 献

- 1 Karayel D, Barut Z B, Özmerzi A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437~444.
- 2 Guarella P, Pellerano A, Pascuzzi S. Experimental and theoretical performance of a vacuum seeder nozzle for vegetable seeds [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 64(1): 29~36.
- 3 Singh 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.
- 4 陈进, 李耀明. 气吸振动式播种试验台内种子运动规律的研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 47~50. Chen Jin, Li Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33 (1): 47~50. (in Chinese)

- 2 Lamers J G, Perdok U D, Lumkes L M, et al. Controlled traffic farming systems in the Netherlands[J]. *Soil and Tillage Research*, 1986, 8: 65~76.
- 3 杜兵, 周兴祥. 节约能耗的固定道耕作法[J]. *中国农业大学学报*, 1999, 4(2): 63~66.
Du Bing, Zhou Xingxiang. Energy saving of controlled traffic tillage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1999, 4(2):63~66. (in Chinese)
- 4 高焕文. 保护性耕作技术与机具[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- 5 姚宗路. 小麦对行免耕播种机的改进研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Yao Zonglu. Improved design of row-follow no-till wheat planter [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 6 廖庆喜, 高焕文, 舒彩霞. 免耕播种机防堵技术研究现状与发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 108~112.
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Shu Caixia. Present situations and prospects of anti-blocking technology of no-tillage planter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 108~122. (in Chinese)
- 7 Tice H. Disk coulter force: evaluation of mathematical models[J]. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(6): 2 291~2 298.
- 8 魏延富. 机电伺服触觉式秸秆导向系统试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Wei Yanfu. Study on the strip chopping anti-blocking no-till planter [D]. Beijing: China Agriculture University, 2005. (in Chinese)
- 9 张晋国, 高焕文, 杨光. 不同条件下麦秸切碎效果的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(3): 70~72.
Zhang Jinguo, Gao Huanwen, Yang Guang. Study on the chopping property of wheat straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(3): 70~72. (in Chinese)
- 10 张晋国, 高焕文. 免耕播种机新型防堵装置的研究[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(4): 33~35.
Zhang Jinguo, Gao Huanwen. Study on the strip chopping anti blocking mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(4): 33~35. (in Chinese)
- 11 姬江涛, 李庆军, 蔡苇. 刀具布置对茎秆切碎还田机振动的影响[J]. *农机化研究*, 2003(4): 63~64.
Ji Jiangtao, Li Qingjun, Cai Wei. Influence analysis of cutter arrangement on the vibration of field straw chopper[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2003(4): 63~64. (in Chinese)
- 12 田斌, 韩少平, 吴建民. 2BMFSG-3/6型固定道作业免耕施肥播种机的设计[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(6): 187~189, 198.

~~~~~

(上接第 59 页)

- 5 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)
- 6 Theuerkauf J, Witt P, Schwesig D. Analysis of particle porosity distribution in fixed beds using the discrete element method [J]. *Powder Technology*, 2006, 165(2): 92~99.
- 7 Tatemoto Y, Mawatari Y, Yasukawa T, et al. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(2): 437~447.
- 8 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述[J]. *力学进展*, 2003, 33(4): 483~490.  
Liu Kaixin, Gao Lingtian. A review on the discrete method[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(4): 483~490. (in Chinese)
- 9 Goda T J, Ebert F. Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos[J]. *Powder Technology*, 2005, 158(1): 58~68.
- 10 Yang S C, Hsiao S S. The simulation of powders with liquid bridges in a 2D vibrated bed[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(24): 6837~6849.
- 11 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.
- 12 Güner M. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(3): 904~913.
- 13 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器吸种性能数值模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 95~99, 104.  
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin, et al. Numerical simulation and experiment on the seeds pickup performance of precision air-suction seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10): 95~99, 104. (in Chinese)