

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.017

水稻籽粒碰撞力学特性研究*

赵 湛¹ 李耀明¹ 陈 义¹ 梁振伟¹ 刘丽霞²

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080)

摘要: 根据水稻籽粒的物理特性建立了椭球体颗粒模型, 采用离散元法模拟了籽粒与检测传感器碰撞力学过程。结果表明: 对心碰撞时的峰值法向接触力 $F_{n \max}$ 随着曲率半径的增加而增大, 偏心碰撞时籽粒将发生转动, $F_{n \max}$ 随着法向重叠量的减小而减小; $F_{n \max}$ 的差异随着粒径比 γ 的增加而增大, 当 $\gamma = 3$ 时峰值力比率 η 的最小值小于 45%。斜碰撞时 η 的变化呈现出不对称特性, 且 η 的变化范围也随之增大, 当 $\gamma = 3$ 时 η 的最小值约为 30%, 接触力上升时间 t_r 为 14 ~ 26 μs 。采用 PVDF 压电薄膜作为敏感元件设计了检测传感器, 并进行了水稻籽粒冲击力学试验。结果表明, 在相同碰撞速度下, 输出电压峰值在 2 ~ 4 V 范围内波动, 接触力上升时间 t_r 为 15 ~ 35 μs 。

关键词: 水稻籽粒 椭球颗粒 离散元法 碰撞 力学特性

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0088-05

Impact Mechanical Characteristics Analysis of Rice Grain

Zhao Zhan¹ Li Yaoming¹ Chen Yi¹ Liang Zhenwei¹ Liu Lixia²

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. China National Machinery Industry Corporation, Beijing 100080, China)

Abstract: An ellipsoid particle model was established according to the physical properties of rice grain. The discrete element method was used to simulate the impact process of a grain with a detection sensor. The results indicated that the peak normal contact force $F_{n \max}$ was increased with the increasing of curvature radius during the central impact process. Rotation of grain was driven during the eccentric impact process which reduced the value of $F_{n \max}$. The differences of $F_{n \max}$ was enlarged with the increasing of grain radius ratio γ , and the minimal value of peak force ratio η was lower than 45% with γ of 3. The asymmetric variation behavior of η was shown during the oblique impact process and the variation range of η was increased. The minimal value of peak force ratio η was about 30% with γ of 3. The rise time of impact force t_r was in the range of 14 ~ 26 μs . Then, a detection sensor using piezo-electric polyvinylidene fluoride (PVDF) film as sensitive material was presented and the rice grains impact tests were carried out. The results showed that the peak output voltage was fluctuated in 2 ~ 4 V, and the rise time of impact force t_r was 15 ~ 35 μs .

Key words: Rice grain Ellipsoid Discrete element method Impact Mechanical properties

引言

联合收获机在田间作业时, 不可避免地会产生各种谷物损失, 主要形式为清选损失和夹带损失, 损失率是衡量联合收获机作业性能的重要技术指标, 也是工作参数调控的主要依据。实现联合收获机工

作过程中谷物损失检测的核心问题就是研制检测传感器, 国内外正在积极开展这一研究, 并且取得了一些成果^[1-3], 主要方法是利用压电材料检测籽粒撞击信号, 通过对检测信号进行鉴别处理, 得到损失谷物的数量。水稻是我国最主要的粮食作物, 由于品种不同, 水稻籽粒的物理特性和几何形态差异显著,

收稿日期: 2012-04-24 修回日期: 2012-06-05

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20103227120010)、中国博士后科学基金资助项目(20110490124)、江苏省博士后科研基金资助项目(1102131C)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PADP)

作者简介: 赵湛, 助理研究员, 博士, 主要从事现代农业机械设计及理论研究, E-mail: zhaozhan@ujs.edu.cn

使得撞击过程更加复杂,因此要准确鉴别籽粒撞击信号,有必要对籽粒与传感器碰撞力学特性进行研究。

离散元法(Discrete element method, DEM)是一种用于解决非连续介质力学问题的数学方法,它采用牛顿运动定律和时步迭代计算颗粒单元的微观运动过程。近年来,离散元法逐步应用于农业散体物料的运动分析和农业机械工作部件的设计领域,Wojtkowski等采用不同接触力学模型计算了油菜籽粒与平面的碰撞运动过程,Sakaguchi等采用离散元法模拟了稻谷和糙米振动分选的过程,李耀明等模拟了精密排种器振动种盘中油菜种群的运动特性,孙裕晶等动态仿真了大豆的精密吸排种过程^[4-8]。由于非球体颗粒模型的本构关系很难建立,数据结构非常烦琐,接触判断复杂,因而上述研究中的离散单元主要采用球体模型,与实际物料差别较大,造成计算结果存在一定误差。本文根据水稻籽粒的几何形态,采用椭球体颗粒建立籽粒模型,利用离散元法数值计算籽粒与检测传感器碰撞过程的力学特性。

1 离散元模型

1.1 水稻籽粒模型

水稻籽粒通常呈现为椭球体,其几何形态的差异主要表现为长轴与短轴的比例关系,因此定义无量纲参数粒径比 γ 进行描述,即

$$\gamma = a/b \quad (1)$$

式中 a ——籽粒的长轴长度

b ——籽粒的短轴长度

γ 取值通常为1~3。

根据水稻籽粒的一般力学特性^[9],设定参数为:泊松比0.25,弹性模量375 MPa,密度1350 kg/m³,千粒质量28 g;碰撞平面为厚度1 mm的不锈钢薄板,泊松比0.29,弹性模量75 000 MPa,密度8 000 kg/m³,碰撞恢复系数0.5,滑动摩擦因数0.56,滚动摩擦因数0.02,建立的水稻籽粒模型如图1所示。

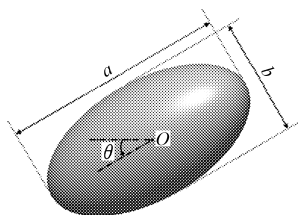


图1 水稻籽粒模型

Fig.1 Model of rice grain

1.2 籽粒碰撞运动方程

籽粒的碰撞运动微分方程可以表示为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_n + F_\tau + mg \quad (2)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = F_n r \cos\theta - F_\tau r \sin\theta \quad (3)$$

式中 m ——籽粒质量 x ——籽粒中心位移
 I ——籽粒转动惯量 ω ——转动角速度
 F_n ——法向接触力 F_τ ——切向接触力
 r ——籽粒中心到接触点的距离
 θ ——碰撞角度,即碰撞平面与籽粒长轴之间的夹角

接触模型是离散元法的核心,它以接触力学为基础,通过弹性理论对颗粒之间的碰撞问题进行预测,农业物料广泛采用 Hertz - Mindlin 接触力学模型^[10],因此本文采用该模型计算籽粒受力运动过程,法向接触力 F_n 、切向接触力 F_τ 分别为^[11]

$$F_n = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} \delta_n^{3/2} \quad (4)$$

$$F_\tau = -S_\tau \delta_\tau \quad (5)$$

式中 R ——等效接触半径
 δ_n ——法向叠合量 δ_τ ——切向叠合量
 E^* ——等效弹性模量

法向阻尼力 F_n^d 、切向阻尼力 F_τ^d 分别为

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

$$F_\tau^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta v_\tau^{\text{rel}} \sqrt{S_\tau m} \quad (7)$$

其中 $S_n = 8E^* \sqrt{Ra}$ $S_\tau = 8G^* \sqrt{Ra}$

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$$

式中 v_n^{rel} ——法向相对速度
 v_τ^{rel} ——切向相对速度
 e ——碰撞恢复系数 a ——接触面半径
 G^* ——等效剪切模量

2 碰撞运动的离散元模拟

2.1 籽粒碰撞运动过程

设籽粒与平面发生正碰撞,即切向速度 $v_\tau = 0$ 。当 $\theta = 0, 90^\circ$ 时,籽粒与平面发生对心碰撞,由于切向叠合量 $\delta_\tau = 0$,籽粒仅受到法向力 F_n 的作用, F_n 通过质心,籽粒受到的转动力矩为零,因此碰撞后籽粒将沿垂直方向反弹。当 $0 < \theta < 90^\circ$ 时,籽粒与平面发生偏心碰撞,由于 F_n 不通过质心,籽粒将在 F_n 产生力矩作用下发生转动,接触点产生切向变形 δ_τ ,并产生切向作用力 F_τ ,因此碰撞后籽粒将沿斜上方反弹,同时伴随着旋转运动。当粒径比 $\gamma = 2$,法向碰撞速度 $v_n = 2.5$ m/s、碰撞角 $\theta = 60^\circ$ 时,籽粒碰撞

运动过程如图2所示。

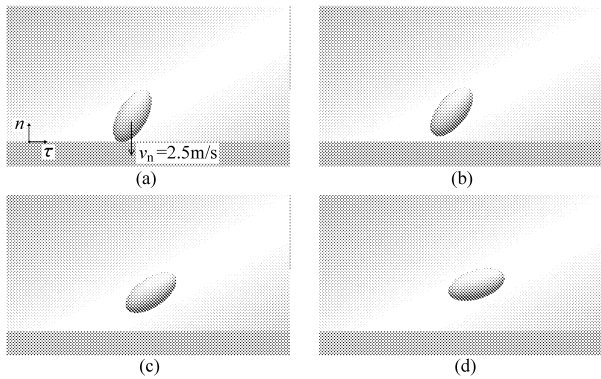


图2 籽粒碰撞运动过程

Fig. 2 Grain impact motion process

(a) 0 ms (b) 0.5 ms (c) 1.5 ms (d) 2.5 ms

图3给出了 θ 在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内,籽粒碰撞过程中法向力 F_n 、切向力 F_t 和转动角速度 ω 随碰撞时间的变化曲线。可以看出,椭球体籽粒与平面的碰撞运动过程不仅取决于碰撞速度,还与碰撞角度 θ 相关。此外,由于籽粒的切向速度 v_t 会改变接触点的切向变形,也会影响碰撞运动过程。

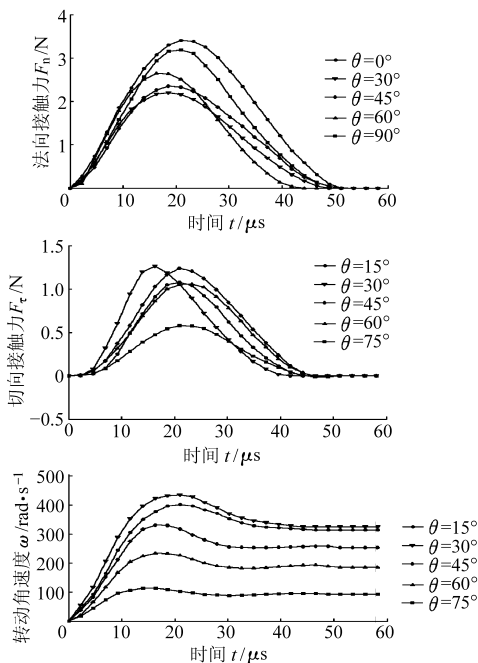


图3 籽粒碰撞过程中 F_n 、 F_t 和 ω 随碰撞时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of F_n , F_t and ω during impact process

2.2 籽粒碰撞角度的影响

由于饱满籽粒与颖壳、茎秆的质量、弹性模量等物理特性的差异,使得它们冲击到籽粒传感器后产生的信号也不同,其中碰撞接触时间和峰值接触力是识别籽粒冲击的2个重要特征参数^[12]。

定义法向接触力 F_n 从零上升到最大值的时间为 t_r ,为了描述碰撞角度 θ 和粒径比 γ 对峰值接触力的影响,定义峰值力比率 η 为

$$\eta(\theta, \gamma) = [\max(F_n(\theta, \gamma)) / \max(F_n(0, \gamma))] \times 100\% \quad (8)$$

η 越大表明峰值法向接触力越稳定, η 越小表明峰值法向接触力的差异越大。当 v_n 为2.5 m/s、 γ 在1~3、 θ 在 $0 \sim 180^\circ$ 时, η 的变化规律如图4所示。

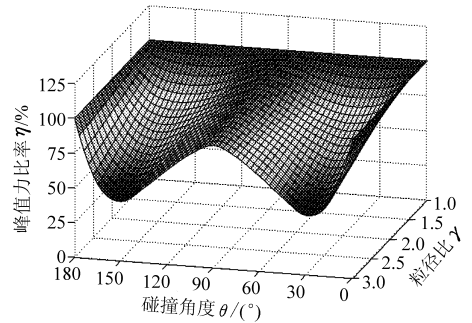


图4 正碰撞时粒径比 γ 和碰撞角度 θ 对峰值力比率 η 的影响

Fig. 4 Influence of grain radius ratio γ and impact angle θ on peak force ratio η during orthogonal impact process

对心碰撞过程中,根据能量守恒定理,计算得到法向最大重叠量为^[13]

$$\delta_{n \max} = \left(\frac{15}{16} \frac{mv^2}{E^* R^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (9)$$

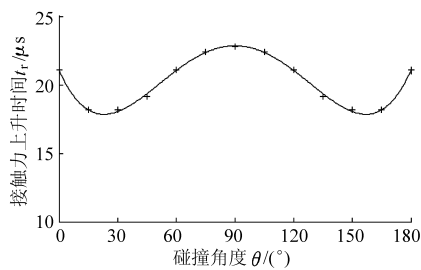
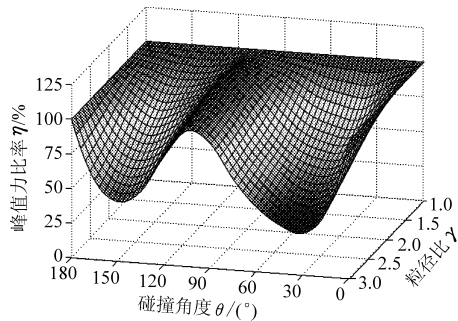
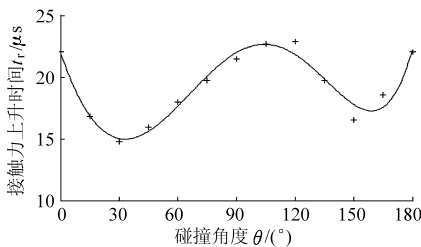
将式(9)代入式(4),可以求出峰值法向接触力 $F_{n \max}$,可见 $F_{n \max}$ 主要取决于籽粒的曲率半径,且 $F_{n \max}$ 随着籽粒曲率半径的增加而增大。

偏心碰撞过程中,由于籽粒发生转动,接触点的法向相对速度和重叠量随之减小,导致法向接触力降低。由于切向速度 $v_t = 0$, η 的变化呈现对称特性,最小值出现在 θ 为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 和 $150^\circ \sim 160^\circ$ 范围内。随着粒径比 γ 的增加, $F_{n \max}$ 的差异越显著, η 的变化也越大,当 $\gamma = 3$ 时, η 的最小值小于45%。

图5为接触力上升时间 t_r 的变化曲线。可以看出,对心碰撞过程中, t_r 也取决于籽粒的曲率半径,且籽粒曲率半径越大,法向最大重叠量 $\delta_{n \max}$ 越大,接触力上升时间 t_r 随之增加。斜碰撞过程中,由于籽粒发生转动, t_r 随之减小。 t_r 总体分布在14~26 μ s,最小值也出现在 θ 为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 和 $150^\circ \sim 160^\circ$ 范围。

2.3 籽粒切向速度的影响

当发生碰撞的法向速度 $v_n = 2.5$ m/s,切向速度 v_t 在 $0 \sim 2$ m/s时,计算得到的 η 和 t_r 的变化规律分别如图6、7所示。由于 v_t 的影响,籽粒将与平面发生斜碰撞,当 $0 < \theta < 90^\circ$ 时 F_n 和 F_t 分别产生的籽粒转动力的方向相同;当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时转动力的方向相反,造成 η 和 t_r 的变化呈现出明显的不对称性,变化的范围也随之增大, η 和 t_r 的最小值均出现在 θ 为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 范围,当 $\gamma = 3$ 时 η 约为30%, t_r

图5 正碰撞时碰撞角 θ 对接触力上升时间 t_r 的影响Fig. 5 Effect of impact angle θ on impact force rise time t_r during orthogonal impact process图6 斜碰撞时粒径比 γ 和碰撞角度 θ 对峰值力比率 η 的影响Fig. 6 Influence of grain radius ratio γ and impact angle θ on peak force ratio η during oblique impact process图7 斜碰撞时碰撞角 θ 对接触力上升时间 t_r 的影响Fig. 7 Effect of impact angle θ on impact force rise time t_r during oblique impact process

总体分布在 $14 \sim 26 \mu\text{s}$ 。

3 籽粒碰撞试验

为了测量水稻籽粒冲击力学特性,采用PVDF压电薄膜作为敏感元件设计了检测传感器。薄膜厚度为 $50 \mu\text{m}$,压电系数 $d_{33} = 21 \text{ pC/N}$ 。采用冷压端子将电极引出,为了防止表面划伤,在上、下表面均粘贴厚度为 0.1 mm 的PET塑封薄膜,将塑封好的PVDF压电薄膜粘贴于 1 mm 厚的不锈钢薄板上。由压电效应可知,当薄膜受到籽粒冲击时将产生极化电荷,电荷量与冲击应力呈正比,然后通过电荷放大器将其转换为电压信号后进行采集。

试验过程中,将同一个水稻籽粒从高度为 35 cm 位置下落冲击到压电薄膜上,法向冲击速度约为 2.5 m/s ,籽粒的粒径比 γ 约为 2.2 ,质量为 29.3 mg ,试验结果如图8所示。可以看出,在相同的冲击速

度下,由于籽粒与传感器的碰撞角度存在一定随机性,造成冲击信号的峰值和上升时间存在明显差异。重复试验结果表明,输出电压峰值一般在 $2.0 \sim 4.0 \text{ V}$,上升时间 $15 \sim 35 \mu\text{s}$,这与离散元计算结果基本吻合。

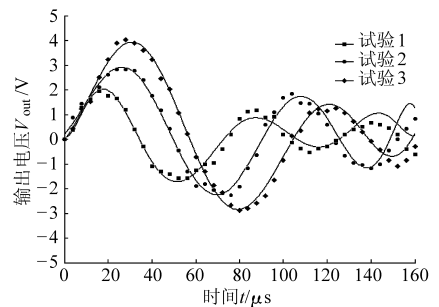


图8 籽粒碰撞力测量结果

Fig. 8 Measuring results of grain impact force

水稻品种和含水率的不同,籽粒的几何形态和力学特性存在差异,籽粒冲击传感器的输出信号也随之改变。选择不同品种水稻籽粒进行碰撞试验,当法向速度为 $2.0 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 时传感器输出电压峰值为 $2.0 \sim 4.5 \text{ V}$,上升时间 $12 \sim 45 \mu\text{s}$ 。由式(9)可知,传感器的输出电压峰值和上升时间主要取决于质量、刚度和碰撞速度。与饱满籽粒相比,颖壳和短茎秆的质量和刚度较小,输出电压峰值通常小于 1.0 V 和 3.0 V ,上升时间大于 $100 \mu\text{s}$ 和 $50 \mu\text{s}$,可以通过带通滤波器和电压比较进行鉴别^[14]。以此为基础,开发了籽粒检测传感器的信号调制电路^[15],其中带通滤波器的截止频率和电压比较器的阈值分别设定为 $5 \sim 20 \text{ kHz}$ 和 1.5 V ,传感器能够有效识别籽粒冲击信号,实现谷物一次冲击,传感器输出一个方波电压信号,通过计算方波电压的数量,进行联合收获机籽粒损失的实时检测^[15]。

4 结论

(1)采用离散元法和椭球体颗粒模型数值模拟了水稻籽粒与检测传感器碰撞过程,得到籽粒的几何形态和碰撞角是影响碰撞力变化的重要因素。

(2)对心碰撞过程中,峰值法向接触力 $F_{n \max}$ 随着籽粒曲率半径的增加而增大。偏心碰撞过程中,由于籽粒发生转动,导致法向接触力的降低。当粒径比 $\gamma = 3$ 时峰值力比率 η 的最小值小于 45% 。

(3)斜碰撞过程中, η 的变化呈现出不对称特性,且变化范围也随之增大, η 的最小值出现在 θ 为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 范围,当 $\gamma = 3$ 时约为 30% 。

(4)水稻籽粒与检测传感器碰撞过程中,法向接触力上升时间 t_r 在 $14 \sim 26 \mu\text{s}$ 范围。

(5)籽粒碰撞试验结果表明:在相同的冲击速

度下,由于碰撞角度的不同,导致传感器输出电压峰值和上升时间分别在 2.0 ~ 4.0 V 和 15 ~ 35 μ s,这与理论分析结论基本吻合。

参 考 文 献

- 1 Craessaerts G, Baerdemaeker J D, Missotten B, et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. *Biosystems Engineering*, 2010,106(2): 97 ~ 102.
- 2 Omid M, Lashgari M, Mobli H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010,37(10): 7 080 ~ 7 085.
- 3 Maertens K, Ramon H, Baerdemaeker J D. An on-the-go monitoring algorithm for separation processes in combine harvesters[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004,43(3): 197 ~ 207.
- 4 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005,21(5): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 5 Wojtkowski M, Pecan J, Horabik J, et al. Rapeseed impact against a flat surface: physical testing and DEM simulation with two contact models[J]. *Powder Technology*, 2010,198(1): 61 ~ 68.
- 6 Sakaguchi E, Suzuki M, Favier J F, et al. Numerical simulation of the shaking separation of paddy and brown rice using the discrete element method[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001,79(3): 307 ~ 315.
- 7 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. *农业机械学报*, 2009,40(3): 56 ~ 59.
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(3): 56 ~ 59. (in Chinese)
- 8 孙裕晶,马成林,牛序堂,等. 基于离散元的大豆精密排种过程分析与动态模拟[J]. *农业机械学报*, 2006,37(11): 45 ~ 48.
Sun Yujing, Ma Chenglin, Niu Xutang, et al. Discrete element analysis and animation of soybean precision seeding process based on CAD boundary model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006,37(11): 45 ~ 48. (in Chinese)
- 9 徐立章,李耀明. 水稻谷粒冲击损伤临界速度分析[J]. *农业机械学报*, 2009,40(8):54 ~ 57.
Xu Lizhang, Li Yaoming. Critical speed of impact damage on a rice kernel[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(8): 54 ~ 57. (in Chinese)
- 10 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.
- 11 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. *农业工程学报*, 2011,27(5): 117 ~ 121.
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011,27(5): 117 ~ 121. (in Chinese)
- 12 周利明,张小超,刘阳春,等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2010,41(6): 167 ~ 171.
Zhou Liming, Zhang Xiaochao, Liu Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010,41(6): 167 ~ 171. (in Chinese)
- 13 孙其诚,王光谦. 颗粒物物质力学导论[M]. 北京:科学出版社,2009.
- 14 唐忠,李耀明,赵湛,等. 夹带损失传感器不同安装位置对籽粒检测精度的影响[J]. *农业工程学报*, 2012,28(10): 46 ~ 52.
Tang Zhong, Li Yaoming, Zhao Zhan, et al. Effect of different installed location of entrainment loss sensor on grain testing accuracy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(10): 46 ~ 52. (in Chinese)
- 15 Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011,76(2): 183 ~ 188.

(上接第 83 页)

- 21 陈超,李红,袁寿其,等. 出口可调式变量喷头喷灌均匀性[J]. *排灌机械工程学报*,2011,29(6):536 ~ 541.
Chen Chao, Li Hong, Yuan Shouqi, et al. Irrigation uniformity of nozzle-changeable variable-rate sprinkler[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011,29(6):536 ~ 541. (in Chinese)
- 22 GB/T 19795. 2—2005 水量分布均匀性和试验方法[S]. 2005.
- 23 GB/T 22999—2008 旋转式喷头[S]. 2008.
- 24 周世峰. 喷灌工程学[M]. 北京:北京工业大学出版社,2004.
- 25 李小平. 喷灌系统水量分布均匀度研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
Li Xiaoping. Study on distribution uniformity of sprinkler system[D]. Wuhan: Wuhan University,2005. (in Chinese)
- 26 Han Wenting, Fen Hao, Wu Pute, et al. Evaluation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines [C]//2007 ASABE Annual International Meeting, 2007.