

水稻籽粒流对承载板冲击过程离散元分析

邱白晶, 姜国微*, 杨宁, 管贤平, 解金键, 李耀明

(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: 为了提高谷物流量测量精度, 基于软球模型的离散元法, 采用 Hertz-Mindlin (无滑移) 接触力学模型模拟水稻籽粒流与承载板冲击过程, 在升运器线速度分别为 0.5、1.0、1.5 m/s 时分析水稻质量与平均法向冲击力变化规律。结果表明: 水稻籽粒流对承载板冲击过程的离散元模型参数选用合理, 具有工程应用价值; 去除水稻籽粒在承载板上的滑落阶段, 3 种线速度下水稻质量与平均法向力的线性相关系数由 0.8062, 0.9082, 0.9891 分别增大到 0.9144, 0.9630, 0.9944。在设计冲量式谷物质量流量测量装置时应考虑如何减少谷物在测量装置上的滑落阶段, 从而提高测量精度。为谷物流量测量装置的开发提供技术支持。

关键词: 数值模拟, 冲击强度, 模型, 离散元, 接触力学, 籽粒流

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.03.008

中图分类号: S126; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-03-0044-06

邱白晶, 姜国微, 杨宁, 等. 水稻籽粒流对承载板冲击过程离散元分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 44-49.
Qiu Baijing, Jiang Guowei, Yang Ning, et al. Discrete element method analysis of impact action between rice particles and impact-board[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 44-49. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在智能收获机械的研究中, 谷物流量传感器的精度与稳定性直接关系到谷物产量以及产量图的测量精度。冲量式谷物质量流量传感器因为结构简单, 安全无辐射而得到广泛应用^[1]。

目前对冲量式谷物质量流量传感器的研究主要依靠试验。例如王薄, 李民赞^[2]设计的悬臂梁式谷物质量流量传感器, 在室内试验中得到较好的精度, 田间试验依然存在一些问题。M. Loghavi, R. Ehsani^[3]为测试谷物质量流量传感器的性能设计了试验台, 模拟收割机在不同工况下的工作性能。此外, 周俊^[4-6]等人也做了大量的研究工作。试验研究可以很好地为传感器的设计提供客观依据, 但是存在成本大, 周期长, 细观过程无法检测的弱点。完全依赖试验研究显然成了谷物质量流量传感器精度提高的瓶颈。

谷物籽粒流对承载板的冲击作用力学特性是研究冲量式谷物质量流量传感器的理论基础^[7]。利用离散元法 (discrete/distinct element method, 简称 DEM) 解决农业中非连续颗粒群的分析问题^[8], 从细观上准确把握谷物籽粒流对承载板的冲击过程可以为传感器的设计工作提供理论依据。

收稿日期: 2011-05-16 修订日期: 2011-08-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863 计划”资助项目(2010AA101402); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8号); 江苏省农业装备与智能化高技术重点实验室资助项目(BM2009703)

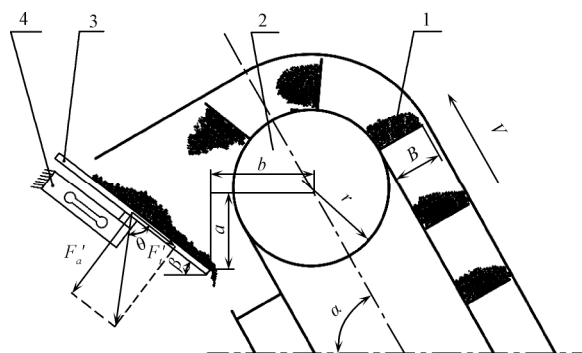
作者简介: 邱白晶, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化设计及理论学科的科学研究与教学工作。镇江 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 212013。Email: qbj@ujs.edu.cn

*通信作者: 姜国微, 硕士, 主要从事系统监测与控制研究。镇江 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, 212013。

Email: jguowei@hotmail.com

1 工程背景

机械机构简图如图 1 所示, 包括刮板式升运器, 承载板和弹性元件。图中各工程参数如表 1 所示。此外在竖直方向对承载板添加频率 $f=300$ Hz, 振幅 $A=0.5$ mm 的正弦振动, 用以模拟收割机振动。



1. 谷物 2. 刮板式谷物升运器 3. 承载板 4. 弹性元件
注: F_a' 为承载板所受法向冲击力; F_t' 为承载板所受切向冲击力; θ 为法向冲击力与切向冲击力的夹角; a 为承载板底部到升运器滚筒的垂直距离; b 为承载板底部到升运器滚筒的水平距离; r 为滚筒半径; α 为升运器倾斜角度; v 为升运器的线速度; B 为刮板宽度

图 1 谷物流量测量原理示意图

Fig.1 Measurement schematic of grain mass flow

表 1 技术参数

Table 1 Technical parameters

参数	取值
刮板尺寸 $B \times l / \text{mm}^2$	300×55
承载板面积/ mm^2	300×300
升运器倾角 $\alpha / (^\circ)$	60
承载板倾角 $\beta / (^\circ)$	38
滚筒半径 r / mm	110
滚筒中心与承载板底部垂直距离 a / mm	67
滚筒中心与承载板底部水平距离 b / mm	200

质量流量测量原理见文献^[9]，质量 m 与法向平均作用力 \overline{F}_n 的关系如下

$$m = \frac{\overline{F}_n(t_2 - t_1)}{v_n - v_0} \quad (1)$$

式中， \overline{F}_n 为 $t_1 \sim t_2$ 内谷物对承载板的平均法向冲击力，N； m 为在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内与承载板发生碰撞的谷物质量，kg； v_n 为碰撞后谷物在垂直承载板方向的速度，m/s； v_0 为碰撞前谷物在垂直承载板方向的速度，m/s。

从式 (1) 看出，当 $(t_2 - t_1)$ 和 $(v_n - v_0)$ 是常数时， m 和 \overline{F}_n 成正比，通过测量 \overline{F}_n 计算得出 m 的值。 $(t_2 - t_1)$ 可以由系统采样的时间设定，这里假设 $(v_n - v_0)$ 是常数。

2 水稻籽粒的填充模型

非球体的组合球模型用多个球的外包络面近似一个非球体的外形，将非球体的接触转化为球体接触，从而简化并统一了接触算法，使其能够适用于任意形状的物体。组合球模型有相切球和重叠球两种形式，实际计算表明，重叠球模型可以有效地延缓“自锁”现象的发生，并且对边界的拟合度更好^[10]。本文采用重叠球模型近似水稻籽粒。

水稻籽粒外形是非球体，但统计上可用椭球来近似，因此水稻籽粒的外形参数归结为椭球长半轴 a 和短半轴 b 。选用水稻品种为武粳 13，则籽粒外形参数具体为^[11]： $a=3.5$ mm， $b=1.8$ mm。对这样轴对称的椭球单元，在 EDEM 中可用多球填充，参与填充的球体越多，近似程度越高，计算量也越大^[12]。为了兼顾计算精度和计算量，本文选取 7 个球粘合在一起来近似水稻籽粒，如图 2 所示。7 个球的半径 R 分别为：0.5，1.4，1.0，1.8，1.4，1.0，0.5 mm。

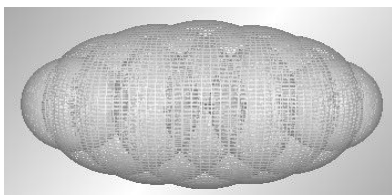


图 2 水稻籽粒的球体填充模型
Fig.2 Sphere assembly model of rice

3 力学参数的确定

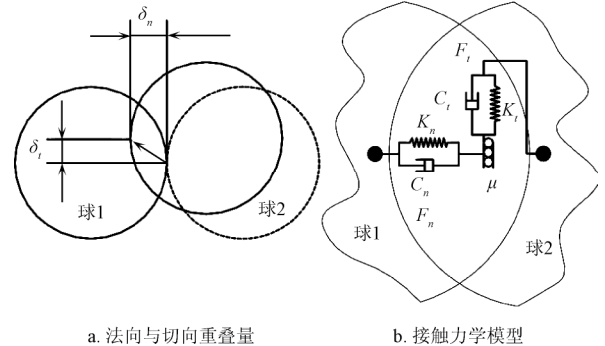
3.1 确定力学参数所用的力学模型

接触力学模型可分为球体接触理论，软球模型和硬球模型。本文采用 Hertz-Mindlin (无滑移) 软球模型，忽略碰撞两球的滑移变形。模型可用图 3 表示^[13]。图 3 中包含两类参数。其一是几何参数，用法向重叠量 δ_n 和切向重叠量 δ_t 表示；其二是物理性质参数，具体有：法向弹性系数 k_n 、切向弹性系数 k_t 、法向阻尼系数 C_n 和切向阻尼系数 C_t 。

3.2 数字模拟所用的力学参数

由图 3 的物理参数和几何参数可以根据 Hertz 理论^[14]

计算两球的法向接触力 F_n ，根据 Mindlin 理论^[15-16]计算切向接触力 F_t 。其中，法向弹性系数 k_n 、切向弹性系数 k_t 通过人工设定剪切模量 G 、杨氏弹性模量 E 确定^[17]；法向阻尼系数 C_n 和切向阻尼系数 C_t 通过人工设定恢复系数 e 、材料密度 ρ 和对应的法向和切向弹性系数确定^[18]。



注： δ_n 为法向重叠量； δ_t 为切向重叠量； F_n 为两球的法向接触力，N； F_t 为两球的切向接触力，N； k_n 为法向弹性系数； k_t 为切向弹性系数； C_n 为法向阻尼系数； C_t 为切向阻尼系数； μ 为静摩擦系数。

图 3 重叠量示意图与两球的接触力学模型

Fig.3 Schematic of overlap and model of contact mechanics of two sphere

由于 Hertz 接触理论^[14]中将碰撞的球视为各向同性材料，所以剪切模量 G 与杨氏弹性模量 E 满足以下关系

$$G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}, \quad i=1,2 \quad (2)$$

式中， G_i 为球 i 的剪切模量； ν_i 为球 i 的泊松比； E_i 为球 i 的杨氏弹性模量。

剪切模量 G 、杨氏弹性模量 E 和泊松比 ν 三者只要给出两个，其余一个可通过式 (2) 计算。本文在设置模拟参数时给出的是剪切模量 G 和泊松比 ν ，具体模拟采用的参数见表 2，这些参数在模拟中不变。仿真变量详见第 4 节所述试验设计。

表 2 仿真主要参数
Table 2 Main simulation parameters

参数属性	参数	数值
籽粒属性 ^[19-21]	籽粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 000
	剪切模量 G/Pa	100×10^6
	泊松比 ν	0.25
承载板属性 (赛璐珞)	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 350
	剪切模量 G'/Pa	700×10^6
	泊松比 ν'	0.4
相互作用	籽粒与承载板静摩擦系数 μ_1	0.4
	籽粒与承载板恢复系数 e_1	0.2
	籽粒与籽粒静摩擦系数 μ_2	0.8
	籽粒与籽粒碰撞恢复系数 e_2	0.1
其他参数	重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.81

3.3 数值模拟方案的试验验证

为验证上述模型的合理性，将数值模拟结果与孙宇瑞^[7]、J.P. Fulton^[22]、T. F. Burks^[23]的台架试验结果对比，对比结果详见第 5.2 节所示。

4 离散元模拟试验设计

4.1 升运器的线速度

升运器与刮板式输送机的结构相似，粮食专用刮板输送机^[24]的链速范围 0.16~1.00 m/s，由于收割机上的升运器所运输的谷物流量较小，可以相应增大升运器的速度，所以本文选用升运器的线速度： $v=0.5, 1.0, 1.5$ m/s。

4.2 水稻质量

根据刮板式升运器每个刮板的承载量选取单次冲击作用的水稻籽粒总质量 $m=0.18\sim 0.63$ kg，分析时发现当 $m=0.45\sim 0.54$ kg 时曲线发生突变，所以， m 的取值如下：

$$m = \underbrace{0.18, 0.27, 0.36, 0.45, 0.495, 0.54, 0.585, 0.63}_{h_1} \text{ kg}$$

步长 $h_1=0.09$ kg, $h_2=0.045$ kg。

5 模拟结果分析

本文针对冲击力的性质，冲击力与水稻质量的关系以及对该关系影响因素的分析。核心在后两部分，第一部分是后两部分的基础。

5.1 冲击过程

在水稻籽粒流与承载板碰撞的过程中，冲击力可以分解为垂直于承载板的法向冲击力 F_n' （以下简称法向力）和沿着承载板的切向冲击力 F_t' （以下简称切向力，如第 1 节图 1 所示）。

水稻籽粒流与承载板碰撞过程并不是碰撞之后立即脱离承载板，而是存在滑落过程。滑落过程如图 4c~f。图 4 中显示的是冲击过程中动能随时间的变化。

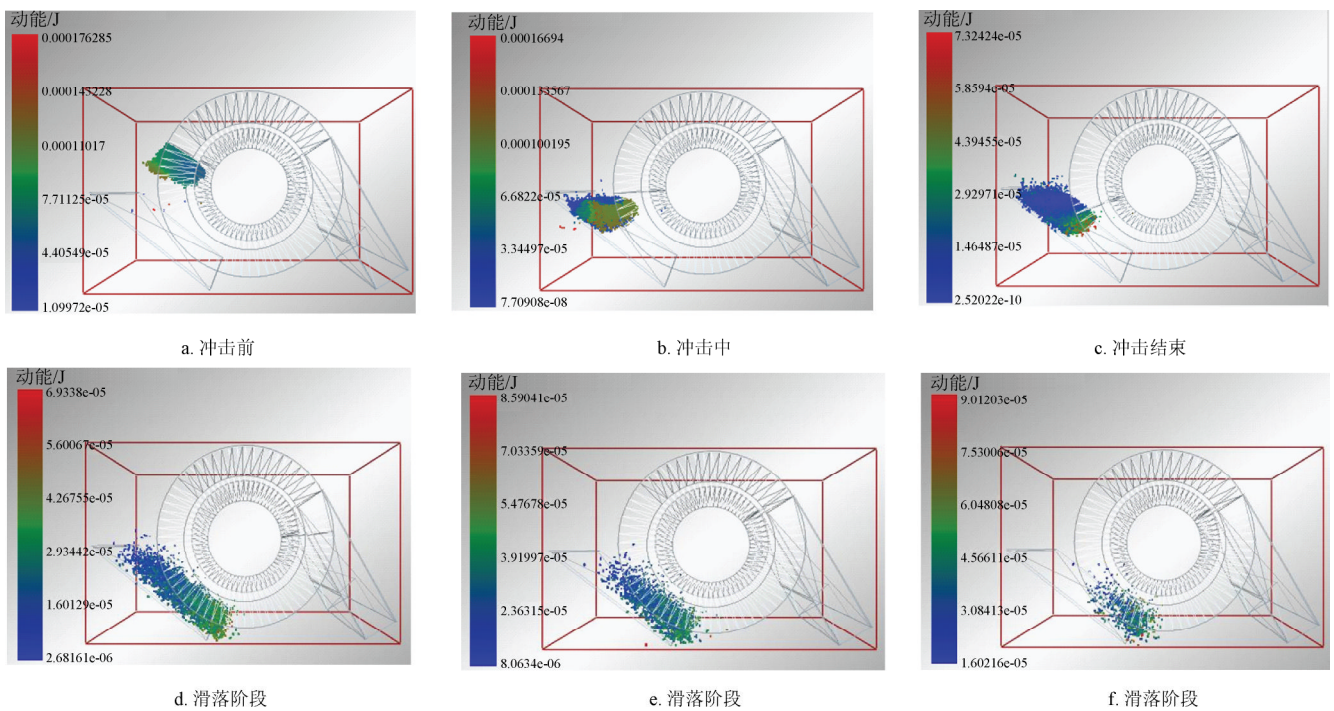


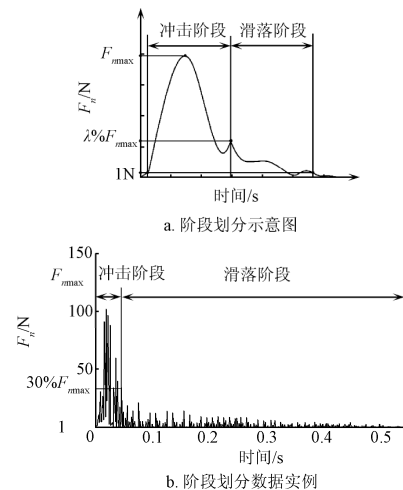
图 4 水稻籽粒流与承载板作用过程

Fig.4 Action process between rice flow and impact plate

5.1.1 冲击过程的 2 个阶段

为了说明水稻籽粒与承载板作用过程，本文把作用过程分为冲击阶段和滑落阶段。为了便于阶段划分，这里引入系数 λ 。把从法向力大于 1 N 的时刻起到法向力峰值 $F_{n\max}$ 出现之后满足 $F_n \geq \lambda F_{n\max}$ 的最后一个时刻之间的时间段定义为冲击阶段，从冲击阶段结束的时刻到最后法向冲击力大于 1 N 的时刻之间的时间间隔定义为滑落阶段，这里系数 $\lambda=30\%$ ，如图 5a 所示。

阶段划分的原因在于：通过对 24 组数据统计分析， $\lambda=20\%, 30\%, 40\%$ 时，分别有 62.50%，93.67% 和 25% 的数据在 $F_n = \lambda F_{n\max}$ 分界处 F_n 出现明显下降趋势。3 个百分点之和不等于百分之百的原因在于部分数据发生区域重叠。 λ 在 $30\% \pm 5\%$ 范围内对计算结果不会产生过大影响。如果 λ 偏大则会将球与承载板发生冲击的时间段划分到滑落阶段内，丢失冲击阶段的有用信息；反之，如



注：带速为 1.5 m/s，水稻质量 0.36 kg

图 5 冲击阶段与滑落阶段划分

Fig.5 Boundary between impact phase and retention phase

果 λ 偏小, 则会将球与承载板的冲击作用已经结束的时间区域划分到冲击阶段, 加大了冲击阶段的干扰。图 5b 为冲击阶段和滑落阶段划分的实例。

5.1.2 不同速度下法向和切向冲击力

在将冲击过程分为冲击阶段和滑落阶段的基础上, 深入分析不同升运器线速度 v 下水稻籽粒流与承载板的冲击过程 2 个阶段的时间分配。

表 3 为生成的水稻籽粒质量为 0.36 kg 时, 升运器线速度 $v=0.5、1.0$ 和 1.5 m/s 3 种情况下冲击过程中冲击阶段时间、滑落阶段时间以及法向力和切向力峰值的变化。从表 3 比较看出, 随着升运器线速度 v 的增加, 水稻籽粒流与承载板作用的冲击阶段时间变化为 0.141、0.048、0.040 s, 呈现减小的趋势。但 $v=0.5$ 到 1.0 m/s 冲击阶段的时间明显减少, 而 $v=1.0$ 到 1.5 m/s 冲击阶段时间减少的幅度较小。与冲击阶段时间不同的是, 随着 v 的增大, 随着 v 的增大, 滑落阶段时间变化为 0.332、0.474、0.501 s, 呈增加趋势。总时间随着升运器线速度增大呈现增多趋势; 法向力峰值和平均值随着升运器线速度 v 的增大而增大, 从 $v=0.5$ 到 1.0 m/s 的增长幅度大于 $v=1.0$ 到 1.5 m/s 的增长幅度; 切向力峰值和平均值随着升运器线速度 v 的增大波动不大。

表 3 不同的升运器线速度下冲击力变化

Table 3 Variation of impact force with different velocities

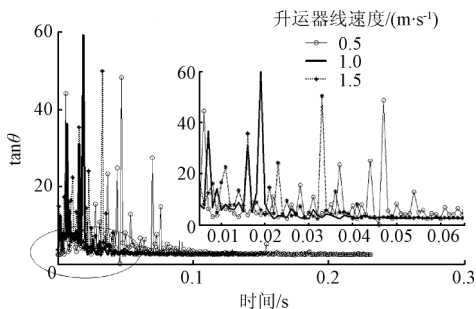
升运器线速度/(m·s ⁻¹)	冲击阶段时间/s	滑落阶段时间/s	总时间/s	法向力峰值/N	法向力均值/N	切向力峰值/N	切向力均值/N
0.5	0.141	0.332	0.473	51.445	2.800	13.821	0.902
1.0	0.048	0.474	0.522	97.099	6.411	12.93	0.820
1.5	0.040	0.501	0.541	102.115	8.347	13.079	0.875

注: 水稻质量 0.36 kg

5.1.3 切向力与合力夹角 θ 的变化

由力学理论可知, 冲击合力与承载板的夹角 θ 越大, 那么法向力越大, 切向力就越小, 即由切向力造成的能量损耗越小, 有利于谷物流量测量。

图 6 是当生成水稻籽粒质量 $m=0.36$ kg 时, 3 种升运器线速度 v 下在每一采样时刻法向力与切向力比值的变化, 由于该比值的物理意义是切向力与合力夹角 θ 的正切值 (如第 1 节图 1 所示), 所以纵轴用 $\tan\theta$ 表示。横轴代表时间, 图 6 右上角为前 0.065 s 内的局部放大图。



注: 水稻质量 0.36 kg, $\tan\theta$ 为法向力 F_n 与切向力 F_t 交角的正切值。(图 6 左侧的字数太多, 将图例在此说明)

图 6 3 种线速度下每一时刻法向力与切向力比值

Fig.6 Ratio of normal force and tangential force at each time step with the three velocities

可以看出随着 v 的增大, $\tan\theta$ 峰值先增大后减小, 当 v 增大到 1.0 m/s 时, $\tan\theta$ 最大, 即冲击合力与承载板的夹角 θ 最大, 但是当 $v=1.5$ m/s 时 $\tan\theta$ 又呈减小趋势, 可见 $\tan\theta$ 不随着 v 单调递增, 在 $v=0.5\sim 1.5$ m/s 之间存在最大值, 通过更进一步试验可以找出该最大值。

5.2 水稻质量与平均法向力

设计冲量式谷物流量质量传感器时为了减少振动的影响通常力敏元件只检测法向力^[4]。所以重点分析水稻籽粒质量与承载板所受法向力的关系。

图 7 是水稻质量与冲击作用时间内平均法向力的关系曲线, 横轴表示水稻质量, 纵轴表示作用时间内所有采样点法向力的平均值, 采样频率为 1 000 Hz。将 3 种速度下水稻籽粒质量与平均法向力分别一元线性回归, 线速度 $v=0.5、1.0、1.5$ m/s 下水稻质量与平均法向力的线性相关系数 $R_1、R_2、R_3$ 分别为 0.8062, 0.9082, 0.9891。

如图 7 所示。可见当 $v=0.5$ m/s 时, 在 $m=0.495$ kg 处曲线出现转折点, 当 $v=1.0$ m/s 时转折点位于 $m=0.54$ kg 处, 在转折点之后, 平均法向力随着水稻质量的增加趋于饱和。而 $v=1.5$ m/s 时, 平均法向力与水稻质量在 0.18~0.63 kg 之间表现出很好的线性关系, 可以推断, 当继续增大水稻质量, 将使法向冲击力达到饱和。

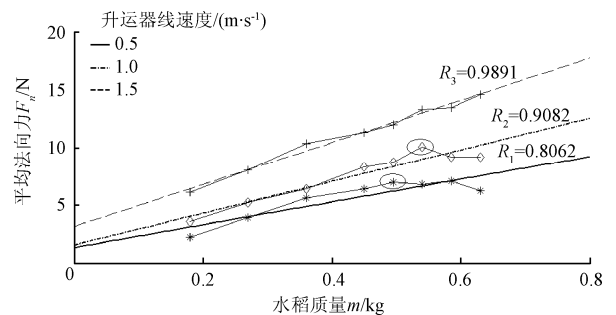


图 7 水稻质量与平均法向力的关系曲线

Fig.7 Curve between the mass of rice and mean impact force

综上所述可得 2 点结论:

- 1) 当谷物质量增大时, 谷物流量测量误差增大;
- 2) 增大升运器线速度 v 能够拓展水稻质量与平均法向力的线性区。

对于结论 1), 孙宇瑞^[7]等的试验结果表明当谷物流量增大时, 传感器输出很快随着谷物流量的增加趋于饱和, 与本文结论在定性层面上是一致的。

J.P. Fulton^[22]通过台架试验测试了 GreenStar 谷物流量监测器性能, 选择低流量 (8.2 kg/s) 和中流量 (13.6 kg/s) 作为标定数据。在高流量 (20.4 kg/s) 情况下, 测量误差从 -6.44% 到 5.50%; 中流量 (13.6 kg/s) 下, 测量误差范围从 -3.94% 到 4.87%; 而低流量 (6.8 kg/s) 下, 测量误差的范围仅为 -0.83%~2.94%。可见, 对于流量增加测量误差明显增大的现象, 与本文模拟结果一致。本文采用的模拟方案具有合理性。

此外, T. F. Burks^[23]分别在试验中证实, 当流量增大时, GreenStar 谷物流量测量系统的测量精度明显降低。

5.3 滑落阶段对水稻质量与平均法向力线性的影响

在第 5.1 节中把冲击过程分为冲击阶段和滑落阶段, 现在将 3 种速度下每个冲击过程的滑落阶段去掉, 仅取冲击阶段的平均法向力。回归所得到的结果如图 8 所示, 线速度 $v=0.5、1.0、1.5 \text{ m/s}$ 下线性相关系数 $R'_1、R'_2、R'_3$ 分别为 0.9144, 0.9630, 0.9944。

对比图 7 和图 8, 可以发现去除滑落阶段法向力的干扰之后, 水稻质量与平均法向力的线性相关系数有了很大提高, 所以减小水稻籽粒在承载板上的滑落时间, 可以提高水稻质量与平均法向力的线性相关性, 有利于谷物质量流量测量。

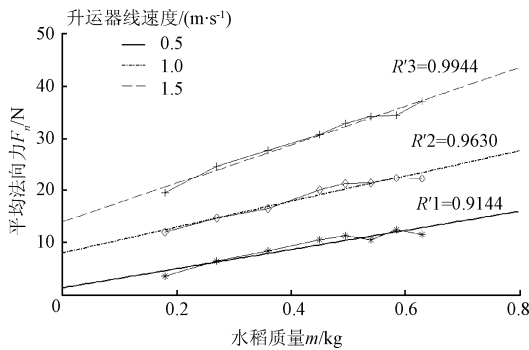


图 8 去除滑落阶段后水稻质量与平均法向力的关系

Fig.8 Relationship between mass of rice and mean normal force after removing sliding stages

6 结 论

1) 仿真结果与目前孙宇瑞、J.P. Fulton 和 T. F. Burks 等学者的试验结果对比, 对比结果显示, 仿真结论: “当谷物质量增大时, 测量误差增大” 与三位学者的试验结果相同, 因此谷物籽粒流对承载板冲击过程的离散元模型参数选用合理, 具有工程应用价值。

2) 去除水稻籽粒在承载板上的滑落时间, 3 种线速度下水稻质量与平均法向力的线性相关系数由原来的 0.8062, 0.9082, 0.9891 分别增大到 0.9144, 0.9630, 0.9944。可见, 减少滑落时间可以增大水稻质量与平均法向力的线性相关系数。因此在设计冲量式谷物质量流量装置时, 应考虑如何减少水稻籽粒与测量装置的滑落时间。

3) 对水稻籽粒流与承载板的冲击过程的模拟, 结果显示: 水稻质量相同, 升运器线速度由 0.5, 1.0, 1.5 m/s 逐阶增大时, 水稻籽粒流与承载板作用的冲击阶段时间变化为 0.141、0.048、0.040 s, 呈现减小趋势。滑落阶段时间变化为 0.332、0.474、0.501 s 逐渐增加; 法向力的峰值增大, 切向力的峰值变化不明显。

4) 升运器线速度在 0.5~1.5 m/s 之间, 就三点而言升运器线速度为 1.0 m/s 时, 法向力与切向力的比值最大, 但是否为区间的最大值, 需要进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] Reyns P, Missotten B, Ramon H et al. A review of combine sensors for precision farming[J]. Precision Agriculture, 2002(3): 169-182.

[2] 王薄, 李民赞, 张成龙, 等. 冲击式谷物流量传感器设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊 1): 52-56.

[3] Loghavi M, Ehsani R, Reeder R. Development of a portable grain mass flow sensor test rig[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008: 160-168.

[4] 周俊, 刘成良. 平行梁冲量式谷物质量流量传感器弹性元件设计[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 110-114. Zhou Jun, Liu Chengliang. Load cell design for parallel beam impact-based grain mass sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 110-114. (in Chinese with English abstract)

[5] 周俊, 刘成良. 平行梁冲量式谷物质量流量传感器信号处理方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 183-187. Zhou Jun, Liu Chengliang. Signal processing method for impact based grain mass flow sensor with parallel beam load cell[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 183-187. (in Chinese with English abstract)

[6] 周俊, 周国祥, 苗玉彬, 等. 悬臂梁冲量式谷物质量流量传感器阻尼设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 121-123. Zhou Jun, Zhou Guoxiang, Miao Yubin, et al. Damping Design of Impact-based Grain Yield Sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 121-123. (in Chinese with English abstract)

[7] 孙宇瑞, 汪懋华, 马道坤, 等. 冲量法谷物流量测量系统的试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 48-50. Sun Yudian, Wang Mmaohua, Ma Daokun, et al. Testing reaserch of impact-based measurement of grain mass flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 48-50. (in Chinese with English abstract)

[8] Tijksens E, Ramon H, de Baerdemaeker J. Discrete element modelling for process simulation in agriculture[J]. Journal of Sound and Vibration. 2003, 266(3): 493-514.

[9] Ehler Detlef. Measuring mass flow by bounce plate for yield mapping of potatoes[J]. Precision Agriculture, 2000, 2(2): 119-130.

[10] 李水乡, 赵健. 非球体填充的组合球模型及松弛算法[J]. 计算物理, 2009, 26(3): 454-460. Li Shuixiang, Zhao Jian. Sphere assembly model and relaxation algorithm for packing of non-spherical particles[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(3): 454-460. (in Chinese with English abstract)

[11] 王显仁. 水稻谷粒的力学性能及基于能量平衡的脱粒损伤机理研究[D]. 镇江, 2007. Wang Xianreng. Mechanical Properties of Rice Grain and Threshing Injury Based on the Energy Conservation [D]. Zheng Jiang, 2007. (in Chinese with English abstract)

[12] Dziugys Algis, Peters Bernhard. An approach to simulate the motion of spherical and non-spherical fuel particles in combustion chambers[J]. Granular Matter, 2001, 3(4): 231-266.

[13] Higashitani Ko, Iimura Kenji, Sanda Hiroko. Simulation of

- deformation and breakup of large aggregates in flows of viscous fluids[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(9): 2927—2938.
- [14] Johnson K L. *Contact Mechanics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [15] Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(3): 525—541.
- [16] Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco. An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(5): 1303—1312.
- [17] Di Renzo Alberto, di Paolo Maio. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59: 525—541.
- [18] Malone Kevin Francis, Xu Bao Hua. Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems[J]. *Particuology*, 2008, 6(6): 521—528.
- [19] 周祖锬. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.
- [20] 张红霞. 稻米及米饭的力学流变学特性的研究及其应用探讨[D]. 哈尔滨, 2004.
- Zhang Hongxia. *Studies on the Mechanical Rheological Properties and Discuss of Application of Brown Rice and Cooked Rice*[D]. Ha ErBing, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [21] 高建民, 郝磊斌, 张刚, 等. 谷粒冲击压电力敏元件数值模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(6): 636—693.
- Gao Jianmin, Hao Lebin, Zhang Gang, et al. Numerical simulation and test of grain impact piezoelectric yield sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(6): 636—693. (in Chinese with English abstract)
- [22] Fulton John P, Sobolik Christopher J, Shearer Scott A, et al. Grain yield monitor flow sensor accuracy for simulated varying field slopes[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(1): 15—21.
- [23] Burks T F, Shearer S A, Fulton J P, et al. Effects of time-varying inflow rates on combine yield monitor accuracy[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(3): 269—275.
- [24] 中华人民共和国电子工业部. 埋刮板输送机型式和基本参数[S]. 1989.

Discrete element method analysis of impact action between rice particles and impact-board

Qiu Baijing, Jiang Guowei^{*}, Yang Ning, Guan Xianping, Xie Jinjian, Li Yaoming

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

Abstract: Contacts model of Hertz-Mindlin (no slip) based on discrete element method of soft-sphere was used to simulate the impact action between the rice particles flow and the impact-board in order to improve the measurement accuracy of grain flow. The relationship of rice mass and mean normal impact force was analyzed when the line velocity of elevator was 0.5, 1.0 and 1.5 m/s. The results showed that simulation parameters of discrete element method which used between rice particles and impact-board were reasonable, and it had great practical value; The Linear correlation increased from 0.8062, 0.9082, 0.9891 to 0.9144, 0.9630, 0.9944 at three velocities respectively when the sliding stages removed. Therefore, we should consider how to reduce the sliding stages to improve the measurement accuracy when designed the measurement device of grain flow. This article can provide technical support for the research and development of grain mass flow device.

Key words: numerical simulation, impact strength, models, discrete element method, contact mechanics, rice particles