

型孔轮式排种器工作过程与性能仿真*

于建群¹ 王 刚¹ 心 男¹ 付 宏²

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学计算机科学与技术学院, 长春 130012)

【摘要】 由型孔轮式大豆排种器的三维 CAD 模型建立了其三维离散元法分析模型,采用球颗粒建立了大豆种子的分析模型,采用离散元法和自主研发的三维 CAE 软件对排种器的工作过程及性能进行了仿真分析,并与台架试验进行比较。结果表明,排种性能、投种角、种子运动轨迹与台架试验结果基本一致,证明了采用离散元法分析型孔轮式大豆排种器工作过程及其性能的可行性。

关键词: 型孔轮式排种器 大豆种子 离散元法 优化设计

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)12-0083-05

Simulation Analysis of Working Process and Performance of Cell Wheel Metering Device

Yu Jianqun¹ Wang Gang¹ Xin Nan¹ Fu Hong²

(1. School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract

A cell wheel metering device and the soybean seed were researched by using the discrete element method. The 3-D discrete element method analytical model of the seed metering device was built on its 3-D CAD model extracted through the method which was based on graphic elements and the surface mesh, and the 3-D particle model of soybean seeds were established on the spherical particle. The metering performance, the trajectories and dropping angles of the soybean seeds were simulated and analyzed by using self-developed 3-D CAE software. It showed that the metering performance, the dropping angles and trajectories of the seeds were good agree with the experiment results by comparing the analytical results of simulation. This result showed the feasibility of using the discrete element method to analyze the performance of the cell wheel metering device.

Key words Cell wheel metering device, Soybean seeds, Discrete element method, Optimal design

引言

排种器作为精密播种机的核心部件,其性能直接影响播种机的作业质量,而为提高播种机的作业效果,必须对排种器的结构和充、排种机理进行研究。但目前排种器的设计,大都采用试验和经验方法,既费时费力、研发周期长,往往还达不到优化的目的。

随着计算机技术的发展,基于离散介质力学的理论在较多领域得到应用。目前研究和应用较多的方法为离散元法^[1~2]。离散元法的基本思想是,把散粒群体简化成具有一定形状和质量颗粒的集合,赋予接触颗粒间及颗粒与接触边界(排种器)间某接触力学模型和模型中的参数,以分析散粒群体中每个颗粒的运动过程。

本文以一种型孔轮式排种器^[3~5]和一种大豆种

收稿日期: 2011-09-02 修回日期: 2011-09-30

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA04Z125)、国家自然科学基金资助项目(50775097、60973090、11172112)和吉林省科技发展规划资助项目(20100313)

作者简介: 于建群,教授,博士生导师,主要从事数字化设计研究,E-mail: yujianqun@jlu.edu.cn

通讯作者: 付宏,教授,主要从事数值模拟和计算机仿真研究,E-mail: Fuhong@jlu.edu.cn

子(吉科豆)为研究对象,采用离散元法和自主研发的三维 CAE 软件,仿真分析排种器的工作过程及其性能,并与排种器的台架试验结果进行对比,以期为例孔轮式排种器的研究和优化设计提供一种新方法。

1 三维 CAE 软件结构及功能

自主研发的三维 CAE 软件有 4 个模块,即边界(排种器)模型设计模块、离散元法分析模型建模模块、离散元法仿真分析计算模块和工作过程仿真显示与性能分析模块,见图 1。

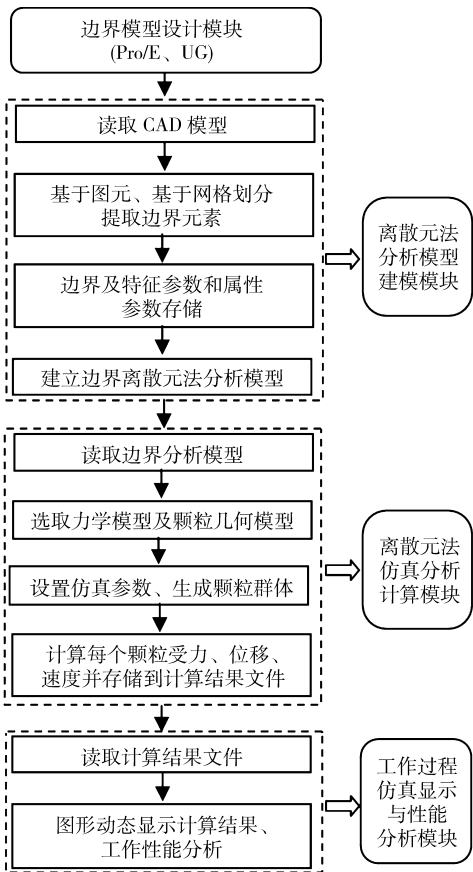


图 1 三维 CAE 软件的结构

Fig.1 Structure of 3-D CAE software

边界模型设计模块,由 CAD 软件组成,使用者可由该模块设计排种器的三维实体模型,为排种器工作过程的仿真分析和结构、尺寸参数优化提供数据。

离散元法分析模型建模模块,是读取排种器三维实体模型并进行处理,同时设定边界的运动特征和材料属性参数,由此建立边界元素、运动特征和材料属性的离散元分析模型,并将模型存储到数据库中,为离散元法仿真分析计算模块和工作过程仿真显示与性能分析模块提供数据环境。

离散元法仿真分析计算模块,是分析计算颗粒之间、颗粒与机械部件之间的受力与运动情况,用户

首先在数据库中选取排种器的分析模型,再根据种子和排种器的特性选择不同的接触力学模型和相关参数,然后进行离散元法计算,由此求出每粒种子的运动速度和位移,并将这些信息以文件的形式记录下来,为仿真显示与性能分析模块提供数据。

工作过程仿真显示与性能分析模块,是将计算结果数据以图形动态仿真的形式重现,同时显示颗粒速度场、颗粒受力场、机械部件受力等,以评价机械部件的工作性能。

该 CAE 软件的特点为:①实现了三维 CAD 软件与三维离散元法软件的集成,由此把与散粒物料相关的工作部件设计与离散元法仿真分析结合起来。②可通过改变颗粒模型、工作部件的 CAD 模型和力学模型及参数,来分析评价不同种类散粒物料、不同结构和运动方式的机械部件的工作过程及性能,如播种时的单粒率、空穴率、种子运动轨迹、种子运动速度、种子受力等,以实现机械部件的结构方案和尺寸参数的优化。③可根据仿真过程分析机械部件的工作机理,从而开发新的机械部件。

2 离散元法分析模型

2.1 边界模型

在进行离散元法分析时,首先应建立边界分析模型,本文采用基于图元的边界建模方法^[6]和基于网格划分的边界建模方法^[7],具体步骤为:①应用三维 CAD 软件建立排种器三维实体模型,如图 2a 所示。②通过人机交互,提取与种子接触作用的排种器的零件表面,对于可用初等解析函数表示的简单曲面,如平面、球面、圆柱面、圆锥面等,可直接提取其尺寸参数,即基于图元的建模方法。对于不能用初等解析函数表示的自由曲面,进行三角形网格划分,将其离散成小三角形平面片的组合,然后提取每个三角形平面片尺寸参数,即基于网格划分的建模方法。③对边界设置运动特征和材料属性参数,最终建立排种器的三维离散元法分析模型,如图 2b 所示。

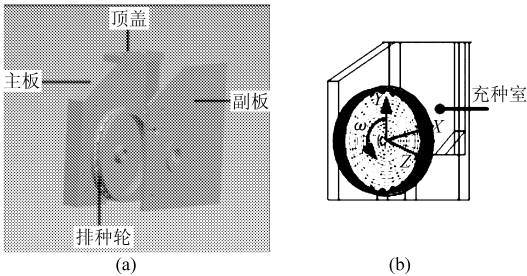


图 2 排种器的三维 CAD 模型和三维离散元法分析模型

Fig.2 3-D CAD model and 3-D DEM analytical model

(a) 三维 CAD 模型 (b) 三维离散元法分析模型

2.2 颗粒模型

由于吉科豆种子球形率在 88% 以上的占 90%，所以在离散元分析过程中，本文将大豆种子简化为球颗粒模型（图 3），其直径取大豆种子的等效直径 $D^{[8]}$ 为

$$D = (LWT)^{1/3} \tag{1}$$

式中 $L、W、T$ ——大豆种子三轴尺寸长、宽、厚的实测值

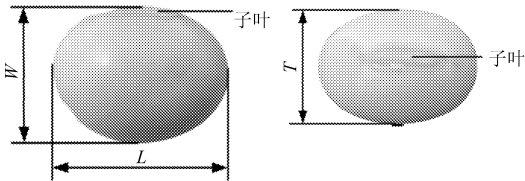


图 3 大豆种子三轴尺寸示意图

Fig. 3 Three axes dimensions of soybean seed

3 仿真参数选取

由于大豆种子可视为无粘干颗粒，所以本文采用线性粘弹性力学模型^[9]，计算种子之间及种子与排种器之间的接触作用力。离散元法仿真计算时，参数选取如表 1 所示。其中种子的颗粒密度、种子与边界间的摩擦因数、碰撞恢复系数 e 取试验测试的平均值^[10]；种子之间的摩擦因数参考文献^[11]选取；为减少计算时间，种子与边界间接触的切向刚度系数 k_n ，取试验测得种子三轴方向刚度系数平均值的 $1/2^{[10]}$ ；种子间接触的切向刚度系数取与边界接触的 $1/2^{[12]}$ ；切向刚度系数 k_s 取法向的 $2/3 \sim 1^{[9]}$ ；为保证计算收敛，时步为^[13]

$$\Delta t = \lambda \sqrt{\frac{m_{\min}}{k_{\max}}} \tag{2}$$

表 1 离散元法仿真分析时的参数

Tab. 1 Input parameters for DEM simulation analysis

参数	数值	
	颗粒与颗粒	颗粒与边界
法向刚度系数 $k_n / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	26 000	52 000
切向刚度系数 $k_s / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	17 500	35 000
法向阻尼系数 $c_n / \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	0. 806	1. 37
切向阻尼系数 $c_s / \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	0. 658	1. 119
碰撞恢复系数 e	0. 440	0. 501
动摩擦因数 f_k	0. 23	0. 11
静摩擦因数 f_s	0. 27	0. 15
颗粒密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$1. 209 \times 10^3$	
颗粒直径 D / mm	6. 22 ~ 7. 37 (正态分布)	
颗粒数目 n	780	
计算时步 $\Delta t / \text{s}$	$1. 226 \times 10^{-5}$	
仿真时间 T / s	20	

式中 λ ——保险系数，取 $\lambda = 0. 2$

$k_{\max}$ ——接触的最大刚度系数

$m_{\min}$ ——颗粒的最小质量

法向阻尼系数 c_n 和切向阻尼系数 c_s 为

$$c_n = - \frac{2 \ln e \sqrt{m_0 k_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \tag{3}$$

$$c_s = - \frac{2 \ln e \sqrt{m_0 k_s}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}} \tag{4}$$

$$m_0 = \begin{cases} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} & (\text{两颗粒接触}) \\ m_1 \text{ 或 } m_2 & (\text{颗粒与边界接触}) \end{cases} \tag{5}$$

式中 m_0 ——接触等效质量

$m_1、m_2$ ——两接触颗粒的质量

4 结果与讨论

为便于观察排种过程中排种器内部大豆种子的运动过程，采用有机玻璃制作试验用排种器。采用自主研发的三维 CAE 软件（图 4），在 13. 99、20. 33、26. 67、33. 01 r/min 4 种型孔轮转速下，对排种器的工作过程及排种性能进行仿真分析，并与台架试验（图 5）进行对比。

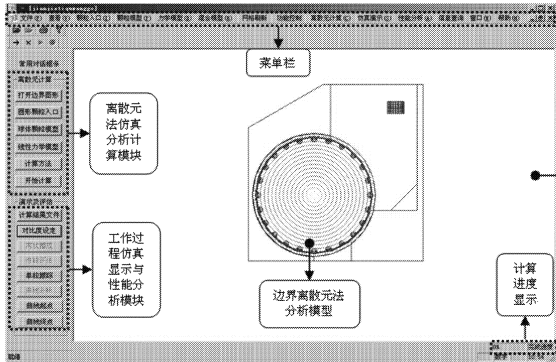


图 4 自主研发的 CAE 软件主界面

Fig. 4 Main interface of self-developed CAE software

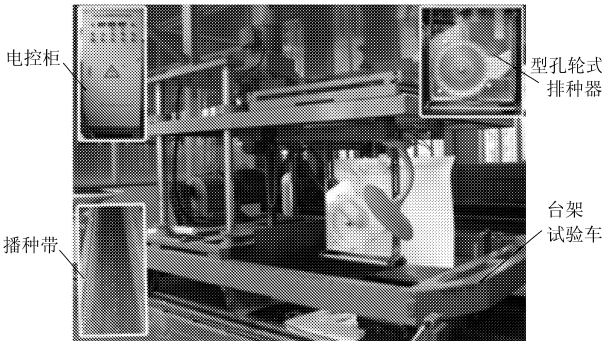


图 5 PSJ 型排种性能试验台

Fig. 5 PSJ-type metering device test bench

4.1 排种性能的仿真与试验对比

在统计排种性能时，每种转速下分别进行 4 次仿真，每次仿真播出 100 粒种子，取 4 次仿真结果的

平均值作为最终结果。仿真与台架试验排种性能对比如表 2 所示。

表 2 不同转速下排种性能仿真与试验对比
Tab.2 Comparison of metering performance with different rotation speeds between simulation and experiment %

性能参数		排种轮转速/ $r\cdot\min^{-1}$			
		13.99	20.33	26.67	33.01
单粒率	台架试验	98.37	94.57	86.75	82.15
	球型仿真	97.11	94.53	92.60	89.45
	相对误差	1.26	0.04	5.85	7.30
空穴率	台架试验	1.36	5.43	13.00	17.59
	球型仿真	2.89	5.47	7.40	10.55
	相对误差	1.53	0.04	5.60	7.04
双粒率	台架试验	0.27	0	0.25	0.26
	球型仿真	0	0	0	0
	相对误差	0.27	0	0.25	0.26

由表 2 可知:①仿真与试验的单粒率随转速的增加而减少,空穴率随着转速的增加而增加,仿真和试验变化趋势一致。②随着转速的增加,仿真的双粒率保持不变,试验的双粒率保持在 0.5% 以内,两者相差不大。③4 种转速下仿真与试验的单粒率、双粒率和空穴率相对误差均在 10% 以内。

4.2 投种角的仿真与试验对比

排种器投种角定义为:在排种器工作过程中,当种子完全落出型孔时,该型孔轴线与 Y 轴负方向的夹角,如图 6 所示, α 为投种角。具体测量方法为:①在 CAE 软件中重现仿真结果并截取种子完全脱离型孔瞬时图片;由高速摄像机记录试验排种器工作过程,在试验过程回放时截取符合要求的图片。②将截取的图片导入 CAD 软件中,分别绘制过型孔轮中心竖直线和过型孔轮中心与刚落出种子的型孔中心直线,对这两条直线进行角度标注,从而得到仿真、试验投种角。因为统计投种角时有一定的随机

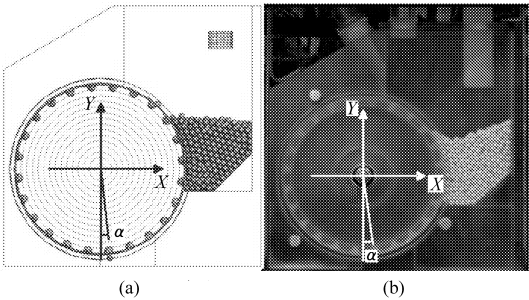


图 6 投种角的仿真与试验分析
Fig.6 Analysis of seed dropping angle between simulation and experiment
(a) 仿真分析 (b) 试验分析

性,所以每种转速下分别统计 10 组数据,去掉最大值和最小值后,取平均值作为最终结果,如表 3 和图 7 所示。

表 3 不同转速下投种角的仿真与试验对比
Tab.3 Comparison of seed dropping angle with different rotation speeds between simulation and experiment

转速/ $r\cdot\min^{-1}$	仿真投种角 / $(^{\circ})$	试验投种角 / $(^{\circ})$	相对误差 /%
13.99	3.880	3.578	8.44
20.33	3.900	4.205	7.25
26.67	5.000	5.938	15.80
33.01	5.848	6.962	16.00

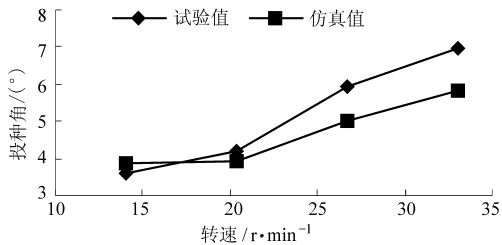


图 7 不同转速下投种角的仿真与试验对比
Fig.7 Comparison of seed dropping angle with different rotation speeds between simulation and experiment

由表 3 和图 7 可以得知:①当转速为 13.99、20.33 $r/\min$ 时,仿真与试验较接近,相对误差分别为 8.44%、7.25%,随转速的增加,仿真值比试验值小,转速最高时误差达到最大值 16.00%。②随着转速的增加,仿真与试验投种角都是线性增加的,变化趋势相同。

4.3 种子运动轨迹仿真与试验对比

由于试验和仿真过程中靠近排种轮的第 3 及第 3 层之外的种子基本保持不动,所以本文选取紧挨型孔轮且其相对 X 轴逆时针方向 $(20 \pm 2)^{\circ}$ 的一粒种子为研究对象,分析其运动轨迹,如图 8 所示。具体方法为:首先利用自主研发的三维 CAE 软件中的

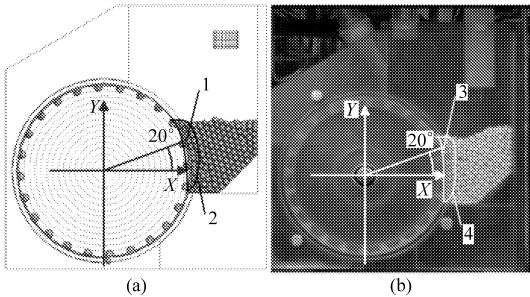


图 8 单粒种子运动轨迹的仿真与试验分析
Fig.8 Analysis of single seed trajectory between simulation and experiment
(a) 仿真分析 (b) 试验分析
1. 仿真分析种子 2. 仿真拖带层 3. 试验分析种子 4. 试验拖带层

单粒种子跟踪功能,记录种子运动轨迹坐标;然后利用爆破分析软件对 4 种转速下高速摄像得到的种子运动轨迹进行跟踪记录,进而得到种子连续运动的坐标,由此得到试验种子运动轨迹^[14]。4 种转速下

试验与仿真轨迹如图 9 所示。

由图 9 可以看出,拖带层中单粒种子运动轨迹的仿真与试验测试具有一定偏差,但 4 种转速下变化趋势一致。

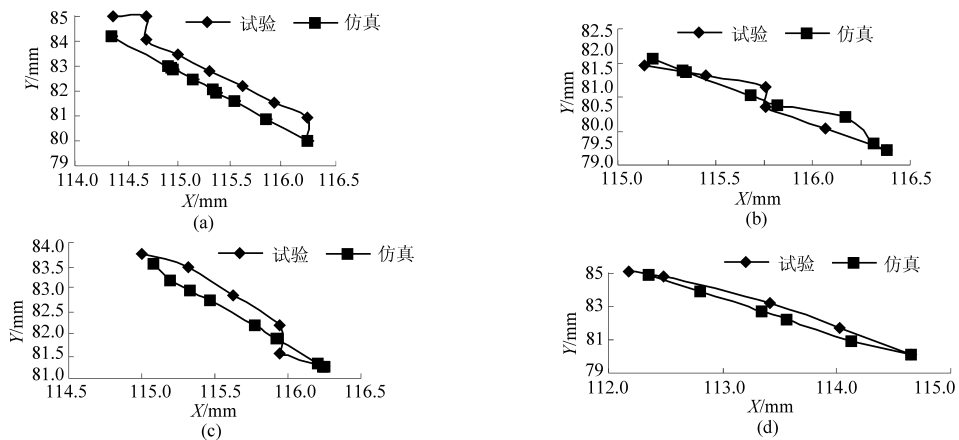


图 9 不种转速下单粒种子运动轨迹仿真与试验对比

Fig. 9 Comparison of single seed trajectory with different rotation speeds between simulation and experiment

(a) 13.99 r/min (b) 20.33 r/min (c) 26.67 r/min (d) 33.01 r/min

5 结束语

以型孔轮式排种器和大豆种子为研究对象,采用离散元法及自主研发的三维 CAE 软件,分别对排种器工作时的排种性能、投种角、拖带层种子运动轨迹进行试验测试与仿真对比分析。结果表明:仿真

与试验的排种性能和投种角相对误差分别在 10%、16% 以内,且仿真结果与试验结果变化趋势相同;仿真与试验的种子运动轨迹有一定误差,但它们随排种轮转速的变化趋势是一致的;证明了采用离散元法分析型孔轮式排种器的可行性,为型孔轮式排种器的研究及优化设计提供了一种新方法。

参 考 文 献

- Cundall P A, Strack O L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47 ~ 65.
- 杨洋,唐寿高. 颗粒流的离散元法模拟及其进展[J]. 中国粉体技术, 2006(5): 33 ~ 43.
Yang Yang, Tang Shougao. Discrete element method simulation of granular flow and its advances[J]. China Powder Science and Technology, 2006(5): 33 ~ 43. (in Chinese)
- 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003: 56 ~ 66.
- 袁文胜,吴崇友,金诚谦. 异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 72 ~ 75.
Yuan Wensheng, Wu Chongyou, Jin Chengqian. Design and experiment on seed-metering device with special cells for cole seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 72 ~ 75. (in Chinese)
- 张宇文. 机械式多功能精密排种器的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 50 ~ 53.
Zhang Yuwen. Research and design for making a new type of mechanized and multiple functions of precision seed-drilled appliance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 50 ~ 53. (in Chinese)
- 付宏,乌兰,黄万风,等. 基于图元的三维离散元法边界建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(12): 2 328 ~ 2 333.
Fu Hong, Wu Lan, Huang Wanfeng, et al. Method for modeling boundaries based on the graphic elements in the three-dimensional DEM[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(12): 2 328 ~ 2 333. (in Chinese)
- 黄山. 基于 CAD 模型的三维离散元法边界建模方法研[D]. 长春:吉林大学, 2011.
Huang Shan. The research of boundary modeling method of 3D DEM based on CAD model[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- Deshapande S D, Bal S, Ojha T P. Physical properties of soybean[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(2): 89 ~ 98.
- Mishra B K. A review of computer simulation of tumbling mill by the discrete element method: part I — contact mechanics [J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 71(1 ~ 4): 73 ~ 93.

表 5 单因素试验砍蔗质量的方差分析

Tab.5 Variance analysis of sugarcane cutting quality of single factor experiment

误差来源	偏差平方和	自由度	均方差	统计量 F	临界值	显著性
路谱频率	386.2	5	77.24	2.82	$F_{0.1}(5,24) = 2.62$	显著
误差	656.6	24	27.35			
总和	1 043	29				

表 4、表 5 表明,0.05 Hz 到 0.30 Hz 路谱激励对

砍蔗质量有一般显著的影响,随着蔗地激励频率的增大,砍蔗质量有降低的趋势。

5 结束语

结合仿真和试验的方法,比较和分析了蔗地路谱激励下对刀盘砍蔗时振动影响以及对应的甘蔗断面切割质量。结果表明,蔗地路谱激励对砍蔗时刀盘的振动有较为明显影响,随着蔗地激励频率的增大,砍蔗质量有降低的趋势。

参 考 文 献

1 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等. 甘蔗茎秆切割机理研究[J]. 农机化研究,2007(1):21~24.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Study on the cutting mechanism of sugarcane stem [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(1):21~24. (in Chinese)

2 Mello R D C, Harris H. Cane damage and mass losses for conventional and serrated basecutter blades [C]//Proceedings of Australia Sugar Cane Technology Meeting, 2000(22):84~91.

3 杨家军,谢化斌,汤双清. 小型甘蔗收割机切割器结构动态设计[J]. 湖北工学院学报,2003,18(2):3~5.
Yang Jiajun, Xie Huabin, Tang Shuangqing. Dynamic design of minitype sugarcane harvester [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2003,18(2):3~5. (in Chinese)

4 杨坚,梁兆新,莫建霖,等. 甘蔗切割器切割质量影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(5):60~64.
Yang Jian, Liang Zhaoxin, Mo Jianlin, et al. Experimental research on factors affecting the cutting quality of sugarcane cutter [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(5):60~64. (in Chinese)

5 王宵峰,杨春伟,杜永昌. 道路模拟控制系统的研制和开发[J]. 仪表技术与传感器,2004(10):22~25.
Wang Xiaofeng, Yang Chunwei, Du Yongchang. Study and design of road simulation control system[J]. Instrument Techique and Sensor, 2004(10):22~25. (in Chinese)

6 靳晓雄,张帆. 时域波形再现技术在汽车道路模拟中的应用[J]. 中国工程机械学报,2006,4(2):220~222.
Jin Xiaoxiong,Zhang Fan. Application of time waveform replication technology in automobile road simulation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006,4(2):220~222. (in Chinese)

7 麻芳兰,何玉林,李尚平,等. 甘蔗收获机切割性能的模糊综合评价与优化[J]. 农业机械学报,2006,37(12):79~84.
Ma Fanglan, He Yulin, Li Shangping, et al. Analysis on fuzzy comprehensive evaluation and optimization of cutting performance of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(12):79~84. (in Chinese)

(上接第 87 页)

10 张列南. 基于离散元法的大豆精密排种器的数字化设计方法研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
Zhang Lienan. Digital design method of soybean precision seed-metering device based on DEM [D]. Changchun: Jilin University,2009. (in Chinese)

11 LoCurto G J, Zakirov V, Bucklin R A. Soybean friction properties [C]//1997 ASAE Annual International Meeting, ASAE Paper 97-4108, Minneapolis, MN, 1997.

12 Klinker D H, Henderson J M. Flow model development for pherical discrete objects[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(1):225~233.

13 焦红光,李靖如,赵继芬,等. 关于离散元法计算参数的探讨[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2007,26(1):88~93.
Jiao Hongguang, Li Jingru, Zhao Jifen, et al. Discussion on the calculation parameters of discrete element method [J]. Journal of Henan Polytechnic University:Natural Science,2007,26(1):88~93. (in Chinese)

14 李政权. 基于离散元法的小麦排种器的数字化设计方法研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
Li Zhengquan. Study on digital design method of wheat metering device based on DEM [D]. Changchun:Jilin University, 2009. (in Chinese)