

水稻种子与斜面碰撞后运动规律的试验

任文涛, 董滨, 崔红光, 韩双, 向权力, 代丽丽

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110161)

摘要: 利用高速摄影仪和高分辨率摄像头分别从竖直和水平两个方向对水稻种子与斜面发生碰撞后的运动轨迹进行了在线跟踪, 通过摄像图片的再现, 检测与分析了接触面材料、投种高度和斜面倾角对种子碰撞后各运动参数的影响。试验结果表明: 随投种高度 h 增加, 种子碰撞后第 1 次弹跳高度 H_1 线性增大、沿斜面方向的弹跳距离 L_1 也线性增大; 随斜面倾角 θ 的增大, H_1 线性减小、 L_1 呈指数规律增大; 利用二元二次回归正交试验, 建立了以投种高度和斜面倾角为自变量, 以种子运动平面的侧向偏斜角度为目标函数的种子运动行为预测模型。研究成果为输种管的结构设计提供参考。

关键词: 水稻种子, 输种管, 结构设计, 碰撞, 投种高度, 斜面倾角, 弹跳高度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.019

中图分类号: S223.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0103-05

任文涛, 董滨, 崔红光, 等. 水稻种子与斜面碰撞后运动规律的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 103-107.

Ren Wentao, Dong Bin, Cui Hongguang, et al. Experiment on the motion characteristics of rice seeds after collision with different slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(7): 103-107.(in Chinese with English abstract)

0 引言

水稻种子在输种管内输送过程中, 由于碰撞作用导致从排种器排出的种子流的均匀度变差, 影响种子在田间分布的株距准确性。近年来, 输种管碰撞对播种均匀性影响的研究受到关注。佟超研究了零速投种技术及输种管设计理论^[1], 贺俊林等分析了导种管曲线设计方法^[2], 马旭等研究了精密播种机接输种管后田间植株分布的变化规律^[3], 高锐进行了输种管的计算机辅助设计方法的探讨^[4]。挪威大学农业工程系的 Hans Christian Endreud 把揭示种子在输种管中能量损失最小作为研究目标计算出合适的输种管倾斜度、管径和管长等^[5-8]。但有关种子与输种管的碰撞过程及碰撞后种子的运动行为研究几乎是空白, 导致参考现有模型设计出的输种管田间试验效果不佳^[9-16]。

本文以接触面材料、投种高度、斜面倾角为试验因素, 研究水稻种子与斜面碰撞后的弹跳高度和种子沿斜面方向的弹跳距离等运动行为规律, 为优化输种管参数、提高排种均匀性提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

选用适于直播的水稻品种丰民 2000 (除芒后) 作为试验种子, 种子的最大长度为 8 mm。采用美国 Vision Research 公司生产的 Phantom 高速摄影仪, 检测种子在

竖直面内的运动轨迹。采用深圳生产的枫雨杰 TM 牌 500 万像素摄像头检测种子碰撞后在水平面内的运动轨迹。惠州天敏公司生产的 vc4000 型视频采集卡, 帧率为 30 fps, 压缩位率为 2 Mbps。选用上海仪表厂生产的精度为 2' 的万能角度尺检测斜面倾角。选用带有 P4 2.6 处理器, 256 M 显存的计算机进行图像的转存。图像处理利用 Adode 公司生产的 Photoshop7.0 软件。

1.2 试验方法

1.2.1 图像采集系统

试验采用了自制的模拟种子从排种盘排出后自由下落与输种管管壁发生碰撞的摩擦角试验台, 如图 1 所示。借鉴袁月明^[17-18]等的研究结论, 认为水稻种子在气吸式排种盘上有 3 种吸附姿态, 但沿长轴方向被吸附占大多数, 因此可以将种子放在直径为 6 mm 的管内, 保证其沿长轴方向投下, 如图 2a 所示。

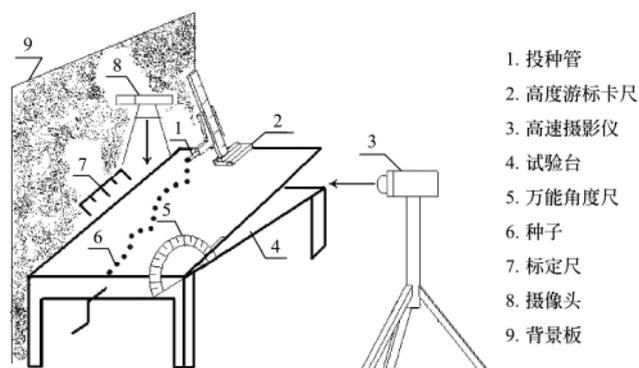


图 1 试验装置结构简图

Fig.1 Structural diagram of the test device

利用高速摄影仪获取种子在竖直面内投影轨迹, 初步试验得知种子的速度最大可达到 4 m/s, 因此选定记录速率为 250 fps。采集域为 0.5 m × 0.68 m。因种子质量较

收稿日期: 2008-12-12 修订日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50775150); 沈阳市科学技术计划项目 (1032051-1-02)

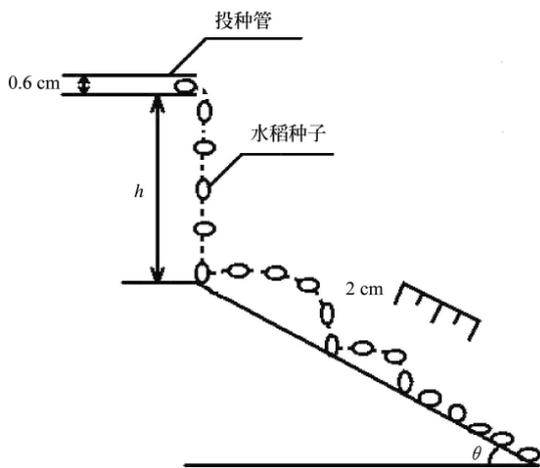
作者简介: 任文涛 (1958-), 男, 辽宁海城人, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会会员 (E041200316S), 主要从事农业机械系统理论与设计研究。沈阳市东陵路 120 号 沈阳农业大学工程学院, 110161。

Email: renwentao1958@yahoo.cn

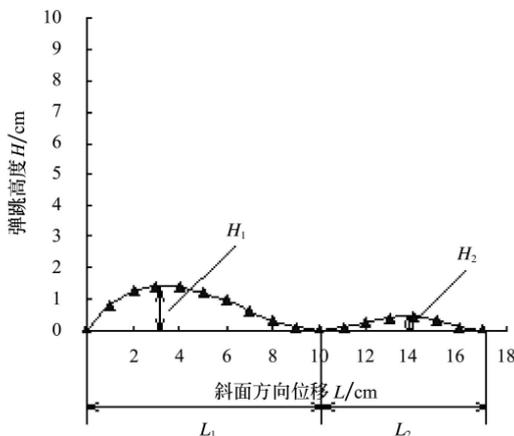
小、易受外界环境影响，故试验选在白天封闭的室内进行。为增加流场中种子的对比度、吸收杂乱的反射光使图像更加清晰，选黑色为摄像背景。在摄像背景平面内放置一个刻度尺，作为标定。种子碰撞后的运动平面与摄影仪的摄像平面（即竖直平面）可能有侧向偏斜，因此需在摄像背景的垂直方向安装一个摄像头，铅垂向下拍摄，选定记录速率为 60 fps，可以采集到种子在水平投影方向上的运动轨迹，同时在斜面上作一参考线，投种时保证种子的第一碰撞点在该参考线上。

1.2.2 图像处理与分析

将高速摄影仪采集的种子运动轨迹图像，通过视频采集卡存储到计算机内，回放视频录像并利用抓图工具每隔 8 ms 抓拍一次，从碰撞的第一点开始并记为 0 时刻，依次进行标记，直到能够完整的描述该次弹跳的全过程为止。再将图片导入到 Photoshop 图像处理软件中，经处理得到种子运动轨迹图像如图 2a 所示，找出各时刻该种子质心在图片中的位置坐标，选定碰撞的第一点为坐标原点，沿斜面向下为 x 轴正方向，垂直于斜面向上为 y 轴正方向，建立坐标系，并进行相应的坐标变换。根据图像中标定的刻度，计算出实际尺寸与图片中尺寸的对应比例关系，绘制出在竖直投影面内种子的运动轨迹，



a. 原始图像叠加后种子运动轨迹



b. 处理后生成的种子运动轨迹曲线

图 2 图像处理过程

Fig.2 Image processing

记录弹跳次数、弹跳的高度及沿斜面方向的弹跳距离，如图 2b 所示。

通过摄像头获取种子运动轨迹后，仍需进行回放，抓拍第一、第二碰撞点，得到这两点的坐标，计算出种子侧向偏斜的角度。

结合高速摄影仪和摄像头得到的种子运动轨迹就能清晰完整的描述水稻种子与斜面碰撞后的弹跳规律。

1.3 试验设计

以接触面材料、投种高度 h 、斜面倾角 θ 为试验因素，以弹跳次数 n 、每一次弹跳的高度 H_i 和沿斜面方向的弹跳距离 L_i 为试验指标进行试验。考虑到与作物绳播种植技术相配套的种绳捻制机的使用环境（在室内固定架架上工作）、输种管制造的难易性和成本等因素，选择如下 3 种可能的输种管材料：厚度为 3 mm 的聚碳酸酯（pc）板、厚度为 1 mm 的镀锌板和厚度为 3 mm 的有机玻璃作为碰撞的接触面材料（3 种材料的面积均 30 cm×30 cm）。参考刘俊峰等^[19-24]的研究结论，投种高度水平分别取为：7、9、11、13、15 和 17 cm。根据输种管的结构特征，碰撞斜面倾角分别取为 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°和 90°。每个处理均重复 5 次，对每组试验得到的相同时刻种子位置坐标求取平均值。

在前述试验的基础上，选取聚碳酸酯（pc）板作为接触面材料，以投种高度和斜面倾角为试验因素进行二元二次回归正交试验，分析各因素的不同水平及交互作用对种子运动平面侧向偏斜角度的影响。设计方案在零水平处重复 8 次，总试验次数 16 次， $\gamma=1.682$ ，试验因素水平编码表见表 1。

表 1 试验设计因素水平编码表

Table 1 Levels and codes of test design factors

水平	投种高度 h/cm	斜面倾角 $\theta/^\circ$
-1.682	10.17	15.86
-1	11	20
0	13	30
1	15	0
1.682	15.83	44.14

2 结果与分析

2.1 接触面材料对碰撞后种子运动状态的影响

从图 3 中可以看出，在投种高度为 13 cm，斜面倾角为 20°的试验条件下，种子与有机玻璃碰撞后产生的每一次弹跳高度和沿斜面方向的弹跳距离最大，弹跳最为强烈，而种子与其他两种材料碰撞后产生的弹跳行为接近且较小。产生上述差异的原因是碰撞材料的弹性模量不同。

2.2 投种高度对碰撞的影响

选用聚碳酸酯（pc），作为接触面材料，斜面倾角为 20°，检测不同投种高度下种子第一次弹跳高度 H_1 和沿斜面方向的弹跳距离 L_1 值并进行方差分析，结果表明投种高度对 H_1 和 L_1 影响极显著。当投种高度在 7~13 cm 时种子碰撞后仅弹跳 1 次，但投种高度在 13~17 cm 时弹跳 2 次，这个弹跳次数变化的临界值在 13 cm 附近。图 4

表明随着投种高度的增加， H_1 和 L_1 都线性增加。

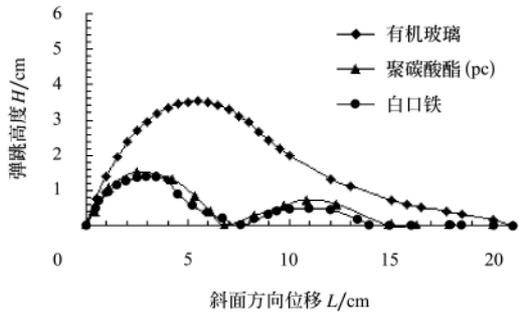


图 3 不同接触面材料对种子弹跳高度的影响
Fig.3 Effect of contact materials on the bouncing height of the seed

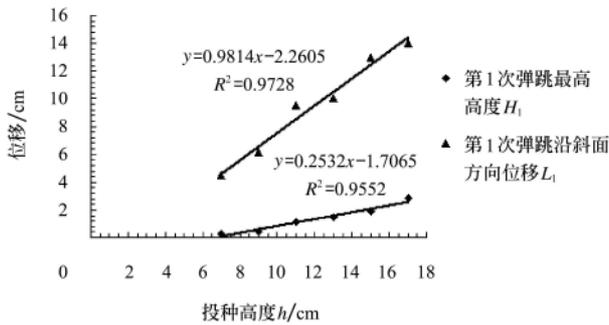


图 4 投种高度对第 1 次弹跳最高高度和沿斜面方向位移的影响
Fig.4 Effects of seed charge height on the first bounce maximum height and displacement along slant

设种子碰撞后速度为 v ，种子质量为 m ， F 为碰撞过程中种子对斜面的作用力， t 为碰撞持续时间， N 为碰撞过程中斜面对种子的正压力。若碰撞前种子动量为 mv ，碰撞中速度减为零，碰撞变形阶段结束后有

$$\Delta mv = \sqrt{2gh} - 0 = Ft \quad (1)$$

由受力分析可知种子上跳的条件：

$$\sum x = N - mg \cos \theta > 0 \quad (2)$$

由式 (1) 可见，随投种高度 h 增大、 F_1 增大、 F_1 的反作用力 N_1 也增大。由式 (2) 式可知，当 N_1 增大到与 $mg \cdot \cos \theta$ 相等时有可能产生第二次弹跳，即存在临界值 h 。

2.3 斜面倾角对碰撞的影响

选用接触面材料为聚碳酸酯 (pc)，投种高度为 13 cm，调节斜面倾角观察碰撞后弹跳情况。对试验结果 H_1 和 L_1 进行方差分析，结果表明斜面倾角对 H_1 和 L_1 影响极显著。试验过程中发现当斜面倾角在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 时，种子弹跳 1 次，在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 时弹跳 2 次，斜面倾角的临界值在 50° 左右。从图 5 可以看出，随 θ 不断增大， H_1 线性减小， L_1 呈指数规律增加，在 4.5° 处两指标有交叉点，此时两指标之和最小。

由式 (2) 可知随 θ 增大， $\sum x$ 增大，在某一斜面角度下，发生第二次碰撞时，有 $\sum x=0$ ，此时种子有第 2 次弹

起的趋势，即存在临界角度 θ 。

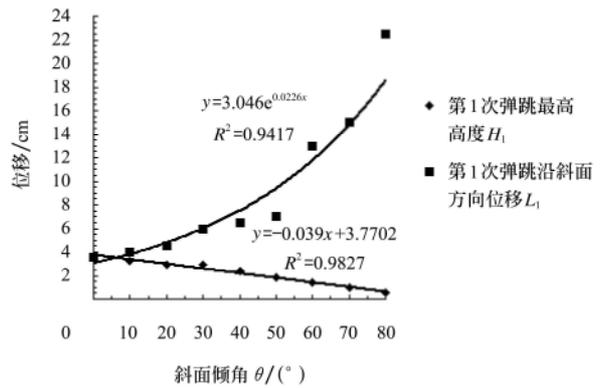


图 5 斜面倾角对种子第 1 次弹跳高度和沿斜面方向位移的影响

Fig.5 Effects of slant obliquity on the first bounce height and displacement along slant

2.4 投种高度和斜面倾角对碰撞后种子运动侧向偏斜角度的影响

1) 回归模型的建立与检验

应用 SAS8.0 分析软件对试验数据进行处理分析，得到以种子运动平面的侧向偏斜角度为目标函数 (Y)，以投种高度和斜面倾角各水平的编码值 X_1 和 X_2 为自变量的二次回归数学模型：

$$Y = 10.28 + 1.82X_1 - 7.24X_2 + 0.22X_1X_2 + 1.09X_1^2 + 2.28X_2^2 \quad (3)$$

回归模型的方差分析结果如表 2 所示。回归方程的显著性检验结果表明，模型的可信度为 99.9%。

表 2 回归模型的方差分析结果

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值
回归	5	496.94	99.39	$F_{回}=17.38$
剩余	10	57.19	5.72	$F_{残}=6.42$
失拟	3	41.95	13.98	
误差	7	15.24	2.18	
总和	15	554.13		

回归方程的失拟检验结果为不显著，说明失拟平方和基本上是由误差等偶然因素引起的，即回归方程拟合得很好，反映了种子运动平面的侧向偏斜角度与投种高度和斜面倾角的关系。

表 3 回归模型系数的 F 检验

回归方程各项常数	回归系数	F 值	临界值	显著性
β_1	1.82	12.14	$F_{0.025}(1,7)=8.07$	$\alpha=0.025$
β_2	-7.24	192.5	$F_{0.001}(1,7)=29.25$	极显著
β_3	0.22	0.09	$F_{0.1}(1,7)=3.59$	不显著
β_4	1.08	4.32	$F_{0.1}(1,7)=3.59$	$\alpha=0.1$
β_5	2.28	19.15	$F_{0.005}(1,7)=16.24$	$\alpha=0.005$

如表 3 所示，显著性检验结果表明因素 2 (斜面倾角)

的一次项对试验指标有极显著的影响;因素 1(投种高度)与因素 2(斜面倾角)的交互项对试验指标没有影响,说明投种高度和斜面倾角两因素没有交互作用;其他各因素的置信水平 $\geq 90\%$,剔除不显著项的回归方程模型为:

$$Y = 10.28 + 1.82X_1 - 7.24X_2 + 1.09X_1^2 + 2.28X_2^2 \quad (4)$$

2) 主因素效应分析

由于回归方程是经无量纲线性编码代换后所得,方程中各项回归系数已经标准化,因此可以直接比较其绝对值大小来判断各因子的重要性,从线性项看, $\beta_2 > \beta_1$,说明斜面倾角对种子碰撞后运动平面侧向偏斜角度的影响比投种高度大。

3) 确定预测模型方程

将回归方程中的因素水平编码值转换为实际值,得到以种子运动平面的侧向偏斜角度为目标函数(Y),以投种高度(Z_1)和斜面倾角(Z_2)为自变量的预测模型方程:

$$Y = 86.74 - 6.18Z_1 - 2.09Z_2 + 0.27Z_1^2 + 0.02Z_2^2 \quad (5)$$

投种高度和斜面倾角对碰撞后种子运动平面侧向偏斜角度的影响如图 6 所示。从图 6 可见,在本试验条件下,碰撞后种子运动平面的侧向偏斜角度随投种高度的增加而增大,随斜面倾角的增加而减小。

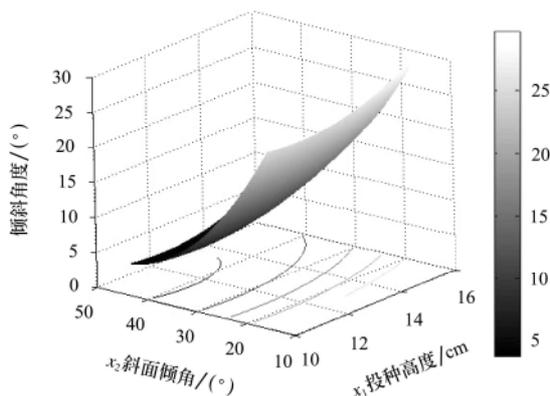


图 6 投种高度和斜面倾角对种子碰撞后运动平面侧向偏斜角度的影响

Fig.6 Effect of seed charge height and slant obliquity on lateral deviation angle of motion plane after the collision

3 结 论

1) 相碰撞的斜面材料对水稻种子碰撞后的运动状态有影响。在投种高度和斜面倾角不变的条件下,种子与有机玻璃斜面碰撞后的弹跳高度和沿斜面方向的弹跳距离最大,而与聚碳酸酯和镀锌板材料斜面碰撞后的上述运动指标较小,且后两者对种子弹跳状态的影响没有明显差异。

2) 投种高度和斜面倾角对水稻种子与斜面碰撞后的运动状态有影响。随投种高度 h 增加,种子碰撞后的第一次弹跳高度 H_1 线性增大,沿斜面方向弹跳距离 L_1 也线性增大。投种高度 13 cm 是种子由 1 次弹跳变为 2 次弹跳的临界值。随斜面倾角 θ 增大, H_1 线性减小, L_1 呈指数规律增大。50°的斜面倾角是种子由 1 次弹跳变为

2 次弹跳的临界值。

3) 斜面材料、投种高度和斜面倾角对碰撞后种子运动平面侧向偏斜角度的影响是相互独立的。回归分析得到了投种高度和斜面倾角对碰撞后种子运动侧向偏斜角度影响的预测模型,分析结果证明,碰撞后种子运动平面的侧向偏斜角度随投种高度的增加而增大,随斜面倾角的增加而减小。

[参 考 文 献]

- [1] 佟超. 零速投种技术及其理论设计[J]. 机械研究与应用, 1995, (1): 16-18.
- [2] 贺俊林, 杨涛, 裘阻荣. 精密播种机导种管曲线的设计研究[J]. 山西农业大学学报, 2000, 20(4): 389-391. He Junlin, Yang Tao, Qiu Zurong. Design and research of the curve of seed tube in 2BQYF-6A direct seeder[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2000, 20(4): 389-391. (in Chinese with English abstract)
- [3] 马旭, 马成林, 张守勤. 精密播种机接输种管后田间植株分布的研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 119-123. Ma Xu, Ma Chenglin, Zhang Shouqin. Study on field plant distribution of precision planter with the seed drop tube[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(3): 119-123. (in Chinese with English abstract)
- [4] 高锐. 精密播种机输种管的微机设计方法探讨[J]. 农业工程学报, 1990, 6(4): 60-66.
- [5] Endrerud H C. Influence of tube configuration on seed delivery to a coulter[J]. J Agric Engng Res, 1999, 74: 177-184.
- [6] Grift T E, Crespi C M. Estimating mean particle diameter in free-fall granular particle flow using a Poisson model in space[J]. Biosystems Engineering, 2008, (11): 28-35.
- [7] Gaikwad B B, Sirohi N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2007, (10): 322-329.
- [8] Genkawa T, Uchino T, Miyamoto S, et al. Development of mathematical model for simulating moisture content during the re-wetting of brown rice stored in film packaging[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 445-451.
- [9] Karayel D, Barut Z B, Ozmerzi A. Mathematical modeling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.
- [10] Arzu Yazgi, Adnan Degirmencioglu. Optimization of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347-356.
- [11] Prasanna G V, BrijeshSrivastava, D.S. Nagesh Kumar. Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(1): 26-35.
- [12] [20] C. Igathinathane, L.O. Pordesimo, E.P. Columbus, et al. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 66(2): 147-158.
- [13] Olivier Schneider, Jean Roger-Estrade, Jean-Noël Aubertot, et al. Effect of seeders and tillage equipment on vertical distribution of oilseed rape stubble[J]. Soil and Tillage

- Research, 2006, 85(2): 115—122.
- [14] M. Jaime Baeza, Jacques Roy. Germination of an obligate seeder (*Ulex parviflorus*) and consequences for wildfire management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(4): 685—693.
- [15] V. Leemans, M-F. Destain. Application of the Hough Transform for Seed Row Localisation using Machine Vision[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(3): 325—336.
- [16] Ghasemi Varnamkhashti M, Mobli H, Jafari A, et al. Some physical properties of rough rice (*Oryza Sativa* L.) grain. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47(3): 496—501.
- [17] 袁月明, 马旭, 朱艳华, 等. 基于高速摄像技术的气吸式排种器投种过程的分析[J]. *吉林农业大学学报*, 2008, 30(4): 617—620.
Yuan Yueming, Ma Xu, Zhu Yanhua, et al. Analysis of working process for seed-metering device based on high speed video camera system technique[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(4): 617—620. (in Chinese with English abstract)
- [18] 廖庆喜, 邓在京, 黄海东. 高速摄影在精密排种器性能检测中的应用[J]. *华中农业大学学报*, 2004, 23(5): 570—573.
Liao Qingxi, Deng Zaijing, Huang Haidong. Application of the high speed photography checking the precision metering performances[J]. *Journal of Huazhong Agricultural*, 2004, 23(5): 570—573. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘俊峰, 杨欣, 冯晓静. 2BF—8 型小麦精播机播种均匀性影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 66—67.
Liu Junfeng, Yang Xin, Feng Xiaojing. Analysis of influence factor on seeding uniformity of model 2BF—8 wheat precision planter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(6): 66—67. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杨松华, 孙裕晶, 马成林, 等. 气力式精密排种器参数优化[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 116—120.
Yang Songhua, Sun Yujing, Ma Chenglin, et al. Optimization of parameters of air-blowing vertical-rotor type precision seed-metering device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(2): 116—120. (in Chinese with English abstract)
- [21] 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴播排种轮的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 108—112.
Luo Xiwen, Liu tao, Jiang Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(3): 108—112. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵月霞. 机械式精密排种器关键技术研究[D]. 南京农业大学, 2003: 28—29.
Zhao Yuexia. Study on Key Technology of Mechanical Precision Metering Device[D]. Nanjing Agricultural University, 2003: 28—29. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王未. 精密播种机触土部件 CAD 数据库的设计与动态分析[D]. 吉林大学, 2006: 42—45.
Wang Wei. Design of Precision Planter's Soil-Touching Parts CAD Database and its Dynamic Analysis[D]. Jilin University, 2006: 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王显仁, 李耀明, 徐立章. 水稻脱粒破碎率与脱粒元件速度关系研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 16—19.
Wang Xianren, Li Yaoming, Xu Lizhang. Relationship between thresher velocities and rice grain broken rate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(8): 16—19. (in Chinese with English abstract)

Experiment on the motion characteristics of rice seeds after collision with different slopes

Ren Wentao, Dong Bin, Cui Hongguang, Han Shuang, Xiang Quanli, Dai Lili
(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Trajectory of the rice seed motion after collision with inclined plane was tracked by a HSVC (high speed video camera) and a high-resolution camera separately from vertical and horizontal direction. Through image analysis captured from video, effects of contact materials, seed charge height and inclined plane obliquity on all motion parameters of the collision were detected and analyzed. The results showed that as seed charge height increased, the maximum height of the first bounce H_1 and the displacement along the direction of the slope L_1 increased linearly. With the increase of inclined plane obliquity, H_1 reduced linearly and L_1 increased exponentially. Using quadratic orthogonal test with two factors, the seed motion forecast model was established with seed charge height and inclined plane obliquity as independent variables and lateral deviation angle of seed motion plane as objective function. The research results provide reference for structure design of seed drop tube.

Key words: rice seed, seed drop tubes, structure design, collision, seed charge height, inclined plane obliquity, seed bouncing height