

直线电磁振动下玉米种子定向传输的模拟仿真试验与验证

邢洁洁 徐丽明* 袁全春 刘旭东 陈俊威 王荣炎

(中国农业大学 工学院,北京 100083)

摘要 针对使用实际直线电磁振动定向装置进行优化试验时效果不理想的问题,利用 ADAMS 建立玉米种子直线电磁振动定向装置参数化仿真模型,从传输稳定性角度确定 3 个影响因素(振幅 A 、台阶高度 H 和倾角 J)的试验范围,以传输速度 v 和定向成功率 ρ 为指标,进行直线电磁振动下玉米种子定向传输的模拟仿真试验,得到了直线电磁振动定向装置的最佳工作条件: $A=0.6\text{ mm}$ 、 $H=3\text{ mm}$ 、 $J=4^\circ$ 。通过实际直线电磁振动定向装置对该最佳工作条件进行验证,结果表明:玉米种子的平均传输速度和定向成功率与仿真结果基本一致,并且能够保证传输稳定性,说明该最佳工作条件正确合理。

关键词 玉米种子;定向传输;仿真;直线电磁振动

中图分类号 S225.93

文章编号 1007-4333(2017)10-0120-06

文献标志码 A

Simulation test and verification of corn seeds' directional transmission under linear electromagnetic vibration

XING Jiejie, XU Liming*, YUAN Quanchun, LIU Xudong, CHEN Junwei, WANG Rongyan

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Aiming at the problem that the effect of the optimization experiment was not ideal using the actual linear electromagnetic vibration directional device for corn seeds, a parameterized simulation model of linear electromagnetic vibration directional device by ADAMS was built firstly, and a simulation test of corn seeds' directional transmission under linear electromagnetic vibration was the carried out. Three factors, e. g. vibration amplitude A , step height H and inclination angle J were obtained from the perspective of transmission stability. The average transmission speed (v_0) and directional success rate (ρ) were also taken as index. Then the optimal working conditions of the linear electromagnetic vibration orientation device were obtained, which is $A\ 0.6\text{ mm}$, $H\ 3\text{ mm}$ and $J\ 4^\circ$. A directional transmission test was carried out on corn seeds by actual directional device based on electromagnetic vibration to verify the optimal working conditions. The results showed that the transmission speed and the directional success rate of corn seeds were basically consistent with the simulation results, and the transmission stability could be guaranteed. In conclusion, the optimal working conditions were proved to be correct and reasonable.

Keywords corn seeds; directional transmission; simulation; linear electromagnetic vibration

玉米定向播种是一种新的播种方法,可以使玉米植株在生长过程中叶子展开方向一致,改善作物在田间的光照和通风情况,能够有效地提高玉米单产,并提高玉米机械化收获水平^[1-5]。要实现玉米定向播种,玉米种子定向传输是关键技术之一。直线电磁振动定向装置主要由直线电磁振动器和定向滑

槽 2 部分组成,能对玉米种子进行姿态翻转使其“尖端”统一朝前实现定向传输。玉米种子的定向成功率和传输速度是该直线电磁振动定向装置重要的工作性能指标,另外作为生物物料,玉米种子在传输过程中还应当保证运动平稳,不能有大的跳跃,即直线电磁振动定向装置的工作性能指标除了定向成功率

收稿日期:2016-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51475461)

第一作者:邢洁洁,博士研究生,E-mail:584731137@qq.com

通讯作者:徐丽明,教授,博士生导师,主要从事生物生产自动化研究,E-mail:xlmoffice@126.com

和传输速度外,还应当有传输稳定性。目前对于直线电磁振动定向装置的研究还处于初级阶段,其工作性能难以保证。因此,选用合理有效的方法对其进行优化具有重要的意义。

王应彪等^[5]对直线电磁振动定向装置进行了理论分析,确定了影响其工作效果的几个主要因素:单个台阶高度 H (简称台阶高度)、滑槽倾角 J (简称倾角)、振幅 A 等,并以定向成功率为单一指标进行了正交试验研究,但忽略了传输速度和传输稳定性 2 个指标;另外,使用实际的直线电磁振动定向装置进行多因素多水平试验时,因素水平的选取受加工精度的影响很大,试验效果不理想。

本研究针对使用实际直线电磁振动定向装置进行优化试验时效果不理想的问题,利用 ADAMS^[6-10]建立玉米种子直线电磁振动定向装置参数化仿真模型,从传输稳定性角度确定 3 个影响因素(振幅 A 、台阶高度 H 和倾角 J)的试验范围,以传输速度 v 和定向成功率 ρ 为指标,进行直线电磁振动下玉米种子定向传输的模拟仿真试验,综合分析各因素对传输速度和定向成功率的影响,确定直线电磁振动定向装置的最佳工作条件,并通过实际电磁振动定向装置对仿真试验得到的最佳工作条件进行试验验证,以期达到优化直线电磁振动定向装置的目的。

1 直线电磁振动定向装置参数化仿真模型建立

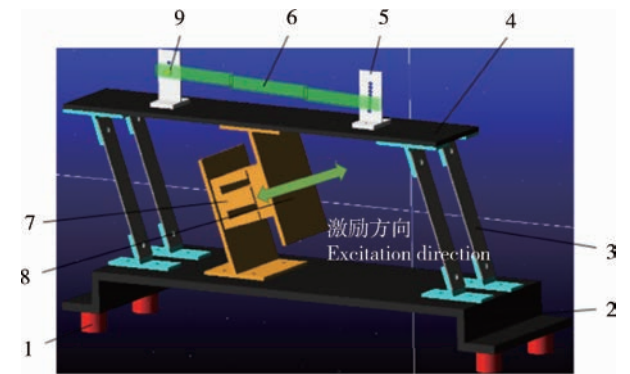
以实际直线电磁振动定向装置为参照,利用 ADAMS 等软件建立直线电磁振动定向装置仿真模型(图 1),在定向滑槽与种子之间添加接触^[11],在电磁铁和衔铁之间添加激励,振幅为 A ,对定向滑槽相邻 2 段之间的台阶高度 H 、定向滑槽的倾角 J 以及振幅 A 进行参数化。当振幅、台阶高度以及倾角合理时,玉米种子在定向滑槽中稳定滑行,原本“尖端”朝后的玉米种子在台阶处会发生姿态翻转变成“尖端”朝前,而本来“尖端”朝前的玉米种子则可以顺利通过台阶而不产生姿态翻转,从而使本来“尖端”朝向无规律的玉米种子统一变成“尖端”朝前实现定向排序传输。其中,电磁铁和衔铁之间的激励采用标准的正弦位移函数模拟实际运动,函数表达式为:

$$s = A \sin(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中: s 为电磁铁和衔铁之间的位移,mm; A 为振幅,mm; f_0 为振动频率,Hz; t 为时间,s。

由于市面上的直线电磁振动器普遍直接采用市

电(频率为 50 Hz)作为动力源,采用半波或全波驱动,本研究选用半波驱动, f_0 为 50 Hz。



1. 减震弹簧;2. 底座;3. 主振弹簧;4. 振动板;5. 角度支撑座;6. 定向滑槽;7. 电磁铁;8. 衔铁;9. 玉米种子

1. Damping spring; 2. Base; 3. Principal vibration spring; 4. Vibrating plate; 5. Angle support; 6. Directional sliding slot; 7. Electromagnet; 8. Armature; 9. Corn seed

图 1 直线电磁振动定向装置参数化仿真模型

Fig. 1 Parametric simulation model of directional device based on linear electromagnetic vibration

2 直线电磁振动下玉米种子定向传输的模拟仿真试验

本研究以台阶高度 H 、倾角 J 以及振幅 A 为影响因素,以传输速度 v 和定向成功率 ρ 为指标,首先从传输稳定性角度确定 3 个因素的试验范围,然后利用 ADAMS 进行直线电磁振动下玉米种子定向传输的模拟仿真试验。

2.1 各影响因素试验范围的确定

作为生物物料,玉米种子在传输过程中,为了保证传输稳定性,玉米种子在滑槽中前进时,最好的状态是滑行,不能出现剧烈跳跃,且在台阶处不能发生弹跳和滚动。本研究以 0.2 mm 作为判断跳跃剧烈与否的临界值,从传输稳定性角度确定各因素(H 、 J 和 A)的试验范围。

1) 振幅 A 。常规电磁振动器的振幅一般为 0.2~1.0 mm。摆放玉米种子在定向滑槽的起始端,“尖端”朝向随机,在 $J=0^\circ$ 、 $H=0$ mm 条件下,以振幅 A 为单因素,在 0.2~1.0 mm 范围内均匀取 9 个水平进行仿真预试验,监测 9 次试验中玉米种子相对于定向滑槽的竖直位移(即跳跃高度)和玉米种子相对于定向滑槽的水平速度(即传输速度),结果见图 2 和图 3。

由图2可以看出,当振幅 A 分别为0.7、0.8、0.9和1.0 mm时,玉米种子相对于滑槽的竖直位移已经明显超过0.2 mm,跳跃剧烈,传输过程不稳定,因此确定振幅 A 应该小于0.7 mm。

由图3可见,振幅 $A=0.2$ mm时玉米种子的前进速度特别小,几乎为0,无法进行有效的传输作业,因此,确定振幅 A 应大于0.2 mm。因此,将振幅 A 的试验范围设定为:0.3~0.6 mm。

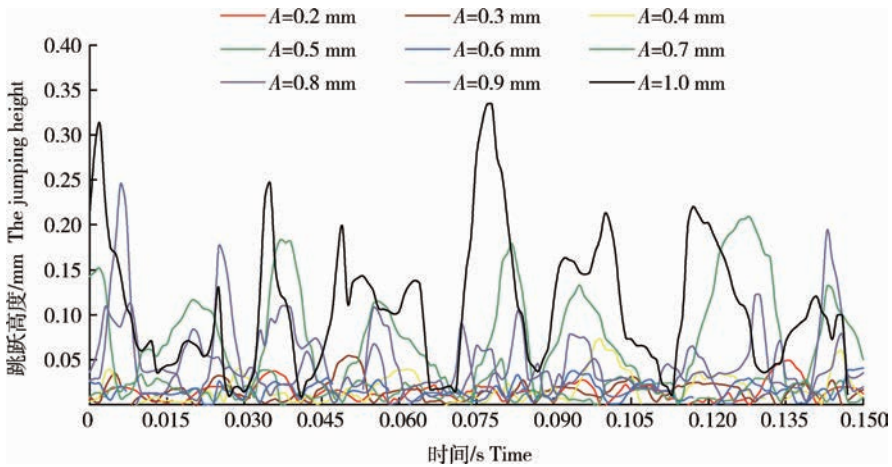


图2 玉米种子的跳跃高度随时间的变化

Fig. 2 Change of the jump height of corn seed over time

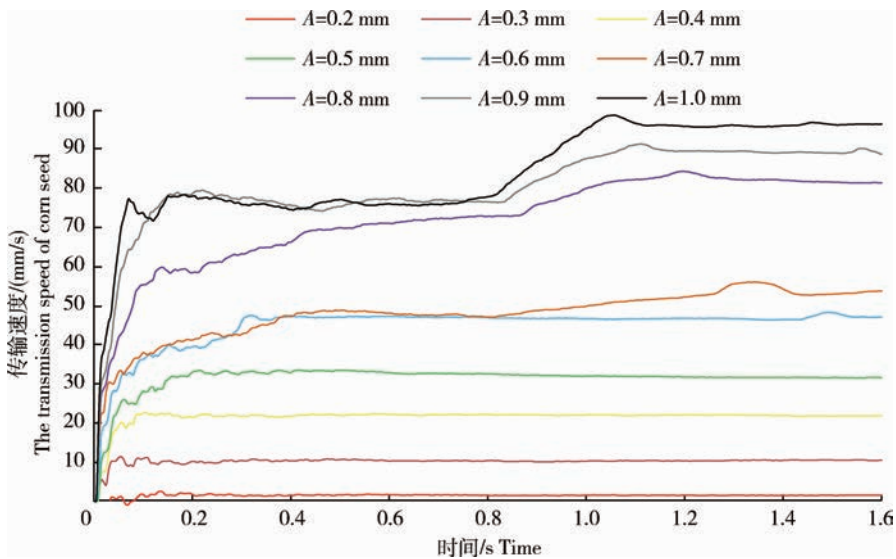


图3 玉米种子的传输速度随时间的变化

Fig. 3 Change of the transmission speed of corn seed over time

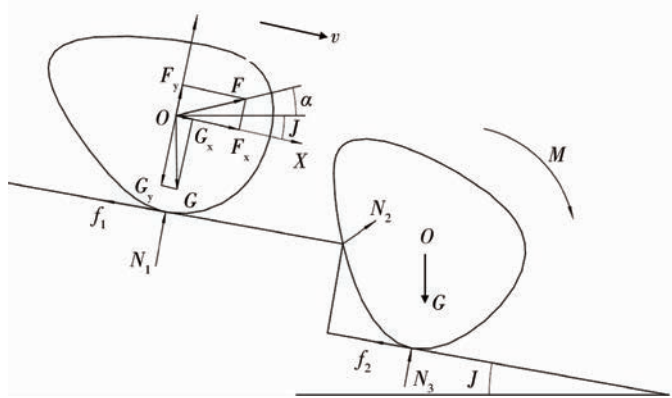
2) 台阶高度 H 。台阶高度 H 也是玉米种子能够实现姿态翻转的关键因素,不能大于玉米宽度(平均10 mm左右)的一半。在合适的范围内,增大 H ,有利于逆行种子的姿态翻转,而减小 H 有利于原本正行种子继续保持正行。 H 过大,不管是正行还是逆行,玉米种子在台阶处都容易发生弹跳,甚至滚动,导致定向失败;而 H 过小时,原本逆行的玉米种子就无法进行姿态翻转。综合考虑选取 H 的试验

范围为2~5 mm。

3) 倾角 J 。图4示出玉米种子在台阶处的受力(以逆行为例)。理论上,定向滑槽倾角 J 对玉米种子的前进速度有较大的影响: J 适当增大可以增大玉米种子重力沿滑槽方向的分力 G_x ,提升前进速度; J 适当增大也可以增大翻转扭矩 M ,有利于“尖端”朝后的玉米种子在台阶处发生姿态翻转,但同时也可能使原本“尖端”朝前的玉米种子也发生姿态

翻转,导致定向失败;而 J 过大时会造成激振力在垂直于滑槽方向的分力 F_y 和玉米种子在台阶处的

翻转扭矩 M 过大,可能导致玉米种子被弹飞或发生滚动。



X 和 Y 为坐标轴, X 轴平行于滑槽底面; O 为玉米种子质心; J 为滑槽倾角, $(^\circ)$; α 为激励与水平方向的夹角, $(^\circ)$; G 为玉米种子重力, N ; G_x 和 G_y 分别为玉米种子的重力沿 X 和 Y 方向的分力, N ; F 为激振力, N ; F_x 和 F_y 分别为激振力沿 X 和 Y 方向的分力, N ; N_1 、 N_2 和 N_3 都为滑槽底面对玉米种子的支持力, N ; f 为摩擦力, N ; v 为玉米种子的传输速度, mm/s ; M 为玉米种子的翻转扭矩, $N \cdot \text{mm}$ 。

X and Y are the coordinate axis, the X axis is parallel to the bottom surface of the sliding slot; O is center of mass of the corn seed; J is inclination angle of sliding slot, $(^\circ)$; α is The included angle between the excitation and the horizontal direction, $(^\circ)$; G is the gravity of the corn seed, N ; G_x and G_y are respectively the gravity component of corn seed along X and Y axis, N ; F is exciting force, N ; F_x and F_y are exciting force component along X and Y axis, N ; N_1 , N_2 and N_3 are all support force on corn seed from the bottom surface of the sliding slot, N ; f is friction, N ; v is transmission speed of corn seed, mm/s ; M is turning torque of corn seed, $N \cdot \text{mm}$ 。

图 4 玉米种子在台阶处的受力

Fig. 4 Force diagram of corn seed at step

摆放玉米种子在定向滑槽的起始端,“尖端”朝向随机,在其他 2 个因素都取最小的条件下,即 $A = 0.3 \text{ mm}$, $H = 2 \text{ mm}$ 时,以倾角 J 为单因素,进行仿真预试验,从 0 开始,以 1° 为水平差值逐渐递增,观察玉米种子在台阶处的运动情况,发现当 $J = 0^\circ$ 时,“尖端”朝后的玉米种子大多无法进行姿态翻转,导致定向失败;当 $J \geq 5^\circ$ 时,玉米种子在台阶处开始出现滚动现象(图 5)。因此,将倾角 J 的试验范围设定为 $1 \sim 4^\circ$ 。

设计,本研究根据各因素的试验范围对每个因素选取 4 个水平(表 1)。由于激振力的每个振动正弦周期是 0.02 s ,一个周期分为 4 个阶段,得到每个阶段作用时间为 0.005 s 。为了精确地监测玉米种子的运动状态,将仿真步长设置为 0.002 s 。

取 1 颗玉米种子模型,摆放在在定向滑槽起始端,使“尖端”朝向随机,开始进行 3 因素 4 水平的全试验,监测每次试验中玉米种子的传输速度,并记录定向是否成功。然后取另外 9 颗形状有差别的玉米种

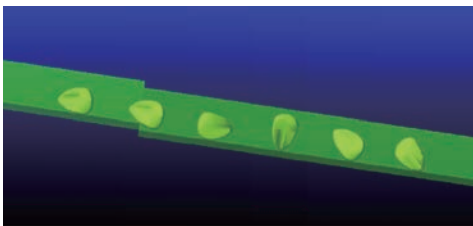


图 5 玉米种子在台阶处的滚动现象

Fig. 5 Phenomenon of corn seed rolling at step

2.2 仿真试验与分析

2.2.1 仿真试验方案

ADAMS 有着优秀的试验设计功能,可以直接对参数化的振幅 A 、台阶高度 H 和倾角 J 进行试验

表 1 仿真试验的因素水平表

Table 1 Factors and levels in simulation test

水平 Levels	因素 Factor		
	A / mm	H / mm	$J / (^\circ)$
1	0.3	2	1
2	0.4	3	2
3	0.5	4	3
4	0.6	5	4

注: A 为振幅, mm ; H 为台阶高度, mm ; J 为滑槽倾角, $(^\circ)$ 。

Note: A is vibration amplitude, mm ; H is step height, mm ; J is inclination angle, $(^\circ)$ 。

子进行重复试验,计算统计 10 颗种子在各因素水平组合下平均传输速度和定向成功率作为试验结果。

2.2.2 仿真试验结果分析

1)对传输速度结果进行方差分析,得到各因素对玉米种子传输速度的影响(表 2)。可以看出,振幅 A 、倾角 J 以及高度差 H 对传输速度都有影响,影响显著性 $A > J > H$ 。另外实际结果表明: A 和 J 与传输速度呈正相关,即在因素的试验范围内,增大

A 、 J 都能提高传输速度, A 的作用更明显,而高度差 H 对传输速率影响比较小,并呈负相关,即当 H 大于 3 mm 后,反而会降低玉米种子的传输速度,并且玉米种子在台阶处往往会产生轻微弹跳,造成传输不稳定。另外,3 个因素之间的两两交互作用对传输速度的影响不显著。综上,确定最佳因素组合为: $H=3$ mm、 $A=0.6$ mm、 $J=4^\circ$,该组合下,玉米种子的传输速度达到最大,为 62 mm/s。

表 2 传输速度的方差分析结果

Table 2 Variance analysis of the transmission speed

方差源 Source	平方和 SS	自由度 DF	F 比 F ratio	F 值 F value	显著性 Significance
H	30.424	3	23.506	3.860	*
A	8433.404	3	6515.635	3.860	*
$H \times A$	1.361	3	1.052	3.860	
J	268.524	3	207.461	3.860	*
$H \times J$	4.961	3	3.833	3.860	
$A \times J$	1.901	3	1.469	3.860	
误差 Error	3.88	9			

注:显著性水平 $\alpha=0.05$, * 表示显著。

Note: Significance level $\alpha=0.05$, * means significance.

2)观察 10 颗种子在不同因素水平组合下的定向成功率发现,只有当 $J=1^\circ$ 且 $H \leq 3$ mm 的时候才会出现定向失败的情况,即只有 H 和 J 对定向成功率有影响,而振幅 A 无影响,只要保证 $J \geq 2^\circ$ 或 $H \geq 4$ mm,就能保证玉米种子能够定向成功,并且只需要通过一个台阶就能定向成功。

当 $H=3$ mm、 $A=0.6$ mm、 $J=4^\circ$ 时,不仅玉米种子的传输速度达到最大,同时还能够保证玉米种子定向都能成功,并且只需要 1 个台阶即可。因此可以作为直线电磁振动定向装置的最佳工作条件。

3 试验验证

为了验证仿真试验所得的最佳工作条件是否正确合理,通过实际直线电磁振动定向装置对玉米种子进行定向排序传输试验,监测直线电磁振动定向装置在该组合下的工作效果,包括玉米种子的定向成功率、传输速度和传输稳定性。

3.1 试验方案

试验设备包括实际直线电磁振动定向装和测控设备 2 部分。将定向滑槽台阶设定为 1 个,并将台

阶高度和倾角分别设定为 $H=3$ mm、 $J=4^\circ$,通过电压控制器调节电压来控制振幅,并利用 PC 和传感器监测振幅,将振幅锁定在 0.6 mm 左右。试验对象选用筛选过的郑单 958 玉米种子,马齿状长扁形,长 10~12 mm、宽 6~8 mm、厚 3~5 mm。随机选取 1 粒种子摆放在定向滑槽起始端,初始“尖端”朝向随机,进行试验。记录玉米种子从定向滑槽起始端到脱离滑槽的传输时间,判断定向是否成功,并观察玉米种子的传输过程是否稳定。然后选取另外 39 粒玉米种子进行重复试验,最后统计计算玉米种子的平均传输时间 T 和定向成功率 ρ 。测量整个定向滑槽的长度 L ,利用式(2)计算玉米种子的平均传输速度 v_0 。

$$v_0 = L/T \quad (2)$$

式中: L 为整个定向滑槽的长度,mm; T 为玉米种子的平均传输时间,s; v_0 为玉米种子的平均传输速度,mm/s。

3.2 试验结果分析

1)计算得到试验中玉米种子的平均传输速度为 58.3 mm/s,略小于仿真得到的最大速度,这是因为仿真中工作环境较为理想,而实际作业中,会受到一

些干扰,比如玉米种子表面粉尘会影响摩擦力、交流电输入不太稳定造成直线电磁振动定向装置的振幅不能保持固定不变等。该试验结果符合预期要求,说明对于玉米种子的传输速度指标而言,该最佳工作条件具有合理性。

2)40 粒玉米种子全部定向成功,定向成功率为 100%,结果与仿真试验结果一致,说明对于玉米种子的定向成功率指标而言,最佳工作条件具有合理性。

3)整个试验过程中,电磁振动装置振动均匀,工作稳定,所有玉米种子定向滑槽中都平稳滑行,没有出现明显跳跃的情况,在台阶处,玉米种子也没有发生弹跳或滚动。说明对于玉米种子的传输稳定性指标而言,最佳工作条件具有合理性。

4 结束语

本研究利用 ADAMS 建立了玉米种子直线电磁振动定向装置参数化仿真模型,从传输稳定性角度确定 3 个影响因素(振幅 A 、台阶高度 H 和倾角 J)的试验范围,以传输速度 v 和定向成功率 ρ 为指标,进行直线电磁振动下玉米种子定向传输的模拟仿真试验;综合分析各因素对传输速度和定向成功率的影响,确定了直线电磁振动定向装置的最佳工作条件为: $A=0.6\text{ mm}$ 、 $H=3\text{ mm}$ 、 $J=4^\circ$,在该条件下,玉米种子的传输速度达到最大,为 62 mm/s ,同时能够保证定向成功。通过实际直线电磁振动定向装置对该最佳工作条件进行了验证,结果表明:装置在该条件下工作时,玉米种子的平均传输速度和定向成功率与仿真结果基本一致,并且能够保证传输稳定性,说明该最佳工作条件正确合理。

参考文献 References

- [1] Yarnia M, Tabrizi E F M. Effect of seed priming with different concentration of GA3, IAA and kinetin on azarshahr onion germination and seedling growth[J]. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2012, 2(3): 2657-2661
- [2] Torres G, Vossemkemper J P, Raun W R, Taylor R. Maize (*Zea mays*) leaf angle and emergence as affected by seed orientation at planting[J]. *Experimental Agriculture*, 2011, 47(4): 579-592
- [3] 徐丽明, 王应彪, 赵学观, 侯兴杰. 一种玉米种子定向方法及定向装置. 中国, CN102893723A[P]. 2013-01-30
Xu L M, Wang Y B, Zhao X G, Hou X J. Corn seed directional method and directional device. China, CN102893723A [P]. 2013-01-30 (in Chinese)
- [4] 侯彦龙, 徐丽明, 陈莉明. 玉米机械化定向播种技术的现状和发展趋势[J]. *农机化研究*, 2012, 34(2): 10-14
Hou Y L, Xu L M, Chen L M. The current situation and development trend of corn mechanization oriented seeding technology [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(2): 10-14 (in Chinese)
- [5] 王应彪, 赵学观, 徐丽明, 李超, 陆鑫, 李世军. 基于电磁振动的玉米种子定向排序输送技术[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 79-88
Wang Y B, Zhao X G, Xu L M, Li C, Lu X, Li S J. Experiment and directional movement technology of corn seed based on electromagnetic vibration [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 79-88 (in Chinese)
- [6] 贾晶霞, 张东兴, 郝新明, 刘汉武. 马铃薯收获机参数化造型与虚拟样机关键部件仿真[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(11): 70-73
Jia J X, Zhang D X, Hao X M, Liu H W. Parametric modeling and computer simulation of potato harvester parts [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(11): 70-73 (in Chinese)
- [7] 董艳. 2BD-6 水稻直播机电磁振动排种器虚拟设计[D]. 南宁: 广西大学, 2005
Dong Y. An optimization design on electromagnetic vibrated seeding apparatus of 2BD-6 rice direct-seeding machine by virtual prototype technology [D]. Nanning: Guangxi University, 2005 (in Chinese)
- [8] 李超, 邢洁洁, 徐丽明, 何绍林, 李世军. 柔性梳脱式酿酒葡萄脱粒机构设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 290-296
Li C, Xing J J, Xu L M, He S L, Li S J. Design and experiment of wine grape threshing mechanism with flexible combing striping monomer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 290-296 (in Chinese)
- [9] 付刚, 董钢. 油菜收获机清选装置虚拟样机的建模与仿真实验[J]. *农机化研究*, 2006(07): 96-98
Fu G, Dong G. The cleaning device of rape harvester virtual prototyping modeling and simulation experiment[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006(07): 96-98 (in Chinese)
- [10] 鲍玉冬, 郭艳玲, 张慧, 郭帅. 基于 ADAMS 的蓝莓果实收获碰撞仿真与分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(12): 157-160
Bao Y D, Guo Y L, Zhang H, Guo S. Simulation and analysis of fruits collision during blueberry harvest based on ADAMS[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(12): 157-160 (in Chinese)
- [11] Hamid M L, Parviz E N. Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems [J]. *Nonlinear Dynamics*, 1994, 5(2): 193-207