

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.012

基于电磁振动的玉米种子定向排序输送技术*

王应彪^{1,2} 赵学观¹ 徐丽明¹ 李超¹ 陆鑫¹ 李世军¹

(1. 中国农业大学农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083; 2. 西南林业大学机械与交通学院, 昆明 650224)

摘要: 根据振动送料原理,提出了一种实现玉米种子定向排列输送的方法,对种子的定向过程进行了动力学分析,探讨了定向过程中种子各种姿态的变化过程与力学参数之间的关系。以郑单958玉米种子为试验对象,建立了振动定向试验装置;以台阶高度 A 、滑槽倾角 B 、振幅 C 和频率 D 作为影响因素进行了正交试验。试验结果表明:台阶高度 A 、滑槽倾角 B 及其交互作用对种子定向效果具有极显著影响;通过多重比较分析得出试验条件的最佳组合为:台阶高度为4 mm、滑槽倾角为 4° 、振幅为0.18 mm、频率为51.5 Hz。在最佳试验条件下分别对顺行和逆行种子进行10次重复试验,试验结果表明:顺行定向成功率为93.5%,逆行定向成功率为89.4%。采用高速摄影技术分别对顺行和逆行的种子进行了观察验证分析,分析表明:种子的实际运动状态与理论分析基本吻合。

关键词: 玉米种子 定向播种 电磁振动

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0079-10

Experiment and Directional Movement Technology of Corn Seed Based on Electromagnetic Vibration

Wang Yingbiao^{1,2} Zhao Xueguan¹ Xu Liming¹ Li Chao¹ Lu Xin¹ Li Shijun¹

(1. Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: According to the principle of vibrating feeder, this paper proposed a method to achieve directional transportation for corn seed. It explored the relationship between the various postures of the change process and mechanical parameters during orientation. A directional vibration test device was established by kinetic analysis while the Zheng Dan 958 corn seed was taken as the research object. The orthogonal experiment was carried out with the factors affecting the rate of directional orientation such as step height A , inclination angle of track surface B , vibration amplitude C and vibration frequency D . The test results showed that the step height A and the inclination angle of track surface B and its interaction had extremely significant effect on seed orientation. The best test combination was determined by multiple comparison analysis. The result of the forward motion directional rate from repeating ten times was 93.5% and the reverse motion directional rate was 89.4% when the altitude difference was 4 mm, inclination angle was 4° , vibration frequency was 51.5 Hz, and vibration amplitude was 0.18 mm. The high speed photography was applied on the observation and verification for the direct and reverse motion test result, the analysis result showed that the actual state of motion was in keeping with the theoretical analysis basically.

Key words: Corn seed Directional seeding Electromagnetic vibration

收稿日期: 2014-03-25 修回日期: 2014-04-25

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120008110045)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012YJ105)

作者简介: 王应彪, 博士生, 西南林业大学讲师, 主要从事生物生产自动化技术与装备研究, E-mail: wybjob@163.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技术与装备研究, E-mail: xlmoffice@126.com

引言

玉米定向播种技术是实现玉米增产的方法之一,该播种技术能使玉米植株生长整齐,长势一致,行距、株距分布均匀,特别是玉米“棒三叶”的展开方向一致,可以更好地为作物群体创造最佳的光照和通风条件,创造作物生长的最佳群体结构,不仅能有效控制植株叶片的生长排列具有方向性,改善玉米叶片伸展的无序性,且能增强单位面积玉米叶片光合作用能力,提高产量 15% 以上^[1-6]。要实现玉米机械化定向播种,其关键技术是实现玉米种子的定向排序,因此,寻找一种适合玉米种子的定向排序方法,是实现机械化定向播种的关键所在;但目前对于机械化玉米定向播种技术的研究,国内外尚属起步阶段。为此,本文基于电磁振动送料原理,提出一种实现玉米种子定向排序输送方法,设计振动式玉米种子定向输送试验装置,并对定向方法进行理论分析和试验研究,为后续玉米种子的定向包装、种子的定向处理以及定向播种提供条件,为实现玉米机械化、自动化定向播种提供思路和方法^[7-8]。

1 振动送料原理

电磁振动送料原理如图 1 所示,工作时,交流电(半波或全波)接通电磁铁线圈,在 t_1 时电压达到峰值,此时电磁吸力最大,衔铁被吸,弹簧被压,槽体向左下方运动; t_2 时电压为零,电磁吸力消失,弹簧恢复变形反推槽体向右上方运动;当电压以正弦或余弦周期性变化时,输送槽体产生垂直于弹簧片的上下振动,槽体上的物料被带动,与槽体产生相对运

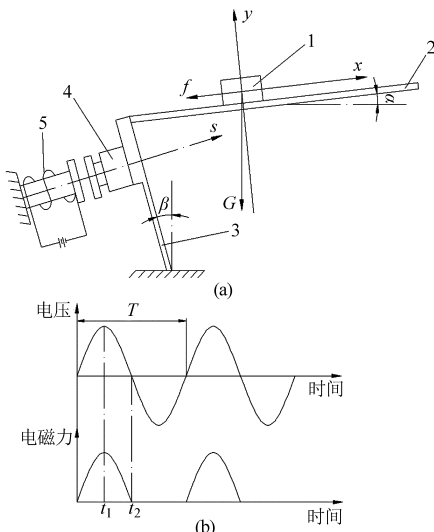


图 1 振动送料工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of vibratory feeding

(a) 振动原理 (b) 激振波形图

1. 物料 2. 槽体 3. 弹簧片 4. 衔铁 5. 线圈

动,其中 β 为振动方向角, ($^\circ$), α 为振动台面倾角, ($^\circ$);当选择不同的振动参数(振幅、频率、振动方向角和弹簧倾角)时,物料在槽体工作面上受到重力 G 、摩擦力 f 、激振力 F 及台面反力的共同作用,将出现滑移和抛掷两种形式的运动^[8-9];其中所需激振力 F 的计算式为^[9]

$$F = 4\pi^2 f_0^2 A' m (1 - \xi^2) \quad (1)$$

式中 f_0 ——振动频率, Hz

A' ——振幅, m m ——种子质量, g

ξ ——谐振频率与激振频率之比,取 0.85 ~ 0.95^[9]

由式(1)可以看出激振力 F 与振幅 A' 、频率 f_0 以及频率比 ξ 呈正比关系。在 t 时刻,物料与槽体沿着 S 方向的振动位移 s 、速度 v 、加速度 a 可表示为^[8-9]

$$\begin{cases} s = A \sin(\omega t) \\ v = A\omega \cos(\omega t) \\ a = A\omega^2 \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 A ——槽体沿方向的单边振幅, mm

ω ——激振角频率, rad/s

当物料做滑移运动时,物料始终保持与输送槽底接触,在槽体的每个振动周期中,物料沿槽底相对滑槽向前滑动一个微小距离,当槽体以一定频率和振幅连续振动时,物料则被连续地从槽体中(向前或向后)输送出去;而当激振力在垂直于槽体方向上的分量过大时,物料则作抛掷运动,物料在槽面上被轻微抛起,腾空后沿槽体面向前作抛物线运动,物体下落产生了微小的位移变量,在连续振动时,物体实现向前运动^[8]。

2 玉米种子定向排序方法分析

根据前述振动送料原理,物料在槽体中输送的基本方式有 3 种:正向滑移、反向滑移和抛掷运动。玉米种子输送过程中,种子始终与槽体表面保持接触,在槽体的每一个振动周期内,种子沿着槽底向前正向滑移一个微小距离,通过调节频率和电压,使种子平稳向前输送。本文以郑单 958、粒型为半马齿扁形的玉米种子籽粒作为研究对象,其外观特性如图 2 所示,其中 L 为种子长轴、 B 为种子短轴、 S 为偏心量、 R 为外圆弧半径;通过观察,半马齿型玉米种子胚乳端轮廓呈“圆弧型”,而另一端则近似呈“尖角型”,种子质量主要集中在胚乳端,可认为种子的质心与重心向胚乳端偏移^[10]。

假设种子以横姿(种子长轴平行于运动方向,短轴垂直于振动表面)在振动槽体中滑移,则种子在运动时存在两种不同的自然状态:一种是如果柄

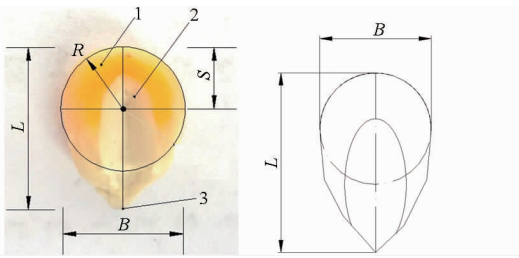


图 2 玉米种子外观与模型示意图

Fig. 2 Appearance and model of corn seed

1. 胚乳 2. 胚芽 3. 果柄端

端即种子“尖端”朝前运动(假设为顺行),另一种是胚乳端即种子“大端”朝前运动(逆行)。通过在输送过程中设计台阶让种子翻滚的方法,使得顺行和逆行种子从台阶滑落后发生翻转的几率不同,进而通过调节试验装置结构参数与振动条件,最终使玉米种子均按“尖端”朝前的方向滑移输送,下面将通过理论分析与试验验证的方法探讨种子在振动输送过程中的定向原理以及运动状态。

2.1 玉米种子顺行定向方法

当玉米种子顺行滑移输送时,种子通过台阶滑落后将出现两种翻转结果:种子没有翻转成功,继续保持顺行姿态向前滑移,如图 3 中(a)、(b)、(c)、(d);另一种情况是种子在与下台面接触的同时成功翻转 180°转为逆行状态,如图 3 (a)、(b)、(e)、(f)。假设在 t_0 、 t_i 、 t_{i1} 、 t_j 、 t_{j1} 、 t_k 、 t_{k1} 时刻分别代表玉米种子沿台阶面向滑移经过台阶前后各阶段所处的状态;以平行于台阶面为 x 轴、垂直于台阶面为 y 轴建立坐标系,对各个阶段种子的运动进行受力分析,讨论种子在滑过台阶时的受力和在翻转过程中的力矩变化情况,进而分析种子翻转定向与各参数条件之间的关系。

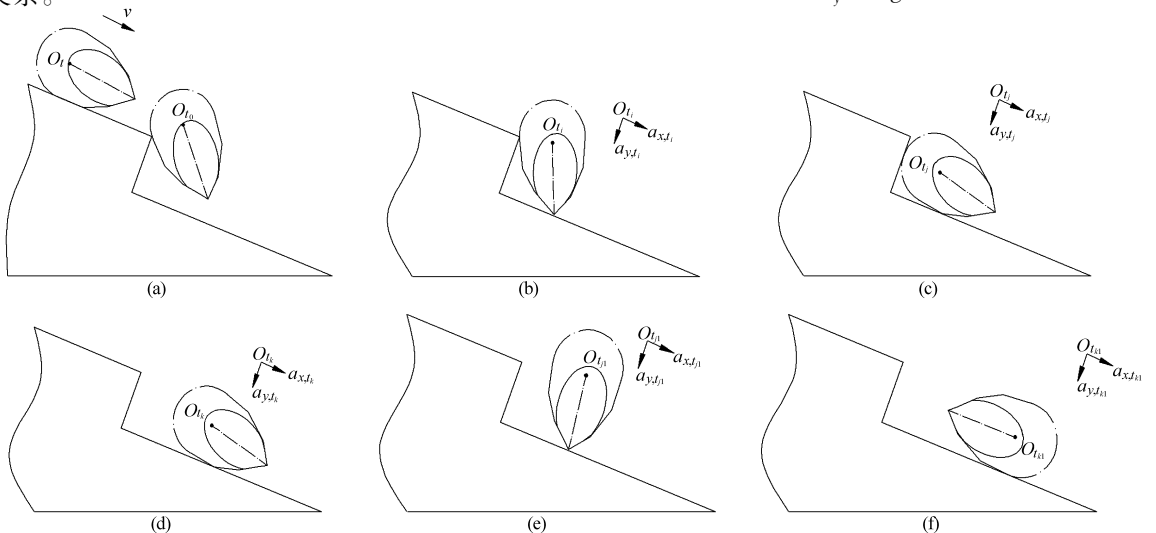


图 3 顺逆行种子姿态变化图

Fig. 3 Changes of postures for forward motion

(a) t_0 (b) t_i (c) t_j (d) t_k (e) t_{j1} (f) t_{k1}

当种子在状态 t_{01} 时,假设激振力作用点为 $O_{t_{01}F}$,重心即重力作用点为 $O_{t_{01}G}$,当种子的重心还没有越过支撑点 $A_{t_{01}}$ 时,则种子在激振力分力 F_x 、重力的分力 G_x 以及斜面支撑反力和摩擦力的共同作用下,以速度 v 沿斜面向前继续做滑移运动,如图 4a 所示。

当激振力作用点 $O_{t_{01}F}$ 和种子重心 $O_{t_{01}G}$ 越过支撑点 $A_{t_{02}}$ 处以后, F_y 与 $N_{t_{01}}$ 共同作用使种子有向上“平抛”的趋势,若 F 的幅值、振动方向角以及台面倾角 α 过大都会使种子被抛起做平抛运动,此时由于惯性的作用,种子被“腾空”的同时绕种子自身某点做旋转,如图 4c 所示;在与下台面接触时,在 x 方向上种子以 v_x 的速度被抛出了一段距离,然后以 v_y 的速度下落与下台面接触,此时若支撑反力和 F_y 过大,则又会被循环抛起同时伴随转动,如图 4e 所示。若种子没被抛起,种子在沿斜面向前下滑移的同时,在 $A_{t_{02}}$ 处将产生一个绕 $A_{t_{02}}$ 的合力转矩 $M_{A_{t_{02}}}$,如图 4b 所示,假设此时玉米种子的重心位于 $O_{t_{02}G}$,激振力的作用点为 $O_{t_{02}F}$,则 $M_{A_{t_{02}}}$ 可表示为

$$M_{A_{t_{02}}} = M_F + M_G = M_{F_x} + M_{F_y} + M_{G_x} + M_{G_y} \quad (3)$$

由图 4b 可以看出,此时 M_{F_x} 、 M_{G_y} 与 M_{G_x} 都为顺时针方向,仅有 M_{F_y} 为逆时针方向,以逆时针为正,顺时针为负,则式(3)可进一步表示为

$$M_{A_{t_{02}}} = -M_{F_x} + M_{F_y} - M_{G_x} - M_{G_y} \quad (4)$$

同时由激振力的计算式(1)以及坐标关系可得

$$\begin{cases} F_x = F \cos(\theta + \alpha) \\ F_y = F \sin(\theta + \alpha) \\ G_x = mgs \sin \alpha \\ G_y = mgc \cos \alpha \end{cases} \quad (5)$$

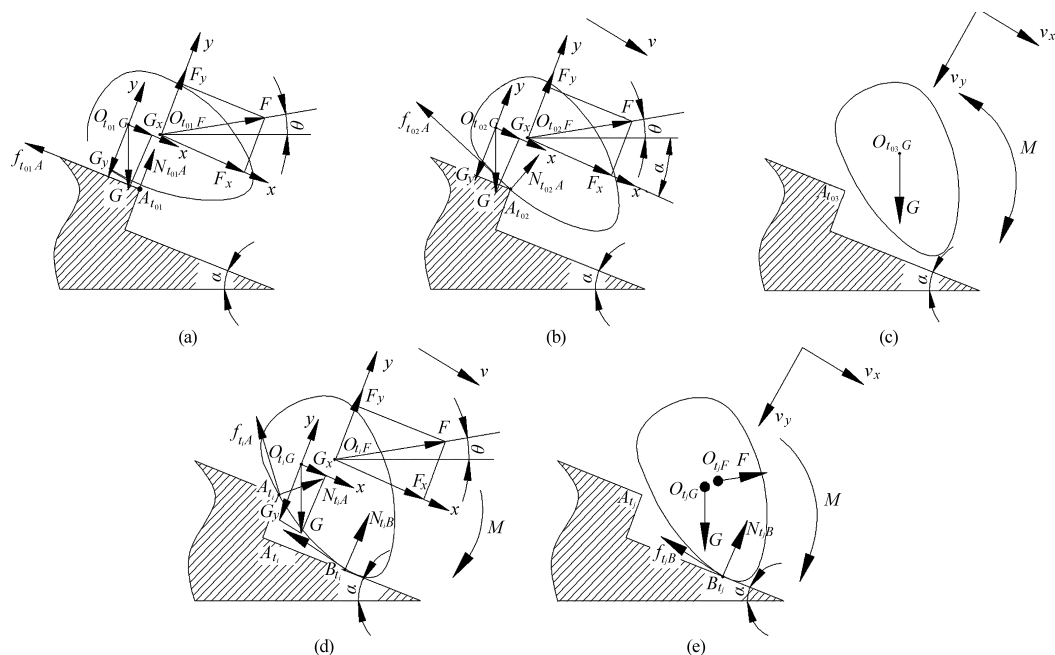


图4 顺行种子受力分析图

Fig.4 Force diagram for forward motion seed

(a) t_{01} (b) t_{02} (c) t_{03} (d) t_i (e) t_j

结合式(4)、(5)可以看出,在 t_{02} 状态时,仅有 M_{F_y} 驱使种子发生逆时针翻转,而改变 α 及激振力幅值大小,可调整 F_y 的大小,即可控制种子在下滑的同时发生绕 $A_{t_{02}}$ 的翻转。

当种子滑至 t_i 时,种子下落与下台面在 B_{t_i} 点接触,假设激振力作用点为 $O_{t_i,F}$,重心位于 $O_{t_i,G}$,此时将出现两种情况:一种情况是种子与上台面还没有分离,则种子除了受到重力 G 、激振力 F 的作用,还受到上接触点 A_{t_i} 处的反力 $N_{t_i,A}$ 和摩擦力 $f_{t_i,A}$ 以及下接触点 B_{t_i} 处的反力 $N_{t_i,B}$ 和摩擦力 $f_{t_i,B}$ 的共同作用,如图 4d 所示;另一种情况,种子已经与上台面分离,如图 4e 所示,在此状态下 $N_{t_i,A}$ 和 $f_{t_i,A}$ 消失。其中 $f_{t_i,A}$ 的方向为过 A_{t_i} 点接触面切线与滑移方向相反, $N_{t_i,A}$ 方向为垂直于过 A_{t_i} 点接触面切线向上; $f_{t_i,B}$ 的方向为过点 B_{t_i} 接触面切线与滑移方向相反, $N_{t_i,B}$ 方向过点 B_{t_i} 接触面法线向上。

在上述状态下,种子向下滑移的同时,将绕 B_{t_i} 点发生转动,在 B_{t_i} 点产生一个合力矩,有

$$M_{B_{t_i}} = M_{F_x} + M_{F_y} + M_{G_x} + M_{G_y} + M_{J_{t_i,A}} + M_{N_{t_i,A}} \quad (6)$$

其中第 2 种状态, $M_{N_{t_i,A}}$ 与 $M_{J_{t_i,A}}$ 为零,由图 4d 可看出, M_{F_x} 、 M_{F_y} 、 M_{G_x} 、 $M_{J_{t_i,A}}$ 、 $M_{N_{t_i,A}}$ 均为顺时针方向,仅有 M_{G_y} 为逆时针方向,只需调整台面倾角 α 即可调整 M_{G_y} 的大小,从而可以改变种子在此状态下的翻转状态,由此可得:

(1) 当增加 α 时, G_y 将减小,种子顺时针翻转的趋势加大;当 α 增加到一定值,且激振力足够大时,

种子将脱离 A_{t_i} 点,绕 B_{t_i} 点翻转为逆行方向向前滑移,如图 3e ~ 3f 所示。

(2) 当减小 α 时, G_y 将增加,若同时减少激振力,种子顺时针翻转的趋势将减小,此时种子将保持原有顺行姿态向前滑移,如图 3c ~ 3d 所示。

综上所述,当种子以顺行的姿态滑移过台阶时,可以通过改变滑槽倾角 α 、激振力 F 的大小来控制种子的转向,由式(1)可知,激振力的大小又与激振频率 f_0 和振幅 A' 有关系;因此,可通过调节滑槽倾角、激振频率和振幅实现对种子转向的控制。

2.2 玉米种子逆行定向方法

当种子逆行通过台阶时,由于种子“大端”轮廓近似圆弧,且比较光滑,同时种子的重心前移;种子整体在往前滑移的同时,在重力、台面反力、激振力和摩擦力的综合作用下,整体绕自身某点滚动,若激振力和台面反力过大,种子也会被抛起“腾空”,若滚动翻转角度超过 90° ,则变为顺行姿态向前滑移,若翻转角度小于 90° ,则在重力的作用下又回到逆行状态继续滑移,其姿态变化如图 5 所示。

假设在状态 t'_0 时,如图 6a 所示,种子的一部分滑出台阶面,但滑出部分未与下台阶面接触,假设此时重心位于 $O'_{t'_0,G}$,激振力作用于 $O'_{t'_0,F}$,则种子在接触点 $A'_{t'_0}$ 处所受合力矩可表示为

$$M_{A'_{t'_0}} = -M'_{F_x} \pm M'_{F_y} - M'_{G_x} \pm M'_{G_y} \quad (7)$$

式中 $M_{A'_{t'_0}}$ —— t'_0 时各力对 $A'_{t'_0}$ 的合力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

M'_{F_x} —— t'_0 时 F_x 在接触点 $A'_{t'_0}$ 的转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

M'_{F_y} —— t'_0 时 F_y 在接触点 $A'_{t'_0}$ 的转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

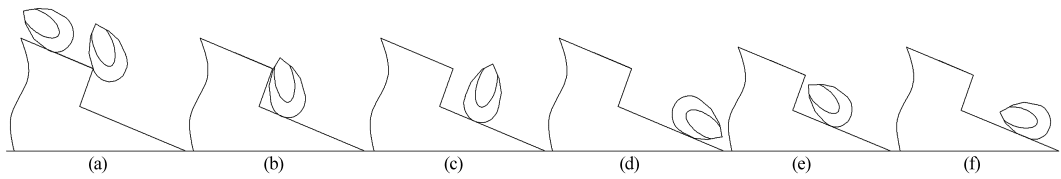


图 5 逆行姿态变化

Fig. 5 Changes of postures for reverse motion

(a) t'_0 (b) t'_i (c) t'_j (d) t'_k (e) t'_l (f) t'_{i1}

M'_{G_x} —— t'_0 时 G_x 在接触点 A'_0 的转矩, $N \cdot m$

M'_{G_y} —— t'_0 时 G_y 在接触点 A'_0 的转矩, $N \cdot m$

当激振力作用点 $O'_{i,F}$ 与重心位置 $O'_{i,G}$ 越过 A'_{i0} 点时, M'_{G_y} 为顺时针取“ $-$ ”号, 当重心位置 $O'_{i,G}$ 没有越过 A'_{i0} 点时, M'_{G_y} 为逆时针取“ $+$ ”号; 当激振力作用点 $O'_{i,F}$ 越过 A'_{i0} 点时, M'_{F_y} 为逆时针取“ $+$ ”号, 当作用点 $O'_{i,F}$ 没有越过 A'_{i0} 点时, M'_{F_y} 为顺时针取“ $-$ ”号。

随着种子的向前滑移, 种子的重心位置随之在改变, 通过式(7)可以看出, 当种子重心越过 A'_{i0} 时, $M'_{A'_{i0}}$ 逆时针翻转的趋势只与 M'_{F_y} 的大小有关, 其他转矩都是使得 $M'_{A'_{i0}}$ 有顺转的趋势, 因此理论上可以通过改变激振力幅值以及 α 的大小使种子在此刻发

生顺时针翻转, 翻转的同时往下滑落, 最终与下台面接触进入 t'_i 状态(图 5b)。

在 t'_i 状态时, 种子在与下台面接触的同时胚乳端未与支撑点 A'_i 分离, 如图 6c 所示, 以逆时针为正, 顺时针为负, 则种子 B'_i 所受外合力矩可表示为

$$M'_{B'_i} = -M'_{F_x} - M'_{F_y} - M'_{G_x} + M'_{G_y} - M'_{f_{i,A}} - M'_{N_{i,A}} \quad (8)$$

此时, 种子在向前滑移的同时, 绕下接触点 B'_i 做顺时针或逆时针的滚动; 与顺行分析类似, 可以通过改变 α 以及激振力的大小实现对种子转向的控制。

(1) 当增加 α 时, 且激振力足够大时, 种子将脱

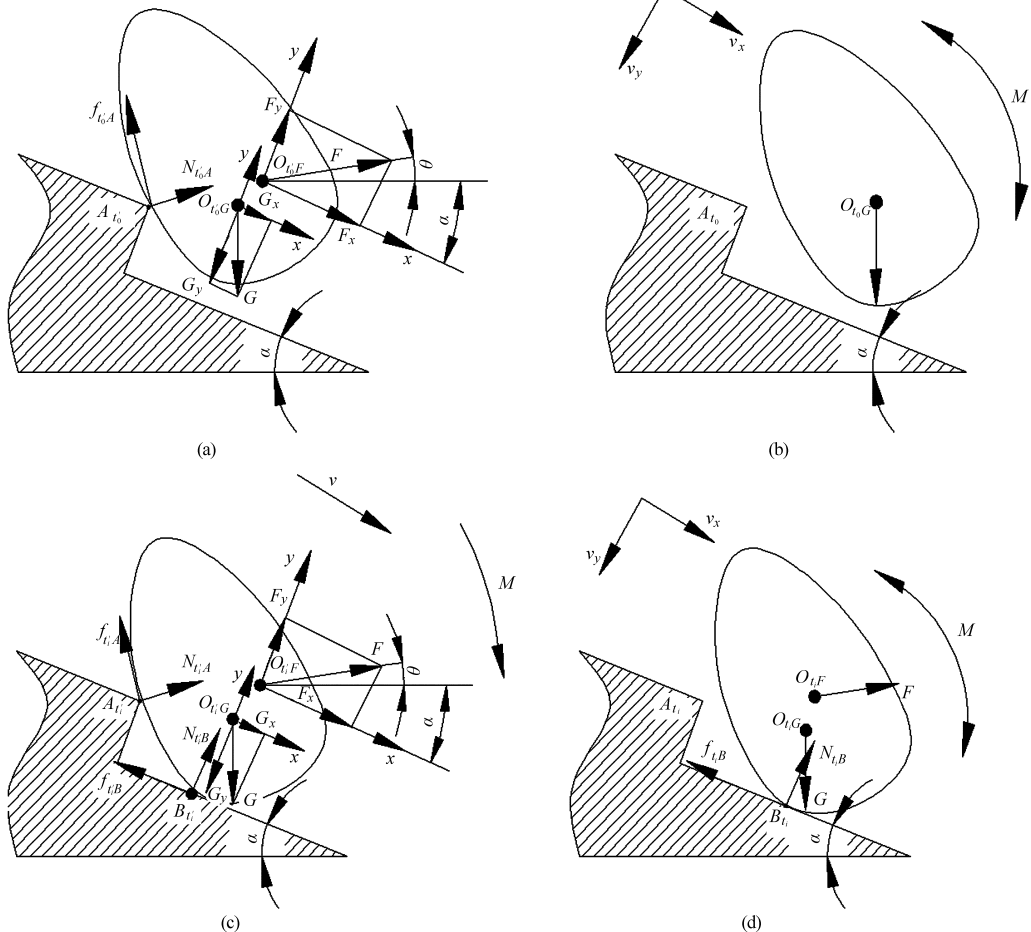


图 6 逆行种子受力分析图

Fig. 6 Force diagram for reverse motion seed

(a) t'_0 (b) t_0 (c) t'_i (d) t_i

离 A'_i 点, 绕 B'_i 点翻转为顺行方向向前滑移, 如图 5c ~ 5d 所示。

(2) 当减小 α 时, G_y 增加, 若同时减少激振力的大小, 则种子将向前滑移的同时翻转不成功, 继续保持逆行的姿态向前滑移。

若激振力幅值、振动方向角以及台面倾角 α 过大都会使种子被抛起, 如图 6b 所示, 此时由于惯性的作用种子被“腾空”的同时绕自身某点整体做顺时针旋转运动, 在与下台面接触时, 种子在 x 方向上已被抛出一段距离, 若距离较远, 种子将不和上支撑点接触, 同时自身旋转了一个角度, 如图 6d 所示, 同时受到重力和激振力的作用而产生翻滚, 最终由逆行变为顺行。

综上所述, 当种子逆行通过台阶后, 由于种子有绕着下接触点顺时针或逆时针翻转的趋势, 在翻转的同时伴随着 x 方向上的滑动和 y 方向抛掷运动, 只需控制好激振力参数以及斜面倾角, 可让种子在脱离上接触点以后实现从逆行变为顺行的翻转, 最终 t'_k 时刻达到平稳状态向前滑移。

2.3 台阶高度对定向效果影响分析

如图 7a 所示, 假设种子的尺寸一定, 当种子顺行通过台阶离开上接触面后, 增加 Δh , 则种子与上台面脱离的可能性增加, 使之绕下支撑面做顺时针

翻转的可能性增加, 从而破坏原来的顺行姿态, 且增加了 Δh 以后, 下台面的支撑反力增大, 种子容易发生碰撞反弹, 导致二次翻转不易控制; 而 Δh 过小, 对于逆行的种子将减弱支撑反力和摩擦力的作用, 阻碍了逆行种子的翻转, 如图 7b 所示。因此, 增加台阶高度 Δh , 将有助于种子下落后顺时针翻转, 对于原来顺行姿态的种子将加大破坏原来顺行姿态的可能性, 而对于原来逆行的种子将阻碍翻转。 Δh 的确定对种子顺行和逆行的定向效果都有影响, 根据玉米种子尺寸的测量值, 通过试验初步测试, Δh 值取 2 ~ 6 mm 时种子翻转过程比较稳定且定向效果比较理想。

基于以上分析, 不管是顺行还是逆行的玉米种子, 其重心位置、滑移面倾角、台阶高度以及激振力是玉米种子产生翻转的主要影响因素; 当种子以顺行姿态滑过台阶时, 通过改变激振力、台面倾角和台阶高度等参数, 使之继续保持顺行姿态向前滑移, 而逆行的种子通过台阶后, 以下台面接触后做顺时针翻转, 变为顺行姿态向前滑移, 从而实现顺行和逆行的种子通过台阶后均能转为顺行的定向输送是可以实现的。此外由于种子尺寸较小, 各转矩力臂的影响相对较小, 本文仅讨论了种子所受各外力对种子翻转的影响。

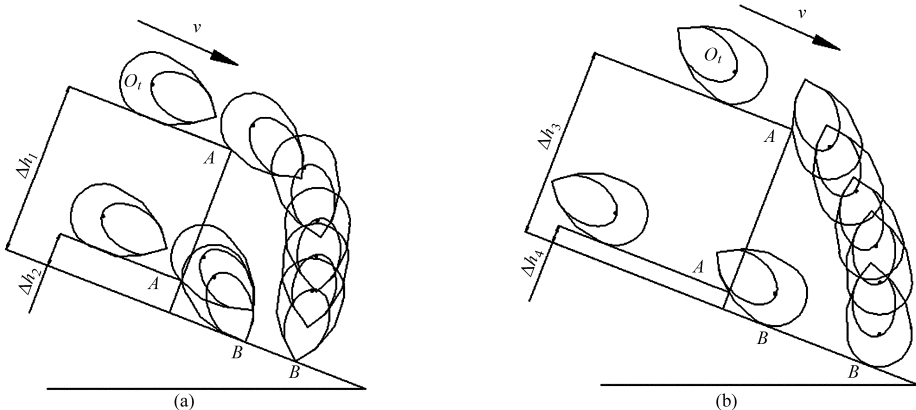


图 7 Δh 对玉米种子翻转影响示意图

Fig. 7 Effect of Δh on rotation of corn seed

(a) 顺行 (b) 逆行

3 试验

为了验证前述玉米种子定向输送方法, 建立了电磁振动玉米种子定向输送试验装置, 其结构如图 8 所示, 其中上滑槽与下滑槽通过横向支撑杆用螺栓固定于支撑座和角度调节座上, 两段滑槽的相对安装位置可调节, 形成一个高度为 Δh 下降台阶; 角度调节座上开有相差一定角度安装孔, 可使支撑杆与水平方向形成 α 角, 支撑座安装固定于振动板上; 弹簧板将振动板支撑在底座上, 衔铁、线圈和铁

芯分别固定在电磁铁支座上, 衔铁与铁芯之间的间隙可通过修整安装座的方法来调节, 安装座固定于底座上, 底座通过隔振弹垫与地面相连接。当电磁铁线圈通入交流电流时, 在电磁铁上表面产生交变电磁力, 由于弹簧板与水平方向向下倾斜一定角度, 电磁激振力方向与弹簧板相互垂直, 使得直槽内玉米受到沿水平方向和垂直方向两个振动分量, 垂直分量使玉米腾空, 水平分量使玉米向前或向后滑移。根据前述分析的定向输送方法, 在输送过程中通过调节 Δh 和 α 以及激振力的大小进行试验分析, 从

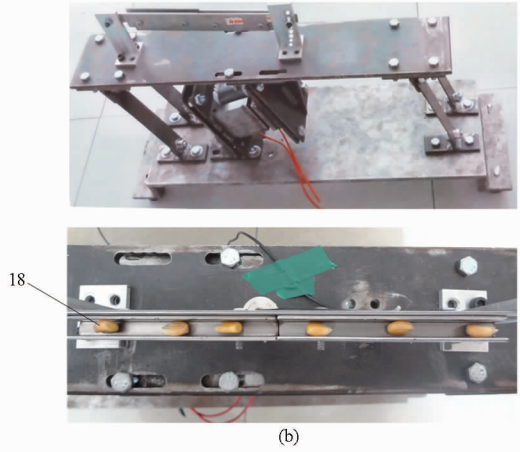
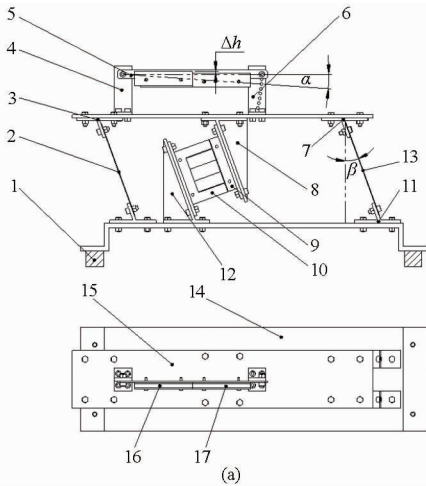


图 8 定向输送试验装置结构示意图

Fig. 8 Structural diagram of vibration directional testing device

(a) 结构图 (b) 实物图

1. 隔振弹垫 2. 弹簧 1 3. 弹簧支座 1 4. 支撑杆 5. 横向支撑杆 6. 角度调节座 7. 弹簧支座 2 8. 衔铁支座 9. 衔铁 10. 电磁铁及线圈 11. 弹簧支座 3 12. 电磁铁支座 13. 弹簧 2 14. 底座 15. 振动板 16. 上滑槽 17. 下滑槽 18. 种子籽粒

而实现种子的定向滑移输送。为了验证以上定向方法的可行性和振动试验装置的工作效果,对相关参数进行测定后进行了试验研究。同时通过高速摄影方法,对顺行和逆行的种子运动翻转过程进行了动态观察与分析^[14]。

3.1 材料与方法

试验对象为河南农业科学院研制的秋乐牌郑单 958 玉米杂交种,籽粒黄色,半马齿长扁平型,长 11 ~ 12 mm,宽 6 ~ 8 mm,厚 3.5 ~ 5 mm。试验分为顺行定向试验和逆行定向试验 2 部分。以定向成功率(逆行时种子长轴发生 180°转动,顺行未发生 180°转动)为评价目标。选择台阶高度 A 、滑槽倾角 B 、振幅 C 及激振频率 D 作为试验因素,每个因素选择 3 个水平进行试验,其中振幅大小通过加速度传感器实时监测得到。由于试验装置是按 50 Hz 市用频率进行设计,当频率比 ξ 取 0.95 时,试验装置的工作点处于亚共振区,其振动的效果最好,即设计频率与激振频率比值为 0.95,因此激振频率取 51.5 Hz、52.0 Hz、52.5 Hz 3 个水平^[9],其中频率与电压采用 SDVC31 型数字调频振动送料控制器进行调节及显示,振幅则通过 Kjar4370 型加速度传感器实时采集并通过 LabView 软件转换与显示。试验目标是在同等试验条件下,测定顺行种子和逆行种子定向排序的比例,即当种子顺行时,统计通过台阶后仍以顺行姿态前行的种子数量,而当种子逆行时,统计由逆行转变为顺行的种子数量。每组试验选取玉米种子 200 粒,其中 100 粒为顺行姿态,另外 100 粒为逆行姿态,每个水平进行 4 次重复试验,统计顺行和逆行种子定向排序的数量,然

后取平均值作为试验结果,试验的因素和水平如表 1 所示^[11-13]。

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels of experiment

水平	A/mm	$B/(\text{°})$	C/mm	D/Hz
1	2	0	0.16	51.5
2	4	2	0.18	52.0
3	6	4	0.20	52.5

3.2 试验结果及分析

3.2.1 台阶高度及滑槽倾角对定向成功率的影响

试验结果统计如表 2 所示,从表中可以看出台阶高度 A 对种子定向成功率具有极显著影响($P < 0.01$),随着高度的增加,逆行时种子翻转几率增加,但对于质量较小的种子,经过台阶下落后会弹起而出现不稳定,而且高度增加后,顺行时种子翻转的几率也相应增加,从而破坏原有顺行的姿态。滑槽倾角 B 对种子定向成功率也具有极显著影响($P < 0.01$),随着滑槽倾角的增加,种子在水平方向的重力与激振力分量随之增加,导致种子向前倾倒的趋势加强,提高了种子翻转的几率,但如果倾角过大会使得部分近圆型种子没经过台阶或经过台阶定向以后还发生二次翻转,甚至发生多次翻转,使输送不稳定。4 个因素中除了台阶高度 A 与滑槽倾角 B 对种子定向成功率具有极显著交互作用($P < 0.01$)外,其余各组合对定向成功率没有交互作用,由此说明需合理选择台阶高度 A 与滑槽倾角 B 的水平值,才能提高定向的效果。表 3 表明,对于顺行时的玉米种子的定向,只有台阶高度 A 与振动频率 D 对其有显著影响($P < 0.05$),说明对于顺行的种子,只要调

节适当的台阶高度与振动频率就能保持原来顺行的姿态而不翻转。由表4可以看出,对于逆行的种子,台阶高度 A 与滑槽倾角 B 及其交互作用对定向效果都有极显著的影响($P < 0.01$),而振幅和频率影响不显著($P > 0.05$)。

表2 各因素方差分析

Tab.2 Variance analysis of various factors

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P
A	0.046	2	0.023	38.744	0.000 1
B	0.043	2	0.021	36.044	0.000 1
C	0.008	2	0.004	6.869	0.015
D	0.001	2	0	0.606	0.566
$A \times B$	0.008	1	0.008	12.834	0.006
$A \times C$	0.002	1	0	0.084	0.778
$A \times D$	0.001	1	0.001	2.109	0.180
$B \times C$	0	1	0	0.600	0.458
$B \times D$	0.001	1	0.001	2.400	0.156
$C \times D$	0	1	0	0.150	0.708
误差	0.005	9	0.001		
总计	0.118	26			

表3 顺行时各因素的方差分析

Tab.3 Variance analysis of various factors for forward motion

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P
A	0.052	2	0.026	36.270	0
B	0	2	0	0.255	0.778
C	0.001	2	0.001	1.035	0.378
D	0.005	2	0.003	3.844	0.043
$A \times B$	0	2	0	0.068	0.935
误差	0.011	16	0.001		
总计	0.070	26			

3.2.2 振幅及激振频率对定向成功率的影响

振幅 C 对种子定向成功率具有显著影响($P < 0.05$),振幅的大小反映了激振力的大小,对于逆行玉米种子,激振力越大越有利于种子的翻转,而对于顺行种子,激振力过大,顺行的种子顺时针翻转几率也会增加,同时种子将出现抛掷运动,甚至抛出滑槽轨道,导致输送不稳定,破坏定向效果;振幅减小,会使逆行种子翻转不充分而形成直立滑移。由于电磁振动过程中,系统在谐振频率附近的振动效果是最好的,因此频率的改变对振动效果有很大的关系,因此必须把激振频率调整到接近谐振频率,由于所取3个试验频率都比较接近谐振频率,结果由表2可以看出,频率对试验结果影响不显著($P > 0.05$)。

表4 逆行时各因素的方差分析

Tab.4 Variance analysis of various factors for reverse motion

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P
A	0.614	2	0.307	118.703	0
B	0.201	2	0.100	38.869	0
C	0.001	2	0	0.178	0.839
D	0.002	2	0.001	0.311	0.737
$A \times B$	0.065	2	0.032	12.543	0.001
误差	0.041	16	0.001		
总计	0.923	26			

3.2.3 最优组合选择

通过Duncan法对试验结果进行多重比较分析,结果如表5、6所示,表中 N 为自由度,由表5可以看出,因素 A 的3水平最好,因素 B 的3水平的定向成功率最高;由表6可以看出,因素 C 的3个水平之间差异都不显著,但2水平定向效果最好,因素 D 的1水平效果略高于其他水平。通过上述分析得出各水平的最佳组合为 $A_2 B_3 C_2 D_1$,即取台阶高度为4 mm、滑槽倾角为 4° 、振幅为0.18 mm、频率取51.5 Hz效果最好。通过选择最优组合,选取200粒种子分别通过顺行和逆行姿态放置进行10次重复试验,结果表明:顺行定向成功率为93.5%,逆行定向成功率为89.4%。

表5 A 、 B 因素多重比较Tab.5 Multiple comparisons of factors A and B

A	N	Subset		B	N	Subset	
		1	2			1	2
1	9	0.762		1	9	0.740	
2	9	0.825		2	9		0.813
3	9		0.791	3	9		0.832
Sig.		0.566	1.000	Sig.		1.000	0.174

表6 C 、 D 因素多重比较Tab.6 Multiple comparisons of factors C and D

C	N	Subset		D	N	Subset
		1	2			1
1	9	0.792		1	9	0.802
2	9	0.809		2	9	0.793
3	9		0.795	3	9	0.790
Sig.		0.414	1.000	Sig.		0.396

3.3 种子定向过程高速摄影观察分析

为了真实反映种子在滑过台阶时的运动状态,利用高速摄影技术对种子进行观察,使用透明有机玻璃材料对滑槽的侧边进行加工制作,如图9a所示。在拍摄位置,可以通过有机玻璃观察到种子在滑槽中的运动状况以及经过台阶时的翻滚过程;高

速图像采集仪为美国 Vision Research 公司生产的 Phantom v9.1 高速摄影仪(图 9b),曝光时长为 $997 \mu\text{s}$,利用自带的 Phantom 控制软件对视频图片进行采集处理,设置拍摄采样率为 100 帧/s,即每秒采集 100 帧,每帧图片的间隔为 0.01 s。试验采用的振动频率为 51.5 Hz,通过调节振幅、试验装置结构参数对单粒种子的运动、翻转及腾空进行观察和分析^[13-15]。

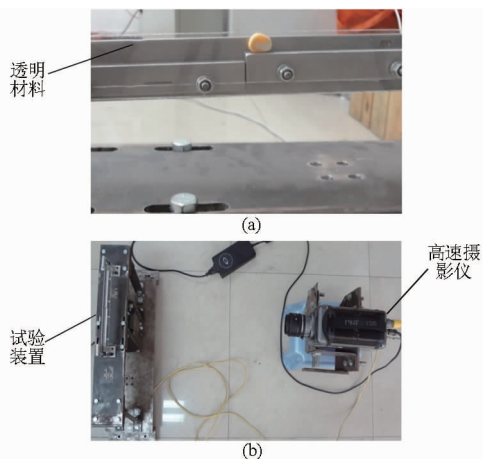


图 9 高速摄影拍摄

Fig. 9 Shooting with high speed

(a) 定向滑槽 (b) 拍摄装置

其中顺行通过台阶仍保持顺行姿态滑移,如图 10 所示,参数条件为:台阶高度为 4 mm,滑槽倾角为 0° ,振幅为 0.16 mm;逆行通过台阶后仍保持逆行姿态滑移,如图 11 所示,参数条件为:台阶高度为 4 mm,滑槽倾角为 0° ,振幅为 0.16 mm。顺行通过台阶翻转为逆行滑移,如图 12 所示,参数条件为:台阶高度为 6 mm,滑槽倾角为 4° ,振幅为 0.18 mm。逆行通过台阶后翻转为顺行姿态,如图 13 所示,参数条件为:台阶高度为 4 mm,滑槽倾角为 2° ,振幅为 0.18 mm。

从实际拍摄的整个定向翻转过程来看,当增加振幅时,激振力在前进和竖直方向上的分量变大,输送速度将变快,出现抛掷运动,种子容易被抛起,导致输送不稳定;而当种子逆行通过台阶下落时,由于重心靠前,重心越过上支撑点而产生翻转的时间较短,比较容易发生顺时针翻转,如图 13 所示,在翻转的同时,种子整体向前滑移了一段距离。由于顺行的种子重心靠后,若台阶高度和台面倾角过小,当重心越过上支撑点时,种子前端已经和下台面接触,重力产生一个逆时针的力矩阻碍翻转而保持顺行姿态,如图 10 所示,在此条件下,种子滑移比较平稳,但对于逆行的种子翻转则不理想,减少了逆行定向成功的几率,如图 11 所示;当增加台阶高度,同时加大台面倾角,种子下落后下台面的反力加大,不管是

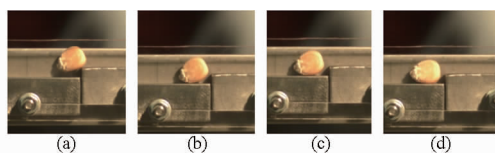


图 10 过台阶保持顺行滑移($\Delta h = 4 \text{ mm}, \alpha = 0^\circ$)

Fig. 10 Keep the forward motion after through the step

(a) 0.01 s (b) 0.05 s (c) 0.08 s (d) 0.10 s

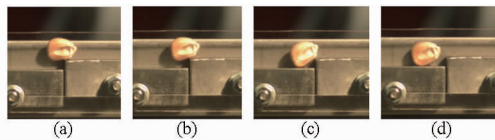


图 11 过台阶保持逆行滑移($\Delta h = 4 \text{ mm}, \alpha = 0^\circ$)

Fig. 11 Keep the reverse motion after through the step

(a) 0.01 s (b) 0.05 s (c) 0.08 s (d) 0.10 s

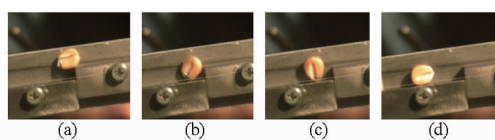


图 12 顺行转为逆行滑移($\Delta h = 6 \text{ mm}, \alpha = 4^\circ$)

Fig. 12 Forward motion turns into reverse motion

(a) 0.01 s (b) 0.03 s (c) 0.06 s (d) 0.08 s

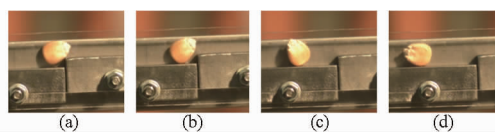


图 13 逆行转为顺行滑移($\Delta h = 4 \text{ mm}, \alpha = 2^\circ$)

Fig. 13 Reverse motion turns into forward motion

(a) 0.01 s (b) 0.05 s (c) 0.10 s (d) 0.13 s

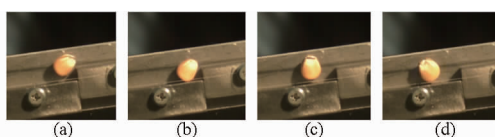


图 14 种子被抛起($\Delta h = 6 \text{ mm}, \alpha = 4^\circ$)

Fig. 14 When the seed was thrown up

(a) 0.01 s (b) 0.03 s (c) 0.05 s (d) 0.07 s

顺行还是逆行的种子整体滑移速度加快,在翻滚的同时产生跳跃,在空中受到重力的作用出现不可控的翻转效果,甚至出现连续翻滚的现象,如图 12 和图 14 所示。因此台阶的高度对顺行种子的翻转定向有着重要的影响,若台阶过高,顺行姿态的种子容易被翻转破坏原有的定向效果;同时台面倾角加大时,重力以及激振力在斜面方向上的分量增加,增加了顺时针翻转的几率,对于逆行种子定向有利,对于顺行种子不利,同时也增加了激振力在前进方向上的分力,从而增加了滑移速度。高速摄影观察表明,种子的运动状态与前述分析基本吻合。

4 结论

(1) 根据玉米定向播种的需求,结合玉米种子

外观物理特性,通过力学分析,研究了在电磁振动作用下玉米种子顺行定向与逆行定向排序输送的方法,探讨了定向过程中,种子在振动输送过程中,各种姿态的变化过程与力学参数之间的关系。研制了振动定向试验装置,理论分析和试验结果表明,利用电磁振动使玉米种子定向排序输送是可行的。

(2)通过对试验结果进行多因素方差分析表明:台阶高度 A 、滑槽倾角 B 以及其交互作用对种子定向排序效果具有极显著影响 ($P < 0.01$);对于顺行时的玉米种子的定向,只有台阶高度 A 与激振频率 D 对其有显著影响;对于逆行时的种子,台阶高度 A 与滑槽倾角 B 以及其交互作用对定向效果都有极显著的影响 ($P < 0.01$);振幅 C 对种子定向成

功率具有显著影响 ($P < 0.05$),激振频率 D 对试验结果影响不显著 ($P > 0.05$)。通过多重比较,选择最佳的因素水平组合为 $A_2B_3C_2D_1$,即取台阶高度为 4 mm、滑槽倾角为 4° 、振幅 0.18 mm、激振频率 51.5 Hz 效果最好,通过选择最优组合分别对种子顺行和逆行进行 10 次重复试验,试验结果统计显示,顺行定向成功率为 93.5%,逆行定向成功率为 89.4%。

(3)通过高速摄影观察表明,通过设置台阶结构,在电磁振动作用下种子往前滑动输送的同时伴随着抛起、自身旋转以及落地滚动等效果,调整各试验参数可以实现顺行种子翻转不充分,而逆行种子成功翻转为顺行,从而实现种子定向排序输送。

参 考 文 献

- 1 Cole R J, Holl K D, Keene C L, et al. Direct seeding of late-successional trees to restore tropical montane forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(10): 1590 - 1597.
- 2 Rama B P. Effect of orientation of seed placement on seedling emergence in some species of calamus [J]. *Advances in Bioresearch*, 2011, 2(2): 86 - 89.
- 3 Guilherme Torres, Jacob V, Raun W R. Maize (*Zea Mays*) leaf angle and emergence as affected by seed orientation at planting [J]. *Experimental Agriculture*, 2011, 47(4): 579 - 592.
- 4 Khaledian M R, Mailhol J C, Ruelle P, et al. The impacts of direct seeding into mulch on the energy balance of crop production system in the SE of France [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106(2): 218 - 226.
- 5 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]. *J. Basic. Appl. Sci. Res.*, 2012, 2(3):2657 - 2661.
- 6 郭玉富,刘闻铎,陈秀生,等. 一种玉米定向播种方法、定向种块制造设备与播种块装置:中国,CN1016639352[P]. 2010-03-10.
- 7 高星星,谭鹤群. 淡水鱼头尾与腹背定向装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*,2011,27(5):342 - 347.
Gao Xingxing, Tan Hequn. Design and experiment of directional transport device of freshwater fish bodies[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5):342 - 347. (in Chinese)
- 8 尚久浩. 自动机械设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003:232 - 258.
- 9 宋世国,王其超. 直线式电磁振动上料器的设计[J]. *机械设计*,1987(5): 30 - 35.
- 10 吴海燕. 玉米杂交种种子生物学特性研究[D]. 保定:河北农业大学,2005.
- 11 俞亚新,张斌,赵匀,等. 振动式排种器上稻种有序排列运动分析[J]. *浙江大学学报:工学版*,2009,43(5): 902 - 906.
Yu Yaxin, Zhang Bin, Zhao Yun, et al. Movement analysis of rice seed embryo ordering in vibration seed-metering device[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2009, 43(5):902 - 906. (in Chinese)
- 12 刘闻铎,姜楠,陈建林,等. 装有种子有序排列的玉米种子产品及其制造方法:中国,CN102884891A[P]. 2013-01-23.
- 13 崔涛,刘佳,杨丽,等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. *农业工程学报*,2013,29(15):34 - 41.
Cui Tao, Liu Jia, Yang Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013,29(15):34 - 41. (in Chinese)
- 14 苏江,杨志刚,田丰君,等. 惯性式压电振动送料器[J]. *农业机械学报*,2013,44(8):281 - 286.
Su Jiang, Yang Zhigang, Tian Fengjun, et al. Piezoelectric vibratory feeder [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8):281 - 286. (in Chinese)
- 15 李心平,马福丽,高连兴. 玉米种子脱粒过程高速摄影观察分析[J]. *农业机械学报*,2009,40(11): 46 - 49.
Li Xinping, Ma Fuli, Gao Lianxing. High-speed photograph analysis on threshing process of corn seed [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(11):46 - 49. (in Chinese)