

# 基于单轴对称特性的稻种定向排序仿真与试验\*

俞亚新 林佳辉 赵 匀 郑 斌

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要:** 根据稻种惯性特性及表面特性建立了欧拉动力学方程组, 并利用 Matlab 对方程组进行数值仿真。结果表明, 稻种绕  $x$ 、 $y$  轴的转动是无条件稳定的, 绕  $z$  轴的转动是有条件稳定的。分析了曲柄长度、曲柄角速度、导向板与稻种间摩擦因数、导向板倾角和振动板倾角等参数对稻种绕  $z$  轴转动的影响。根据仿真分析结果研制了振动式排种器, 通过正交试验获得了一组满足  $z$  轴转动稳定性条件的较优参数。试验结果表明, 在该参数下稻种定向率达 89%, 能满足超级稻的播种要求。

**关键词:** 单轴对称 定向排序 参数优化

**中图分类号:** S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0062-06

## Simulation and Test on Rice Seed Orientation Based on Single Axisymmetric Properties

Yu Yaxin Lin Jiahui Zhao Yun Zheng Bin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** According to inertial properties and surface characteristic of rice seed, Euler dynamical model was built. Matlab software was used to simulate the movement stability of the seeds. The numerical simulation results proved that rotation about  $x$ -axis and  $y$ -axis was unconditional stability, while rotation about  $z$ -axis was stable with some conditions. The effect of parameters on movement stability of rotation about  $z$ -axis, such as crank length, angular velocity, the friction coefficient between the rice seed and the guide plate, angle of vibrating board, and angle of guide plate, were analyzed. According to the results of simulation, through orthogonal experiment on fabricated device, a set of optimized parameters were obtained. Through experiments, above 89% embryo of rice seed were ordered.

**Key words:** Single axisymmetric Orientation Parameters optimization

### 引言

超级稻的种植要求每穴 1~2 株秧苗, 每公顷栽插穴数和株数只有常规稻的 50% 左右<sup>[1]</sup>, 因此要求育秧播种播量精度和位置精度准确, 种子在秧盘上呈单粒均匀分布状态, 空格率低, 秧苗在秧盘上也呈单株均匀分布状态, 并且盘根成片, 符合机插规格<sup>[2]</sup>。

周海波等在分析现有水稻秧盘育秧技术的基础上, 提出适合于超级杂交稻精密播种的育秧系统; 张晓慧等提出了一种针吸滚筒式水稻排种器; 王朝辉等利用气吸滚筒和振动种盘的组合方式来控制精确

吸种; 齐龙等采用图像处理的方式检测超级稻穴盘育秧的播种空穴, 提高超级稻精准育秧的成秧率<sup>[3-6]</sup>。

本文作者根据超级稻毯状苗育秧要求, 提出了稻种定向排序育秧的方法<sup>[7]</sup>。在农业工程中, 对于定向排序的研究, 集中在检测、播种、移栽等方面, 主要利用物料的生物特性、设计特殊的机构来实现<sup>[8-12]</sup>。本文作者在文献[13]中提出了利用种子表面定向生长的茸毛, 在排种器中设置导向板, 研究了稻种绕垂直于振动板的轴的转动和沿播种方向的运动, 试验研究了稻种排列方向转向一致的影响参

数。在试验过程中,发现稻种绕三轴的转动规律各不相同,因此本文在原有研究的基础上,对稻种运动过程中绕三轴的转动情况即整体运动姿态的情况进行分析,提出根据稻种的单轴对称特性,结合表面物理特性,建立播种过程中稻种的欧拉动力学方程,分析在运动过程中姿态稳定性的条件,仿真分析各参数对运动稳定性的影响,并试验验证所建立的模型。考虑到播种速度的要求,建立质心运动方程,仿真分析同参数下质心运动速度。

## 1 欧拉动力学方程

### 1.1 几何模型

超级稻种呈长椭圆形,在显微镜下可观察到表面分布有定向生长的茸毛(由胚胎向种尖方向),如图 1 所示。通过测试,运动时胚胎在前(顺行)的摩擦因数  $\mu_{2s}$  小于种尖在前时(逆行)的摩擦因数  $\mu_{2n}$ 。在越粗糙的表面,稻种逆行和顺行的摩擦因数相差越大<sup>[13]</sup>。

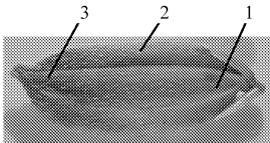


图 1 稻种的显微照片  
Fig. 1 Photomicrograph of rice seed  
1. 胚胎 2. 茸毛 3. 种尖

稻种可以表示为椭球模型(图 2),其数学表达式为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

3 个主轴的转动惯量分别为  $I_x = \frac{1}{5}m(b^2 + c^2)$ ,  $I_y = \frac{1}{5}m(a^2 + c^2)$  和  $I_z = \frac{1}{5}m(a^2 + b^2)$ ,其中  $m$  为单颗稻种的质量。

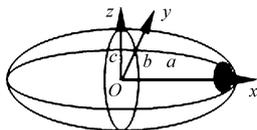


图 2 稻种的几何模型  
Fig. 2 Geometry model of rice seed

### 1.2 基本结构和工作原理

振动式排种器的组成如图 3 所示,由机架、曲柄连杆机构、导向板、稻种和振动板等组成。其工作原理是曲柄带动振动板在滑道内往复运动。稻种在振动板上无跳动无跳动的情况下,沿导向板运动,运动过程中不断自行调整姿态。

以稻种质心为坐标原点建立参考坐标系

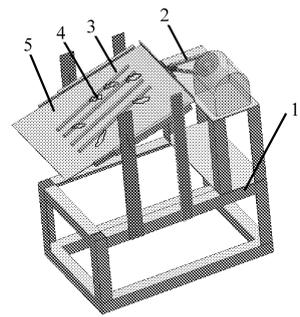


图 3 排种器结构示意图

Fig. 3 Schematic of seed-metering device

1. 机架 2. 曲柄连杆 3. 导向板 4. 稻种 5. 振动板

$OXYZ$ ,  $X$  轴方向平行于导向板,  $Y$  轴方向垂直于导向板,  $Z$  轴方向垂直于振动板(图 4)。以稻种质心为坐标原点建立动坐标系  $Oxyz$ ,  $Oxyz$  为稻种的主轴坐标系,其中  $x$  轴与稻种的长轴重合,  $y$  轴与稻种的中间长轴重合,  $z$  轴与稻种的短轴重合。在稻种运动过程中参考坐标系  $OXYZ$  的坐标原点始终位于稻种质心,但其不随稻种一起转动,动坐标系  $Oxyz$  与稻种相固连,随稻种一起转动。

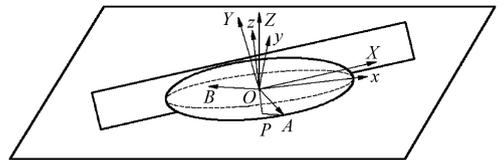


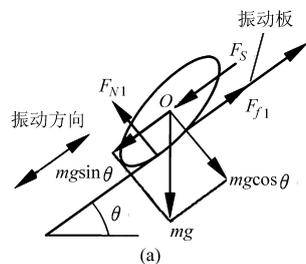
图 4 稻种在振动板上运动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rice seed movement

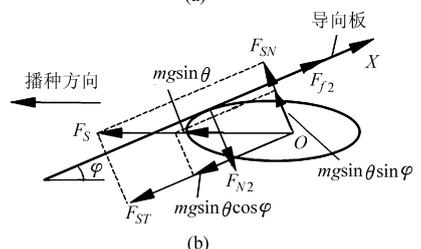
稻种在振动板上运动时的受力如图 5 所示。其中,重力  $G$ 、牵惯性力  $F_S$ 、振动板对稻种的接触力  $F_{N1}$ 、振动板对稻种的摩擦力  $F_{f1}$ 、导向板对稻种的接触力  $F_{N2}$ 、导向板对稻种的摩擦力  $F_{f2}$ 。

### 1.3 欧拉动力学方程

稻种的初始位置动坐标系  $Oxyz$  与参考坐标系  $OXYZ$  重合,根据稻种在振动板上的运动情况和广



(a)



(b)

图 5 稻种受力图

Fig. 5 Force analysis of rice seed

义欧拉角的奇点位置,选用3-1-2的坐标轴旋转顺序,转角 $\gamma$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 是坐标系 $Oxyz$ 相对坐标系 $OXYZ$

转过的角度,即为运动的姿态角<sup>[14]</sup>。坐标轴转动顺序对应的方向余弦矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & -\cos\alpha\sin\gamma & \sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\cos\beta\sin\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \cos\alpha\cos\gamma & \sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma \\ -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据坐标系(图4)和稻种的受力(图5),建立欧拉动力学方程<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} I_x \frac{d\omega_x}{dt} - (I_y - I_z)\omega_y\omega_z = M_x \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} - (I_z - I_x)\omega_z\omega_x = M_y \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} - (I_x - I_y)\omega_x\omega_y = M_z \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\cos\alpha\sin\beta \\ 0 & 1 & \sin\alpha \\ \sin\beta & 0 & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ ——稻种转动角速度在动坐标系 $Oxyz$ 中的3个轴分量

$M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ——稻种受到的偏心力矩在动坐标系 $Oxyz$ 中的3个轴分量

求得稻种绕质心转动的欧拉动力学简化模型

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} I_x = [(I_y - I_z)\dot{\gamma}^2 + (b^2 - c^2)(t_1 F_{N1} + t_2 F_{N2} \cos^2 \gamma + t_2 F_{f2} \sin\gamma \cos\gamma)]\alpha + [I_x \dot{\gamma}(I_y - I_z)\dot{\alpha}\dot{\beta} - (b^2 - c^2)t_2 F_{N2} \sin\gamma \cos\gamma + t_2 F_{f2}(c^2 \sin^2 \gamma + b^2 \cos^2 \gamma)]\beta + (I_x + I_y - I_z)\dot{\beta} I + t_1 F_{f1} c^2 \sin\gamma \\ \ddot{\beta} I_y = [-I_y \dot{\gamma}(a^2 - c^2)t_2 F_{N2} \sin\gamma \cos\gamma - t_2 F_{f2} c^2 \cos^2 \gamma - a^2 \sin^2 \gamma]\alpha + [(I_z - I_x)(\dot{\alpha}^2 - \dot{\gamma}^2) + (a^2 - c^2)(t_1 F_{N1} + t_2 F_{N2} \sin^2 \gamma - t_2 F_{f2} \sin\gamma \cos\gamma)]\beta - (I_x + I_y - I_z)\dot{\alpha}\dot{\gamma} + t_1 F_{f1} c^2 \cos\gamma \\ \ddot{\gamma} I_z = [(I_x - I_y)\dot{\alpha}\dot{\gamma} - t_1 F_{f1} b^2 \cos\gamma]\alpha + [t_1 F_{f1} a^2 \sin\gamma - I_z \dot{\alpha} - (I_x - I_y)\dot{\beta}\dot{\gamma}]\beta - (I_x - I_y - I_z)\dot{\alpha}\dot{\beta} + (b^2 - a^2)t_2 F_{N2} \sin\gamma \cos\gamma + F_{f2} t_2 (t^2 \cos^2 \gamma + a^2 \sin^2 \gamma) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中} \quad t_1 = -\frac{1}{\sqrt{a^2 \beta^2 + b^2 \alpha^2 + c^2}}$$

$$t_2 = \frac{1}{\sqrt{a^2 \sin^2 \gamma + b^2 \cos^2 \gamma + c^2 (\beta \sin\gamma - \alpha \cos\gamma)^2}} \quad (6)$$

## 2 质心运动微分方程

稻种沿导向板 $X$ 方向的运动方程可表示为

$$m \ddot{X} = mg \sin\theta \cos\varphi + F_{st} - F_{f1} - F_{f2} \quad (7)$$

式中 $m$ ——单颗稻种的质量,kg

## 3 Matlab 数值仿真

式(5)是非线性方程组,采用 Matlab 对方程组进行数值求解,分析稻种运动姿态的变化规律以及排种器各结构参数对姿态角的影响。

建立的模型中,稻种对 $x$ 轴转动惯量最大,该方向的转动是稳定的,且姿态角 $\alpha$ 的变化对排序没有影响;而根据势能最小原理,稻种绕 $y$ 轴的转动也是稳定的。因此,稻种绕 $x$ 、 $y$ 轴转动姿态稳定的条件均能满足,通过调节参数来控制稻种绕 $z$ 轴转动可以实现稻种定向排序,实现排种时胚胎一致朝前的要求。

### 3.1 运动姿态稳定性分析

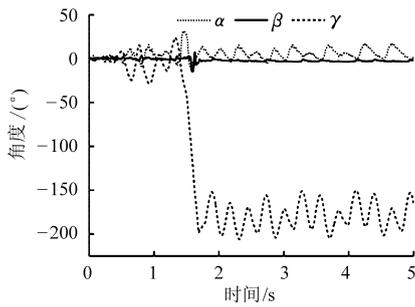
从种箱出来的稻种,落到振动板上,初始状态是随机的。图6为稻种在无跳动的前提下2种初始状态时姿态角的变化。在 $R = 1 \text{ mm}$ , $\omega = 19.2\pi \text{ rad/s}$ , $\theta = 10^\circ$ , $\varphi = 15^\circ$ 稻种与振动板间摩擦因数 $\mu_1 = 0.32$ ,稻种与导向板间摩擦因数 $\mu_{2n} = 1.4$ , $\mu_{2s} = 0.9$ 时,初始状态分别为:稻种的 $x$ 轴正方向与 $X$ 轴正方向一致和稻种的 $x$ 轴正方向与 $X$ 轴正方向的夹角为 $180^\circ$ 。在2种初始状态下,姿态角 $\alpha$ 、 $\beta$ 的波动均没有超过 $\pm 90^\circ$ ,表明绕 $x$ 、 $y$ 轴的转动是稳定的。图6a中,稻种绕 $z$ 轴的转角 $\gamma$ 转过了 $180^\circ$ ,表明稻种有转向过程,然后保持稳定的姿态运动;图6b中稻种绕 $z$ 轴的转角 $\gamma$ 在 $\pm 90^\circ$ 范围内波动,表明稻种绕 $z$ 轴运动是稳定的。

仿真分析结果表明:2种初始状态的稻种经过一段时间的运动,均能实现 $x$ 轴正方向与 $X$ 轴正方向成 $180^\circ$ 的运动,也就是运动时胚胎在前,实现了定向排种的目的。

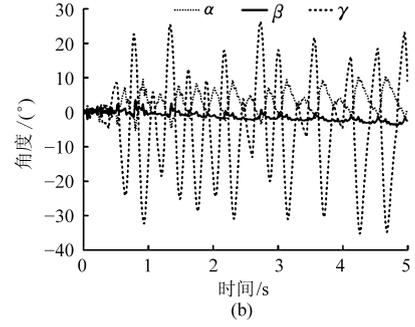
### 3.2 各参数对稻种绕 $z$ 轴转动稳定性影响

在 $\mu_1 = 0.5$ , $\mu_2 = 1.4$ , $\theta = 10^\circ$ , $\varphi = 10^\circ$ , $R = 1 \text{ mm}$ , $\omega = 10\pi \text{ rad/s}$ 下,每次只改变1个参数,在其他参数不变的情况下分析该参数变化对姿态角 $\gamma$ 波动的影响。 $\gamma$ 的波动越小,即稻种绕 $z$ 轴的转向越困难,稻种在排种器上的运动姿态越稳定。

图7~13可知, $\mu_1$ 增大时,姿态角 $\gamma$ 的波动减小; $\mu_2$ 增大时,姿态角 $\gamma$ 的波动增大;当振动板倾角



(a)



(b)

图 6 不同初始状态下稻种姿态角波动曲线

Fig. 6 Posture curves in different initial states

(a) 稻种  $x$  轴正方向与  $X$  轴正方向一致

(b) 稻种  $x$  轴正方向与  $X$  轴正方向夹角为  $180^\circ$

$\theta$ 、导向板倾角  $\varphi$  变化时,姿态角  $\gamma$  的波动变化不明显;当曲柄长度  $R$ 、曲柄角速度  $\omega$  增大时,姿态角  $\gamma$  的波动增大。

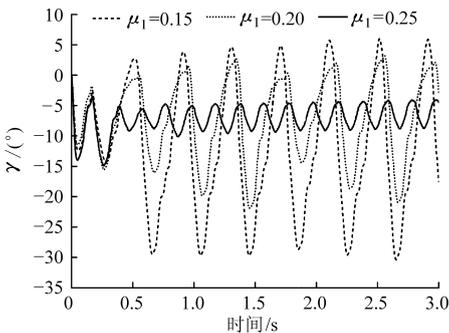


图 7  $\mu_1$  对稻种运动稳定性的影响

Fig. 7 Effect of  $\mu_1$  on movement stability

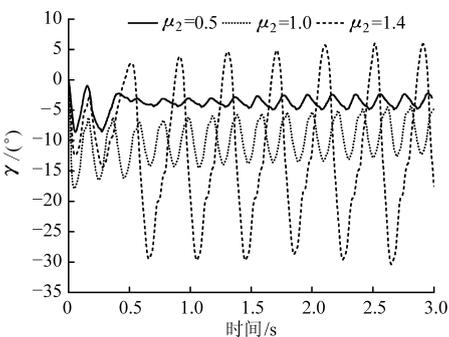


图 8  $\mu_2$  对稻种运动稳定性的影响

Fig. 8 Effect of  $\mu_2$  on movement stability

图 13 在  $\theta = 10^\circ$ ,  $\varphi = 10^\circ$ ,  $R = 1 \text{ mm}$ ,  $\omega = 10\pi \text{ rad/s}$ ,  $\mu_1 = 0.15$ ,  $\mu_2 = 0.5$ ,  $b = 1.44 \text{ mm}$ ,  $c = 1.04 \text{ mm}$  条件下,稻种长轴尺寸分别为 4、5、6 mm 时

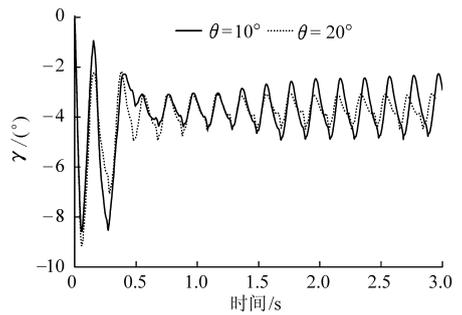


图 9  $\theta$  对稻种运动稳定性的影响

Fig. 9 Effect of  $\theta$  on movement stability

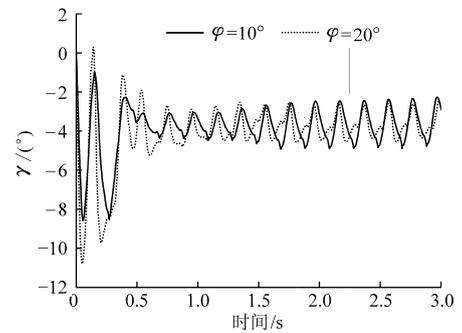


图 10  $\varphi$  对稻种运动稳定性的影响

Fig. 10 Effect of  $\varphi$  on movement stability

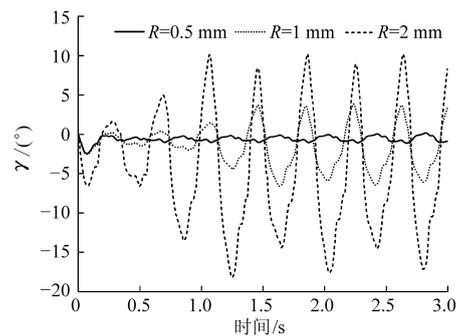


图 11  $R$  对稻种运动稳定性的影响

Fig. 11 Effect of  $R$  on movement stability

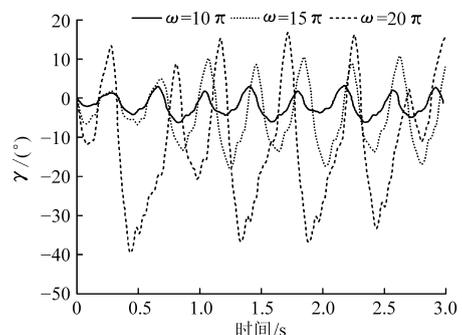


图 12  $\omega$  对稻种运动稳定性的影响

Fig. 12 Effect of  $\omega$  on movement stability

姿态角  $\gamma$  波动的情况。由图可知,稻种越细长,其姿态角  $\gamma$  波动的中间位置偏离稻种的初始位置越小,因此在相同结构参数下,越细长的稻种在排种器上的转动越稳定。

### 3.3 质心速度仿真分析

稻种沿导向板方向的移动速度关系到排种器定

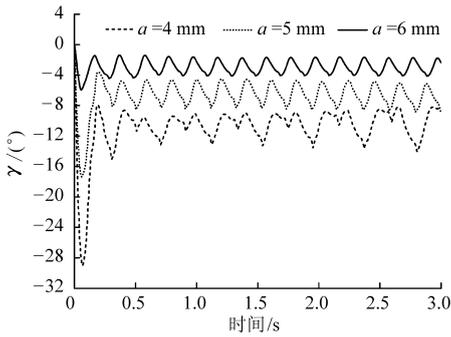


图13 稻种几何形状对运动稳定性影响

Fig. 13 Effect of shape of rice seed on movement stability

向播种的效率和稻种间的连续性,图14为在 $\mu_1 = 0.5$ ,  $\mu_2 = 1.4$ ,  $\theta = 10^\circ$ ,  $\varphi = 10^\circ$ ,  $R = 1$  mm,  $\omega = 10\pi$  rad/s下,质心沿导向板的位移与速度。

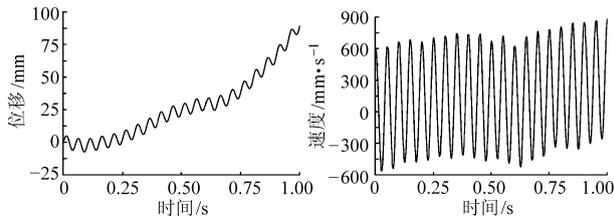


图14 质心位移和速度分析

Fig. 14 Analysis of centroid velocity

## 4 试验

图15为试验研究的振动式排种器。试验所用

的超级稻种为国稻6号,三轴长分别为:10.27 mm、2.08 mm和2.87 mm;千粒质量为32.016 g。

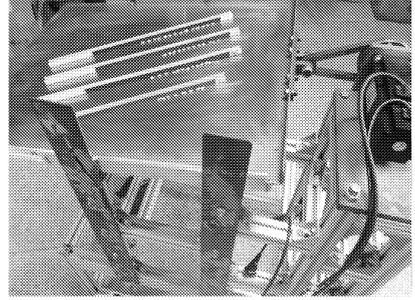


图15 排种器试验台

Fig. 15 Test bed of seed-metering device

### 4.1 试验参数

试验中振动板为表面镀锌板,因其表面较光滑,不同运动方向的稻种对振动板的摩擦因数变化较小,本文取0.82。导向板表面粘贴不同型号砂纸(2000号,1500号,600号),以获得不同摩擦因数。由振动板的运动方程: $x_1 = R\cos(\omega t + \varphi) + L$ 可知,其频率和振幅可分别通过调整伺服电动机转速和曲柄长度得到。

将曲柄长度、曲柄角速度、导向板与稻种间摩擦因数、导向板倾角、振动板倾角5个因素进行正交试验。根据Matlab仿真分析确定各参数的调节范围,每个因素取3个水平。表1为正交试验因素水平表。

表1 试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	曲柄长度 $x_1/\text{mm}$	曲柄角速度 $x_2/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	导向板与稻种间摩擦因数 $x_3$		导向板倾角 $x_4/(^\circ)$	振动板倾角 $x_5/(^\circ)$
			逆行 $\mu_{2n}$	顺行 $\mu_{2s}$		
1	0.5	$24\pi$	1.36	1.07	10	8
2	1	$21\pi$	1.24	1.02	15	12
3	2	$18\pi$	1.17	0.97	20	16

### 4.2 试验结果

根据试验中因素个数和水平数,选择七因素三水平的正交试验表 $L_{18}(3^7)$ ,每组试验取国稻6号种子100颗,随机落到振动板上,统计稻种胚胎定向排列的成功率,每组试验重复10次,最终结果取平均值。试验方案及结果如表2所示。

由极差分析表3可知,5个因素对稻种排序率影响重要性从大到小依次为:曲柄长度 $R$ 、导向板与稻种间摩擦因数 $\mu_2$ 、曲柄角速度 $\omega$ 、导向板倾角 $\varphi$ 、振动板倾角 $\theta$ 与Matlab中得到的导向板角和振动板倾角对稻种运动稳定性影响较小的结论相符。以定向率为考察目标,可以得到一组最佳的因素水平

组合为 $R = 2$  mm、 $\omega = 21\pi$  rad/s、 $\mu_{2n} = 1.36$ 、 $\mu_{2s} = 1.07$ 、 $\beta = 20^\circ$ 、 $\alpha = 12^\circ$ 。

在最佳参数下,进行稻种定向排序的验证试验,随机选取100颗稻种,重复试验10次,计算平均值,稻种定向率为89%。

图16为播种录像中每隔0.3 s截取一张图片的集合。初始状态为顺行的稻种(2,3,5,10)在整个运动过程中始终没有发生转向。在图16中,稻种(1,4)正在转向,稻种(6,7,8,9)为逆行。经过沿振动板上导向板的运动,在图16f中,除稻种9外,其余稻种均为胚胎向前运动,可以实现定向排种的目的。

表 2 试验方案及结果

Tab. 2 Scheme and result of orthogonal experiments

序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	稻种定向率/%
1	1	1	1	1	1	71
2	1	2	2	2	2	67
3	1	3	3	3	3	63
4	2	1	1	2	2	80
5	2	2	2	3	3	79
6	2	3	3	1	1	69
7	3	1	2	1	3	71
8	3	2	3	2	1	76
9	3	3	1	3	2	82
10	1	1	3	3	2	69
11	1	2	1	1	3	74
12	1	3	2	2	1	67
13	2	1	2	3	1	76
14	2	2	3	1	2	76
15	2	3	1	2	3	68
16	3	1	3	2	3	67
17	3	2	1	3	1	88
18	3	3	2	1	2	74

表 3 试验结果的极差分析

Tab. 3 Range analysis of experiment results

参量	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$K_1$	68.33	72.33	77.17	72.50	74.33
$K_2$	74.67	75.67	72.17	70.67	74.66
$K_3$	76.33	70.33	70.00	76.17	70.33
极差 $R$	8.00	6.33	7.17	5.50	4.33

## 5 结论

(1) 根据稻种表面物理特性及单轴对称的几何

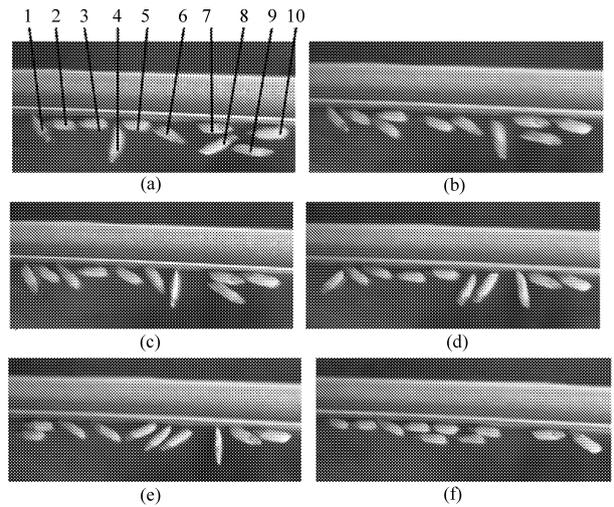


图 16 稻种的转向过程

Fig. 16 Rotation of rice seeds

特性,设计了排种器,建立了播种过程中的欧拉动力学方程。

(2) 利用 Matlab 对欧拉方程组进行数值仿真,分析了排种时稻种 3 个主轴方向转动的稳定性。在本文设计的约束条件下,可以实现稻种绕转动惯量最小轴  $z$  轴的定向转动稳定性,达到稻种胚胎一致朝前,实现定向排序排种目的。

(3) 利用自制的排种器进行了正交试验,当  $R = 2 \text{ mm}$ 、 $\omega = 21\pi \text{ rad/s}$ 、 $\beta = 20^\circ$ 、 $\mu_{2s} = 1.07$ 、 $\mu_{2n} = 1.36$ 、 $\alpha = 12^\circ$  时,稻种定向率为 89%,测得稻种沿导向板的平均播种速度是 56 mm/s。

(4) 理论与试验分析表明,利用稻种单轴对称特性所设计的振动式排种器能满足超级稻机械化播种位置精度的要求。

## 参 考 文 献

- 袁隆平. 超级杂交水稻研究[M]. 上海:上海科学技术出版社,2005.
- 吴崇友,陈南云. 超级稻机械化生产关键技术装备研究开发的技术途径[J]. 农业装备技术,2006,32(6):16~19.  
Wu Chongyou, Chen Nanyun. Technical ways of developing key-technologies and machines of super-rice mechanization[J]. The Equipment and Technology of Agriculture, 2006,32(6):16~19. (in Chinese)
- 周海波,马旭,姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报,2008,24(4):301~306.  
Zhou Haibo, Ma Xu, Yao Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(4):301~306. (in Chinese)
- 张晓慧,宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[J]. 农业机械学报,2009,40(3):69~71.  
Zhang Xiaohui, Song Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):69~71. (in Chinese)
- 王朝辉,马旭. 超级稻精密播种器种层振动测试与分析[J]. 农业机械学报,2010,41(2):68~72.  
Wang Zhaohui, Ma Xu. Vibrating measurement and analysis of seeds layer on precision seedling planting parts for super hybrid rice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(2):68~72. (in Chinese)
- 齐龙,马旭,周海波. 基于机器视觉的超级稻秧盘育秧播种空穴检测技术[J]. 农业工程学报,2009,25(2):121~125.  
Qi Long, Ma Xu, Zhou Haibo. Seeding cavity detection in tray nursing seedlings of super rice based on computer vision technology [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(2):121~125. (in Chinese)
- 赵匀,俞亚新,张斌,等. 电磁振动式精密播种器:中国,ZL200710067322.8[P]. 2009-06-10.

## 参 考 文 献

- 1 Taylor W A, Andersen P G, Cooper S. The use of air assistance in a field crop sprayer to reduce drift and modify drop trajectories [C]//Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference: Weeds 2. Farnham, U. K. : BCPC Publications, 1989: 631 ~ 639.
- 2 Quanquin B J. Less drift, more on target with the twin system [C]. ASAE Paper 92-1564, 1992.
- 3 Quanquin B J. Air-assist applied to field sprayers [C] // Proceedings of the National Conference on Pesticide Application Technology. Guelph, Ontario: University of Guelph, 1995:124 ~ 126.
- 4 Young B W. A method for assessing the drift potential of hydraulic nozzle spray clouds, and the effect of air assistance[C] // Air-Assisted Spraying in Crop Protection, BCPC MONO. No.46. Farnham, U. K. : BCPC Publications, 1991: 77 ~ 86.
- 5 Hislop E C, Western N M, Cooke B K, et al. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions [J]. Crop Protection, 1993,12(3): 193 ~ 200.
- 6 Howard K D, Mulrooney J E. Testing protocol for the evaluation of air-assisted boom sprayers [C]. ASAE Paper AETC96116, 1996.
- 7 Robert E W. Equipment to reduce spray drift [R]. Lawrence, KS: Kansas State University, 2000.
- 8 Hislop E C, Western N M, Ruth Butler. Experimental air-assisted spraying of a maturing cereal crop under controlled conditions [J]. Crop Protection, 1995,14(1): 19 ~ 26.
- 9 Panneton B, Phillion H, Thériault R, et al. Spray chamber evaluation of air-assisted spraying on broccoli [J]. Crop Science, 2000,40(2): 444 ~ 448.
- 10 Piché M, Panneton B, Thériault R. Field evaluation of air-assisted boom spraying on broccoli and potato[J]. Transactions of the ASAE, 2000,43(4): 793 ~ 799.
- 11 Scudeler F, Raetano C G. Spray deposition and losses in potato as a function of air-assistance and sprayer boom angle [J]. Sci. Agric. , 2006,63(6): 515 ~ 521.
- 12 严荷荣,张志平. 风幕式喷杆喷雾机的研制 [J]. 农业机械,2006(1):139 ~ 140.
- 13 杨学军,严和荣,刘树民,等. 自走式高地隙风幕式喷杆喷雾机的研制[J]. 农业机械,2008(6):34 ~ 35.
- 14 张铁,杨学军,董祥,等. 超高地隙风幕式喷杆喷雾机施药性能试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):66 ~ 71.  
Zhang Tie, Yang Xuejun, Dong Xiang, et al. Experiment on spraying performance of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(10):66 ~ 71. (in Chinese)
- 15 王俊,祁力钧. 喷雾机喷杆压力损失及对喷雾质量的影响[J]. 农业机械学报,2006,37(3):42 ~ 45.  
Wang Jun, Qi Lijun. Pressure drop on the boom sprayer and its effect on spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(3):42 ~ 45. (in Chinese)
- 16 刘雪美,苑进,张晓辉,等. 气流辅助式喷雾工况参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):67 ~ 72.  
Liu Xuemei, Yuan Jin, Zhang Xiaohui, et al. Effect of air-assisted spraying condition parameters on boom spray drift characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):67 ~ 72. (in Chinese)
- 17 汤伯敏,林光武,高崇义,等. 二相流喷雾技术的研究[J]. 农业工程学报,2001,17(5):59 ~ 62.  
Tang Bomin, Lin Guangwu, Gao Chongyi, et al. Study on two-phase flow spraying technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2001,17(5):59 ~ 62. (in Chinese)

(上接第 67 页)

- 8 Lefcourt A M, Narayanan P, Tasch U, et al. Theoretical analysis of stability of axially-symmetric rotating objects with regard to orienting apples[J]. Transactions of the ASABE, 2008,51(4):1 353 ~ 1 364.
- 9 金诚谦,袁文胜,吴崇友,等. 大蒜播种时鳞芽朝向对大蒜生长发育影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):155 ~ 158.  
Jin Chengqian, Yuan Wensheng, Wu Chongyou, et al. Experimental study on effects of the bulbil direction on garlic growth[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(4):155 ~ 158. (in Chinese)
- 10 何岳平,陈青春,何瑞银,等. 大蒜栽植机栽植系统优化设计与运动分析[J]. 农业机械学报,2011,42(2):88 ~ 93,119.  
He Yueping, Chen Qingchun, He Ruiyin, et al. Optimal design and kinematic analysis for planting system of garlic planting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(2):88 ~ 93,119. (in Chinese)
- 11 荐世春,赵峰,李青,等. 旋转式蒜瓣单粒定向取种器的研究设计[J]. 农业装备与车辆工程,2009(2):18 ~ 20.  
Jian Shichun, Zhao Feng, Li Qing, et al. Research and design on rotary garlic single-clove directional seed metering device[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2009(2):18 ~ 20. (in Chinese)
- 12 Gao Chi, Zhang Heng. Study on the direction identification and alignment of garlic scaly bud[J]. Advanced Materials Research, 2012, 482 ~ 484: 220 ~ 223.
- 13 俞亚新,赵匀,张斌,等. 基于稻种胚胎定向排列原理的排种器研究及参数优化[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2008, 29(3):194 ~ 197.  
Yu Yaxin, Zhao Yun, Zhang Bin, et al. Seed metering device based on orienting ordered arrangement in embryo and parameter optimization[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008,29(3):194 ~ 197. (in Chinese)
- 14 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- 15 谢传锋. 动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.