

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.009

双凹面摇杆式排种器设计与性能试验*

贾洪雷^{1,2} 赵佳乐^{1,2} 郭明卓^{1,2} 姜鑫铭^{1,2} 郭慧^{1,2} 姜铁军³

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025;

3. 大庆市农业机械技术推广总站, 大庆 163311)

摘要: 为满足精密播种机的作业要求,设计了一种大豆排种器,通过双凹曲面取种块与倾斜式清种环完成种子的充种、清种、排种等作业环节,实现高效率、高精度、低破损的作业目标。通过对其作业原理的分析,对作业关键部件双凹曲面取种块的结构参数进行优化设计。为实现通过转速来调节排种器变量排种的要求,并为设计高速、高性能播种机提供理论依据,以排种器转速、清种环倾斜角为试验因素,单粒率为试验指标进行二次旋转组合试验。通过单因素和双因素试验得到充足的试验数据,并运用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析,建立试验因素与试验指标之间的数学模型。试验结果表明:清种环最佳倾斜角为 65° ,在此前提下排种器转速小于 110 r/min 时,可保证单粒率在95%以上。

关键词: 大豆 排种器 双凹曲面取种块 倾斜式清种环

中图分类号: S222.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0060-06

Design and Performance Experiment on Double-concave Surface Rocker Type Seed Metering Device

Jia Honglei^{1,2} Zhao Jiale^{1,2} Guo Mingzhuo^{1,2} Jiang Xinming^{1,2} Guo Hui^{1,2} Jiang Tiejun³

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

3. Daqing Agricultural Machinery Technology Promotion Station, Daqing 163311, China)

Abstract: In order to meet the requirements of precision planting, a soybean seedmeter was designed, which can perform operations of seed filling, seed cleaning and seed metering, achieving high efficiency, high precision and low seed damage. The optimal design of structural parameters of the seed-taking block, the key part of the seedmeter, was conducted based on the analysis of the working principle of the double-concave seedmeter, which provided a theoretical basis for the design of high-speed and high-performance planters and variable adjustment of seeding rates by adjusting the rotational speed of the seedmeter. The quadratic general rotary unitized design was carried out with the rotational speed of the seedmeter and tilting angle of the seed-cleaning ring as the experimental factors and the single seed rate as the experimental index. Based on experimental data, a mathematical model was built by using the Design-Expert software. Test results showed that the optimal tilting angle of the cleaning ring was 65° , at which the single seed rate of over 95% can be ensured when the rotational speeds were less than 110 r/min .

Key words: Soybean Seedmeter Double-concave seed-taking block Tilting cleaning ring

引言

排种器作为精密播种机最重要的工作部件,其

工作性能直接影响着精密播种机的作业质量。20世纪70年代伊始,中国逐步开展了排种器的研究工作,所研制的排种器主要分为气吸式排种器和

收稿日期:2014-01-24 修回日期:2014-02-13

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B03)

作者简介:贾洪雷,教授,博士生导师,主要从事全程机械化与保护性耕作理论与技术研究,E-mail: jiahl@vip.163.com

机械式排种器两种^[1-4]。气吸式排种器主要有组合吸孔气吸式排种器、气吸滚筒式排种器等^[5-9];机械式排种器主要有倾斜圆盘勺式排种器、组合内窝孔玉米精密排种器等^[10-16]。其中机械式排种器对加工精度和加工成本的要求均较低,适合我国的实际情况,但是当前市场上常见的几种机械式排种器均很难满足高精度、高效率、性能稳定的农艺要求,因此研制一种能够实现低漏播率、低重播率、低伤种率的机械式排种器成为迫切需求^[16-20]。基于此种需求,本文设计一种双凹曲面摇杆式排种器,通过双凹曲面取种块与倾斜式清种环完成种子的充种、清种、排种作业,实现单粒率高、下籽均匀、高速、低破碎的作业要求,为精密播种机整机设计提供基础。

1 排种器结构与工作原理

1.1 排种器结构

如图 1 所示,轴与转盘焊接,转盘与取种块圆环、曲柄拐臂圆环焊接,双凹曲面取种块与取种块圆环铰接,曲柄拐臂与曲柄拐臂圆环铰接,由此达到双凹曲面取种块与曲柄拐臂随轴做逆时针转动的目的。双凹曲面取种块与曲柄拐臂由连杆连接,形成一个曲柄摇杆机构,进而达到双凹曲面取种块可随曲柄拐臂的转动而摆动。扭转弹簧可使双凹曲面取种块绕螺钉做顺时针转动。排种器种盒与排种器种盒盖由螺栓固定在一起,排种器种盒上的倾斜面起到清种环的作用,倾斜式清种环上安有一个清种刷。排种器种盒与转盘之间存在极小缝隙,以避免摩擦

阻力。凸轮与排种器种盒盖由连杆连接,以保证凸轮不发生转动。凸轮、排种器种盒盖由深沟球轴承、轴承端盖与轴连接。作业关键部件双凹曲面取种块具有两个凹曲面,距螺钉 2 较远的凹曲面称为第一凹曲面,较近的称为第二凹曲面。

1.2 工作原理

轴与电动机输出轴连接,带动转盘做逆时针转动,从而驱动曲柄拐臂、连杆、双凹曲面取种块做逆时针匀速转动。

1.2.1 充种作业原理

当双凹曲面取种块逆时针旋转接近充种区时,凸轮迫使拐臂绕螺钉做逆时针旋转,曲柄拐臂进入远休止过程,通过连杆带动双凹曲面取种块绕螺钉做逆时针旋转,使双凹曲面取种块凹曲面与清种环之间形成一定的张角,从而使种子进入第一凹曲面。

当双凹曲面取种块的两凹曲面结合部进入充种区时,曲柄拐臂结束远休止过程,进入回程和近休止过程。从而使第二凹曲面进入充种区时,双凹曲面取种块在扭转弹簧扭力作用下做顺时针转动,张角变小,进而使种子无法进入第二凹曲面之中,被夹持在第一凹曲面之中。此时种子在双凹曲面取种块夹持力、离心力、倾斜清种环支撑力、自身重力共同作用下达达到力的平衡状态,随双凹曲面取种块做逆时针匀速转动。

1.2.2 清种作业原理

双凹曲面取种块一次取种数量为 1~2 粒,极少出现 3 粒的情况。当取种数大于 1 粒时,种子与清种刷接触时,种子受到清种刷的阻碍,种子与双凹曲面取种块发生相对运动,距第二凹曲面最近的种子率先进入第二凹曲面,使双凹曲面取种块张角变大。此时滞留在第一凹曲面中的种子不再受到双凹曲面取种块的夹持作用,又因清种环具有一定的倾斜角度,使其在排种器轴向向上的受力无法达到平衡,产生轴向位移,进而脱离双凹曲面取种块掉回取种区。清种环采取倾斜式设计,还具有对双凹曲面取种块的限位功能,双凹曲面取种块与清种环上半径较小的一侧接触后就会停止转动,从而使种子不会因双凹曲面取种块张角过小而破损。

1.2.3 排种作业原理

种子被双凹曲面取种块夹持到排种口时,种子不再受到倾斜清种环支撑力的作用,进而在双凹曲面取种块夹持力、离心力和自身重力的作用下被推出排种口。

2 双凹曲面取种块设计

大豆排种器的核心作业部件为双凹曲面取种

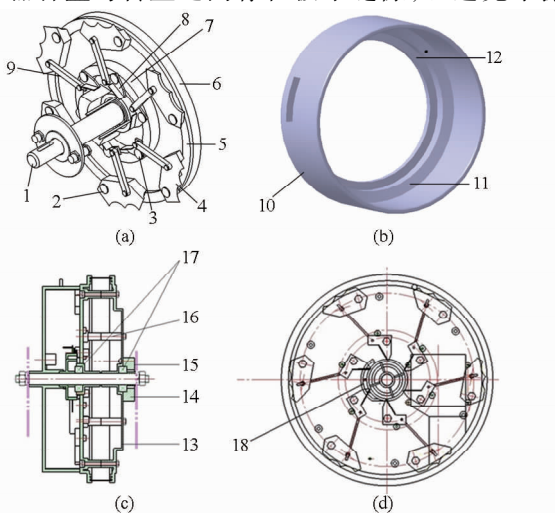


图 1 排种器结构图

Fig. 1 Structural diagram of seed metering device

(a) 取种转盘结构图 (b) 倾斜式清种环
(c) 排种器侧视图 (d) 排种器主视图

1. 轴 2、3. 螺钉 4. 双凹曲面取种块 5. 取种块圆环 6. 转盘
7. 曲柄拐臂圆环 8. 曲柄拐臂 9. 连杆 10. 排种器种盒
11. 倾斜式清种环 12. 清种刷 13. 排种器种盒盖 14. 种箱
15. 轴承端盖 16. 连杆 17. 深沟球轴承 18. 凸轮

块。建立一个空间直角坐标系 $OXYZ$, O 点为双凹曲面取种块的旋转中心点, Z 轴为排种器轴向方向, X 轴为双凹曲面取种块旋转中心的瞬时速度方向, Y 轴为取种块绕排种器轴做圆周运动时 O 点的径向方向, 如图 2 所示。通过求出平行于 XOY 平面的偏心圆弧 AC 、偏心圆弧 CD 及平行于 YOZ 平面的偏心圆弧 DB 的参数方程, 完成对两个凹曲面的设计。由于大豆种子的球形率大于 90%^[15], 所以在设计分析过程中大豆种子按球形考虑, 试验所分析的大豆最大半径 r_{\max} 为 3.5 mm, 最小直径 r_{\min} 为 2 mm, 基于机构整体结构考虑, O 、 A 两点在 Y 轴方向上距离为 9 mm。

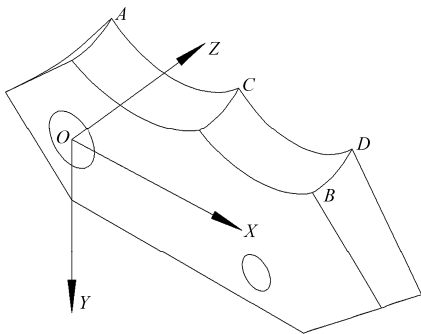


图 2 双凹曲面取种块三维空间示意图

Fig. 2 3-D diagram of double-concave surface seed-taking block

图 3 为双凹曲面取种块侧视图。 M 、 N 分别为偏心圆弧 AC 、偏心圆弧 CD 的圆心, H 、 F 分别为弦 AC 、弦 CD 的中点, G 、 E 分别为直线 MH 与偏心圆弧 AC 的交点和直线 NF 与偏心圆弧 CD 的交点。双凹曲面取种块的偏心圆弧 AC 段在作业时起取种作用, 为使最大的种子也能够被双凹曲面取种块夹持, 此段偏心圆弧 CD 的半径 r_{CD} 应大于等于大豆种子的最大半径 r_{\max} , 同时 r_{CD} 过大会造成一次取种过多使排种器单粒率下降, 因而 r_{CD} 长度取 r_{\max} 。为使任意种子进入双凹曲面取种块时, 双凹曲面取种块的张角大于零, 线段 EF 应小于等于大豆种子的最小半径 r_{\min} , 同时线段 EF 过小会造成偏心圆弧 CD 的弧度过平, 对种子的夹持效果下降, 因而 EF 长度取 r_{\min} 。由公式

$$r_{CD}^2 = (r_{CD} - r_{\min})^2 + (L_{CD}/2)^2 \quad (1)$$

式中 L_{CD} ——弦 CD 的长度, mm

得出弦 CD 长度为 6.4 mm。

由此得出偏心圆弧 CD 的参数方程

$$\begin{aligned} (x - 11)^2 + (y - 10.5)^2 &= 12.25 \\ (7 \leq y \leq 9; 7.8 \leq x \leq 14.2) \end{aligned} \quad (2)$$

当种子与清种刷接触时, 距偏心圆弧 AC 最近的种子率先进入偏心圆弧 AC 内。由于大豆种子近似球体, 所以随着种子的深入, 双凹曲面取种块张角

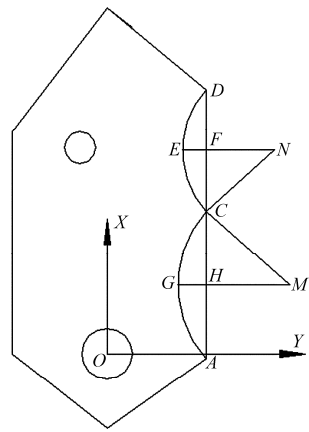


图 3 凹曲面取种块侧视图

Fig. 3 Side view of concave surface seed-taking block

先变大后变小, 且种子深入一半时双凹曲面取种块张角最大。为使所有种子都可进入偏心圆弧 AC 内, 且种子进入偏心圆弧 AC 后双凹曲面取种块张角尽量大, 偏心圆弧 AC 应满足最大的种子恰好被夹持在种子的二分之一处。由公式

$$L_{AC}^2 = r_{\max}^2 + (2r_{\max})^2 \quad (3)$$

式中 L_{AC} ——弦 AC 长度, mm

得出弦 AC 的长度为 $\sqrt{5}r_{\max}$ 。

当进入偏心圆弧 AC 的种子体积小于种子体积最大值时, 双凹曲面取种块的张角减小。为使任意种子进入双凹曲面取种块时, 双凹曲面取种块的张角大于零, 线段 GH 应小于等于大豆种子的最小半径 r_{\min} , 线段 GH 过小会造成偏心圆弧 CD 的弧度过平、种子的夹持效果下降, 因而 GH 长度取为 r_{\min} 。由公式

$$(r_{AC} - r_{\min})^2 + (\sqrt{5}r_{\max}/2)^2 = r_{AC}^2 \quad (4)$$

得出 r_{AC} 为 4.8 mm。

由此得出偏心圆弧 AC 的参数方程为

$$\begin{aligned} (x - 3.9)^2 + (y - 11.8)^2 &= 23.04 \\ (0 \leq x \leq 7.8; 7 \leq y \leq 9) \end{aligned} \quad (5)$$

图 4 为双凹曲面取种块的主视图, J 为偏心圆弧 BD 的圆心, 线段 BI 为倾斜清种环, $\angle BIJ$ 为倾斜式清种环的倾斜角 β , $\angle BJD$ 为偏心圆弧所对圆心角 α 。为使任意种子均可进入双凹曲面取种块, 偏心圆弧 DB 的半径应为最大种子半径 r_{\max} 。种子在随双凹曲面取种块转动过程中, 由于种子重力在 X 轴、 Y 轴两个方向上的分力不断变化, 所以为保证种子受力的平衡状态, 其会沿偏心圆弧 DB 不断滑动以保持受力平衡。为使任意种子进入双凹曲面取种块后, 无论处于偏心圆弧 DB 上任意位置均可受到双凹曲面取种块的夹持, 偏心圆弧上 DI 点与清种环的距离应小于等于最小种子的直径 $2r_{\min}$, 同时线段 DI 过小造成取种块夹持作用下降, 线段 DI 的长

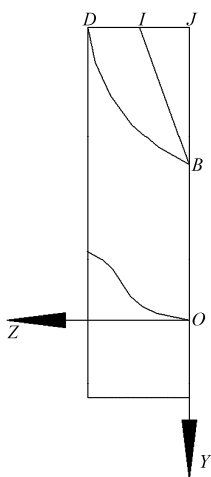


图 4 凹曲面取种块主视图

Fig. 4 Front view of concave surface seed-taking block

度应取 $2r_{\min}$ 。由公式

$$\frac{2r_{\max} - 2r_{\min}}{\sin(\pi/2 - \beta)} = \frac{2r_{\max}}{\sin(\pi/2 - \alpha + \beta)} \quad (6)$$

可求出 α 与 β 关系。由试验得出 $\beta = 65^\circ$ 、 $\alpha = 97^\circ$ 。得出偏心圆弧 DB 的参数方程为

$$\begin{aligned} Z^2 + (Y + 8.6)^2 &= 12.25 \\ (0 \leq Z \leq 3.5; 5.1 \leq Y \leq 9) \end{aligned} \quad (7)$$

3 试验设计

3.1 试验条件

试验在长度为 30 m 的试验台上进行,试验台上安装有传送带和调速电动机。试验设备有手持式数字转速表、米尺和 5 个不同的排种器等。每个排种器的清种环、双凹曲面取种块都分别具有不同的倾斜角度 β 、偏心圆弧 DB 的圆心角 α ,且每个排种器的参数 β 、 α 均满足公式(6)。

3.2 试验因素与试验指标选取

种子随双凹曲面取种块转动时,排种器转速决定了种子离心力的大小。种子不受双凹曲面取种块夹持时,清种环的倾斜角和离心力的大小决定了种子在排种器轴向(Z 轴)上受力的大小,此力越大种子越容易掉回取种区。偏心圆弧 DB 的圆心角 α 越小,在双凹曲面取种块张角变大时,多余的种子在排种器轴向(Z 轴)上受到双凹曲面取种块阻挡的概率越小,越容易掉回取种区。所以排种器转速、清种环倾斜角 β 、偏心圆弧 DB 的圆心角 α 均对排种器的单粒率具有影响。同时清种环倾斜角 β 、偏心圆弧 DB 的圆心角 α 需满足公式(6),即每一个 β 水平都有一确定的 α 水平与其相对应,此两因素应视为一个因素。因此选取排种器转速与清种环倾斜角 β 为试验因素。因为精密播种机最重要的性能指标为单粒率,所以排种器单粒率作为试验指标。

3.3 试验方法

试验时,用调速电动机同步带动排种器排种轴转动,由手持式数字转速表测定调速电动机的转速是否调为试验方案所选转速 N_1 。确定试验转速后,在排种器上安装试验方案所选的排种盒。向排种器充种,由传送带持续 1 min 接住排出的种子,传送带上铺上一层沙土,以保证种子掉落到传送带后不发生弹跳。经测量发现绝大多数种子之间间距相等,测量此距离 d 。重新开动排种器,每次 2 min,测量排出种子两两之间的距离 L ,若 L 大于 $1.5d$,则记漏播一次,此种现象若发生 n_1 次,则漏播次数为 n_1 。若 L 小于 $0.5d$ 则存在重播一次,此种现象若发生 n_2 次,则重播次数为 n_2 。总播种次数单粒率为

$$\gamma_1 = \frac{6N_1 - n_1 - n_2}{6N_1} \times 100\% \quad (8)$$

如此重复 5 次取平均值。单因素试验时试验因素依次取 5 个水平,另一因素固定为零水平,每个水平都重复上述步骤,单因素试验按照表 1 和表 2 选取水平。旋转试验时依照表 3 和表 4 选取转速和清种环倾斜角水平,每个水平组合都重复以上步骤。

表 1 排种器转速单因素试验方案与结果

Tab. 1 Design of the single-factor experiment and test

水平	重复试验结果					平均值
	1	2	3	4	5	
128	89.3	88.0	90.2	89.6	89.4	89.3
120	92.3	91.7	92.5	92.2	91.0	92.0
100	96.0	95.3	95.5	95.8	96.2	95.8
80	96.5	96.8	95.0	97.1	97.2	96.5
72	98.0	98.6	97.2	98.5	98.6	98.2

表 2 倾斜角单因素试验方案与结果

Tab. 2 Design of single-factor experiment and

test results for tilt angles ($^\circ$)

水平	重复试验结果					平均值
	1	2	3	4	5	
72	92.1	92.5	93.0	91.8	91.6	92.2
70	94.3	94.1	93.9	94.2	93.7	94.0
65	96.0	95.8	95.7	96.3	96.2	96.0
60	94.5	93.9	94.0	94.1	94.2	94.1
58	92.6	93.2	92.5	93.0	92.7	92.8

3.4 单因素试验设计与试验结果分析

排种器转速依次选取 5 个水平,同时选取倾斜角为 65° 的排种器,进行排种器转速的单因素试验,试验结果如表 1 所示。对试验结果进行 F 检验, $F > F_{1-0.05}(4, 16)$, 所以排种器转速对单粒率影响显

著。由排种器转速关于单粒率的拟合曲线可知,单粒率随着排种器转速的提高而降低,且下降趋势逐步增强,如图5所示。

表3 试验因素与水平编码

Tab.3 Experimental factors and levels

编码	试验因素	
	排种器转速/(r·min ⁻¹)	清种环倾斜角/(°)
1.414	78	72
1	70	70
0	50	65
-1	30	60
-1.414	21	58

表4 试验方案及试验结果

Tab.4 Experimental scheme and result

试验编号	因素		指标 y ₁ /%
	x ₁	x ₂	
1	1	1	91.0
2	1	-1	91.6
3	-1	-1	94.3
4	-1	1	93.6
5	1.414	0	89.3
6	-1.414	0	98.2
7	0	1.414	92.2
8	0	-1.414	92.8
9	0	0	96.9
10	0	0	96.3
11	0	0	95.6
12	0	0	97.2
13	0	0	94.9

注: x₁ 为转速编码值, x₂ 为清种环倾斜角编码值, y₁ 为单粒率。

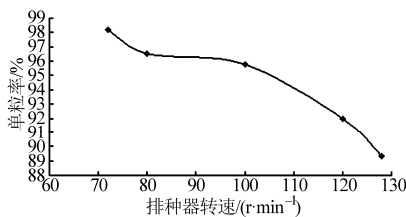


图5 排种器转速对单粒率的影响

Fig.5 Seedmeter rate of speed on a single grain of regression curves

排种器转速固定为 100 r/min, 依次选取 5 个不同清种环角的排种器, 进行倾斜角的单因素试验, 试验结果如表 2 所示。对试验结果进行 F 检验, $F > F_{1-0.05}(4, 16)$, 所以倾斜角对单粒率影响显著。由倾斜角关于单粒率的拟合曲线可知, 单粒率随着倾斜角的提高而先上升后降低, 如图 6 所示。

3.5 旋转组合试验设计与结果分析

试验采用二因素五水平二次旋转组合设计(表 3), 利用 Design-Expert 软件对试验数据进行回

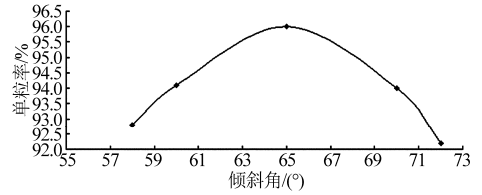


图6 倾斜角对单粒率的影响

Fig.6 Tilt angle with respect to the single particle ratio regression curves

归分析, 得出试验因素关于试验指标的数学模型。试验因素为排种器转速、清种环倾斜角, 试验指标为单粒率。根据表 4 的试验结果通过 Design-Expert 软件得出因素方差分析(表 5), 得出 x_2 、 x_1x_2 项系数不显著, 因而去掉 x_2 、 x_1x_2 项重新建模, 得出方差分析(表 6)。

运用 Design-Expert 软件得到新的响应曲面图, 如图 7 所示, 且回归方程

$$y_1 = 96.10 - 2.24x_1 - 1.30x_1^2 - 1.92x_2^2 \quad (9)$$

各系数显著。

对回归方程(9)求 x_2 的极值, 得出 x_2 最优值为 0, 即清种环最佳倾斜角为 65°。

在清种环最佳倾斜角为 65°的前提下, 由

$$96.10 - 2.24x_1 - 1.30x_1^2 \geq 95 \quad (10)$$

表5 回归方程方差分析

Tab.5 Regression equation analysis of variance

	均方和	F 值	P 值
x ₁	39.99	36.54	0.0005
x ₂	0.58	0.53	0.4914
x ₁ ²	7.67	10.74	0.0290
x ₂ ²	19.52	23.55	0.0019
x ₁ x ₂	2.500 × 10 ⁻³	2.284 × 10 ⁻³	0.9632

表6 重新建模的回归方程方差分析

Tab.6 Regression equation analysis of variance

	均方和	F 值	P 值
x ₁	39.99	36.54	0.0005
x ₁ ²	11.76	10.74	0.0135
x ₂ ²	25.78	23.55	0.0019

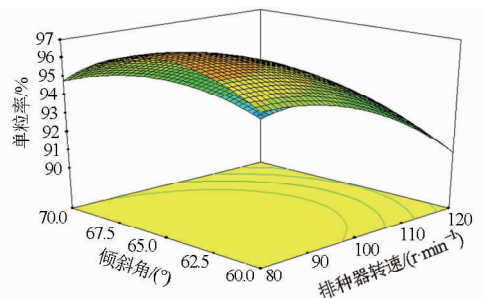


图7 响应曲面图

Fig.7 Response surface figure

$$x_1 = \frac{N_1 - 100}{1.414} \quad (11)$$

得出排种器转速小于 110 r/min 时,可保证单种率在 95% 以上。

3.6 验证试验

由所选用的最佳参数进行验证试验,试验结果如表 7 所示,证明所选作业参数符合作业要求。因此安装该排种器的六行播种机在保证播种单粒率

表 7 验证试验结果

Tab.7 Result of experiment

倾斜角/(°)	排种器转速/(r·min ⁻¹)	单粒率/%
65	70	98.6
65	80	97.2
65	90	96.3
65	100	95.9
65	110	95.2

95% 前提下的最高播种速度为 3 960 粒/min。

4 结论

(1) 双凹曲面取种块是排种器的关键部件,其各项参数取值合理对排种器作业性能具有重要影响。本文对双凹曲面取种块的结构参数进行了优化设计,具有良好效果。

(2) 排种器转速、清种环倾斜角对排种器单粒率具有显著效果,单粒率随着排种器转速的提高而降低,且下降趋势逐步增强;单粒率随着倾斜角的提高先上升后降低;两个因素不具有交互作用。

(3) 运用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析,得出试验因素关于试验指标的回归方程。得出清种环最佳倾斜角为 65°,在此前提下排种器转速小于 110 r/min 时,可保证单种率在 95% 以上。

参 考 文 献

- 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报,2014,45(1):46-52.
Cong Jinling, Yu Jiajia, Cao Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(1):46-52. (in Chinese)
- 赵武云,戴飞,杨杰,等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(11):91-97.
Zhao Wuyun, Dai Fei, Yang Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):91-97. (in Chinese)
- 俞亚新,林佳辉,赵匀,等. 基于单轴对称特性的稻种定向排序仿真与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(10):62-67,74.
Yu Yaxin, Lin Jiahui, Zhao Yun, et al. Simulation and test on rice seed orientation based on single axisymmetric properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(10):62-67,74. (in Chinese)
- 曹成茂,王安民,秦宽,等. 一器多行环槽推送式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):128-134.
Cao Chengmao, Wang Anmin, Qin Kuan, et al. Multi-line metering device with ring groove push movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):128-134. (in Chinese)
- 赵晓顺,于华丽,张晋国,等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(2):48-51,74.
Zhao Xiaoshun, Yu Huali, Zhang Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):48-51,74. (in Chinese)
- 朱惠斌,李洪文,何进,等. 稻茬地双轴驱动防堵式小麦免耕播种机[J]. 农业机械学报,2013,44(6):39-44.
Zhu Huibin, Li Hongwen, He Jin, et al. No-till wheat seeder with two-axle drive anti-blocking in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(6):39-44. (in Chinese)
- 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报,2013,44(8):78-83.
Zhao Jiale, Jia Honglei, Jiang Xinming, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(8):78-83. (in Chinese)
- 李复辉,杜瑞成,刁培松,等. 舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):33-38.
Li Fuhui, Du Ruicheng, Diao Peisong, et al. Design and experiment of helm-shaped no-tillage precision fertilization planter for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):33-38. (in Chinese)
- 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):48-51,95.
Liao Qingxi, Zhang Ning, Zhang Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):48-51,95. (in Chinese)
- 廖庆喜,杨波,李旭,等. 内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(4):51-54.
Liao Qingxi, Yang Bo, Li Xu, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(4):51-54. (in Chinese)
- 杨丽,史嵩,崔涛,等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):48-53.
Yang Li, Shi Song, Cui Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):48-53. (in Chinese)

- Li Chenghua, Gao Yuzhi, Zhang Benhua. Experiment on dispensing performance of air-sweeping inclined plate seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 90-94. (in Chinese)
- 14 Gaikwad B B, Sirohi N P S. Evaluation of seed distribution uniformity of a multi-flight auger as a grain drill metering device[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(4): 535-543.
- 15 廖庆喜, 李继波, 覃国良. 气力式油菜精量排种器试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 40-47.
Liao Qingxi, Li Jibo, Qin Guoliang. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 40-47. (in Chinese)
- 16 Anantacher M, Prasanna G, V Kumar T Guruswamy. Neural network prediction of performance parameters of an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(2): 87-98.
- 17 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 18 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 气吹式精密排种器工作压力试验研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 18-22.
Liu Jia, Cui Tao, Zhang Dongxing, et al. Experimental study on pressure of air-blowing precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 18-22. (in Chinese)
- 19 王延耀, 李建东, 王东伟, 等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 54-58.
Wang Yanyao, Li Jiandong, Wang Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 54-58. (in Chinese)
- 20 陶桂香, 衣淑娟, 汪春, 等. 水稻钵盘精量播种机充种性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 44-50.
Tao Guixiang, Yi Shujuan, Wang Chun, et al. Performance experiments of bowl dish precision seeder for rice in filling processing [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 44-50. (in Chinese)
- 21 杨明金, 邱兵, 杨玲, 等. 振动气吸式精密穴播机的排种性能[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 139-143.
Yang Mingjin, Qiu Bing, Yang Ling, et al. Metering performance of the vibrational vacuum precision tray seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 139-143. (in Chinese)
- 22 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8-15.
Chen Xuegeng, Zhong Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8-15. (in Chinese)

(上接第 65 页)

- 12 夏连明, 王相友, 耿端阳. 倾斜圆台型玉米精密排种器种子破损试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 67-71.
Xia Lianming, Wang Xiangyou, Geng Duanyang. Corn seed damaging experiment in truncated cone precision metering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 67-71. (in Chinese)
- 13 Jia Honglei, Ma Chenglin, Li Guangyu, et al. Combine drotilling-stubble-breaking-planting machine [J]. Soil & Tillage Research, 2007(96): 73-82.
- 14 Jia Honglei, Ma Chenglin, Tong Jin. Study on universal blade rotor for rototilling and stubble-breaking machine [J]. Soil & Tillage Research, 2007(94): 201-208.
- 15 Karayel D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1): 121-125.
- 16 Gaikwad B B, Sirohi N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322-329.
- 17 Yazgi A, Degirmencioglu A. 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.
- 18 廖庆喜, 高焕文, 臧英. 玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 109-113.
Liao Qingxi, Gao Huanwen, Zang Ying. Experimental study on the cell of the horizontal plate precision meter for cornseed [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 109-113. (in Chinese)
- 19 廖庆喜, 高焕文. 玉米水平圆盘精密排种器排种性能试验研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 99-103.
Liao Qingxi, Gao Huanwen. Experimental study on performance of horizontal disc precision meter for cornseed [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 99-103. (in Chinese)
- 20 于建群, 申燕芳, 牛序堂. 组合内窝孔精密排种器清种过程的离散元法仿真分析 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 105-109.
Yu Jianqun, Shen Yanfang, Niu Xutang, et al. DEM simulation and analysis of the clearing process in precision metering device with combination inner-cell [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 105-109. (in Chinese)