

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.012

基于振动排序的玉米种子胚面定向装置设计与试验

张东兴^{1,2} 于天成^{1,2} 杨 丽^{1,2} 崔 涛^{1,2} 和贤桃^{1,2} 张耀辉^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 玉米定向播种即种子尖端朝向一致和胚面朝向一致,可明显提高产量。为了实现玉米种子胚面定向,设计了一种基于振动排序的玉米种子胚面定向装置。设计了胚面定向装置螺旋轨道上的选向机构和定向机构,探明了玉米种子胚面定向原理,确定了选向机构和定向机构的尺寸参数和空间位置。采用试验方法对该装置的最佳工作参数进行了优化。以控制器输出电压、翻面机构1终点到侧壁的垂直距离和翻面机构1终点到轨道表面的垂直距离为试验因素,以胚面定向成功率为评价指标,进行了三因素三水平的Box-Behnken旋转正交试验。试验结果表明:控制器输出电压101 V、翻面机构1终点到侧壁的垂直距离4.38 mm、翻面机构1终点到轨道表面的垂直距离7.96 mm为最优参数组合。在最优参数组合条件下,胚面定向成功率为94.82%,且排料速度可达85个/min。为验证玉米种子胚面定向装置对不同品种玉米的适应性,进行了品种适应性试验,试验结果表明所选的玉米品种的胚面定向成功率均大于91%,满足设计要求。

关键词: 玉米定向播种; 胚面定向装置; 振动排序

中图分类号: S223.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0122-10 OSID: 

Design and Experiment of Embryo Side Orientation Device of Maize Seed Based on Vibration Sorting

ZHANG Dongxing^{1,2} YU Tiancheng^{1,2} YANG Li^{1,2} CUI Tao^{1,2} HE Xiantao^{1,2} ZHANG Yaohui^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Directional sowing of maize, i. e. the tip of seeds in the soil should be in the same direction and so does the embryo side, can improve crop yield. In order to realize the embryo side orientation of maize seed, an embryo side orientation device of maize seed based on vibration sorting was developed. The selector and orientor set on the spiral track of the device were innovated, the principle of embryo side orientation was proved, and the dimension parameters and space position of the selector and the orientor were determined. The optimum working parameters of the device were optimized by the test method. The experiment was employed through the method of Box-Behnken orthogonal rotating center combination of three factors and three levels. In test, dent corn seed was selected as experimental material. Combining with extensive pre-experiment and theoretical analysis, the output voltage of the controller, the vertical distance between the end point of the first orientor for turning over and the side wall and the vertical distance from the end point of the first orientor for turning over to the track surface were taken as main influencing factors, and the success rate of the embryo side orientation was taken as response index. The optimal combination of parameters was as follows: the output voltage of the controller was 101 V, the vertical distance between the end point of the first orientor for turning over and the side wall was 4.38 mm, and the vertical distance between the end point of the first orientor for turning over and the track surface was 7.96 mm. Under the optimal combination of parameters, the success rate of the embryo side orientation was 94.85%. The verification test was repeated three times. And in the verification test, the success rate of the embryo side orientation was 94.82% with the discharge rate of 85 per minute. The actual test results were in agreement with the optimization results. In order to verify the adaptability of

收稿日期: 2021-08-13 修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071915)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-02)

作者简介: 张东兴(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备和玉米生产全程机械化研究,E-mail: zhangdx@cau.edu.cn

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail: yangli@cau.edu.cn

embryo side orientation device to different varieties of maize, the variety adaptability test was carried out, and the test results showed that the success rates of the embryo side orientation of two varieties were greater than 91%, which indicated that the device can meet the requirements of design. The research laid a foundation for the development of device for mechanized directional sowing of maize, and provided a reference for the subsequent production of seed tape of directional sowing of maize.

Key words: directional sowing of maize; embryo side orientation device; vibration sorting

0 引言

玉米定向播种是将种子按照统一的姿态入土的一种播种方式,该播种方式能够使叶片展开方向一致,改善作物的通风和光照情况,从而可通过提高种植密度来提高玉米单位面积产量^[1-3]。实现玉米定向播种的前提是统一种子的姿态,使种子的尖端朝向一致和胚面朝向一致^[4-6]。

对于使胚面朝向一致,即胚面定向,现有的研究主要是基于机器视觉技术和传感器技术^[7-13]。文献[8]研制了一种基于机器视觉的玉米种粒定向摆放装置,该装置胚面及其对立面检测准确率为 98%,但是该装置实现种子输出还需经过凹槽定位、旋转臂定位吸取及籽粒摆放等过程,该装置最终呈现的胚面定向效果仅为 89.35%。并且一旦出现定位吸取失败,将导致种子粘连或拥堵在定向定位区域。文献[9]利用激光测距传感器对玉米种子进行胚面识别,准确率为 96.4%,但要求进行识别的种子尖端朝前,且没有使两种胚面朝向的种子统一朝向。因此,有必要研制一种连续快速运行、对玉米种子尖端朝向没有严格要求、能够统一胚面朝向、胚面定向效果好的装置。

本研究以马齿形玉米种子为工作对象,在电磁振动的基础上研制一种玉米种子胚面定向振动排序装置,该装置首先对成堆玉米种子进行分散、排序使之变为一列种子长轴沿轨道切线方向的种子,之后对种子进行胚面定向,使其胚面统一朝上,然后排序输出。通过理论分析和试验研究,获取最优工作参数,为后续玉米定向播种种子带制备提供技术支撑^[14-16]。

1 振动排序装置设计

由于马齿形玉米种子籽粒扁平呈长方形,在定向过程中能够较好地保持稳定状态,故本研究选用马齿形玉米种子为研究对象^[9]。本研究提出的玉米种子胚面定向振动排序装置所依据的是马齿形玉米种子的表面特征^[9]。种子外形如图 1 所示,表面特征表现为:玉米种子胚面上的胚部向内凹陷一定深度形成胚沟,胚沟从尖端开始向顶端延伸,延伸方向基本与种子长轴方向一致;而胚面的对立面较为

平整。以马齿形种子京科青贮 516 品种为例,利用游标卡尺对选取的 200 粒该品种玉米种子长度、宽度、厚度、胚沟长度、胚沟宽度、胚沟深度进行测量,结果为种子的长度 L 、宽度 W 、厚度 T 范围分别为 11.15 ~ 13.72 mm、7.00 ~ 9.58 mm、3.51 ~ 5.19 mm,胚沟的长度 l 、宽度 w 、深度 d 范围分别为 7.54 ~ 10.57 mm、3.11 ~ 4.97 mm、0.52 ~ 1.08 mm。计算可知胚沟长度占种子长度的比例在 0.76 左右,胚沟宽度占种子宽度的比例在 0.50 左右。

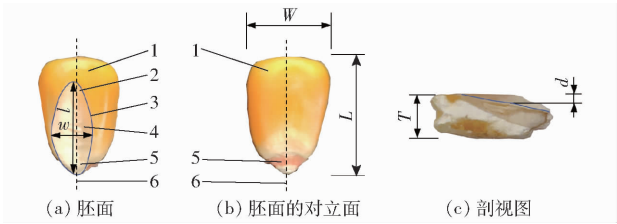


图 1 马齿形玉米种子外形示意图

Fig. 1 Shape of dent corn seed

1. 顶端 2. 胚沟末端 3. 胚部 4. 胚沟 5. 尖端 6. 种子长轴方向

1.1 装置结构

振动排序装置主要由料斗、料斗支架、板弹簧、电磁铁、底座及减震垫组成^[17-18],其结构如图 2 所示,实物如图 3 所示。料斗是振动排序装置重要结构^[19-20],其结构如图 4 所示。料斗为顺时针螺旋单轨道输出,轨道在不同位置有着不同的功能^[21],为了保证各关键轨道的作用效果,准确适时实现胚面定向过程,需对工作区域进行划分^[22-23]。如图 5 所示,其中 β 表示螺旋上升轨道范围, γ 表示单层整列轨道范围, δ 表示分散缓冲轨道范围, ε 表示胚面定向轨道范围, ζ 表示预留轨道范围, η 表示出料轨道范围。

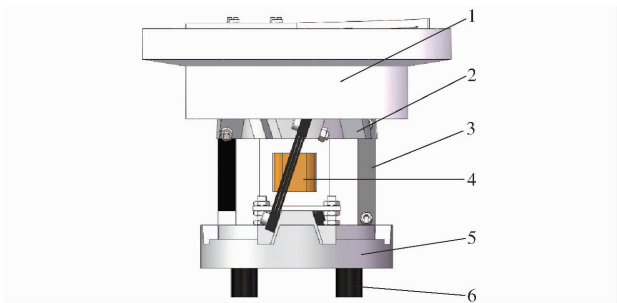


图 2 振动排序装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of vibration sorting device

1. 料斗 2. 料斗支架 3. 板弹簧 4. 电磁铁 5. 底座 6. 减震垫

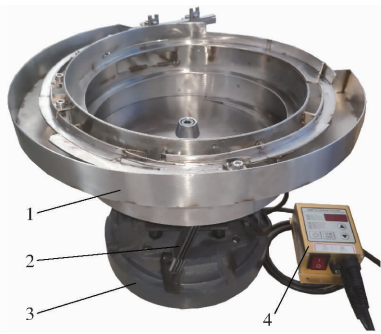


图 3 振动排序装置实物图

Fig. 3 Photo of vibration sorting device

1. 料斗 2. 板弹簧 3. 底座 4. 控制器

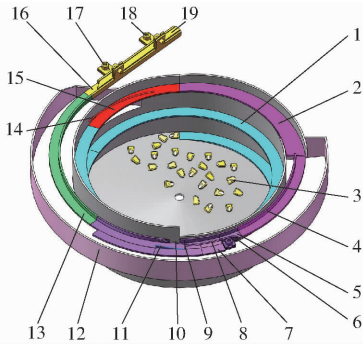


图 4 料斗结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of hopper

1. 螺旋上升轨道 2. 分散缓冲轨道 3. 玉米种子 4. 侧壁
5. 胚面定向轨道 6. 尖端朝向调节机构 7. 分流轨道 8. 引流机构 9. 翻面机构 1 10. 缺口 11. 翻面机构 2 12. 回种盒
13. 预留轨道 14. 限高机构 15. 单层整列轨道 16. 出料轨道
17. M5 螺栓 18. 宽度调节护种板 19. 高度调节护种板

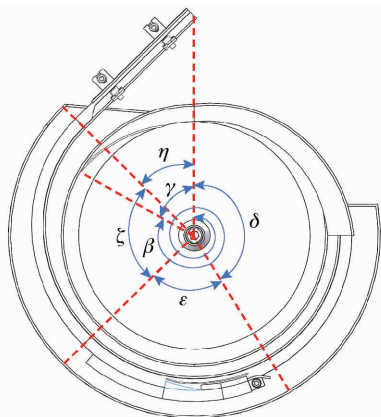


图 5 轨道划分示意图

Fig. 5 Schematic of track division

螺旋上升轨道设计:螺旋上升轨道位于料斗壁内侧,最大圆周半径为 125 mm,螺距为 40 mm,宽 15 mm,向料斗壁往上倾斜 3° , β 设置为 660° 。

单层整列轨道设计:单层整列轨道位于料斗壁内侧,结构参数与螺旋轨道相同,起始端设有限高机构^[18]。限高机构与轨道表面的空间高度比玉米厚度 T 稍大,刚好能够使种子以平躺的姿态通过。限高机构不是与该处轨道的切线方向(即种子的运动

方向)垂直的,而是倾斜的,越靠料斗中心的一侧,限高机构越向种子运动方向前方倾斜,这样就能够使堆叠、竖立的以及侧立的玉米种子,边向前运动边向料斗中心一侧移动,直至最后从轨道落下掉入料斗底部,确保从螺旋上升轨道末端输出的玉米种子为单层,且呈平躺姿态。 γ 设置为 60° 。

分散缓冲轨道设计:分散缓冲轨道横跨料斗壁内外侧,最大圆周半径由 125 mm 过渡到 150 mm,螺距为 -20 mm(负号表示螺旋向下)。分散缓冲轨道将杂乱的玉米种子变成单列的玉米种子流。 δ 设置为 150° ,其中后 60° 范围内的轨道位于料斗壁外侧,向料斗壁往上倾斜 3° ,最大圆周半径为 150 mm。

胚面定向轨道设计:胚面定向轨道位于料斗壁外侧,最大圆周半径为 150 mm,螺距为 -20 mm。尖端朝向调节机构在料斗半径方向上可调节,以适应尺寸存在较大差异的不同品种玉米种子。 ε 设置为 75° 。

预留轨道设计:预留轨道位于料斗壁外侧,最大短轴长度为 150 mm,最大长轴长度为 160 mm,螺距为 0 mm。预留一段轨道,目的是后期实现尖端定向的功能,使该振动排序装置集成胚面定向与尖端定向的功能。 ζ 设置为 90° 。

出料轨道设计:出料轨道为直线轨道,承接预留轨道,长度为 160 mm。其宽度和高度可通过宽度护种板和高度护种板调节,以适应尺寸存在差异的不同品种的玉米种子。宽度护种板和高度护种板通过 M5 螺栓安装固定在出料轨道上,其中宽度护种板宽度为 4 mm,小于种子的最大厚度,高度护种板宽度为 7 mm,小于玉米种子的最大宽度,避免了两个护种板在轨道上的安装干涉,同时还能发挥护种作用,使输出的玉米种子的长轴方向与运动方向一致。 η 设置为 45° 。

1.2 功能原理

1.2.1 振动排序装置工作原理

振动排序装置借助电磁力产生微小的振动,依靠高频惯性作用力、摩擦力、重力的综合作用使物料沿料斗内的螺旋轨道不断向上爬行,当经过相关的选向机构时,符合要求姿态方向的物料继续前行,不符合的物料则落入料斗底部重新向上爬行;当经过相关的定向机构时,不符合姿态要求的物料可以进行姿态纠正,最后物料在出料口按规定的姿态方向连续输出^[18,24]。

1.2.2 胚面定向原理

胚面定向轨道是将胚面朝下的种子进行翻面的关键部件,轨道上的选向机构和定向机构的设计与布置,对种子的运动起决定作用,对胚面定向效果有

重要意义。因此,需对工作区域进行划分^[22-23]。对种子运动轨迹进行绘制,如图 6 所示,①和②表示理想状态下胚面朝上的种子运动轨迹,③表示理想状态下胚面朝下的种子运动轨迹,④表示部分宽度偏小的种子运动轨迹。

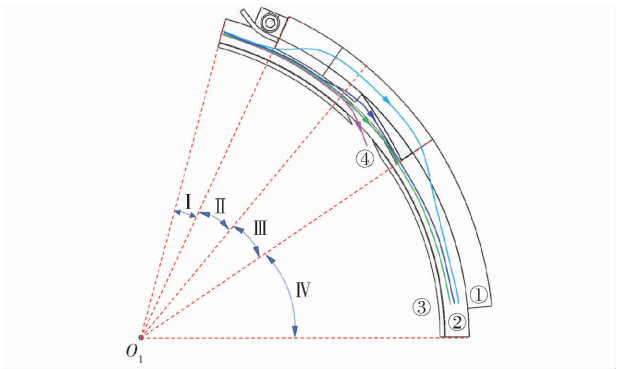


图 6 胚面定向轨道划分示意图

Fig.6 Schematic of division of embryo side orientation track

I. 尖端朝向调整区 II. 引流分流区 III. 选向定向区 IV. 合流区

1.2.2.1 尖端朝向调整区设计

从分散缓冲轨道输出的玉米种子大多数呈尖端朝前或朝后的平躺姿态,少数呈尖端垂直侧壁的平躺姿态。胚面朝下的、尖端垂直侧壁的玉米种子如果直接进入引流分流区,由于引流机构为焊接在轨道表面、圆周分布的不锈钢丝,胚沟将与引流机构呈十字交叉状态,导致种子无法“架”着引流机构前行,将按照轨迹①前行,造成胚面定向失败。因此,在进行胚面定向之前需对种子姿态进行调整,使所有的玉米种子呈尖端朝前或朝后的平躺姿态。该区域长度取两个玉米种子长度,对应 I 设置为 10°。如图 7 所示,该区域的关键部件是尖端朝向调节机构,由长度为 20 mm、宽度为 6 mm 和厚度为 2 mm 的折弯不锈钢块与 U 型方片焊接而成,经 M5 螺栓固定在料斗上,其折弯角 θ 由玉米种子的尺寸参数决定,为

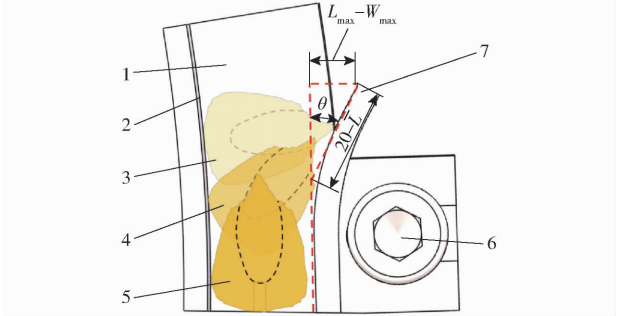


图 7 种子尖端朝向的调整过程示意图

Fig.7 Adjustment process of seed tip direction

1. 胚面定向轨道 2. 侧壁 3. 处于初始状态的种子 4. 处于调整状态的种子 5. 完成调整的种子 6. M5 螺栓 7. 尖端朝向调节机构

$$\theta = \arcsin((L_{\max} - W_{\max}) / (20 - \bar{L})) \quad (1)$$

式中 $L_{\max}$ ——玉米种子最大长度,mm
 $W_{\max}$ ——玉米种子最大宽度,mm
 $\bar{L}$ ——玉米种子平均长度,mm

代入数据计算得 θ 为 32.37°。

1.2.2.2 引流分流区设计

在各种力的综合作用下,胚面朝下的种子“架”在引流机构上,完成引流,按照轨迹③前行,胚面朝上的种子无法在引流机构上保持平衡,从而远离振动盘中心滑落至引流机构外侧,按照轨迹①或②前行,完成分流。为保证引流分流区的最佳工作效果,需探明种子在引流机构上的受力特性。因为只研究种子在半径方向的运动变化,故只考虑在半径方向上的受力情况。如图 8 所示,当装置未工作时,对于胚面朝上或朝下的玉米种子,除了自身重力 G 、 G' 外,还受到引流机构对其的支持力 F_{N1} 、 F'_{N1} ,侧壁对其的支持力 F_{N2} 、 F'_{N2} ,侧壁对其的支持力 F'_{N3} ,其中 G 、 F_{N1} 、 F_{N2} 为种子在轨道上的初始受力, G' 、 F'_{N1} 、 F'_{N2} 、 F'_{N3} 为种子的最终受力。引流机构的位置在半径方向上存在一个分界线(与侧壁的距离为 μ_0),使得左右两侧的种子重力相等,此时玉米种子保持平衡。而当引流机构位于分界线左侧(与侧壁的距离为 μ_1),钢丝右侧的种子部分重力大于左侧重力,产生一个顺时针的倾覆力矩 M_1 ,种子将偏向钢丝右侧;当引流机构位于分界线右侧(与侧壁的距离为 μ_2),钢丝右侧的种子部分重力小于左侧重力,产生一个逆时针的倾覆力矩 M_2 ,种子将偏向钢丝左侧。

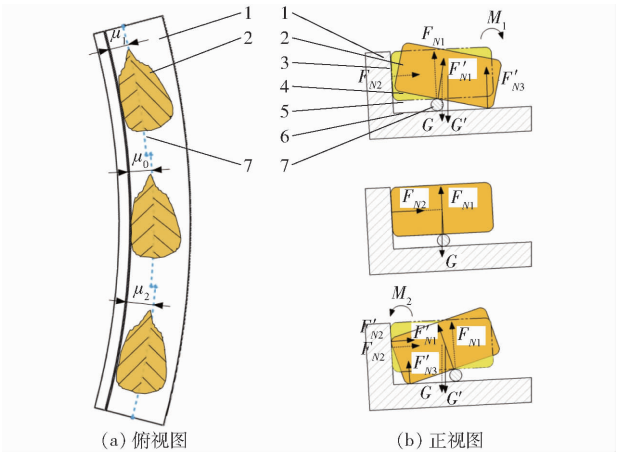


图 8 装置未工作时钢丝分布对种子受力影响示意图

Fig.8 Schematics of influence of wire distribution on stress of seeds when device was not working

1. 轨道 2. 玉米种子 3. 侧壁 4. 处于最终平衡状态的种子 5. 处于初始状态的种子 6. 轨道表面 7. 引流机构

如图 9a 所示,当装置工作时,对于胚面朝上的玉米种子,当引流机构与分界线重合时,种子受到重

力 G 、引流机构对其的支持力 F_{N11} 、侧壁对其的支持力 F_{N12} 以及向心力 F_{n1} ，并将保持该受力状态，此时种子将顺着钢丝继续做圆周运动前行。如图 9b 所示，当引流机构位于分界线左侧时，种子将先往右倾偏向轨道外侧，然后种子受到重力 G 、引流机构对其的支持力 F_{N11} 与摩擦力 f_{11} 、轨道表面对其的支持力 F_{N13} 与摩擦力 f_{13} ，以及离心力 F_{cl} ，此时种子将逐渐远离振动盘中心做离心运动，滑落至分流轨道，而后在分流轨道上做圆周运动。如图 9c 所示，当引流机构位于分界线右侧时，种子将先往左倾偏向内侧，然后种子受到重力 G 、引流机构对其的支持力 F_{N11} 、侧壁对其的支持力 F_{N12} 、轨道表面对其的支持力 F_{N13} 以及向心力 F_{n1} ，并将保持该受力状态，此时种子将顺着钢丝继续做圆周运动前行。

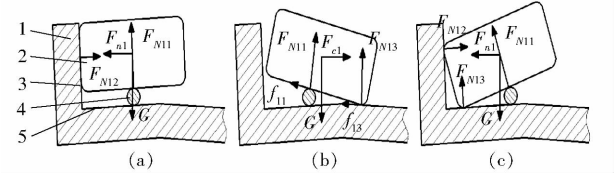


图 9 装置工作时钢丝分布对胚面朝上的种子受力影响示意图

Fig. 9 Schematics of influence of wire distribution on stress of seeds with embryo up during operation of device

1. 胚面定向轨道 2. 胚面朝上的玉米种子 3. 侧壁 4. 引流机构 5. 轨道表面

对于胚面朝下的玉米种子，不同于胚面朝上的种子，由于胚面与钢丝接触，种子在径向上不同截面表现出不同的受力状态。图 10a ~ 10c 是胚沟中部某一径向截面的受力情况，图 10d ~ 10f 是胚沟末端径向截面的受力情况。当引流机构与分界线重合时，种子在胚沟中部某一径向截面受到重力 G'_0 、引流机构对其的支持力 F'_{N01} 以及向心力 F'_{n0} ，在胚沟末端径向截面受到重力 G''_0 、引流机构对其的支持力 F''_{N01} 、侧壁对其的支持力 F''_{N02} 以及向心力 F''_{n0} ，并将保持该受力状态，如图 10a、10d 所示；当引流机构位于分界线左侧时，种子将先偏外侧，然后种子在胚沟中部某一径向截面受到重力 G'_0 、引流机构对其的支持力 F'_{N01} 、轨道表面对其的支持力 F'_{N03} 以及向心力 F'_{n0} ，在胚沟末端径向截面受到重力 G''_0 、引流机构对其的支持力 F''_{N01} ，并将保持该受力状态，如图 10b、10e 所示；当引流机构位于分界线右侧时，种子将先偏向内侧，然后种子在胚沟中部某一径向截面受到重力 G'_0 、引流机构对其的支持力 F'_{N01} 、轨道表面对其的支持力 F'_{N03} 以及向心力 F'_{n0} ，在胚沟末端径向截面受到重力 G''_0 、引流机构对其的支持力 F''_{N01} 、侧壁对其的支持力 F''_{N02} 以及向心力 F''_{n0} ，并将保持该受力状态，如图 10c、10f 所示。3 种状态下种子均顺着引

流机构继续做圆周运动前行。

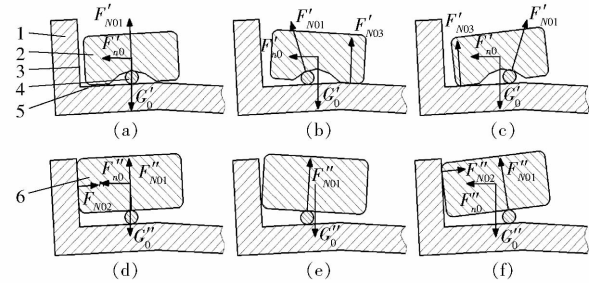


图 10 装置工作时钢丝分布对胚面朝下的种子受力影响示意图

Fig. 10 Schematics of influence of wire distribution on stress of seeds with embryo down during operation of device

1. 胚面定向轨道 2. 胚面朝下的玉米种子在胚沟中部的某一径向截面 3. 侧壁 4. 引流机构 5. 轨道表面 6. 胚面朝下的玉米种子在胚沟末端的径向截面

因此，针对玉米种子宽度方向存在尺寸差异，引流机构与侧壁的距离 μ 对种子的运动起着决定性作用，考虑到重心偏移， μ 应小于种子宽度的一半，且胚沟应位于引流机构的上方， μ 应大于胚沟边缘至种子边缘的距离，故 μ 应大于种子宽度的 1/4 并且小于种子宽度 1/2。但由于胚沟在宽度截面的最大深度位于种子中间，沿宽度方向逐渐减小，所以为了引流机构能够起到引流的作用，引流机构应尽量靠近胚沟宽度中央，故选取 μ 为 3.75 mm。同时选取引流机构直径为 1 mm，其半径小于胚沟的最小深度，能起到良好的引流作用。

此外，引流机构的长度过小，不能使不同胚面朝向的种子实现较好的分流引流效果；长度过大，由于种子胚沟尺寸的差异以及加工误差，加大了胚面朝下的玉米种子从钢丝上脱落的可能性。因此，引流机构的长度 s_{ml} 取 3 个种子长度，对应的圆心角 κ 取整为 16° ，如图 11 所示。同时距离引流机构右侧 2.25 mm 的 $\widehat{RS}$ 处向下折弯，折弯角 λ 设置为 6° ， $\widehat{RS}$ 长度 s_{RS} 取两个种子长度，对应圆心角 ξ 取整为 10° 。曲面 $SQAZ$ 为折弯轨道 $RPQS$ 与原轨道的过渡轨道， $\widehat{SZ}$ 长度 s_{SZ} 取 1.5 个种子长度，对应圆心角 ρ 为

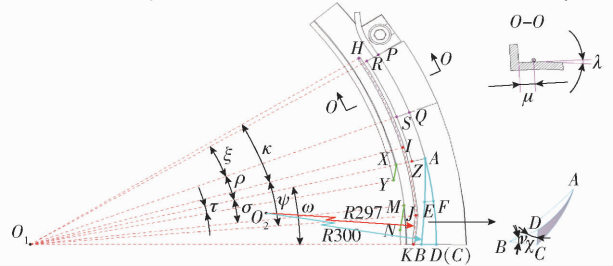


图 11 引流分流区和选向定向区参数确定示意图

Fig. 11 Schematic of parameter determination of guidance and diversion area and selection and orientation area

7.5°,故引流分流区与选向定向区重叠了 2.5°。为了更好地实现引流分流功能,引流分流区与尖端朝向调整区重叠 1°,即引流机构的 1/16 位于尖端朝向调整区内,对应区域Ⅱ设置为 15°。

1.2.2.3 选向定向区设计

考虑到结构的紧凑性,该区域轨道长度同样取 3 个种子长度,即将区域Ⅲ设置为 16°。胚面朝下的玉米种子顺着引流机构进入该区域,此时钢丝脱离轨道表面,与轨道表面呈某一夹角,由于重心偏移,少数尺寸偏小的种子脱离翻面机构 1 以轨迹④从缺口处落入回种盒,最终返回料斗内;大多数种子以轨迹③顺着该翻面机构 1 并配合翻面机构 2 完成胚面翻转。

缺口对少数尺寸偏小的种子具有重要的选向作

用,若是没有缺口,此部分种子将贴着侧壁前行,不仅自身因为未能翻面影响最终的选向定向效果,还会因为占据空间影响翻面机构 1 的定向功能。如图 11 所示,取 $\widehat{XM}$ 所对应的圆心角 σ 为 7°,此时 $\widehat{XM}$ 长度 s_{XM} 大于种子的最大长度,取角 τ 为 2.5°,此时线段 XY 与轨道切线方向呈一定夹角,引导种子落入回种盒,同时设置线段 MN 与线段 XY 平行。

翻面机构 1 和翻面机构 2 对种子翻转具有重要作用,因此需探明种子在选向定向区的受力特性。如图 12 所示,种子在不同时刻表现出不同的受力和运动状态,除自身重力 G 外,还受到翻面机构 1 对其的支持力 F_{N1} 与摩擦力 f_{t1} ,轨道表面对其的支持力 F_{N2} 与摩擦力 f_{t2} ,翻面机构 2 对其的支持力 F_{N3} 与摩擦力 f_{t3} 以及向心力 F_{ni} 。

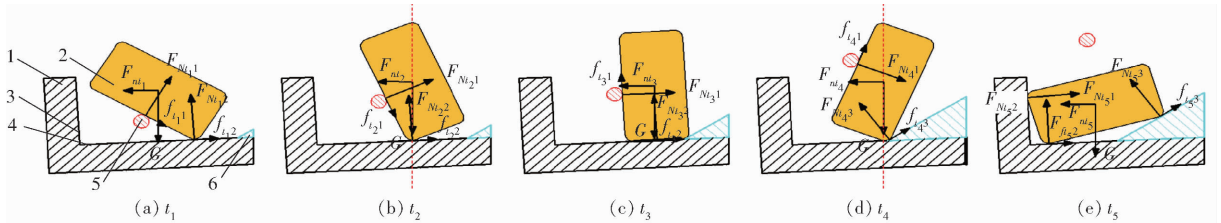


图 12 种子在选向定向轨道的受力和运动状态

Fig. 12 Force and motion state of seed in selection and orientation track

1. 选向定向轨道 2. 玉米种子 3. 侧壁 4. 轨道表面 5. 翻面机构 1 6. 翻面机构 2

在 t_1 时刻,种子与翻面机构 1 初接触,如图 12a 所示,种子顺着翻面机构 1 前行,同时受到翻面机构 1 和轨道表面的支持力,由于翻面机构 1 逐渐变高,种子逐渐绕轨道表面与种子的接触点顺时针旋转。在 t_2 时刻,种子重心作用线经过轨道表面与种子的接触点,如图 12b 所示,当种子继续前行时,种子由于重心偏移实现侧立;若翻面机构 1 位于现在位置的左下方区域,将不会发生种子侧立姿态,在下一时刻翻面机构 2 与种子侧面接触,种子将在翻面机构 1 和翻面机构 2 的共同作用下,脱离轨道表面,在翻面机构 1 和翻面机构 2 上运动,无法实现胚面翻转。在 t_3 时刻,种子与翻面机构 2 初接触,如图 12c 所示,由于翻面机构 2 在径向方向上尺寸不断增大,导致种子绕翻面机构 1 做顺时针旋转运动。在 t_4 时刻,种子重心作用线经过轨道表面与翻面机构 2 的交点,如图 12d 所示,当种子继续前行时,若翻面机构 2 在径向上尺寸继续增大,种子由于重心偏移发生倾覆实现翻面(t_5 时刻),如图 12e 所示;若翻面机构 2 在径向上尺寸不再增大,种子无法发生倾覆,最终以侧立姿态离开选向定向区。

综上所述,翻面机构 1 的空间位置以及翻面机构 2 的尺寸对种子的受力情况以及运动起着重要作用。

相对于翻面机构 2 的尺寸变化,翻面机构 1 的尺寸变化更加方便调整,因此将翻面机构 2 的尺寸参数和空间位置确定下来,只通过改变翻面机构 1 的空间位置来探寻最佳的选向定向效果。

如图 11 所示,翻面机构 2 为一不规则三菱锥 $D-ABC$,由螺旋面 ABC 、圆柱面 ACD 、平面 BCD 、曲面 ABD 组成,轨道宽 11 mm,设置点 B 为轨道宽度中点,则 $l_{BC}=5.5$ mm。角 v 应大于种子与不锈钢的摩擦角与轨道倾角的差值,防止种子侧面在曲面 ABD 上运动,而后不能与翻面机构 1 配合实现翻转; v 也不应该过大,防止翻面机构 2 对种子前进有阻碍作用,影响后面胚面朝下的种子脱离引流机构运动,而后无法实现翻面定向;最终选取 $v=30^\circ$ 。由三角形正弦定理可得,线段 CD 长度 $l_{CD}=l_{BC}\sin v/\sin\chi=3.28$ mm。圆柱螺旋线 AC 与轨道外边缘重合,故螺旋线参数直径 $D_1=300$ mm,导程 $H_1=-20$ mm,旋向为顺时针;圆柱螺旋线 AD 与轨道外边缘重合,又因 $l_{CD}=3.28$ mm,故螺旋线参数直径 $D_2=300$ mm,导程 $H_2=l_{CD}/(\psi/360^\circ)-|H_1|=67.47$ mm,旋向为顺时针。圆柱螺旋线 AB 的两个端点 A 、 B 空间坐标,导程 H_3 、旋向均已经确认,经计算可得,当其直径大于 291.05 mm 时,线段 EF 长度(点 E 、 F 为角 ω 的角平分线与 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{AD}$ 交点)大于线

段 BC 长度的 $1/2$, 直径越大, $\widehat{AB}$ 就越接近线段 AB , 故设置直径 D_3 为 600 mm 。

如图 11 所示, 翻面机构 1 的起点承接引流机构的终点, 前 $3/4$ 段为圆柱螺旋线 IJ , 初步设置其直径 D_4 与引流机构直径相同, 为 285.5 mm , 导程 $H_4 = 140\text{ mm}$, 旋向为顺时针; 后 $1/4$ 段为圆柱螺旋线 JK , 导程 H_5 及旋向与圆柱螺旋线 IJ 一致, 圆心坐标与圆柱螺旋线 AB 一致, 故直径 D_5 为 594 mm 。

由于翻面机构 1 只有一端与轨道接触, 可以通过调整翻面机构 1 另一端的位置坐标来调整翻面机构 1 与翻面机构 2 的相对位置, 从而实现种子的定向效果。故最终翻转效果取决于翻面机构 1 终点的空间位置, 即终点到侧壁的垂直距离 d_1 和终点到轨道表面的垂直距离 d_2 。

1.2.2.4 合流区设计

此区域的目的是将轨迹①的种子进入原半径轨道与轨迹②或③的种子流聚集, 便于后续处理。通过试验发现, 区域Ⅳ取 34° , 不会造成胚面定向完成的种子流入回种盒。

2 试验

2.1 试验地点及仪器设备

振动排序装置工作参数优化试验地点在中国农业大学工学院实验室, 仪器设备包括已加工完成的振动排序装置样机 1 台、玉米种子若干、数字稳压振动送料控制器 1 个(南京创优科技有限责任公司)、尖嘴钳 1 把、六角扳手 1 个、游标卡尺 1 把、秒表 1 个。

2.2 工作性能评价指标

试验对象为京科青贮 516 玉米种子, 籽粒黄色, 马齿形, 千粒质量 389 g , 含水率不高于 14.0% 。试验时, 将一定数量的种子倒入料斗内, 设置好各个参数后启动装置进行试验。针对胚面定向轨道, 以胚面定向成功率为评价指标, 其计算公式为

$$R_{\text{eso}} = \frac{N_{\text{up}}}{N_{\text{all}}} \times 100\%$$

(2)

式中 R_{eso} ——胚面定向成功率, %
 N_{up} ——从胚面定向轨道输出的胚面朝上的玉米种子数量
 N_{all} ——从胚面定向轨道输出的玉米种子数量

2.3 主要影响因素取值范围

根据前期试验结果, 控制器输出电压 U 小于 95 V 时, 振动排序装置的排料速度小于 45 粒/min , 不能满足后续操作中供料要求; 输出电压 U 大于 107 V 时, 由于出料轨道限宽, 导致尖端垂直侧壁的

种子在出料轨道进口处进行换向时速度减慢, 从而引起后面种子拥挤落入回种盒, 降低出料效率。因此, 设立控制器输出电压 U 的试验范围为 $95 \sim 107\text{ V}$ 。

d_1 小于 2 mm 时, 距离侧壁近, 种子顺着钢丝翻转 90° 保持侧立姿态前行, 导致胚面定向失败; 大于 6 mm 时, 距离翻面机构 2 近, 产生卡种或种子同时“架”着翻面机构 1 和翻面机构 2 前行现象, 造成定向机构功能失效。因此, 设立 d_1 的试验范围为 $2 \sim 6\text{ mm}$ 。

d_2 小于 5.5 mm 时, 以轨迹②前行的胚面朝上的种子也容易顺着翻面机构 1 翻面; 大于 9.5 mm 时, 胚面朝下的种子从翻面机构 1 上脱离, 导致翻面失败。因此, 设立 d_2 的试验范围为 $5.5 \sim 9.5\text{ mm}$ 。

2.4 试验方案

为探究上述 3 个影响因素对胚面定向性能的影响规律及确定最佳参数组合, 采用 Box - Behnken 试验方法开展三因素三水平旋转正交试验^[25-26]。各因素编码如表 1 所示。每组试验进行约 500 粒玉米种子的送料作业, 统计经胚面定向轨道输出的种子中胚面朝上的玉米种子所占的百分数, 即考察胚面定向成功率。每组试验重复 3 次。

表 1 试验因素编码
Tab. 1 Factors and coding of experiment

编码	因素		
	控制器输出电压 X_1/V	翻面机构 1 终点到侧壁的垂直距离 X_2/mm	翻面机构 1 终点到轨道表面的垂直距离 X_3/mm
-1	95	2	5.5
0	101	4	7.5
1	107	6	9.5

2.5 试验结果

根据 Design-Expert 软件中的 Box - Behnken 响应曲面进行试验方案设计与数据分析, 以胚面定向成功率为考核指标。试验方案和结果如表 2 所示。

2.6 回归数学模型建立和显著性检验

对试验结果进行方差分析, 如表 3 所示, 采用 Design-Expert 10.0.7 软件对试验数据进行多元回归拟合, 得到胚面定向成功率 Y 的回归方程。

根据表 3 可知, 在可信度 α 为 0.05 的条件下, 模型的拟合度为极显著 ($P < 0.01$), 回归模型失拟项 $P = 0.2439$, 表现为不显著, 说明不存在其它影响指标的主要因素。其中因素 X_1 、 X_1X_2 的 P 值大于 0.05 , 对胚面定向成功率的影响不显著, 剔除不显著交互项后的回归模型为

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test design scheme and results

序号	因素			胚面定向成功率/%
	X_1/V	X_2/mm	X_3/mm	
1	95	2	7.5	80.72
2	107	2	7.5	82.40
3	95	6	7.5	83.95
4	107	6	7.5	84.32
5	95	4	5.5	84.31
6	107	4	5.5	83.32
7	95	4	9.5	84.51
8	107	4	9.5	86.69
9	101	2	5.5	89.22
10	101	6	5.5	88.02
11	101	2	9.5	86.74
12	101	6	9.5	91.69
13	101	4	7.5	94.20
14	101	4	7.5	95.08
15	101	4	7.5	94.69
16	101	4	7.5	94.34
17	101	4	7.5	95.08

表 3 方差分析结果

Tab.3 Variance analysis result

来源	平方和	自由度	F	P
模型	401.71	9	182.55	<0.000 1 **
X_1	1.31	1	5.37	0.053 7
X_2	9.90	1	40.49	0.000 4 **
X_3	2.83	1	11.58	0.011 4 *
X_1X_2	0.43	1	1.75	0.226 9
X_1X_3	2.51	1	10.27	0.015 0 *
X_2X_3	9.46	1	38.67	0.000 4 **
X_1^2	270.84	1	1 107.68	<0.000 1 **
X_2^2	61.13	1	250.00	<0.000 1 **
X_3^2	16.01	1	65.50	<0.000 1 **
残差	1.71	7		
失拟	1.05	3	2.09	0.243 9
误差	0.67	4		
总和	403.42	16		

注：* 表示显著(0.01≤P<0.05)，** 表示极显著(P<0.01)。

$$Y = 94.68 + 0.41x_1 + 1.11x_2 + 0.60x_3 + 0.79x_1x_3 + 1.54x_2x_3 - 8.02x_1^2 - 3.81x_2^2 - 1.95x_3^2 \quad (3)$$

式中 $x_1、x_2、x_3$ ——因素编码值

通过对式(3)回归系数的检验得出,对胚面定向成功率影响的因素主次顺序为 $X_2、X_3、X_1$ 。

2.7 各因素对性能指标影响效应分析

通过 Design-Expert 10.0.7 对数据进行处理,可得到 $X_1、X_2$ 和 X_3 对胚面定向成功率的影响,其响应曲面如图 13 所示。分别固定 $X_2、X_1$ 为零水平,根据响应曲面图,分析其余 2 个因素间的交互作用对胚面定向成功率的影响。

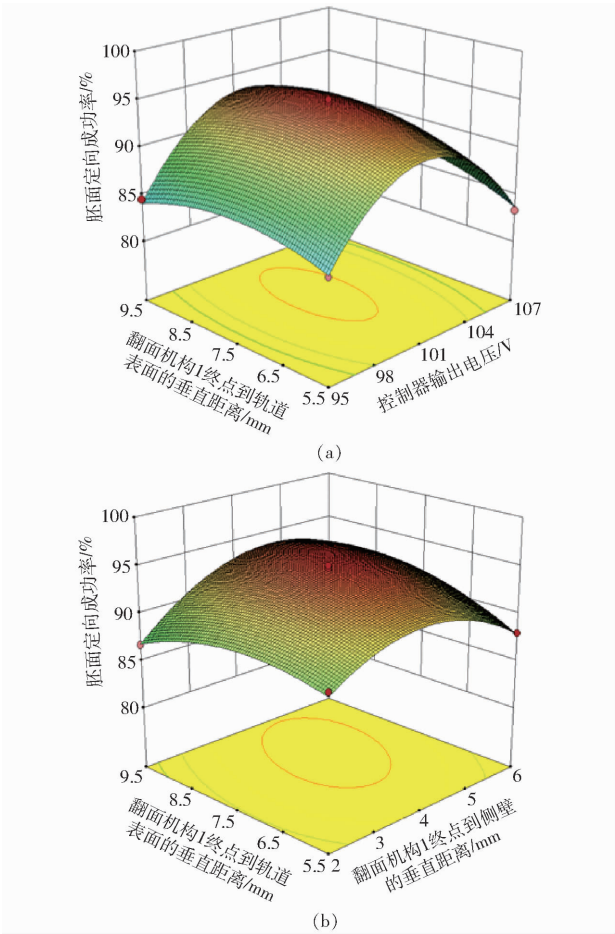


图 13 因素交互作用对胚面定向成功率影响的响应曲面

Fig.13 Impacts of interaction on success rate of embryo side orientation

图 13a 是 X_2 为 4 mm 时, X_1 和 X_3 对胚面定向成功率交互作用的响应面。由图可知,当 X_1 一定时,随着 X_3 的增大,胚面定向成功率呈现先升后降趋势,且变化幅度较小。当 X_3 一定时,胚面定向成功率随着 X_1 的增大先高后低,且变化幅度较大。 X_1 在 99.5 ~ 103 V, X_3 在 6.5 ~ 9 mm 时,胚面定向成功率较高。

图 13b 是控制器输出电压 X_1 为 101 V 时, X_2 和 X_3 对胚面定向成功率交互作用的响应面。由图可知,当 X_3 一定时,随着 X_2 的增大,胚面定向成功率呈现先升后降趋势,且变化幅度较大。当 X_2 一定时,胚面定向成功率随 X_3 的增大先高后低,且变化幅度较小。 X_2 在 3.5 ~ 5.5 mm, X_3 在 6.5 ~ 9.25 mm 时,胚面定向成功率较高。

2.8 参数优化与验证试验

以尽量使胚面定向成功率高的优化原则,在 X_1 为 95 ~ 107 V, X_2 为 2 ~ 6 mm, X_3 为 5.5 ~ 9.5 mm 的约束条件下进行优化求解。得到在 $X_1 = 101.20$ V, $X_2 = 4.38$ mm, $X_3 = 7.97$ mm 的参数组合条件下存在

最优解,但是由于控制器电压只能取整数,此时设置 $X_1 = 101\text{ V}$,对应 $X_2 = 4.38\text{ mm}$, $X_3 = 7.96\text{ mm}$,在该条件下胚面定向成功率为94.85%。

为了验证优化分析结果的正确性,在最优解的条件下进行了验证试验,试验重复3次,胚面定向成功率为94.82%。优化结果可信,试验效果如图14所示。同时记录该参数组合下输送种子目标数量的时间,计算其排料速度,排料速度为85个/min。



图 14 试验效果
Fig. 14 Test results

2.9 品种适应性试验

为了考察该装置对不同品种的适应性,另外选取了农华816、万盛68两个品种的玉米种子在装置上进行适应性试验。试验开始前,两个品种各选取200粒玉米种子进行尺寸的测量。特征参数如表4所示。每组试验进行200粒玉米种子的送料作业,每组试验重复3次。试验结果为农华816品种的胚面定向成功率是91.67%,万盛68的胚面定向成功率是91.17%。试验结果表明所选的玉米品种的胚面定向成功率均大于91%,装置对种子具有良好的适应性。

3 结论

(1)针对玉米定向播种中的胚面定向问题,以

特征参数	品种	
	农华 816	万盛 68
长度范围/mm	[10.78,14.30]	[10.01,12.96]
宽度范围/mm	[7.27,9.08]	[6.87,8.80]
厚度范围/mm	[3.40,5.06]	[3.78,5.29]
胚沟长度范围/mm	[7.84,11.51]	[7.36,10.36]
胚沟宽度范围/mm	[3.41,4.89]	[3.78,5.29]
胚沟深度范围/mm	[0.39,1.05]	[0.42,1.13]
百粒质量/g	30.9	30.3
容重/(g·L ⁻¹)	743	763
含水率最大值/%	13.0	13.0

马齿形玉米种子为研究对象,研制了一种基于振动排序的玉米种子胚面定向装置,设计了该装置螺旋轨道上的选向机构和定向机构,探明了玉米种子胚面定向原理,确定了选向机构和定向机构的尺寸参数和空间位置。

(2)选取控制器输出电压、翻面机构1终点到侧壁的垂直距离和翻面机构1终点到轨道表面的垂直距离为主要因素,利用Box- Behnken试验方法开展了三因素三水平旋转正交试验,确定了最优参数组合为:控制器输出电压101V、翻面机构1终点到侧壁的垂直距离4.38mm、翻面机构1终点到轨道表面的垂直距离7.96mm,在最优参数组合条件下胚面定向成功率为94.85%。

(3)对最优参数组合进行了验证试验,试验结果表明,胚面定向成功率为94.82%,与优化结果基本一致,该结果满足设计要求。且该参数组合下,排料速度可达85个/min,此速度满足后续定向包装的供种要求。

(4)进行了品种适应性试验,试验结果表明:所选的玉米品种农华816、万盛68的胚面定向成功率均大于91%,玉米种子胚面定向装置对京科青贮516、农华816和万盛68具有良好的适应性。

参 考 文 献

[1] TORRES G, VOSSenkEMPER J, RAUN W, et al. Maize (*Zea mays*) leaf angle and emergence as affected by seed orientation at planting[J]. Experimental Agriculture, 2011, 47(4): 579 – 592.

[2] KOLLER A, TORRES G, BUSER M, et al. Statistical model for the relationship between maize kernel orientation and seed leaf azimuth[J]. Experimental Agriculture, 2016, 52(3): 359 – 370.

[3] TORRES G M, KOLLER A, TAYLOR R, et al. Seed-oriented planting improves light interception, radiation use efficiency and grain yield of maize (*Zea mays* L.)[J]. Experimental Agriculture, 2017, 53(2): 210 – 225.

[4] 赵学观,徐丽明,王应彪,等. 基于 Fluent 与高速摄影的玉米种子定向吸附研究[J]. 农业机械学报,2014,45(10):103 – 109,28.
ZHAO Xueguan, XU Liming, WANG Yingbiao, et al. Directional adsorption characteristics of corn seed based on Fluent and high speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(10):103 – 109,28. (in Chinese)

[5] 杨粉团,曹庆军,姜晓莉,等. 玉米种子定向入土方式与叶片空间分布关系[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(3): 406 – 411.
YANG Fentuan, CAO Qingjun, JIANG Xiaoli, et al. Relationship between initial seed orientation and maize leaf spatial distribution[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2015, 27(3): 406 – 411. (in Chinese)

- [6] 权龙哲,奚德君,王建森,等. 玉米定向栽培及机械化定向种植技术研究综述[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 78–85.
QUAN Longzhe, XI Dejun, WANG Jiansen, et al. A review on the theory and mechanization cultivation technology of maize [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 78–85. (in Chinese)
- [7] 王侨,陈兵旗,朱德利,等. 基于机器视觉的定向播种用玉米种粒精选装置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 27–37.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, ZHU Deli, et al. Machine vision-based selection machine of corn seed used for directional seeding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 27–37. (in Chinese)
- [8] 王侨,陈兵旗,寇春荣,等. 基于机器视觉的玉米种粒定向定位摆放装置研制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 19–28.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, KOU Chunrong, et al. Development of corn seed directional positioning machine based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 19–28. (in Chinese)
- [9] 邢洁洁,徐丽明,马帅,等. 马齿形玉米种子尖端激光定向与胚面识别装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 52–59.
XING Jiejie, XU Liming, MA Shuai, et al. Development of tip orientation and embryo side recognition device for dent corn seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 52–59. (in Chinese)
- [10] 史立新. 玉米定向精播种粒品质动态检测方法研究——基于计算机姿态识别[J]. 农机化研究, 2021, 43(3): 240–244.
SHI Linxin. Study on dynamic detection method of maize directional precision seeding grain quality based on computer attitude recognition[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(3): 240–244. (in Chinese)
- [11] 刘长青,陈兵旗,张新会,等. 玉米定向精播种粒形态与品质动态检测方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 47–54.
LIU Changqing, CHEN Bingqi, ZHANG Xinhui, et al. Dynamic detection of corn seeds for directional precision seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 47–54. (in Chinese)
- [12] 宁纪锋,何东健,杨蜀秦. 玉米籽粒的尖端和胚部的计算机视觉识别[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 117–119.
NING Jifeng, HE Dongjian, YANG Shuqin. Identification of tip cap and germ surface of corn kernel using computer vision [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 117–119. (in Chinese)
- [13] 赵学观. 玉米定向种带自动包装处理系统关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
ZHAO Xueguan. Study on key technology of the corn directional seed belt automatic packaging system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [14] 邢洁洁,徐丽明,刘旭东,等. 电磁振动料斗内玉米种子分散与排序输送仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 32–39.
XING Jiejie, XU Liming, LIU Xudong, et al. Simulation and test of corn seeds' dispersion and arraying transport in electromagnetic vibration hopper[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 32–39. (in Chinese)
- [15] 王应彪,赵学观,徐丽明,等. 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 Yingbiao, ZHAO Xueguan, XU Liming, et al. 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)
- [16] 中国农业大学. 一种玉米种子定向方法及定向装置: 201210443038.7[P]. 2014–10–22.
- [17] 姜凯,张骞,王秀,等. 嫁接夹自动排序供夹装置设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 256–261.
JIANG Kai, ZHANG Qian, WANG Xiu, et al. Design for automatic sequencing and supplying device for grafting clips[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 256–261. (in Chinese)
- [18] 李绍炎. 自动机与自动线[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [19] 田索博,杨继峰,王瑞丽,等. 蔬菜嫁接机嫁接夹振动排序装置工作参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 9–16.
TIAN Subo, YANG Jifeng, WANG Ruili, et al. Optimization experiment of operating parameters on vibration sorting-clip device for vegetable grafting machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 9–16. (in Chinese)
- [20] 褚佳,张铁中,张立博,等. 套管式蔬菜自动嫁接机出套装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 64–70.
CHU Jia, ZHANG Tiezhong, ZHANG Libo, et al. Design and experiment of tube-outputting device for vegetable grafting machine using tube-grafting method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 64–70. (in Chinese)
- [21] 邢洁洁,徐丽明,袁全春,等. 马齿型玉米种子侧立定向定距输出装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 55–63.
XING Jiejie, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Design and test of dent corn seed directional and fixed-distance output device with lateral standing posture[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 55–63. (in Chinese)
- [22] 李玉环,杨丽,韩英,等. 勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 108–116.
LI Yuhuan, YANG Li, HAN Ying, et al. Design and experiment of spoon-clamping type metering device for faba beans[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 108–116. (in Chinese)
- [23] 李玉环,魏亚男,杨丽,等. 扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 43–53.
LI Yuhuan, WEI Ya'nan, YANG Li, et al. Design and experiment of mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 43–53. (in Chinese)
- [24] 李军,张铁中,褚佳,等. 全自动整排蔬菜嫁接机嫁接夹输送机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 14–20.
LI Jun, ZHANG Tiezhong, CHU Jia, et al. Design and experiment of grafting-clip transporting mechanism of full automatic grafting machine for whole-row vegetable seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 14–20. (in Chinese)
- [25] 丁力,杨丽,张东兴,等. 基于DEM–CFD的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 50–60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM–CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50–60. (in Chinese)
- [26] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 61–73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61–73. (in Chinese)