

旱地全膜双垄沟玉米精量播种机的设计与试验

杨 杰, 赵武云, 戴 飞

(甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为满足旱地全膜双垄沟农艺技术要求, 设计了一种玉米精量播种机。为实现播种机平稳工作、保证膜下播种深度, 采用双向平行四杆仿形机构, 根据初始工作角和最大上下仿形量, 确定了仿形机构的各项尺寸参数, 上下仿形量可达到 98.35 mm, 左右仿形角达到 15.2°, 满足仿形播种要求; 为减少漏播, 降低空穴率, 采用凸轮-平面连杆开启式穴播轮; 借助 ADAMS 软件对穴播器成穴过程进行仿真分析, 探讨了穴播轮滑移率对穴孔形状的影响, 并以此对播种机的前进速度进行优化, 降低了空穴错位率。田间试验结果表明: 全膜双垄沟播玉米精量播种机作业后空穴率为 0.9%, 穴粒数合格率为 93.6%, 膜下播种深度合格率为 91.8%, 穴位错孔率为 2.5%, 作业质量符合行业技术标准要求。

关键词: 全膜双垄沟; 玉米; 仿形; 精量播种机

中图分类号: S223.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0262-07

Design and test of corn precision seeder for dry-land whole film double furrow sowing

YANG Jie, ZHAO Wu-yun, DAI Fei

(School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to meet the agronomic technical requirements of dry-land whole film double furrow sowing, a corn precision seeder was designed. To realize the smooth working of the seeder, and to ensure the sowing depth under film, the profiling mechanism of bidirectional parallelogram linkage was adopted. According to the initial work angle and the maximum amount of profiling, all size parameters of the profiling mechanism were determined. The profiling volume in vertical direction reached to 98.35 mm, and the profiling angle in horizontal direction reached to 15.2°, which met the requirements of profiling sowing. To reduce missed sowing, and to reduce the rate of no-seed holes, the open-type dibbling wheel with cam-plane connecting rod was adopted. With ADAMS software, the hole-making process of the seeder was simulated and analyzed, and the influence of slipping rate of dibbling wheel to shape of holes was explored, so as to optimize the forward speed of the seeder and to reduce the hole dislocation rate. The field test results showed that, by using the corn precision seeder for dry-land whole film double furrow sowing, the rate of no-seed holes was 0.9%, the pass rate of seed number per hole was 93.6%, the pass rate of sowing depth under film was 91.8%, and the hole dislocation rate was 2.5%, so its working quality could meet the requirement of technical standards.

Keywords: whole film double furrow; corn; profiling; precision seeder

旱地玉米全膜双垄沟播模式是甘肃省在传统地膜覆盖技术基础上, 将地膜覆盖与垄沟种植相结合的一项集雨、保墒、抗旱新技术^[1-3]。生产实践表明, 全膜双垄沟播技术比普通地膜覆盖栽培单产增幅超过 30%, 增产效果显著, 具有良好的经济效益^[4-5]。

旱地全膜双垄沟播技术相关的播种机具主要依靠传统滚轮式穴播器和手持式点播枪, 普遍存在成穴器开启失效, 劳动强度高、播种效率低下, 严重制约了全膜双垄沟播技术的快速发展^[6-7]。此外, 由于甘肃多为山地、丘陵地带, 轮式播种机穴播器随地形起伏较大, 需要工作性能良好的仿形机构才可以

收稿日期: 2013-10-05

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD14B10); 甘肃省干旱生境作物学重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金课题项目(GSCS-2012-09)

作者简介: 杨 杰(1987—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为农业工程技术与装备。E-mail: yj2511@126.com。

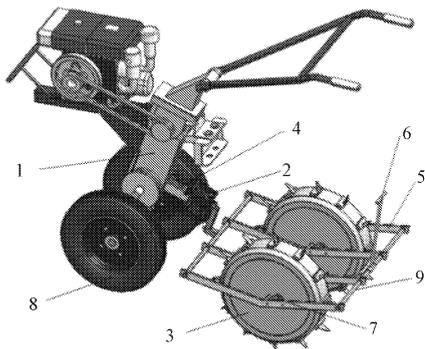
通信作者: 赵武云(1966—), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士, 研究方向为农业工程技术与装备。E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn。

使播种机的穴播装置随地形的变化而始终保持一定的工作深度,仿形机构的优劣直接影响着播种机膜上播种作业质量,为此,设计了一种具有能够实现左右、上下同时仿形并且采用凸轮-平面连杆开启式穴播器的全膜双垄沟播玉米精量播种机^[8-10]。

1 整机组成及工作原理

1.1 主要结构

旱地全膜双垄沟播玉米精量播种机主要由手扶拖拉机、仿形机构、穴播轮、牵引架、半轴等组成。两个穴播轮对称安装于机架上,机架包括固定杆和挡板,挡板前端安装于前固定杆上,挡板后端安装于后固定杆上,并由挡圈固定;后固定杆上安装有手提杆,易于穴播轮转向;穴播轮通过仿形机构悬挂在手扶拖拉机上,实现上下、左右仿形,整个播种装置由手扶拖拉机带动工作,整机结构如图1所示。



1. 手扶拖拉机;2. 仿形机构;3. 穴播轮;4. 牵引架;5. 机架;6. 手提杆;7. 半轴;8. 行走轮;9. 固定杆

1. Walking tractor; 2. Profiling mechanism; 3. Dribbling wheel; 4. Traction frame; 5. Body frame; 6. Hand lever; 7. Axle; 8. Walking wheel; 9. Fixed link

图1 全膜双垄沟播玉米精量播种机整机结构

Fig.1 Structure of corn precision seeder for dry-land whole film double furrow sowing

1.2 工作原理

全膜双垄沟播玉米精量播种机在田间进行播种作业时,动力传递依次是:发动机动力经变速箱传递到行走轮,并经牵引架和仿形机构带动穴播轮向前运动。地轮在小垄两侧的垄沟内行走,穴播轮鸭嘴定点强制开启,在小垄两侧垄沟内完成播种作业,两个穴播轮鸭嘴之间的距离为双垄沟的播种距离,左右对称布置,并列向前,同时播种,并且起到支撑作用^[11-13]。将播种机三维模型导入 ADAMS 软件中进行运动仿真模拟,得到其作业轨迹如图2所示。

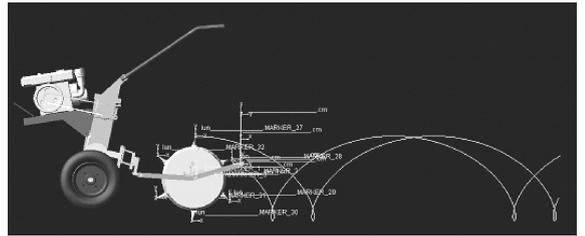


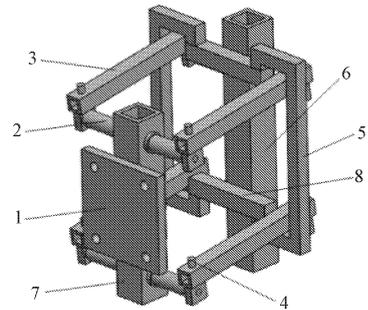
图2 作业轨迹图

Fig.2 Diagram of working trajectory

2 仿形机构设计

2.1 双向平行四杆仿形机构及原理

双向平行四杆仿形机构主要由牵引固定板、仿形横杆、仿形纵杆、仿形限位架、机架等组成。其结构组成如图3所示。



1. 牵引固定板;2. 仿形横杆;3. 仿形纵杆;4. 仿形连接件;5. 仿形限位架;6. 牵引杆;7. 机架;8. 横梁

1. Traction fixed plate; 2. Profiling horizontal bar; 3. Profiling longitudinal bar; 4. Profiling linkage; 5. Profiling limit frame; 6. Traction bar; 7. Body frame; 8. Crossbeam

图3 双向平行四杆仿形机构

Fig.3 Profiling mechanism of bidirectional parallelogram linkage

仿形横杆安装在机架的套筒内,并相对套筒转动,同时通过仿形连接件连接仿形纵杆,仿形纵杆可以绕仿形连接件转动。仿形限位架安装在横梁上。仿形横杆、仿形纵杆转动的角度受仿形限位架的控制,机具作业时,仿形横杆相对套筒转动,仿形纵杆随之发生转动,穴播轮进行上下仿形,仿形纵杆转动一定角度后与仿形限位架横梁发生接触,穴播轮不能继续上下移动,即达到上下仿形的最大量;同时仿形纵杆相对仿形连接件转动,穴播轮进行左右仿形,仿形纵杆转动一定角度后与仿形限位架的竖梁发生接触,穴播轮不能继续左右转动,即达到左右仿形的最大量。本平行四杆机构,不仅实现上下、左右仿形,还缩短了播种机的长度,使得播种机的重心前移,结构紧凑^[14-15]。

2.2 双向平行四杆仿形机构尺寸的设计

平行四杆各拉杆的牵引角 α 、长度 L 、仿形机构的横向宽度 d 的大小等都对仿形性能有直接的影响。若使仿形机构在上下和左右两个方向上运动平稳,播种深度稳定,必须选择合适的尺寸参数。

2.2.1 平行四杆各拉杆的牵引角 α 的确定 在稳定的工作条件下,根据所要求的仿形量大小确定平行四杆尺寸。精量播种机仿形机构仿形量大小依据地形和播前整地条件而定,通常情况下,上下仿形量各为 80 ~ 100 mm,如图 4a 所示。同样左右仿形量也设为 80 ~ 100 mm,如图 4b 所示。从图 3 中可知上下仿形机构总仿形量 h 的大小为

$$h = \sin(\alpha + \alpha_1) + \sin(\alpha_2 - \alpha) \quad (1)$$

式中, α_1 为上仿形角; α_2 为下仿形角。

由式(1)可知,若要仿形量相同,平行四杆的上下拉杆越长,则牵引角 α 变化范围越小;上下拉杆越短,则牵引角 α 变化范围越大。为使播种机能够稳定工作,牵引角变化范围越小越好。因此,上下拉杆长一些有利。但拉杆加长,会使结构不紧凑,机具重心后移,对悬挂式播种机机组的纵向稳定性不利。

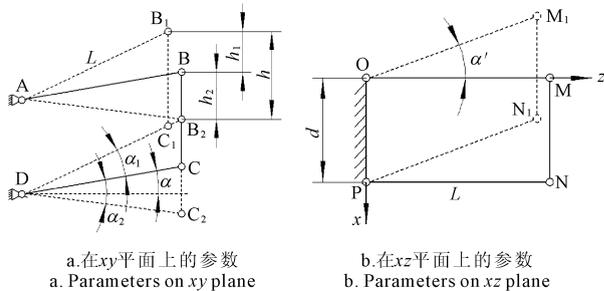


图 4 平行四杆在 xy 和 xz 平面上的参数

Fig.4 Structural parameters of parallelogram linkage on xy and xz plane

注:图 a: B_1C_1 为平行四杆 BC 上仿形时运动的极限位置; B_2C_2 为平行四杆 BC 下仿形时运动的极限位置; α_1 为上仿形角; α_2 为下仿形角; h_2 为下仿形量; h_1 为上仿形量; h 为仿形机构上下总仿形量。图 b: M_1N_1 为平行四杆 MN 左右仿形时运动的极限位置; d 为平行四杆机构的横向宽度; α' 为左右仿形角。

Note: Fig. a: B_1C_1 —limit movement position of upward profiling of parallelogram BC; B_2C_2 —limit movement position of downward profiling of parallelogram BC; α_1 —upward profiling angle; α_2 —downward profiling angle; h_1 —upward profiling volume; h_2 —downward profiling volume; h —total profiling volume. Fig. b: M_1N_1 —limit movement position of horizontal profiling of parallelogram MN; d —horizontal width of parallelogram structure; α' —horizontal profiling angl.

现有播种机上 α 为 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间, α_2 为 $6^\circ \sim 22^\circ$ 之间,即最大播深时的下仿形牵引角 $6^\circ \sim 22^\circ$, $\alpha + \alpha_1$ 为 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间,即最小播深时的上仿形牵引角 20°

$\sim 40^\circ$ 。由于玉米播种期间田间土壤硬度较大,为了能够有足够的力使穴播器开出满足农艺要求的深度。参照国内外播种机机型,依据本论文播种机的特点设计上仿形角 $\alpha_1 = 15^\circ$,初始工作角 $\alpha_0 = 0$,下仿形角 $\alpha_2 = 15^\circ$,两连杆架间距离 l_{AD} 为 200 mm。

2.2.2 仿形机构的横向宽度 d 的确定 平行四杆机构的横向宽度 d 的大小直接影响播种机工作时的播行直线性。如果横向宽度太窄,工作中容易引起横向不稳定,导致播种行直线性不好。反之,如果太宽,使结构庞大,对于窄行距播种不好配置。因此,在满足工作性能的条件下应尽量取小值。根据全膜双垄沟播玉米播种的实际条件,又根据现有播种机的参数选用横向尺寸 $d = 200$ mm。

2.2.3 仿形机构长度 L 的确定 其参数如图 3a 所示,由于初始工作角 $\alpha_0 = 0$,上下仿形量相等,只计算一侧仿形量即可,仿形杆的长度 L 。

$$L = \frac{h_2}{\sin\alpha + \sin(\alpha_2 - \alpha_0)} \quad (2)$$

式中, h_2 为下仿形量,取最大为 100 mm; α_0 为初始工作角,取 0 ; α_2 为下仿形角,取 15° 。经计算, $L = 386.37$ mm,取 $L = 380$ mm,得到上仿形量大小 h_1 。

$$h_1 = L \cdot [\sin(\alpha_1 + \alpha) - \sin\alpha] \quad (3)$$

式中, α_1 为上仿形角,取 15° 。经计算, $h_1 = 98.35$ mm,满足仿形量 80 ~ 100 mm 的要求。如图 4b 所示,双向仿形机构的左右仿形量按照仿形量大小为 80 ~ 100 mm 进行设计,正常工作时,工作角为零度。达到最大仿形量 $h' = 100$ mm 时,得到左右仿形角度 α' 。

$$\alpha' = \arcsin \frac{h'}{L} \quad (4)$$

经计算, $\alpha' = 15.2^\circ$,取 15° ,满足左右仿形要求。

3 凸轮—平面连杆开启式穴播器的结构和工作原理

凸轮—平面四杆开启式穴播器的结构如图 5 所示,这种穴播器是由连杆、摆杆、凸轮、鸭嘴等组成,其结构主要有两个特点:一是入土成穴器由固定嘴和活动嘴两部分组成,二是入土成穴器开闭系统应用凸轮—平面连杆开启原理带动,穴播轮作业时,凸轮固定在轮轴上,平面连杆机构随轮盘绕轮轴逆时针转动,转过合适角度后,凸轮顶起摆杆,摆杆带动连杆,活动嘴随连杆打开,这种强制式开启机构克服了常见滚轮压板式开启机构在陷入松软或潮湿土壤内容易失灵的问题,有效降低了漏播,保证了播种的合格率^[16-17]。

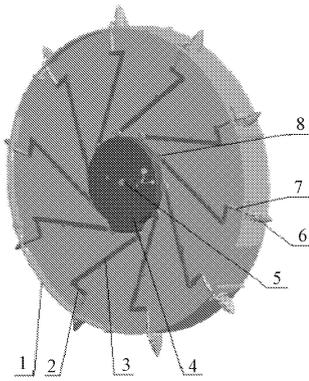


图 5 穴播器实体模型

Fig.5 The solid model of dibbler

1.穴播轮; 2.连杆; 3.摆杆; 4.凸轮; 5.轮轴; 6.鸭嘴固定嘴; 7.鸭嘴活动嘴; 8.滚子

1. Dibbling wheel; 2. Link bar; 3. Pendulum bar; 4. Cam; 5. Axle; 6. Duckbill fixed mouth; 7. Duckbill active mouth; 8. Roller

4 穴孔形成过程及仿真分析

通过 Solidworks 软件建立穴播器的三维实体模型,再导入到 ADAMS 中,添加质量信息和约束,施加旋转驱动 Rotational Motion,驱动穴播轮绕转动轴转动,施加 Translational Motion,驱动穴播轮水平运动,如图 6 所示。

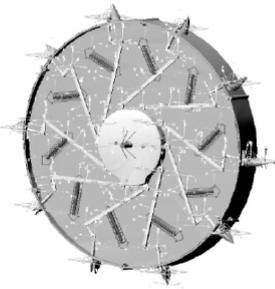


图 6 穴播器仿真模型

Fig.6 Simulation model of dibbler

穴播轮在土壤表面上滚动时,成穴器在进入和退出土壤的过程中,外廓各点在土壤中运动轨迹的包络线形成了穴孔。

穴孔是由成穴器对土壤的剪切和挤压作用形成。穴孔形成过程见图 7 所示,在成穴器入土过程中形成穴孔的 ab 段和 de 段,出土过程中挤压土壤,并延续至出土过程结束,形成穴孔的 bc 和 ef 段。在成穴器的活动嘴打开过程中,形成穴孔的 cd 段^[18]。从穴孔形成过程可知,ab 段的方程为:

$$\begin{aligned} x &= [R\sin(\theta - \alpha) + R'\sin\alpha]\cos(\theta - \alpha) - R\theta + \Delta S \\ y &= H - [R\sin(\theta - \alpha) + R'\sin\alpha]\sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

be 段的方程为:

$$\begin{aligned} x &= R'\sin\theta - R\theta + \Delta S \\ y &= R' - R'\cos\theta \end{aligned} \quad (6)$$

ef 段的方程为:

$$\begin{aligned} x &= [R\sin(\theta + \alpha') - R'\sin\alpha' + l\sin\phi]\cos(\theta + \alpha') + \Delta S \\ y &= H - [R\sin(\theta + \alpha') - R'\sin\alpha' + l\sin\phi]\sin(\theta + \alpha') \end{aligned} \quad (7)$$

式中, R 为穴播轮半径(mm); R' 为固定嘴顶端半径(mm); H 为播种深度(mm); α 为固定嘴压力角($^\circ$); α' 为活动嘴压力角($^\circ$); l 为活动嘴长度(mm); θ 为成穴器转角($^\circ$); ϕ 为活动嘴转角(rad); ΔS 为滑移量(mm)。

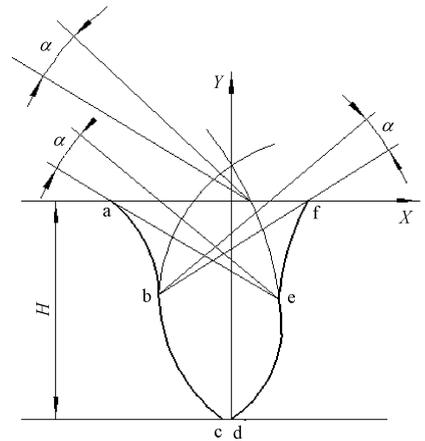


图 7 穴孔形成过程

Fig.7 Diagram of hole formation process

由以上运动方程知:穴孔的形状和大小与穴播轮的结构参数和运动参数密切相关,主要由成穴器的形状、固定嘴压力角、活动嘴压力角及滑移率决定。在其它参数不变的情况下,滑移率和穴播轮半径有如下关系式:

$$\delta = \frac{S - 2\pi R}{2\pi R} \times 100\% \quad (8)$$

式中, δ 为滑移率; S 为穴播轮滚动一圈走过的实际距离(mm); R 为穴播轮的半径(mm)。

由公式(8)知:在穴距不变的情况下,滚轮半径增大,鸭嘴数增多,则成穴器进入和退出土壤时的穴播轮转角减小,穴播轮的滑移率和滑移量减小。鸭嘴高度是由播种深度决定,滑移率和滑移量增加,穴播轮上各点运动轨迹随滑移量不同而变化^[18]。在实际设计过程中,穴播器角速度 ω 、播种机水平速度 v 与滑移率 δ 之间存在如式(9) 关系式

$$\omega = \frac{v(1 - \delta)}{R} \quad (9)$$

所以,在不同的滑移范围计算得到穴播轮的转

速如表 1 所示,进行仿真设置。

在 ADAMS 中对成穴器端点运用创建轨迹曲线功能,可以得到不同滑移量时成穴器端点运动轨迹。如图 8 所示,可以看出滑移量不同时,成穴器形成的穴孔形状差异较大,在设计时,一般取滑移量为 $0.05 \sim 0.12\text{mm}$,此时, $v = 500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,成穴器的运动轨迹及其形成的穴孔相对较理想,如图 8b 所示,减小了对土壤的扰动,保证了穴孔形状,降低了穴孔错位

率。

表 1 滑移量和穴播轮角速度的关系
Table 1 Relation between slipping amount and angular speed of dibbling wheel

滑移量 $\Delta S/\text{mm}$ Slipping amount ΔS	$\Delta S = 0$	$0 \leq \Delta S \leq \pi H$	$\Delta S = \pi H$	$\Delta S \geq \pi H$
角速度 $\omega/(\text{°} \cdot \text{s}^{-1})$ Angular speed ω	103.5	99.35	95.74	92.11

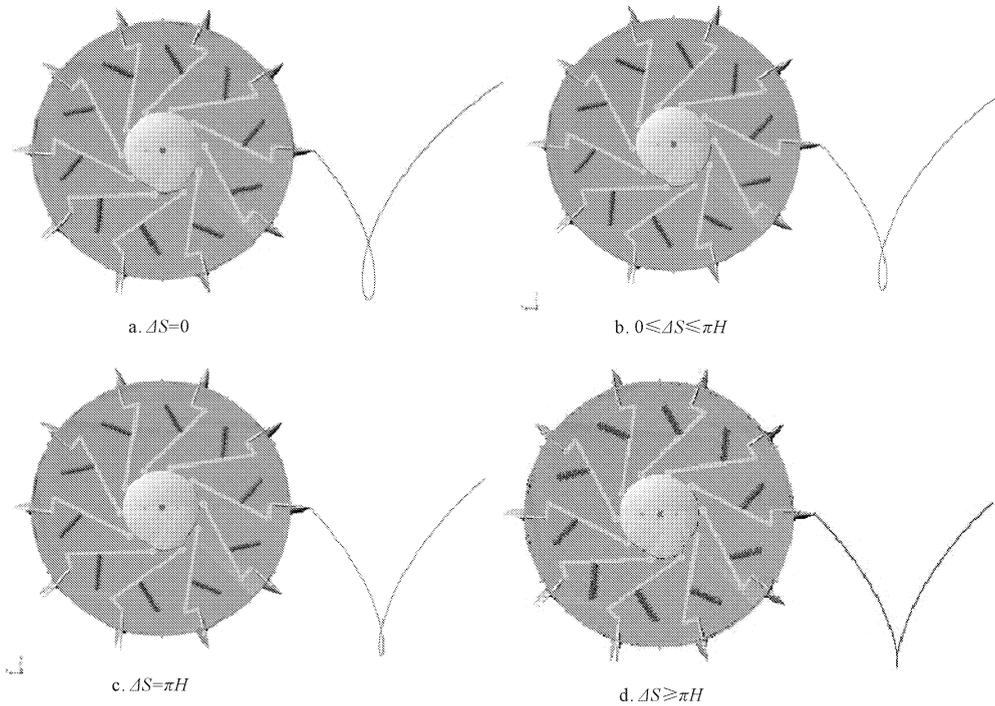


图 8 成穴器端点运动轨迹仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of endpoint trajectory of hole formation device

5 田间试验与分析

5.1 试验材料与方法

精量播种机田间播种性能试验在甘肃省洮河拖拉机制造有限公司试验地进行。试验地地势平坦,土壤为黄绵土,含水率为 $16.2\% \sim 18.4\%$,土壤坚实度为 $1\ 020.8 \text{ kPa}$,地表依照全膜双垄沟播农艺技术要求,经整地起垄后铺膜处理。

玉米种植品种为沈单 16 号,种子千粒质量为 374 g ,含水率为 10.6% 。采用洮河牌柴油小型手扶拖拉机,功率为 2.82 kW ,整机的前进速度为 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。机具播种作业完成后,按照 NY/T987 - 2006《铺膜穴播机作业质量》^[19]标准对播种机作业性能的测定要求,计算玉米全膜覆盖双垄沟播种机的膜上作业时的空穴率、穴粒数合格率、膜下播种深度合格率以及穴位错孔率的实验数据值^[20]。

以样机播种株距 $300 \text{ mm} \times 10$ 行的行距的面积

为 1 个工作区域,测定点为区域内所有的穴孔,用钢卷尺进行人工测量,垂直剖开种床土壤相结合的作业方式获取每个穴孔内的种子粒数,最上层种子的覆土层厚度,穴孔错位个数,计算种子空穴率。

$$H_k = \frac{k_h}{f} \times 100\% \quad (10)$$

$$H_l = \frac{l_h}{f} \times 100\% \quad (11)$$

$$H_b = \frac{b_h}{f} \times 100\% \quad (12)$$

$$H_c = \frac{c_h}{f} \times 100\% \quad (13)$$

式中, f 为总测定膜孔个数(个); k_h 为空穴个数(个); H_k 为空穴率(%); l_h 为穴粒数合格穴数(个); H_l 为穴粒数合格率(%); b_h 为膜下播种深度合格穴数(个); H_b 为膜下播种深度合格率(%); c_h 为膜孔与穴孔错开 $1/2$ 膜孔直径及以上的膜孔数(个); H_c

为穴位错孔率(%)。

分别以每10个作业小区的测定平均值为测试结果。

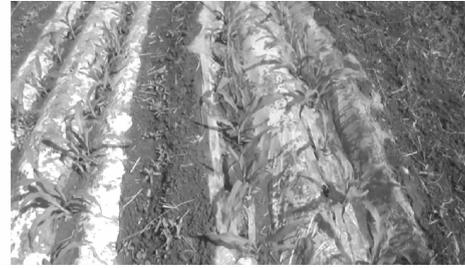


图9 田间试验过程及出苗情况

Fig.9 Field trial process and emergence situation

表2 田间播种性能实验结果

Table 2 Performance results of field sowing

参数 Parameter	试验值 Test value	技术要求 Technical requirement
空穴率/% Rate of no-seed holes	0.9	≤2
穴粒数合格率/% Pass rate of seed number per hole	93.6	≥85
膜下播种深度合格率/% Pass rate of sowing depth under film	91.8	≥75
穴位错孔率/% Hole dislocation rate	2.5	≤6

由表2实验结果可以看出,穴播机田间播种质量各项试验指标均符合NY/T987—2006铺膜穴播机作业质量的规范要求^[19]。播种过程中,样机在双垄沟小垄两侧垄沟内播种行走稳定,关键设计机构作业性能可靠,满足全膜覆盖双垄沟播的农艺技术要求。

6 结论

1) 穴播轮和动力设备之间由仿形机构来连接,本文设计了双向平行四杆仿形机构,在不同地形实现上下和左右同时仿形,克服了垄沟地面高低不平、穴播器工作不稳定、膜下播种深度不均等问题。

2) 本文采用凸轮-平面连杆机构开启式穴播器,克服了传统的转动滚轮式穴播轮在整地不好、种床不够平整或鸭嘴入土深度不足时所出现的瓣嘴压板不能接触地面,瓣嘴不能可靠打开投种,造成空穴和穴粒数不合格等问题。

3) 对凸轮-平面连杆机构开启式穴播轮的成穴过程和穴孔形状进了仿真分析,得到不同滑移率下的穴孔形状,结果表明:机具前进速度影响着滑移率的大小,进而影响穴孔形状及穴孔错位率。

利用上述测定计算方法,所得的玉米播种机田间播种性能实验结果如表2所示。

4) 田间试验表明,全膜双垄沟播玉米精量播种机作业后空穴率为0.9%,穴粒数合格率为93.6%,膜下播种深度合格率为91.8%,穴位错孔率为2.5%,相关指标均达到了NY/T987—2006铺膜穴播机作业质量的规范要求。

参考文献:

- [1] 杨祁峰,刘广才,熊春蓉,等.旱地玉米全膜双垄沟播技术的水分高效利用机理研究[J].农业现代化研究,2010,31(1):113-116.
- [2] 刘晓伟,何宝林,郭天文.全膜双垄沟不同覆膜时期对玉米土壤水分和产量的影响[J].核农学报,2012,26(3):602-609.
- [3] 张雷,牛芬菊,李小燕,等.旱地全膜双垄沟播秋覆膜对玉米产量和水分利用率的影响[J].中国农学通报,2010,26(22):142-145.
- [4] 刘广才,杨祁峰,段襁全,等.甘肃发展旱地全膜双垄沟播技术的主要模式[J].农业现代化研究,2008,29(5):629-632.
- [5] 李来祥,刘广才,杨祁峰,等.甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与应用进展[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):114-118.
- [6] 魏宏安,邵世禄.垂直插入式小麦覆膜穴播机的研究[J].农业机械学报,2001,32(6):34-37.
- [7] 孙伟,吴建民,黄晓鹏,等.勺匙式玉米精量取种器的设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(10):17-21.
- [8] 赵武云,吴建民,王芬娥,等.旱地玉米全膜覆盖双垄沟播精密播种机:中国,200910022858.7[P].2011-07-20.
- [9] 赵武云,马海军,吴建民,等.全膜覆盖双垄沟播玉米精量穴直播机:中国,201020692945.1[P].2012-01-04.
- [10] 赵武云,杨杰,戴飞,等.全膜覆盖双垄沟播玉米双行穴播轮播种机:中国,201320647623.9[P].2013-10-21.
- [11] Jie Yang, Wuyun Zhao, Fei Dai. Design and test of double row dibbling wheel precise seeder for membrane covering the whole of double furrow planting com[J]. Advanced Materials Research, 2014, 377: 850-851.
- [12] 戴飞,赵武云,唐学鹏,等.旱地玉米全膜覆盖双垄沟播精量播种机工作参数优化[J].农业机械学报,20013,44(增刊1):39-45.
- [13] 赵武云,戴飞,杨杰,等.玉米全膜双垄沟直播式精量穴播

- 机设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(11):7-13.
- [14] 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等.小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J].农业工程学报,2013,29(14):26-32.
- [15] 胡鸿烈,孙福辉.单体仿形压轮式播种单组的设计与试验研究[J].农业机械学报,1996,27(增刊10):53-57.
- [16] 魏宏安,邵世禄.滚轮式小麦覆膜穴播机的分析与评价[J].甘肃农业大学学报,2000,35(4):419-423.
- [17] 董丽梅,吴建民.鸭嘴式穴播器活动门凸轮-平面四杆式开启机构的研究[J].甘肃农业大学学报,2009,6(44):153-156.
- [18] 于红鹏,杜瑞成,吴修远.舵轮式杠杆开启穴播器的设计分析及穴孔形状仿真模拟[J].农业科技与装备,2009,4(184):61-64.
- [19] 农业部旱田作农机具质量监督检验测试中心. NY/T987—2006. 铺膜穴播机作业质量[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [20] 杨丽,史嵩,崔涛,等.气吸与机械辅助间种结合式玉米精量排种器[J].农业机械学报,2012,43(增刊):48-53.

(上接第 207 页)

- [11] 李冰,王昌全,代天飞,等.水稻子实对不同形态重金属的累积差异及其影响因素分析[J].植物营养与肥料学报,2007,(4):602-610.
- [12] 王宣,池靖,多克辛.微波消解-原子吸收法测定土壤中的铜铬锌铅镉[J].农业环境与发展,2006,(4):74-76.
- [13] 刘雷,杨帆,刘足根,等.微波消解 ICP-AES 法测定土壤及植物中的重金属[J].环境化学,2008,(4):511-514.
- [14] 杨清伟,蓝崇钰,束文圣.铅锌矿废水污染水稻土 Cd 的化学形态与生物有效性研究[J].农业环境科学学报,2007,(2):500-504.
- [15] 薛澄泽,肖玲,吴乾丰,等.陕西省主要农业土壤中十种元素背景值研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),1986,(3):30-53.
- [16] 陈岩,季宏兵,朱先芳,等.北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J].农业环境科学学报,2012,(11):2142-2151.
- [17] 刘翠华,依艳丽,张大庚,等.葫芦岛锌厂周围土壤镉污染现状研究[J].土壤通报,2003,(4):326-329.
- [18] Verner J F, Ramsey M H, et al. Heavy metal contamination of soils around a Pb-Zn smelter in Bukowno, Poland[J]. Applied Geochemistry, 1996, 11(1/2):11-16.
- [19] 陈林华,倪吾钟,李雪莲,等.常用肥料重金属含量的调查分析[J].浙江理工大学学报,2009,26(2):223-227.
- [20] 王帅杰,狄楠楠,王杰林,等.煤中微量元素的环境效应[J].环境科学与技术,2010,(10):179-182.
- [21] 王利军,卢新卫,荆淇,等.宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J].农业环境科学学报,2012,(2):325-330.
- [22] 杜平.铅锌冶炼厂周边土壤中重金属污染的空间分布及其形态研究[D].北京:中国环境科学研究院,2007.
- [23] Buanam J, Shiwatana J, Pongsakul P. Fractionation and elemental association of Zn, Cd and Pb in soils contaminated by Zn minings using a continuous-flow sequential extraction[J]. Environ Monit, 2005, 7:778-784.
- [24] Li X, Thornton I. Multi-element contamination of soils and plants in old mining areas, U. K[J]. Applied Geochemistry, 1993, 2(Supplement):51-56.
- [25] 熊田恭一,李庆荣,孙铁光,解惠男,等译.土壤有机质的化学[M].北京:科学出版社,1984:1-175.
- [26] 李瑞萍,王安建,曹殿华,等.云南兰坪金顶铅锌矿区土壤中 Pb 分布特征[J].地球学报,2009,(1):72-78.
- [27] 李晓晨,马海涛,冯士龙,等.污泥中重金属的形态及在小麦幼苗中的富集[J].环境科学与技术,2007,(3):1-3.
- [28] 邵云,姜丽娜,李向力,等.五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J].生态环境,2005,(2):204-207.
- [29] 陈怀满.土壤中化学物质的行为与环境质量[M].北京:科学出版社,2002:108-114.
- [30] 张乃明,李阳红.污水灌区土壤-作物系统对三种重金属吸收富集特征研究[C]//首届全国农业环境科学学术研讨会论文集.天津:中国农业生态环境保护协会,2005:196-199.