

窄行密植西洋参精密播种机设计与试验

廖宜涛^{1,2} 李成良¹ 廖庆喜^{1,2} 张百祥¹ 郑娟¹ 杜铮³

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
3. 武汉市农业科学院, 武汉 430070)

摘要: 针对现有条播或大行株距穴播机难以满足西洋参窄行密植精密播种农艺要求、西洋参机械化种植缺乏适用播种机械的问题,设计了一种采用多行并联气力针式排种装置和行星轮点播式导种装置的窄行密植西洋参精密播种机。阐述了播种机及排种装置结构原理与整机传动方案,重点设计了行星轮点播式全约束导种装置,通过机构分析确定了行星轮系的结构参数;通过卸种过程理论分析和高速摄影试验,明确了卸种轨迹影响因素和卸种水平位移,确定了导种装置插播器接口尺寸和合适卸种正压;通过导种轨迹理论与仿真分析,明确了插播器运动规律和低位零速投种条件,确定了导种装置投种控制凸轮轮廓。播种机田间试验结果表明,当吸种负压为-4.5 kPa、卸种正压为3.0 kPa、作业速度为0.54 km/h时,设计的播种机穴粒数合格率为86.2%,重播率为4.4%,空穴率为9.4%,播深合格率为92.8%,穴距合格率为93.9%,满足西洋参播种农艺要求。

关键词: 西洋参; 窄行密植; 精密播种机; 行星轮系; 全约束导种

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0092-12 OSID: 

Design and Experiment of Narrow-row-dense-planting Precision Planter for American Ginseng

LIAO Yitao^{1,2} LI Chengliang¹ LIAO Qingxi^{1,2} ZHANG Baixiang¹ ZHENG Juan¹ DU Zheng³

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China
2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China
3. Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430070, China)

Abstract: Considering the problems that the existing drill or large row spacing hole-drop planter could not meet the agronomy requirements of American ginseng for narrow-row-dense-planting precision planting, and the mechanized planting of American ginseng lacked suitable planting machinery, a narrow-row-dense-planting precision planter for American ginseng was designed, which adopted multi-row parallel pneumatic needle seed metering device and planet-wheel dibbling seed guiding device. The structure principle of the planter and seed metering device was expounded and the transmission scheme of the whole machine was designed. The planet-wheel dibbling full-constrained seed guiding device was designed emphatically. The structural parameters of planetary gear systems were determined through mechanism analysis. The theoretical analysis and high-speed photography experiment of seed unloading process were carried out to determine the horizontal displacement and influencing factors of seed unloading trajectory, and determine the opening size of inserting apparatus of seed guiding device and the appropriate pressure of seed unloading. The theory and simulation analysis of seed guiding trajectory were carried out to determine the motion law of inserting apparatus and the low-position zero-speed dropping condition, and determine the profile of dropping control cam of seed guiding device. The results of field validation experiment showed that when the negative pressure of seed suction was -4.5 kPa, the positive pressure of seed unloading was 3.0 kPa and the working speed was 0.54 km/h, the qualified rate of seed per hole was 86.2%, the multiple rate was 4.4%, the seed-missing rate was 9.4%, the qualified rate of seed depth was 92.8%, and the qualified rate of hole distance was 93.9%, which met the agronomy requirements of American ginseng planting.

Key words: American ginseng; narrow-row-dense-planting; precision planter; planetary gear train; fully-constrained seed guiding

收稿日期: 2021-11-03 修回日期: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975238、51875229)和湖北省农业科技创新行动项目

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

0 引言

西洋参是具有药用和保健价值的五加科人参属植物,种植经济效益显著^[1-2],其种植有播种后直接采收和播种 1~2 年后移栽再采收两种模式,为提高商品化率,两种模式的播种密度都较大,农艺要求播种行距 50~60 mm,播种株距 100 mm 左右,播深约 20 mm,属于窄行密植精密播种^[3]。因西洋参种子形状不规则、催芽裂口种胚易损伤、播种密集且要求分布均匀,目前生产上缺乏适用播种机械装备,以人工压穴后单粒点播再覆土为主,存在工作效率低、劳动强度大、劳动力消耗多、生产成本高等问题,严重制约了产业发展,迫切需要开发适用西洋参精密播种技术装备。

实现播种行株距均匀一致,精密排种技术是关键,种子平稳运移和精确定位技术是重要保障^[4]。气吸式排种对种子形状适应性强、种子损伤率低、单粒排种精度高,广泛应用于玉米、油菜和马铃薯等宽行距作物精量播种^[4-6]。近年来,国内外学者开展了基于气吸原理的窄行密植作物精密排种技术研究,但存在采用单排吸嘴往复排种效率偏低、采用导种管导种精度不足等问题^[7-9]。全约束导种是实现种子平稳运移和精确定位的主动式导种方式,可应用于播种行株距要求严格的作物精密播种^[10]。

国内外学者对全约束导种装置的研究主要集中在带式 and 单体点播式两种,设计了毛刷带式导种带^[11-12]、输送带式导种带^[13-14]、直插式穴播器^[15]和回转式穴播器^[16-18]等。上述导种装置可实现对种子离开排种器至落入种床土壤运移过程进行全自由度或者仅具有局部自由度的全约束,强制种子保持其有序状态;受制于全约束导种装置单体体积大且结构复杂,难以匹配窄行密植播种农艺要求。

针对上述问题,本文基于前期研制的多行并联气力针式精密集排器^[3],以小型田园管理机为配套动力,设计一种采用多行并联行星轮点播式全约束导种装置的窄行密植西洋参精密播种机,完成起垄、精密排种、平稳导种和覆土作业,以期为西洋参精密播种提供配套技术装备。

1 整机及排种装置结构原理与传动方案设计

1.1 整机结构与工作原理

窄行密植西洋参精密播种机以小型田园管理机(含螺旋起垄装置)为配套动力,主要由汽油旋涡式风机、主机架、驱动装置、导种装置、排种装置、辅助轮及覆土板等组成,其结构示意图如图 1 所示。

播种机主机架前端连接在螺旋起垄装置上,驱

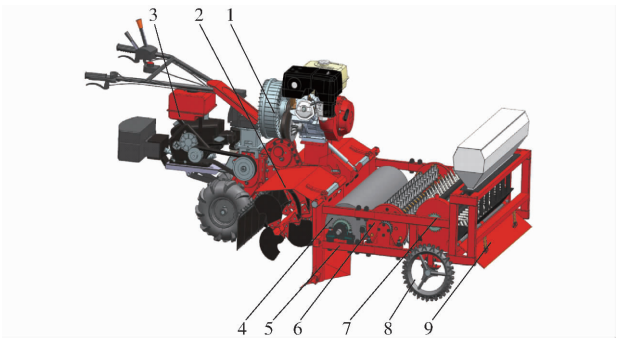


图 1 窄行密植西洋参精密播种机结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of narrow-row-dense-planting precision planter for American ginseng

1. 汽油旋涡式风机 2. 螺旋起垄装置 3. 田园管理机 4. 驱动装置 5. 主机架 6. 导种装置 7. 排种装置 8. 辅助轮 9. 覆土板

动装置、导种装置、排种装置和覆土板前后依次布置在主机架上,一对辅助轮位于主机架后方外侧呈对称布置,用于支撑和辅助机具转移;因小型田园管理机功率较小,选用汽油旋涡式风机^[19]为排种装置提供风压,额定功率 4.1 kW,最大正压为 35 kPa,最大负压为 -25 kPa,风量为 200 m³/h,通过控制节气门开度调节输出功率可调节风压和流量。机具主要技术参数如表 1 所示。

表 1 窄行密植西洋参精密播种机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of narrow-row-dense-planting precision planter for American ginseng

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 560×1 320×1 260
整机质量/kg	380
配套动力/kW	7.5
工作幅宽/mm	1 300
播种行数	16
作业速度/(km·h ⁻¹)	0~1.27
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0~0.165
播种行距/mm	56
播种粒距/mm	100
播种深度/mm	20
垄面宽/mm	860
垄高/mm	150~200

西洋参播种作业时,机具作业状态如图 2 所示。先启动田园管理机与汽油旋涡式风机,螺旋起垄装置对旋耕碎土后平整地表进行螺旋起垄,汽油旋涡式风机为排种装置提供正负气压;驱动装置在田园管理机的牵引下,与起垄面摩擦通过链传动驱动导种装置和排种装置,播种机前进方向如图 2 标识;西洋参种子在自重作用下,由种箱内通过充种管流入充种室,排种装置在负压作用下,排种针从充种室吸种,转动至卸种区,在正压作用下卸种至导种装置

内,完成排种环节;在行星轮系作用下,导种装置接种、运种并成穴投种,完成导种环节;排种装置和导种装置相互配合完成将种子由种箱运移至种床土壤多环节串联过程;覆土板进行种穴土壤回填合拢,完成覆土环节。

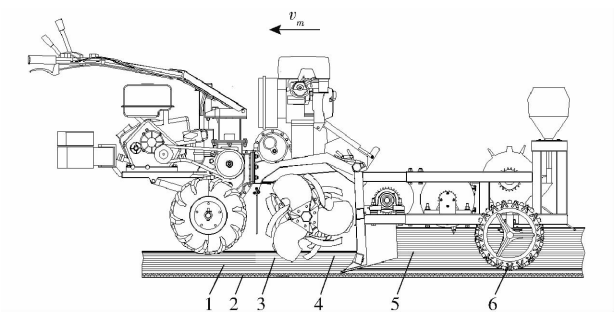


图2 窄行密植西洋参精播机作业状态示意图
Fig.2 Sketch of narrow-row-dense-planting precision planter for American ginseng's working status
1. 已耕地 2. 耕底层 3. 翻耕层 4. 碎土层 5. 垄体层 6. 垄底层

1.2 排种装置结构与工作原理

排种装置作为播种机的核心部件,确保种群有序单粒化,其工作性能直接决定播种机作业质量。采用负压吸种、正压卸种工作原理的气力针式精密集排器^[3],该集排器主要由气室、旋转盘、气流分配管、排种针、排种链轮、排种轴、种箱、充种管和充种室等组成,工作分为吸种、携种和卸种3个过程,其结构如图3所示。

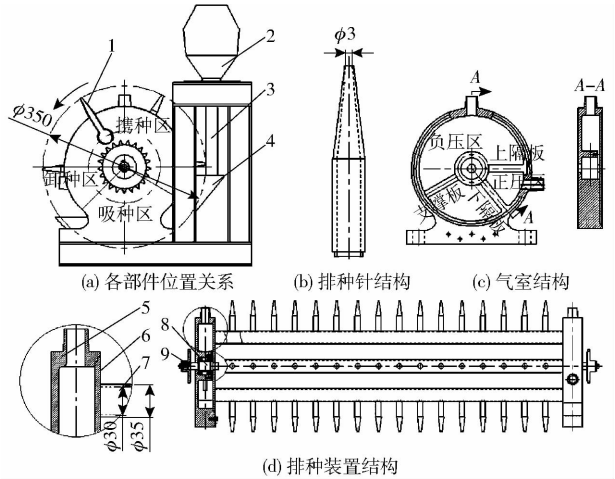


图3 排种装置结构简图
Fig.3 Schematics of seed metering device
1. 排种针 2. 种箱 3. 充种管 4. 充种室 5. 气室 6. 旋转盘
7. 气流分配管 8. 排种轴 9. 排种链轮

集排器为对称结构,左右各一个气室,气室外侧面封闭,气室内腔由气室隔板划分为正压区和负压区,分别与风机吸气端和排气端连通,气室内侧面与旋转盘接触处设计为阶梯型止口,充种室布置在两侧气室间;两侧排种轴分别穿过两侧气室,排种轴外

端连接排种链轮,内端与气室内侧面的旋转盘同轴固定连接,以排种轴所在轴线为中心径向均布6根气流分配管,气流分配管的两端分别固定在两侧旋转盘上,气流分配管上均布用于单粒排种的排种针;即排种链轮、排种轴、旋转盘、气流分配管和排种针组成一刚性连接整体,由左右气室内部的轴承支撑,做旋转运动,气室安装在主机架上固定不动。

根据配套动力、起垄垄面宽度和播种农艺要求,设定播种行距为56 mm,播种行数为16行,即每根气流分配管上相邻排种针轴向间距为56 mm,每根气流分配管上轴向均布16个排种针;排种针包括圆筒部和锥筒部,排种针型孔处吸附面直径为3 mm,排种针型孔处种子运动面直径为350 mm。

排种装置工作时,种箱内的种子在自重作用下经充种管流入充种室,排种链轮带动排种轴、旋转盘、气流分配管和排种针组成的刚性连接整体逆时针旋转,排种针在吸种区负压作用下从充种室单粒吸种,通过携种区转动至卸种区,在自重、正压吹力等作用下卸种至同转速转动的导种装置内。

1.3 传动方案设计

排种装置和导种装置需保持同步同速运转,传动方案示意图如图4所示。驱动链轮、导种链轮与配套传动链组成一级链传动,导种链轮、排种链轮与配套传动链组成二级链传动。驱动装置在田园管理机的牵引下通过一级链传动将动力传递到导种装置,导种装置通过二级链传动将动力传递到排种装置,主要动力传递方式为链传动,总传动比*i*计算公式^[20]为

$$i = \frac{LN}{\pi D_q (1 + \delta)} = i_1 i_2 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1 Z_2} = \frac{Z_3}{Z_1} \tag{1}$$

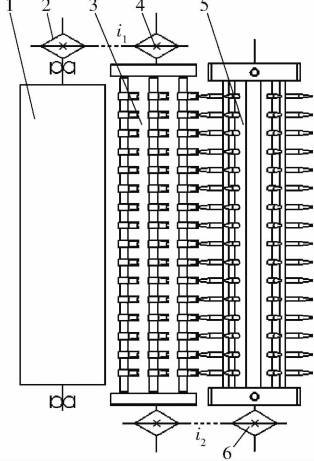


图4 窄行密植西洋参精播机传动方案示意图
Fig.4 Transmission scheme diagram of narrow-row-dense-planting precision planter for American ginseng
1. 驱动装置 2. 驱动链轮 3. 导种装置 4. 导种链轮 5. 排种装置 6. 排种链轮

式中 L ——播种粒距, mm
 N ——径向型孔数
 D_q ——驱动装置直径, mm
 δ ——滑移系数
 i_1 ——驱动装置与导种装置传动比
 i_2 ——导种装置与排种装置传动比, 取 1
 Z_1 ——驱动链轮齿数
 Z_2 ——导种链轮齿数
 Z_3 ——排种链轮齿数

由式(1)可知, 播种粒距与驱动装置直径、总传动比、径向型孔数和滑移系数有关, 可通过改变驱动链轮齿数, 改变驱动装置与导种装置传动比, 实现总传动比改变, 从而调整播种粒距。驱动装置为栅格滚筒, 直径为 250 mm; 滑移系数一般为 0.05 ~ 0.12, 取 0.08^[21]; 播种粒距为 100 mm; 径向型孔数为 6, 可求得总传动比为 0.71。根据总传动比与整机质量, 选定链轮型号为 08B, 各链轮齿数为: $Z_1 = 30, Z_2 = Z_3 = 21$ 。

排种装置的转动由驱动装置通过两级链传动带动, 而驱动装置由田园管理机牵引, 所以在总传动比确定情况下, 播种机前进速度决定排种装置转速, 排种转速需保持一定范围, 因此播种作业时必须严格控制播种机前进速度^[22], 可得

$$\begin{cases} i = \frac{\omega_q}{\omega_p} \\ \omega_q = \frac{2v_m}{D_q(1-\delta)} \times 10^3 \\ \omega_p = \frac{2\pi n_p}{60} \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_m ——播种机前进速度, m/s
 ω_q ——驱动装置角速度, rad/s
 ω_p ——排种装置角速度, rad/s
 n_p ——排种装置转速, r/min

联立式(1)、(2)可知, 播种机前进速度与排种装置转速的关系为

$$v_m = \frac{\pi D_q i n_p (1-\delta)}{6} \times 10^{-4} \quad (3)$$

前期研究可知, 排种装置转速为 12 ~ 18 r/min 时, 可获得相对较优的排种性能^[3], 代入各参数得对应的播种机前进速度为 0.10 ~ 0.15 m/s, 与选用的小型田园管理机作业速度相匹配。

2 行星轮点播式全约束导种装置设计

2.1 结构与工作原理

采用行星轮系工作原理的行星轮点播式全约束导种装置, 主要由导种圆盘、固定轴、惰轮轴、行星轮

轴、导种链轮、插播器、投种控制凸轮和支撑座等组成, 工作分为卸种导种衔接、运种、投种和过渡 4 个过程, 其结构如图 5 所示。

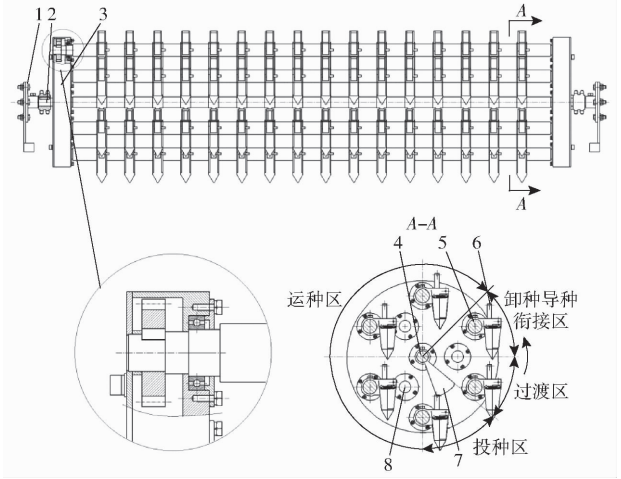


图 5 导种装置结构简图

Fig. 5 Schematics of seed guiding device

1. 支撑座 2. 导种链轮 3. 导种圆盘 4. 固定轴 5. 行星轮轴
6. 插播器 7. 投种控制凸轮 8. 惰轮轴

导种装置为对称结构, 左右各一个导种圆盘, 均由圆盘封盖、行星轮盘(行星架)和行星轮系组成, 圆盘封盖和行星轮盘通过螺钉封闭连接, 内部布置包含 1 个太阳轮、3 个惰轮和 6 个行星轮的行星轮系; 太阳轮与行星轮齿数相同, 惰轮和行星轮均绕太阳轮轴心圆周均布; 左右两侧的太阳轮由 1 根固定轴刚性连接, 固定轴两端通过外侧支撑座固定不动, 固定轴上通过螺钉轴向均布 16 个投种控制凸轮; 左右两侧的 3 个惰轮分别与惰轮轴刚性连接, 通过轴承安装在行星轮盘上; 左右两侧的 6 组行星轮由 6 根行星轮轴刚性连接, 通过轴承安装在行星轮盘上, 每根行星轮轴上通过螺钉轴向均布与排种针对应的插播器。

导种装置工作时, 固定轴与太阳轮固定不动, 导种链轮带动导种圆盘整体逆时针旋转, 带动惰轮和行星轮围绕太阳轮自转和公转; 在行星轮系各齿轮相互啮合下, 惰轮自转方向与导种圆盘转动方向相同, 行星轮自转方向与导种圆盘转动方向相反且大小相等, 从而行星轮和行星轮轴自转和公转相抵消, 转速为 0。行星轮系传动简图如图 6 所示。

2.2 行星轮系设计

为防止齿轮啮合过程发生根切, 直齿圆柱齿轮齿数通常大于 17^[23]。根据设计要求, 太阳轮、惰轮、行星轮齿数 z_1, z_2, z_3 应满足: $z_1 = z_3 \leq z_2$, 且满足同心、均布与邻接要求。根据导种圆盘整体质量、配合及传动要求, 且相互啮合齿轮模数、压力角必须相等, 选定齿厚为 10 mm、模数为 2 mm、压力角为 20°

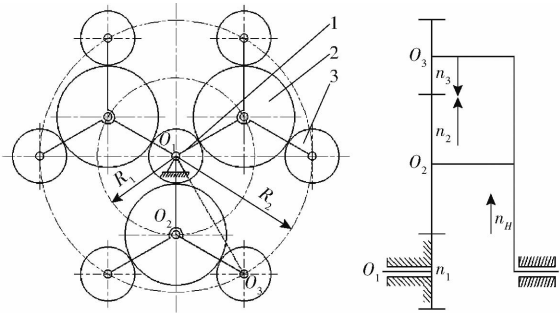


图 6 行星轮系传动简图

Fig. 6 Transmission diagram of planetary gear train

1. 太阳轮 2. 惰轮 3. 行星轮

的直齿圆柱齿轮,各齿轮齿数为: $z_1 = z_3 = 21, z_2 = 39$ 。

根据图 6 几何关系分析可确定中心距与各齿轮参数间的关系为

$$\begin{cases} R_1 = l_{O_1O_2} = l_{O_2O_3} = \frac{M(z_1 + z_2)}{2} \\ R_2 = l_{O_1O_3} = 2l_{O_1O_2} \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}M(z_1 + z_2)}{2} \\ R_3 > R_2 + \frac{Mz_3}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 M ——齿轮模数,mm

R_1 ——惰轮轴轴心与固定轴轴心距离,mm

R_2 ——行星轮轴轴心与固定轴轴心距离,mm

R_3 ——行星轮盘外壁沿半径,mm

将各齿轮参数代入式(4)可得 $R_1 = 60 \text{ mm}, R_2 = 104 \text{ mm}, R_3 > 125 \text{ mm}$,考虑必要的装配间隙、减轻质量及行星轮盘外壁强度要求,确定行星轮盘外壁沿半径 $R_3 = 130 \text{ mm}$ 。

根据周转轮系传动比可得

$$\begin{cases} i_{13}^H = \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_3 - \omega_H} = \frac{z_3}{z_1} \\ i_{21}^H = \frac{\omega_2 - \omega_H}{\omega_1 - \omega_H} = -\frac{z_1}{z_2} \\ i_{2H}^H = \frac{\omega_2}{\omega_H} = 1 - i_{21}^H \end{cases} \quad (5)$$

式中 i_{13}^H ——周转轮系中太阳轮和行星轮传动比

ω_1 ——太阳轮角速度,rad/s

ω_2 ——惰轮角速度,rad/s

ω_3 ——行星轮角速度,rad/s

ω_H ——行星架角速度,rad/s

i_{21}^H ——周转轮系中惰轮和太阳轮传动比

i_{2H}^H ——惰轮和行星架传动比

由式(5)可知行星轮系各齿轮转速为 $n_1 = n_3 = 0, n_2 = 30.77 \text{ r/min}$ 。

假设行星架转速为 n_H ,由于惰轮和行星轮在导

种圆盘的作用下公转转速为 n_H ,可知惰轮自转转速为 $30.77 - n_H$,方向与导种圆盘转向相同;行星轮自转转速为 n_H ,方向与导种圆盘转向相反,自转与公转相互抵消,转速为 0,满足设计要求。

2.3 插播器设计

插播器可完成接种、运种、成穴和投种 4 个环节,主要由固定端、活动端和弹簧 3 部分组成。插播器固定端通过螺钉固定在行星轮轴上,活动端通过轴销与固定端连接,活动端上端设有滚轮,固定端与活动端形成接种口。种子从排种针型孔处卸种,投入插播器内,完成接种。在接种和运种环节,插播器活动端与固定端在弹簧的作用下始终保持闭合状态;在成穴和投种环节,插播器活动端在投种控制凸轮作用下绕轴销转动,快速打开,完成投种;插播器尖端离开土壤后,插播器在弹簧力作用下恢复闭合状态。插播器接种口尺寸与排种装置卸种过程种子水平位移有关,为保证插播器顺利接种,需开展卸种过程种子运动规律和轨迹研究,为插播器结构与尺寸设计提供依据。

2.3.1 卸种过程运动分析

排种针型孔处种子运动轨迹为圆形,与气力滚筒式排种器工作原理相似。假设西洋参种子为尺寸均匀且受力作用于质心的刚性球体,排种针型孔处吸附面附近气流稳定,卸种瞬间种子力学分析如图 7 所示。

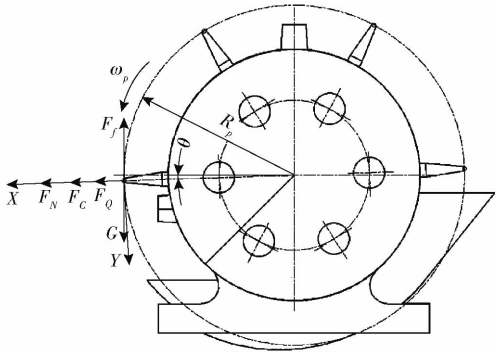


图 7 卸种瞬间种子力学分析

Fig. 7 Seed force analysis of unloading moment progress

卸种瞬间种子应满足的力学方程为

$$\begin{cases} F_Q + F_C + F_N + G \sin \theta = m a_n \\ G \cos \theta - F_f = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} F_Q = \frac{\pi}{4} k \Delta p d_s^2 \\ F_C = m \omega_p^2 R_p \\ F_f = F_N \tan \varphi \\ G = mg \end{cases} \quad (7)$$

式中 F_Q ——卸种瞬间种子所受压差作用力,N
 k ——各因素比例系数,取 0.35 ~ 1.55

Δp ——卸种瞬间排种针型孔处内外压差,Pa
 d_x ——排种针型孔处吸附面直径,0.003 m
 F_c ——种子所受离心力,N
 F_f ——种子受到排种针的摩擦力,N
 F_N ——种子受到排种针的支持力,N
 θ ——卸种角,(°)
 φ ——种子与排种针的滑动摩擦角,取 36.72°
 R_p ——排种针型孔处种子运动圆半径,0.175 m
 m ——种子质量,kg
 G ——种子自身重力,N
 a_n ——法向加速度,m/s²

联立式(6)、(7)可得卸种瞬间种子法向加速度为

$$a_n = \frac{\pi k \Delta p d_x^2}{4m} + \omega_p^2 R_p + g \left(\frac{\cos \theta}{\tan \varphi} + \sin \theta \right) \quad (8)$$

由式(8)可得,卸种瞬间种子法向加速度与种子所受压差作用力、排种转速、卸种角等因素相关。假设卸种瞬间种子法向初速度为 v ,则卸种瞬间种子水平和竖直方向速度为

$$\begin{cases} v_{x_0} = v \cos \theta - \omega_p R_p \sin \theta \\ v_{y_0} = v \sin \theta + \omega_p R_p \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

简化卸种过程受力,假设卸种瞬间种子所受排种针的支持力、摩擦力、离心力和压差作用力瞬间消失,忽略种子脱离排种针时间差,种子受自身重力和空气阻力投入插播器内,因西洋参种子粒径较小且速度较小,可忽略空气阻力,卸种过程种子运动学方程为

$$\begin{cases} L_x = v_{x_0} t_1 \\ L_y = v_{y_0} t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中 L_x 、 L_y ——卸种过程种子在水平和竖直方向运动距离,m
 t_1 ——卸种过程种子运动时间,s
联立式(9)、(10)可得

$$L_x = (\sqrt{(v \sin \theta + \omega_p R_p \cos \theta)^2 + 2 g L_y} - v \sin \theta - \omega_p R_p \cos \theta) \cdot (v \cos \theta - \omega_p R_p \sin \theta) / g \quad (11)$$

由式(11)可知,卸种过程运动轨迹与排种转速、卸种角、排种针型孔处种子运动圆半径等因素相关。在卸种正压区位置和排种针型孔处种子运动圆半径确定的情况下,卸种角与卸种正压有关,则卸种过程运动轨迹主要与排种转速和卸种正压有关,可分为 3 种:当卸种正压相对值较大时,即 $v \cos \theta > \omega_p R_p \sin \theta$,运动轨迹背离种子运动圆切向方向,为正向卸种;当排种转速和卸种正压匹配时,即 $v \cos \theta =$

$\omega_p R_p \sin \theta$,种子水平方向速度相互抵消,运动轨迹竖直向下,为直线卸种;当排种转速相对值较大时,即 $v \cos \theta < \omega_p R_p \sin \theta$,运动轨迹偏向种子运动圆切向方向,为反向卸种。

2.3.2 卸种过程高速摄影分析

由卸种过程运动分析可知,卸种过程运动轨迹与排种转速、卸种正压有关。为观测排种转速和卸种正压对卸种过程种子迁移轨迹与水平位移的影响,根据文献[3]并配合各因素可控范围,确定吸种负压为固定值 -4.5 kPa,排种转速为 12 ~ 18 r/min,卸种正压为 2.5 ~ 3.5 kPa,采用二因素三水平试验方法进行高速摄影试验,试验因素水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平
Tab.2 Factors and levels of experiment

水平	因素	
	排种转速/(r·min ⁻¹)	卸种正压/kPa
1	12	2.5
2	15	3.0
3	18	3.5

试验材料选用威海文登催芽裂口西洋参种子,试验装置如图 8 所示,主要由气力针式精密集排器、美国 Vision Research 公司 Phantom 系列高速摄像机、风机、U 型压差计(量程 5 kPa)、计算机、Visico LED 光源等组成。为方便拍摄和后续分析,选定集排器最外侧一行为拍摄对象,采用 10 mm × 10 mm 标准方格坐标纸为拍摄背景。

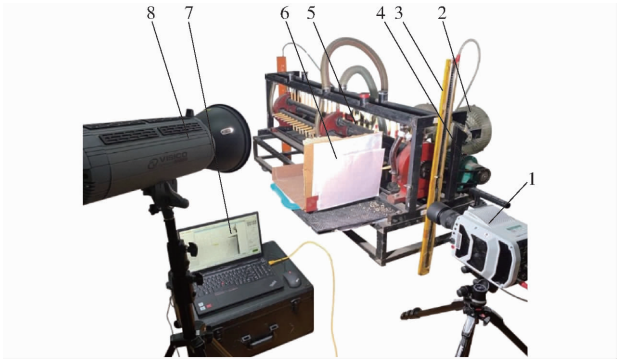


图 8 高速摄影试验装置

Fig.8 Experiment device of high-speed photography

1. 高速摄像机 2. 风机 3. U 型压差计 4. 电机 5. 气力针式精密集排器 6. 坐标纸 7. 计算机 8. LED 光源

设置高速摄像机拍摄速度为 100 f/s(即相邻两帧时间间隔为 0.01 s)、像素分辨率为 2 048 像素 × 1 952 像素、曝光时间为 100 μs,调节光源位置、拍摄距离和角度并校正相机光圈和焦距至画面清晰端正。调整试验参数至指定值,启动高速摄像机并设置录制时间,每组试验工况拍摄 100 粒种子,保存图像和视频文件至计算机端^[24-25]。在高速摄影图像

处理软件 Phantom Camera Control Application 图像界面建立坐标系如图 9 所示,设点 O 位置为坐标原点,将长度单位设置为 mm,角度单位设置为($^{\circ}$),通过 Calibration(校准)功能校准当前视频单位像素代表的实际长度。

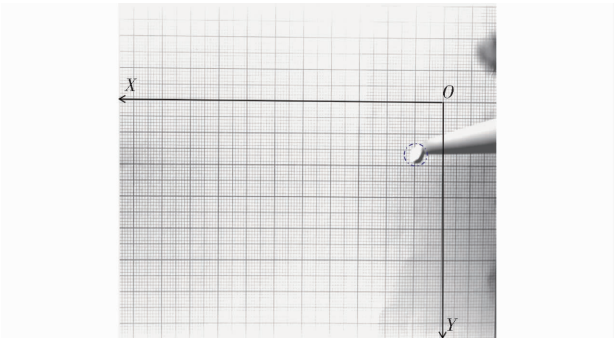


图 9 高速摄影质心点坐标标记

Fig. 9 Centroid coordinate mark by high-speed photography

在排种转速为 12 r/min 和卸种正压为 3.5 kPa (图 10a),以及排种转速为 18 r/min 和卸种正压为 2.5 kPa(图 10b)两种工况(理论极限运动轨迹)下随机选取 1 粒西洋参种子提取每帧瞬时高速摄影图像(共 10 幅),为便于观察,将种子标红处理。由图 10可看出,当下落至坐标系 70 mm 处,即下落高度约 55 mm,图 10a 水平位移为正(正向卸种),图 10b水平位移为负(反向卸种)。

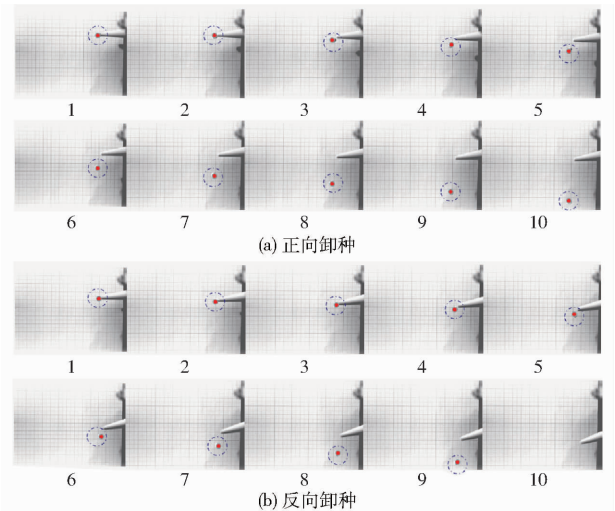


图 10 卸种过程瞬时高速摄影图像

Fig. 10 Instantaneous high-speed photography images of seed unloading process

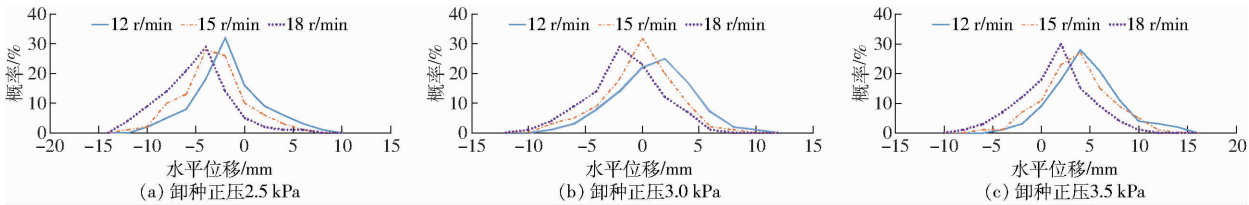


图 11 拍摄结果折线概率分布

Fig. 11 Broken line probability distributions of resulting pictures

受西洋参种子尺寸、形态、吸附姿态差异及质心提取误差等因素影响,同工况下不同种子卸种轨迹曲线呈现出在一定范围内波动,统计各工况下拍摄的 100 粒西洋参种子下落至坐标系 70 mm 处时水平位移,绘制折线概率分布图^[26]如图 11 所示。

由图 11 可知,相同卸种正压条件下,随排种转速的增加水平位移向负方向移动,但移动的幅度并不大;相同排种转速条件下,随卸种正压的增加水平位移向正方向移动,移动的幅度较大;如图 11a 所示,当卸种正压为 2.5 kPa 时,水平位移主要集中在 -10 ~ 0 mm 间,为反向卸种;如图 11b 所示,当卸种正压为 3.0 kPa 时,水平位移主要集中在 -5 ~ 5 mm 间,可实现直线卸种;如图 11c 所示,当卸种正压为 3.5 kPa 时,水平位移主要集中在 0 ~ 10 mm 间,为正向卸种。

当吸种负压为 -4.5 kPa,排种转速为 12 ~ 18 r/min、卸种正压为 2.5 ~ 3.5 kPa、下落高度为 0 ~ 55 mm 时,前后方向水平位移主要集中在 ± 10 mm 以内,因此,插播器接种口前后方向开度应大于 20 mm;卸种过程种子左右方向无作用力,左右方向水平位移可忽略,插播器接种口左右方向开度根据西洋参种子形状尺寸确定,应大于 10 mm。综合考虑,确定插播器接种口尺寸为 12 mm $\times$ 28 mm,保证有足够的空间使西洋参种子顺利投入插播器,增大卸种导种衔接过程可接受区域。

2.3.3 插播器结构尺寸设计

为保证卸种导种衔接过程种子能顺利投入导种装置插播器内,需要确定排种装置与导种装置的位置关系。根据卸种瞬间排种针型孔与插播器接种口中心应位于同一垂线上的位置要求,确定排种导种位置关系如图 12 所示。导种装置插播器最外端运动圆直径为 208 mm,与充种室不存在运动干涉,排种装置和导种装置圆心点水平与竖直距离分别为 296、96 mm。

导种装置为旋转运动机构,在整个周期内运动状态复杂,必须保证各部件不存在相互运动干涉问题。如图 12 所示,卸种导种衔接过程,排种针与插播器回转运动存在运动干涉区域,插播器活动端侧面开有 12 mm $\times$ 24 mm 的排种针避让口。因插播器

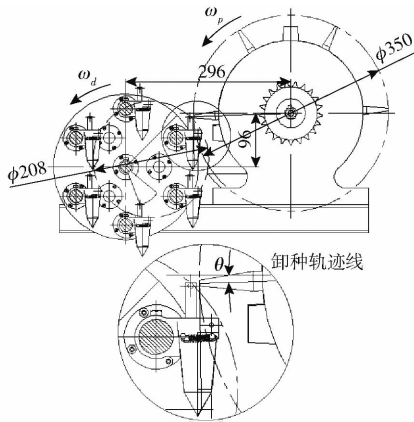


图 12 排种导种装置位置关系图

Fig. 12 Position relation diagram of seed metering and seed guiding devices

尺寸受播种深度、弹簧安装位置和插播器在导种装置相对位置的限制,综合考虑,设计插播器整体尺寸为 60 mm × 20 mm × 95 mm;西洋参播深约为 20 mm,因此设计插播器尖端高度为 18 mm,结构如图 13 所示。

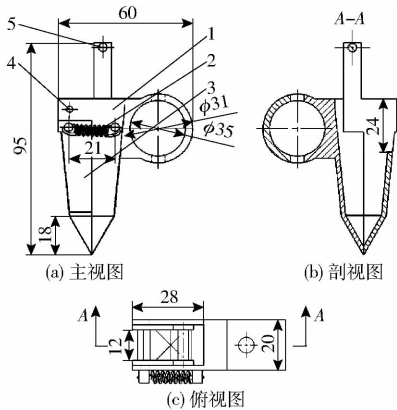


图 13 插播器结构简图

Fig. 13 Schematics of inserting apparatus

1. 固定端 2. 弹簧 3. 活动端 4. 轴销 5. 滚轮

2.4 投种控制凸轮设计

投种控制凸轮的间歇运动可完成在合适的位置与插播器活动端滚轮接触,使其开启至最大开启角后保持开启状态,完成投种作业;插播器旋转至尖端离开土壤后闭合,减少了对土壤的扰动且不易被土壤堵塞,整个过程是连续的。投种控制凸轮的轮廓曲线和安装位置直接影响插播器开闭时间、开闭速率及开启大小,研究导种过程运动规律,确定合适的插播器运动规律是设计合理凸轮轮廓曲线的关键^[27]。

2.4.1 导种过程运动分析

导种装置径向间隔 60°均布 6 组插播器,各组插播器结构及运动特性相同,取其中 1 组插播器尖端点 B 进行运动分析。以固定轴轴心为坐标原点,以播种机前进方向为 X 轴正方向,以过原点垂直向

上为 Y 轴正方向,建立如图 14 所示直角坐标系 XOY,设 t = 0 时,选取的插播器所在的行星轮轴轴心与 Y 轴正方向重合。插播器尖端点 B 运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x_B = v_m t_2 + R_2 \sin(\omega_d t_2) - \Delta x \\ y_B = R_2 \cos(\omega_d t_2) - \Delta h \end{cases} \quad (12)$$

式中 x_B 、 y_B ——插播器尖端点 B 在 t_2 时刻轨迹坐标值, m

ω_d ——导种装置角速度, rad/s

t_2 ——导种装置运动时间, s

Δx 、 Δh ——行星轮轴轴心与插播器尖端水平和竖直距离, m

插播器尖端点 B 在 X、Y 轴方向速度分量为

$$\begin{cases} v_{x_B} = \frac{dx_B}{dt_2} = v_m + R_2 \omega_d \cos(\omega_d t_2) \\ v_{y_B} = \frac{dy_B}{dt_2} = -R_2 \omega_d \sin(\omega_d t_2) \end{cases} \quad (13)$$

则插播器尖端点 B 绝对速度为

$$v_B = \sqrt{v_{x_B}^2 + v_{y_B}^2} = \sqrt{v_m^2 + R_2^2 \omega_d^2 + 2v_m R_2 \omega_d \cos(\omega_d t_2)} \quad (14)$$

插播器尖端点 B 的运动轨迹随速比系数 λ 的不同而有所差异,速比系数计算式为

$$\lambda = \frac{R_2 \omega_d}{v_m} = \frac{2\pi R_2 n_d}{60v_m} \quad (15)$$

式中 n_d ——导种装置转速, r/min

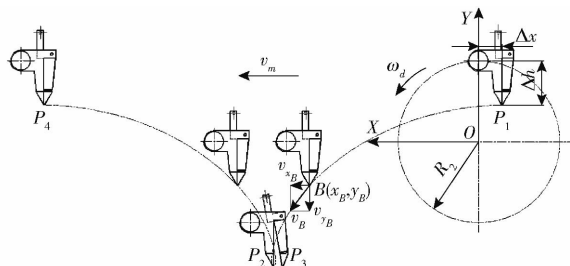


图 14 插播器尖端运动轨迹

Fig. 14 Trajectory of inserting apparatus's tip

由式(15)可知,导种运动轨迹主要与导种装置转速、播种机前进速度和行星轮轴轴心与固定轴轴心距离等因素相关,在行星轮轴轴心与固定轴轴心距离和插播频率确定的情况下, λ 主要取决于播种机前进速度。其中,行星轮轴轴心与固定轴轴心距离为 0.104 m,取导种装置转速为 15 r/min,播种机前进速度为 0.15 m/s,计算可知 $\lambda = 1.09 > 1$,即插播器尖端绝对运动轨迹为余摆线^[28],如图 14 所示。

当 $t_2 = \frac{(2k+1)\pi}{\omega_d}$ ($k \in \mathbf{N}$) 时,插播器插入土壤最深处,插播器尖端线速度方向与播种机前进速度方向相反,存在绝对速度最小值为 $R_2 \omega_d - v_m$,环扣

较小且入土角接近 90° , 穴口小且成穴效果好。

2.4.2 导种过程仿真分析

为探究插播器运动规律和导种装置低位零速投种条件, 利用三维建模软件 UG 建立导种装置三维实体模型, 添加约束建立虚拟装配模型并导入虚拟样机仿真分析软件 ADAMS 中进行运动仿真分析, 设置水平移速为 0.15 m/s , 运动循环周期为 4 s , 即导种装置转速为 15 r/min , 插播器尖端点 B 仿真运动轨迹($P_1P_2P_3P_4$)和速度与加速度曲线如图 15 所示。

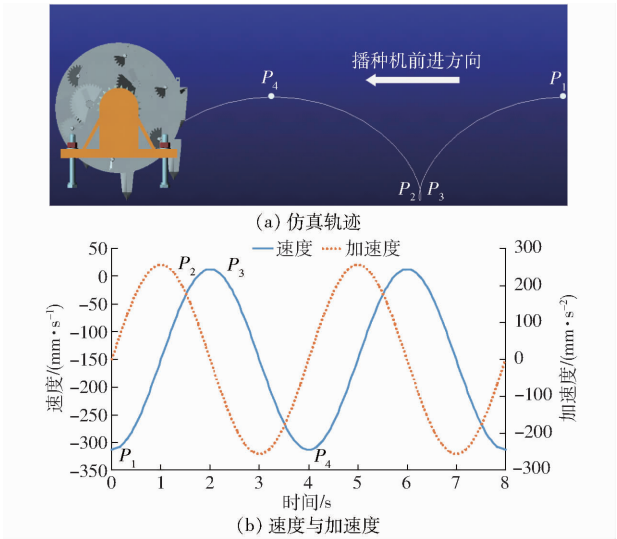


图 15 插播器尖端仿真轨迹和速度与加速度曲线
Fig. 15 Simulation trajectory and velocity and acceleration curves of inserting apparatus' s tip

由图 15 可知, 一个运动循环周期可分为 3 个轨迹段: P_1P_2 段: 插播器从初始相位角 0° 转到 160° , 此阶段插播器处于下降段成穴, 速度由最大值 $R_2\omega_d + v_m$ 逐渐减小至 0。 P_2P_3 段: 插播器从相位角 160° 转到 200° , 此阶段插播器下降至最低点后上升, 速度由 0 逐渐减小至最小值 $R_2\omega_d - v_m$ 后逐渐增大至 0, 此阶段速度接近 0 且处于低位, 在此阶段可基本保证低位零速投种。 P_3P_4 段: 插播器从相位角 200° 转到 360° , 此阶段插播器处于上升段出穴, 速度由 0 逐渐增大至最大值 $R_2\omega_d + v_m$, 进入下一运动循环周期。

一个运动循环周期内存在 2 个速度为零的下降段点 P_2 和上升段点 P_3 , 分别位于运动轨迹最低点环扣两侧最大横弦处。若忽略插播器开启至种子落入种穴时间差, 当插播器在下降段点 P_2 投种时, 插播器开启过程向下运动, 会造成插播器充土堵塞; 当插播器在上升段点 P_3 投种时, 插播器开启过程向上运动, 种子受重力作用落入种穴, 可最大程度降低插播器堵塞和种子与种穴的弹跳滑移。

综合分析仿真轨迹和速度与加速度曲线, 仿真轨迹为余摆线, 与理论轨迹基本一致, 导种装置可满

足平稳导种要求, 初步验证了该装置理论设计的合理性。导种装置低位零速投种条件为: 运动轨迹为余摆线, 即 $\lambda > 1$; 插播器在运动最低点处与投种控制凸轮开始接触, 上升段点 P_3 处完成投种; 插播器尖端在运动到最低点位置应低于起垄面一定的高度, 即播种深度。

2.4.3 投种控制凸轮轮廓设计

插播器在运动最低点处, 投种控制凸轮与活动端开始接触, 以逆时针方向为正, 以圆心 O 到开启段点 a 的连线为起始线 Oa , 圆心 O 到投种控制凸轮轮廓曲线上任意点连线与 Oa 夹角定义为投种控制凸轮转角 α , 插播器固定端与活动端夹角定义为插播器摆角 ψ 。

投种控制凸轮轮廓设计采用反转法, 假设插播器固定在最低点位置, 投种控制凸轮以 $-\omega_d$ 顺时针转动, 设计原理为摆动从动件凸轮机构。根据设计要求, α 与 ψ 最大值分别设计为 30° 与 10° , 投种控制凸轮轮廓曲线设计为推程段 (推程角 α_1 为 $0^\circ \sim 14^\circ$)、远休止段 (远休止角 α_2 为 $14^\circ \sim 26^\circ$)、回程段 (回程角 α_3 为 $26^\circ \sim 30^\circ$) 和近休止段 (近休止角 α_4 为 $30^\circ \sim 360^\circ$), 如图 16a 所示。为避免运动干涉且插播器可在无外力作用下由弹簧力保持闭合, 将投种控制凸轮基圆部分 (近休止段) 去除。

根据运动规律关系图, 采用图解法, 将活动端滚轮中心位置分布点拟合为光滑曲线, 即投种控制凸轮理论廓线, 根据滚轮半径, 作出滚轮圆族包络线, 即投种控制凸轮实际廓线, 投种控制凸轮轮廓曲线示意图如图 16b 所示。其中, a 为插播器闭合状态结束点及开启过程开始点, b 为插播器开启过程结束点及开启状态保持点, c 为插播器开启状态结束点及闭合过程开始点, d 为插播器闭合过程结束点。投种控制凸轮通过螺钉轴向固定在固定轴上, 安装位置为第四象限, 与竖直方向夹角为 20° 。

3 播种机性能试验

3.1 试验材料与方法

为验证窄行密植西洋参精密播种机播种作业效果, 于 2021 年 7 月在武汉市农业科学院设施蔬菜试验基地开展田间播种试验, 土壤类型为沙壤土, 含水率为 14.75% 、坚实度为 261.96 kPa , 播种作业前对地块旋耕碎土整地处理; 试验对象选用威海文登催芽裂口西洋参种子, 千粒质量为 53.26 g , 含水率为 37.90% , 外形尺寸 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 平均值为 $6.24\text{ mm} \times 5.04\text{ mm} \times 3.35\text{ mm}$, 几何平均宽度为 4.72 mm ; 试验机具为窄行密植西洋参精密播种机, 为方便测量数据, 将覆土板拆卸, 吸种负压设定为

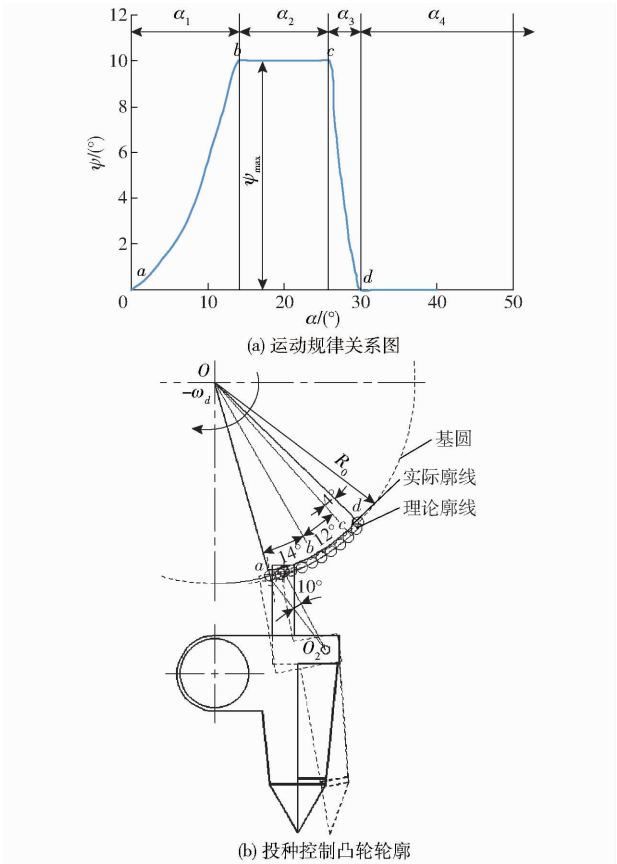


图 16 投种控制凸轮轮廓设计示意图

Fig. 16 Outline design sketch of dropping control cam

-4.5 kPa,卸种正压设定为 3.0 kPa,作业速度设定为 0.54 km/h,理论播种粒距 100 mm,播种 3 垄。

播种作业后随机选取每垄的 6 行作为测量对象,共测量 18 组试验数据,每组数据随机统计中间段工作稳定区域(前后各留 5 m 启停距离)连续 50 种穴内种子粒数并测量种穴距离和播种深度,测量工具为直角钢尺(量程 200 mm 和 1 000 mm)、卷尺(量程 5 000 mm)与纤维皮尺(量程 20 000 mm)等,作业过程如图 17a 所示,播种效果如图 17b 所示。

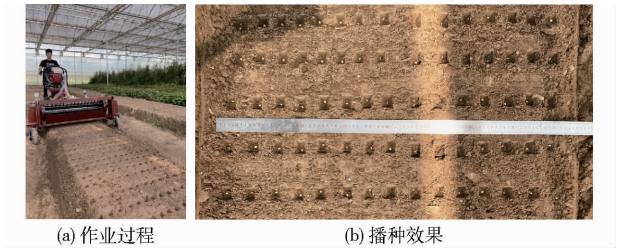


图 17 田间试验

Fig. 17 Field experiment pictures

由于目前我国尚没有关于西洋参播种设备技术检测的国家标准,参照国家标准 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》、农业行业标准 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机作业质量》以及农业行业标准 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》的试验方法和评价指标,主要指标为穴粒数合

格率(1 粒/穴占比)、重播率(大于 1 粒/穴占比)、空穴率(0 粒/穴或未成穴占比)、播深合格率(理论播深 ± 5 mm 占比)和穴距合格率(理论穴距 ± 15 mm 占比),根据测量结果,取平均值,计算各项试验评价指标结果。

3.2 试验结果与分析

田间试验结果表明,样机播种效果良好,行株距播深均匀,穴粒数合格率为 86.2%,重播率为 4.4%,空穴率为 9.4%,播深合格率为 92.8%,穴距合格率为 93.9%,平均播深为 19.71 mm,平均穴距为 103.5 mm,各项试验评价指标均达到设计要求和相关标准要求,满足西洋参精密播种要求。

空穴产生的主要原因有:排种针存在吸种过程漏吸、携种过程种子脱落等原因,导致卸种过程无种子现象;卸种导种衔接失败,种子提前掉落在垄面土壤,后续种穴内无种子。

重播产生的主要原因有:排种针吸种过程吸附多粒种子,顺利携种至卸种区,插播器顺利接种、运种并成穴投种;另外观察到漏播后间隔 5 穴出现重播的现象 2 次,未观察到 3 粒/穴重播的现象,分析可能原因为:前续插播器投种失败,后续接种成功,导致插播器内存在 2 粒种子,顺利运种并成穴投种。

4 结论

(1)设计了一种窄行密植西洋参精密播种机,可一次完成起垄、精密排种、平稳导种和覆土等作业,阐述了播种机和排种装置结构原理,设计了整机传动方案。基于行星轮系运动原理,重点设计了行星轮点播式全约束导种装置,阐述了其结构原理,通过机构分析确定了行星轮系的结构参数。

(2)通过卸种过程理论分析和高速摄影试验,明确了卸种轨迹影响因素和卸种水平位移,结果表明,当吸种负压为 -4.5 kPa、排种转速为 12~18 r/min、卸种正压为 2.5~3.5 kPa 时,前后方向水平位移主要集中在 ± 10 mm 以内,确定插播器接种口尺寸为 12 mm $\times$ 28 mm;当卸种正压为 3.0 kPa、排种转速为 12~18 r/min 时均可实现直线卸种,确定合适卸种正压为 3.0 kPa。通过导种轨迹理论与仿真分析,明确了插播器运动规律和低位零速投种条件,基于反转法设计了投种控制凸轮轮廓。

(3)田间试验表明,当吸种负压为 -4.5 kPa、卸种正压为 3.0 kPa、作业速度为 0.54 km/h 时,设计的播种机穴粒数合格率为 86.2%,重播率为 4.4%,空穴率为 9.4%,播深合格率为 92.8%,穴距合格率为 93.9%,平均播深为 19.71 mm,平均穴距为 103.5 mm,满足西洋参精密播种农艺要求。

参 考 文 献

- [1] CASE M A, FLINN K M, JANCAITIS J, et al. Declining abundance of American ginseng (*Panax quinquefolius* L.) documented by herbarium specimens[J]. Biol. Conservation, 2007, 134(1): 22–30.
- [2] SEN S, CHEN S L, FENG B, et al. Preventive effects of North American ginseng (*Panax quinquefolium*) on diabetic nephropathy[J]. Phytomedicine, 2012, 19(6): 494–505.
- [3] 廖宜涛,郑娟,廖庆喜,等. 正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):46–57.
LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46–57. (in Chinese)
- [4] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(11):38–48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38–48. (in Chinese)
- [5] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1–16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1–16. (in Chinese)
- [6] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术装备研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报,2019,50(3): 1–16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 1–16. (in Chinese)
- [7] 支帅,连政国,王家胜,等. 轴针孔式西洋参气力精密播种机的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(11):83–88.
ZHI Shuai, LIAN Zhengguo, WANG Jiasheng, et al. Design and test of shaft pinhole pneumatic precision drill for *Panax quinquefolium* [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(11): 83–88. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 颜丙新,付卫强,武广伟,等. 基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J]. 农业机械学报,2021,52(2): 44–54.
YAN Bingxin, FU Weiqiang, WU Guangwei, et al. Seed location prediction method of maize high-height precision planting based on satellite positioning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 44–54. (in Chinese)
- [10] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):1–14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1–14. (in Chinese)
- [11] Deere&Company. ExactEmerge™ row unit [EB/OL]. [2021–11–05]. <https://www.deere.com/en/planting-equipment/row-units/exactemerge-row-unit/>.
- [12] Deere&Company. Seed meter assembly for a seeding machine: US 20200120859A1 [P]. 2020–04–23.
- [13] SAUDER G A, DILL K R, DUNLAP D L, et al. Apparatus and method for controlled delivery of seeds to an open furrow: US 20030159631A1 [P]. 2003–08–28.
- [14] 王希英,唐汉,王金武,等. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(11):82–90.
WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82–90. (in Chinese)
- [15] 石林榕,赵武云,杨小平,等. 玉米直插穴播机强排-强启排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2): 41–47.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, YANG Xiaoping, et al. Design and test of metering device with forced seeding and opening for corn direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 41–47. (in Chinese)
- [16] 李沐桐,李天宇,官晓东,等. 旱地回转扎穴式播种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2):48–57.
LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design and experiment of rotary hole seeder for dryland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 48–57. (in Chinese)
- [17] 刘俊孝,王庆杰,李洪文,等. 针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J]. 农业工程学报,2019,35(11):10–18.
LIU Junxiao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and seed suction performance of pinhole-tube wheat precision

- seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 10–18. (in Chinese)
- [18] 侯守印,王升哲,竹筱歆,等. 纤维基地膜侧开式滑切破膜播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10): 155–165.
HOU Shouyin, WANG Shengzhe, ZHU Xiaoxin, et al. Design and experiment of side-open sliding cutting film broken seeding unit based on straw fiber film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 155–165. (in Chinese)
- [19] 邢赫,张国忠,韩宇航,等. 双腔气力式水稻精量水田直播机设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(24):29–37.
XING He, ZHANG Guozhong, HAN Yuhang, et al. Development and experiment of double cavity pneumatic rice precision direct seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 29–37. (in Chinese)
- [20] 王凤花,孙赖,赖庆辉,等. 单行气吸式微型薯精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):66–76.
WANG Fenghua, SUN Kai, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of minituber precision single-row air-suction planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 66–76. (in Chinese)
- [21] 张国忠,张沙沙,杨文平,等. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(8):9–17.
ZHANG Guozhong, ZHANG Shasha, YANG Wenping, et al. Design and experiment of double cavity side-filled precision hole seed metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 9–17. (in Chinese)
- [22] 赖庆辉,曹秀龙,于庆旭,等. 三七压穴精密排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):85–95.
LAI Qinghui, CAO Xiulong, YU Qingxu, et al. Design and experiment of precision seeding device for hole-drop planter for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 85–95. (in Chinese)
- [23] 焦万铭,杨珏,马飞,等. 变速器行星齿轮机构等强度优化设计[J]. 农业机械学报,2015,46(1):359–364,378.
JIAO Wanming, YANG Yu, MA Fei, et al. Equal strength optimal design of planetary gear transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 359–364,378. (in Chinese)
- [24] ABDOLAHZARE Z, MEHDIZADEH S A. Real time laboratory and field monitoring of the effect of the operational parameters on seed falling speed and trajectory of pneumatic planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145(2): 187–198.
- [25] 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(1): 29–37,46.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 29–37,46. (in Chinese)
- [26] 邢赫,臧英,曹晓曼,等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. 农业工程学报,2015,31(12):23–30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23–30. (in Chinese)
- [27] 刘姣娣,曹卫彬,田东洋,等. 钵苗有效零速移栽栽植机构运动学分析与试验[J]. 机械工程学报,2017,53(7):76–84.
LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang, et al. Kinematic analysis and test on transplanting mechanism with effective zero-speed transplanting on mulch film[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 76–84. (in Chinese)
- [28] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.