文章编号:1000-7601(2020)03-0289-10

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.03.38

垄畦覆膜种行覆土党参种苗 移栽机的设计与试验

王军增,孙 伟,王虎存,张 华,刘小龙 (甘肃农业大学机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:针对党参覆膜移栽无机可用的问题,结合西北黄土高原旱区党参垄畦覆膜、种行覆土抗逆栽培模式,设 计了一种具有开沟、播苗、起垄、整形、覆膜、种行覆土功能的党参种苗移栽机。对样机关键部件进行了分析与设计, 确定了尖角长翼型开沟器、整形镇压、膜上覆土等装置的结构及工作参数,解析了核心部件作业机理。田间试验表 明,设计的垄畦覆膜、种行覆土党参种苗移栽机埋苗率为4.1%,露苗率为2.6%,栽植合格率为92.0%,栽植深度合格 率为87.5%,膜边覆土厚度合格率为95.9%,膜边覆土宽度合格率为96.3%,生产率约为0.14 hm²·h⁻¹。田间性能试 验指标均达到国家和行业标准要求,试验结果满足设计要求。

关键词:党参;移栽;开沟器;覆膜;种行覆土

中图分类号:S223.2 文献标志码:A

Design and test of *Codonopsis pilosula* seedlings transplanter with ridge-film mulching and soil-covering in seedling rows

WANG Junzeng, SUN Wei, WANG Hucun, ZHANG Hua, LIU Xiaolong

(College of Electromechanical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In view of the problem that there is no machinery available for transplanting *Codonopsis pilosula*, a transplanter with the functions of ditching, seeding, ridging, shaping, film mulching, and soil-covering in seedling rows was designed in combination with the cultivation mode of ridge-film mulching and soil-covering on seedling rows in consideration of dry stress-resistant of *Codonopsis pilosula* in the arid area of the Northwest Loess Plateau. The key components of the prototype were analyzed and designed. The structure and working parameters of the devices such as opener with sharp angle and long airfoil, shaping and compaction, and soil covering over film were determined. The working mechanism of the core components was analyzed. Field experiments showed that seedling bury percentage of the designed transplanter was 4.1%; exposed seedling percentage was 2.6%; the qualified rate of planting depth was 87.5%; the qualified rate of covering soil thickness on the film edge was 95.9%; the qualified rate of soil covering width on the film edge was 96.3%; and the productivity was about $0.14 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$. The field performance experiment indexes met the requirements of national and industrial standards, and the experiment results met the design requirements.

Keywords: Codonopsis pilosula; transplanter; opener; film mulching; soil-covering on seedling rows

党参作为我国大宗中药材之一,具有补中益 气、健脾益肺之功效,素有"小人参"之美誉。根据 党参对生态环境的要求,其适宜产区在北纬 33°30′ ~36°05′。栽培地气候要求:年平均气温 5℃~8℃、 5 cm 处地温为 33℃,15 cm 处 28℃;无霜期 120~ 165 d,年平均日照时数 1 800 h 以上,年平均降水量 430~600 mm,年平均相对湿度 50%~80%^[1]。随着 野生党参的锐减及市场对党参需求量的日益增加,

收稿日期:2019-08-06 修回日期:2020-04-29

作者简介:王军增(1989-),男,甘肃会宁人,硕士研究生,主要从事现代旱作农机装备技术研究。E-mail:1015411430@qq.com

通信作者:孙伟(1980-),男,甘肃高台人,教授,主要从事现代旱作农机装备技术研究。E-mail:sunw@gsau.edu.en

基金项目:甘肃农业大学科技创新基金(GAU-QDFC-2018-16);甘肃省高等学校科研项目(2017D-13);甘肃农业大学伏羲人才项目 (GAUFX-02J01)

人工种植党参已成为解决党参资源供求矛盾的有效途径。目前,党参全国种植面积 5.4 万 hm²,其中甘肃种植面积 5 万 hm²,甘肃党参的产量和市场占 有率均占全国的 90%以上^[2]。

西北旱区农技工作者把行之有效的传统抗旱 措施和现代科学技术结合起来,创造了垄畦覆膜、 种行覆土党参种苗移栽技术,该模式保证了顺利出 苗和防止烧苗现象的发生,起到提前出苗时间、抗 旱保墒的作用,同时便于机械收挖^[3]。目前,由于 无配套移栽机具,该模式党参移栽主要靠人工完 成,普遍存在党参苗移栽质量不稳定、人工作业强 度大、作业效率低等诸多问题,严重制约了党参生 产的发展^[4+8]。

国外移栽机的研究起步较早,目前移栽技术己 趋于成熟,工作稳定性及可靠性较高[9]。如意大利 Hortus 公司研制的吊杯式膜上移栽机^[10]、美国 Kernico 农机生产公司研制的膜上打穴半自动移栽 机^[11]、日本井关研制的 PVPHR2 型膜上移栽机^[12]、 洋马农机(中国)有限公司研制生产的洋马 PN1 (1W)型蔬菜移栽机^[13]等。上述机型主要用于蔬 菜、烟草、水稻等作物的钵苗垂直移栽,不能满足党 参苗栽植的农艺要求。近年来,国内的相关学者及 农机企业对中药材移栽机进行了大量的研究和推 广,典型研究有:中国农业大学王徐建等[14]研制的 甘草倾斜移栽开沟器、东北农业大学徐高伟等[15]研 制的丹参膜上倾斜移栽机构。经市场调研,甘肃省 内有定西市三牛农机制造有限公司生产的 2BY-6 型中药材根茎播种机、临洮县宏丰机械制造有限公 司生产的 2Z-6/2Z-8/2Z-8 型中药材秧苗栽植机、 甘肃省昱昇农机有限公司生产的 2CY-4/2CY-5/ 2CY-9型根茎作物播种机等,目前,现有的移栽机 无覆膜机构或覆膜后无法进行对行覆土,需要人工 放苗,种植成本相对较高。

本研究针对西北旱区垄畦覆膜、种行覆土党参 种苗移栽农艺要求,设计了一种具有开沟、播苗、起 垄、整形、覆膜、对行覆土等功能的党参种苗移栽 机,并进行了田间试验。

1 党参栽培的农艺要求

图 1 为垄畦覆膜种行覆土党参栽培模式示意 图,垄畦宽度为 1 200 mm,垄畦高为 60~100 mm,行 距为 170 mm,种行覆土厚度为 20~30 mm。为节省 放苗成本,移栽时选用宽度为 1 400 mm、厚度为0.01 mm 的黑色打孔地膜(孔径为 30 mm,两孔中心距为 100 mm)覆盖垄台。为了更好地提高地温,保持土 壤水分,采用种行覆土的方式封堵膜孔。党参移栽时所选参苗长度约为150~200 mm,种苗适宜密度约为25000株・666.7m^{-2[16-17]}。

垄畦覆膜种行覆土党参栽培模式下移栽党参 苗会顺沟平铺至"V"型沟底,移栽过程中需特别注 意播深的调节,播深应以 50 mm 为最佳,播深过大 会严重影响党参出苗率。

2 党参种苗移栽机的整机结构及工作 原理

2.1 整机结构及主要技术参数

图 2 为整机结构简图,主要由机架、松土铲、开 沟器、限深轮、整形镇压装置、覆膜装置、膜上覆土 装置、座椅等部件组成,机架采用方管焊接而成,其 余部件大多采用板件组合设计而成,结构简单,装 配方便。各机构协同工作,保证了整机功能的实现。

参考西北旱区党参种植模式与配套农艺要求, 作业机主要技术参数如表1所示。



1.参苗;2. 黑膜;3. 种行覆土
 1.Codonopsis pilosula seedling; 2. Black plastic film;
 3. Covering soil on seedling row

图1 垄畦覆膜种行覆土党参栽培模式

Fig.1 Cultivation model of codonopsis pilosula with film mulching ridge and covering soil on seedling row



1.机架;2.松土铲;3.开沟器;4.限深轮;5.整形镇压装置;
 6.覆膜装置;7.膜上覆土装置;8.投放口;9.座椅;10. 苗箱安放架
 1. Frame; 2.Soil loosening shovel; 3. Opener; 4. Depth-limit wheel;
 5. Shaping and compaction device; 6. Film mulching device;
 7. Soil covering on film device; 8. Seedling outlet;
 9. Seat; 10. Seedling box rack

图 2 整机结构简图

Fig.2 Structure diagram of whole machine

表 1	主要技术参数
表 1	王要技术参数

Tabl	e	1	Main	technical	parameters
------	---	---	------	-----------	------------

项目名称	参数值	
Item	Parameter values	
外形尺寸:(长×宽×高)/mm	2450×1565×1080	
Dimensions(length×width×height)		
整机质量/kg	165	
Whole machine quality		
配套动力/kW	29.4~44.1	
Power		
作业行数/行	7	
Operation rows	7	
投苗方式	手工投苗	
Mode of seedling fling	Hand seeding	
开沟器形式	尖角长翼型	
Opener type	Long wing with sharp angle	
移栽深度调节范围/mm	50~100 170	
Adjustment range of transplanting depth		
行距/mm		
Row spacing		
生产率/(hm ² ・h ⁻¹)	0.13~0.15	
Production rate		

2.2 工作原理

工作时,党参移栽机通过悬挂机构与拖拉机三 点悬挂架连接,在拖拉机牵引下移栽机开沟器划开 土壤形成种床,侧翼保证回土在种苗落入种床后回 填种沟。栽植人员分别向投放口投苗,由于投放口 及开沟器翼板形成的狭长缝隙,在前进方向上参苗 被平铺于种床。在保证药材品质和产量前提下,参 苗水平移栽可限制其生长深度,便于挖掘作业^[1]。 投苗完成后,整形镇压装置进一步修整垄形,覆膜 装置将膜铺放到已成形的种床上面,完成地膜覆 盖。同时,膜上覆土装置工作,覆土圆盘起土,将一 部分土壤覆盖膜边固定地膜,另一部分土壤被输送 至覆土滚筒,经覆土滚筒内螺旋导土板导向从出土 槽排出,由于每个出土槽正对一个开沟器,确保了 种行覆土。为消除拖拉机轮胎对土壤的压实,两侧 设计了松土铲,深度可根据压实情况调节。此外, 参苗的栽植深度可通过限深轮和拖拉机中央拉杆 共同调节。

3 主要工作部件设计及其参数确定

3.1 尖角长翼型开沟器

开沟器(如图3所示)是移栽机的核心部件,直 接影响到整机的工作性能,本机选用了尖角长翼型 开沟器,其主要由铧尖、土壤分流板、翼板等组成。 其中,土壤分流板、翼板作为一个整体折弯而成,铧 尖经特殊处理后焊接于其上。

开沟器的设计重点是要保证播深稳定且可调, 同时兼顾开沟阻力、回土效果、开沟器的入土和切 土性能等因素。该开沟器选取 3 mm 厚的 65Mn 钢 板制作,并对人土部位进行局部热处理、氧化处理 以提高其耐磨性和抗腐蚀性。计算后得尖角长翼 型开沟器的主要技术参数如表2所示。

3.1.1 开沟器翼板 开沟器工作时,开沟器翼板的 长度发挥着重要作用。设计时若开沟器翼板过长 则会增加开沟器阻力,同时增加制造成本,如果翼 板长度不足,回土会影响种植深度和覆土质量。因 此,要确定合适的翼板长度,设计时将种苗的投放 初速度视为0m·s⁻¹,根据运动学公式可得:

$$\begin{cases} H = \frac{1}{2}gt^2 \\ S = vt \end{cases}$$
(1)

式中,*H*为投种高度,测量取0.8 m;*g*为重力加速度, 取9.8 m·s⁻²;*t*为时间(s);*S*为开沟器水平位移 (m);*v*为水平前进速度,取0.5 m·s⁻¹。

由式(2) 计算可得 *S* = 0.2 m,即种苗落至沟底 时开沟器前进距离为 0.2 m。

为保证种苗覆土质量,设计开沟器时有:种苗 长度 + 开沟器前进距离 < L(如图 3)。



1. 铧尖; 2. 土壤分流板; 3. 翼板

1. Ploughshare point; 2. Soil shunt plate; 3. Opener wing plate

图 3 开沟器结构简图

Fig.3 Structural diagram of opener device

表 2 尖角长翼型开沟器的主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of opener with sharp angle and long airfoil

参数名称 Parameter name	参数值 Parameter value
幅宽 Width(B)/mm	60
铧高 Ploughshare height(H)/mm	460
入土角 Penetration $angle(\alpha)/^{\circ}$	24
隙角 Gap angle(ε)/°	6
斜切角 Oblique-cut angle(γ)/°	35

本机设计时取 L=0.5 m,种苗长度取最大值 0.2 m,工作时栽植人员遵从移栽要求,从投放最前端位置零速投苗,则有 0.2 m+0.2 m<0.5 m;考虑到实际栽植时,栽植人员投放种苗会施加初速度,这样种苗落至沟底时开沟器前进距离将小于 0.2 m。故设计时取 L=0.5 m,满足实际栽植需求。此时,开沟器翼板的长度为 460 mm。

3.1.2 开沟器土壤分流板 开沟器开沟后,土壤对 种苗的覆盖情况直接影响种苗的生长,需要对土壤 颗粒在开沟器上的运动进行分析,分析时将土壤颗粒 视作散粒体,分析接触面上某土壤颗粒,如图4所示。 图4中,土壤颗粒受到分流板的支持力N'及摩擦力 F₀作用。将N'分解为与前进速度方向相同及沿接 触面方向两个分力N'₁、N'₂,设前进速度方向与法线 夹角为δ₁(与开沟器分流板夹角相等),则土壤颗粒 在接触面上滑动时,因切向应力大于摩擦阻力,开 沟器接触面对土壤有滑切作用。土壤颗粒受到的 合力为R,其方向与土壤颗粒的绝对运动相同,土壤 颗粒的运动微分方程为:

$$\begin{cases} M \frac{d^2 x}{dt^2} = N' (\tan \delta_1 - \tan \varphi') \\ M \frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \\ N' = \frac{Mg}{2\tan \alpha'} \end{cases}$$
(2)

式中,M为土壤颗粒质量(kg);g为重力加速度,取 9.8 m·s⁻²; α' 为土壤的自然休止角,取35°; φ' 为土 壤摩擦角,取24°。

土壤颗粒位于分流板位置时在接触面上的速度 v_x 与位移 x 为:

$$\begin{cases} v_x = \frac{gt_1}{2} \times \frac{(\tan\delta_1 - \tan\varphi')}{\tan\alpha'} \\ x = \frac{gt_1^2}{4} \times \frac{(\tan\delta_1 - \tan\varphi')}{\tan\alpha'} \end{cases}$$
(3)

式中, t_1 为时间(s), δ 为开沟器分流板夹角(°)。



图 4 土壤颗粒在土壤分流板及翼板上的运动简图 Fig 4 The movement diagram of soil particles on the soil diversion plate and wing plate

当土壤颗粒运动到边缘后,会沿着开沟器翼板进行运动,受到翼板对颗粒的摩擦力 *F*₁,还有边缘 土层对接触面颗粒的作用力 *F*₂ 及压力 *N*₀,如图 4 所 示,则在翼板位置土壤颗粒的运动微分方程为:

$$M \frac{\mathrm{d}^2 x_1}{\mathrm{d}t^2} = N_0 (\tan\varphi_1 - \tan\varphi') \tag{4}$$

式中, φ_1 为土壤颗粒间摩擦角, 取 25°。

将上一过程的最终状态作为此过程的初始状态,求得土壤脱离开沟器侧板的瞬间速度。

$$v_{x} = \sqrt{\frac{Lg\left[(\tan\varphi_{1} - \tan\varphi') + (\tan\varphi_{1} - \tan\varphi')\sin\delta_{1}\right]}{\tan\alpha'}}$$
(5)

式中,L为开沟器总长度,取0.5 m。

可以看出影响土壤颗粒速度的因素包括:开沟 器分流板夹角δ₁和开沟器总长度L。土壤颗粒回落 过程主要包括土层边缘的土粒下落和自然休止角 范围内土粒下落。这两种土粒落入垄沟时间对党 参苗覆盖有很大影响,文献^[18]表明,边缘土粒接触 沟底的时间要小于休止角范围内的土粒落入沟底 的时间。如图 5 所示,自然休止角范围内的所有土 粒下落,沿着土壤自然休止角 α'的斜面运动。

图 5 中 F_N 为土壤颗粒受到垄沟侧壁的支持力 (N); F_f 为土壤颗粒受到垄沟侧壁的摩擦力(N); M_g 为土壤颗粒受到的重力(N); α' 为土壤的自然休 止角(°)。土壤颗粒离开开沟器翼板时,具有水平 的初速度 v'_x ,自然休止角范围内土壤颗粒下落的位 移方程为:

$$\begin{cases} y = \frac{1}{2}gt_2^2(\tan\alpha' - \tan\varphi_1) \\ t_2 = \frac{x}{v'_x} \end{cases}$$
(6)

式中,t₂为时间(s)。

播种时边缘土壤颗粒落入垄沟,需党参苗先与 沟底接触,边缘土粒落入垄沟时间要大于种苗落入 时间 0.4 s(即 $t_2 > 0.4$ s)。由式(6)可知土壤颗粒 落入沟底时间与初速度 v'_x 有关,再由图 5 可知, v'_x



图 5 土壤颗粒沿坡面运动简图 Fig.5 Diagram of soil particle movement along slope

293

为 v_x 的一个分速度,其夹角为 δ_1 。当沟深取均值 6 cm,自然休止角取 $\alpha' = 35^{\circ}$ 时,得x = 8.6 cm。由式 (5)结论可知,影响初速度 v'_x 的因素为开沟器分流 板夹角 δ_1 及开沟器总长度L,本机设计时取L = 0.5m,将 $t_2 = 0.4$ s代入,综合(5)、(6)可确定 δ_1 ,计算 得开沟器分流板夹角 δ_1 约为66°,因要求 $t_2 > 0.4$ s, 机具制造时 δ_1 取值 60°。

3.1.3 仿真分析 根据式(1)~(6)所确定的各项 参数,综合考虑土壤物理特性及流动性对开沟器设 计的影响,利用 EDEM 模拟开沟器在土壤中的作业 过程,预测农具作业过程中可能存在的问题,优化 设计、节省成本。本文土壤颗粒的基本结构选取球 形块状颗粒,由 EDEM 软件自带的球形颗粒单元进 行土壤模型建立。为保证仿真与实际土壤的一致 性,设置 EDEM 球形填充单元的半径 5 mm,覆膜土 壤颗粒及几何体的离散元模拟参数设置如表 3 所示^[19-20]。

采用 EDEM 2018 软件进行开沟器开沟过程模 拟(图6),仿真过程中建立颗粒工厂先让颗粒充满 土槽,然后设置虚拟党参苗以初速度 0 m·s⁻¹、加速 度 9.8 m·s⁻²的竖直下落,虚拟开沟器以 0.5 m·s⁻¹ 的速度匀速直线运动,此仿真选用 Hertz-Mindlin(no slip)接触模型,仿真总时间设置为 8 s,目标保存间 隔为 0.01 s。待仿真结束后,通过观察仿真结果确 定开沟器翼板长度等核心参数均满足种苗覆土需 求,无亮苗现象。

3.1.4 开沟器强度 开沟器阻力是开沟器设计中 的重要因子,其主要受开沟器类型、结构参数、开沟 深度等因素影响。考虑到党参种植农艺要求,栽植 前已用耕整机械整地。由犁耕牵引阻力的简易经验

表 3 覆膜土壤颗粒及几何体的离散元模拟参数

 Table 3 Discrete element simulation parameters of soil particles and geometry on plastic film

1 0 2	1	
参数 Parameter	土壤 Soil	开沟器 Opener device
密度/(kg・m ⁻³) Density	2600	7850
泊松比 Poisson ratio	0.3	0.3
剪切模量/Pa Shear modulus	5.00×10 ⁷	7.90×10 ¹⁰
恢复系数(与土壤) Restitution coefficient (with soil)	0.6	0.6
静摩擦因数(与土壤) Static friction coefficient (with soil)	0.5	0.5
滚动摩擦因数(与土壤) Dynamic friction coefficient(with soil)	0.4	0.05

公式(7)确定本机牵引阻力为[21]:

$$P = kab \tag{7}$$

式中, P 为牵引阻力(N); k 为犁耕比阻, 取 5 N · cm⁻²; a 为沟深, 取均值 6 cm; b 为沟宽, 取 6 cm。由式(7) 计算可得, 牵引阻力 P 约为 180 N; 选用 3 mm 厚的 65Mn 钢完全满足强度要求。

3.2 整形镇压装置

铺膜种植要求地膜与垄面紧密贴合,如果垄面 不平整或者垄面上存在较大土块都会影响覆膜效 果。为保证垄型和垄面平整、压实覆土提高党参种 苗出苗率,设计了整形镇压装置。

考虑到党参移栽所需覆土量较大,要求覆土严 实,并带有整形功能。而刮板式覆土器具有覆土能 力强、结构简单、刮板角度可调等优点,所以本机选 用了刮板式覆土器。作业时,通过覆土板挤压使土 块破碎,在压紧弹簧预紧力作用下镇压土壤形成垄 形。图7为整形镇压装置结构简图,该装置主要由 覆土板、压紧弹簧、导向杆、拉杆、垫片等部件组成。



1. 梯形块; 2. 復土板; 3. 拉杆; 4. 导问杆; 5. 压紧弹黄; 6. 垫斤
 1. Trapezoidal block; 2. Soil covering plate; 3. Pull rod;
 4. Guide rod; 5. Tightening spring; 6. Gaskets
 图 7 整形镇压装置结构简图

Fig.7 Structural diagram of shaping and compaction device

机具前进时,覆土板贴合地面覆土,当遇到石 子或较大的土块时,自带的压紧弹簧会预紧覆土 板,自动进行仿形以减少机械损伤,从而保护整个 装置。该覆土板采用 5 mm 厚的碳钢板,长 1 225 mm、宽 195 mm,通过将长边两侧各向内 90°弯折 15 mm 提高强度,防止覆土板变形。覆土板上焊有上 下底分别为 50 mm、40 mm,两边长度为 85 mm 的等 腰梯形块,梯形块起到压实种行土壤的作用。

3.3 覆膜装置

地膜覆盖技术是解决西北旱区作物长期缺水 问题的关键性栽培技术。覆膜装置的设计必须考 虑到构件、作业环境、机械性能等因素,依据国家标 准设计制造。图 8 为覆膜装置结构简图,主要由挂 膜杆悬挂架、挂膜杆、展膜辊悬挂架、展膜辊等部件 组成。

装置中挂膜杆悬挂架、展膜辊悬挂架采用5mm 厚的钢板切割而成,挂膜杆、展膜辊分别采用壁厚2 mm、直径28mm和壁厚2mm、直径48mm的无缝 钢管制作。工作时将地膜筒安装在挂膜杆上,展膜 辊将地膜展开铺于垄上完成覆膜作业。

3.4 膜上覆土装置

3.4.1 覆土圆盘及组件 参苗栽植前需用整地机 械耕整土壤,因此,对取土装置入土能力要求不高。 故本机选用普通圆盘取土。图9为覆土圆盘及组件 结构简图,主要由圆盘挂接架、连接管、压紧弹簧及 导向杆、角度调整板、覆土圆盘等部件组成。

所设计圆盘挂接架采用壁厚 3 mm 的 40 mm× 40 mm 的方管焊制,圆柱螺旋弹簧选用 65Mn 碳素 弹簧钢丝,弹簧钢丝直径 2 mm,弹簧外径 16 mm,自 由状态下弹簧的总长为 200 mm。工作时弹簧处于 压缩状态。导向杆选用 Φ13 mm 的碳钢管,其上开



1.挂膜杆悬挂架;2. 挂膜杆;3. 展膜辊悬挂架;4. 展膜辊
 1. Suspension frame of hanging film poles; 2. Plastic film hanging poles;
 3. Suspension frame of unfold film rollers; 4. Unfold film rollers

Fig.8 Structural diagram of film mulching device

有数个小孔用来调整弹簧压缩量,改变预紧力。适 宜的弹簧压力保证了覆土圆盘的人土深度。影响 覆土圆盘作业质量的参数主要有圆盘直径、圆盘偏 角和圆盘倾角^[22]。

圆盘直径 D 取决于最大耕深 a,可根据经验公式(8) 计算:

$$k = D/a \tag{8}$$

式中,D为圆盘直径(mm);k为经验值系数,取2.5;a 为最大耕深,取150 mm。

由式(8)计算可得,D=375 mm,因此,选用覆土 圆盘的直径为 375 mm(实际装配时因产品规格限 制,选用圆盘的直径为 380 mm)。

为保证覆土圆盘的切土、碎土及翻土能力,必 须使得覆土圆盘与前进方向存在偏角α。其值范围 为α=40°~45°,并且随着α角的增大,圆盘切土、碎 土及翻土能力都随之增加,但偏角α过大会增加圆 盘侧向阻力,容易损坏整个机构。综合考虑,本机 选用的圆盘偏角α为40°。

覆土圆盘起到向覆土滚筒内输送土壤的作用, 须具有良好的翻垡能力。因此,覆土圆盘与铅垂面 须存在倾角β。其值范围为β=15°~25°,经田间试 验,本机设计时选择的圆盘倾角β=15°,圆盘在结构 上选用具有多个安装孔的圆盘,图 10 为圆盘倾角、 圆盘偏角示意图。

为保证覆土圆盘顺利完成取土设计了角度调整板,如图 11 所示。角度调整板由 5 mm 厚的小块钢板与 3 mm 壁厚、内径为 18 mm 的小段圆管焊接 而成。焊接时小块钢板与小段圆管留有 40°斜角,钢 板与圆管中心线偏转 15°角,该设计保证了覆土圆盘 的偏角与倾角。覆土圆盘安装时调整圆管上两螺栓, 位置确定后紧固螺栓则覆土圆盘工作角度恒定。



 1.圆盘挂接架; 2. 连接管; 3. 压紧弹簧及导向杆;
 4. 角度调整板; 5. 覆土圆盘
 1. Hanging rack of disc; 2. Connecting pipes; 3. Tightening spring and guide rod; 4. Angle adjustment plate; 5. Soil covering disc 图 9 覆土圆盘及组件结构简图
 Fig.9 Structural diagram of soil covering discs and components







图 11 角度调整板结构简图

Fig.11 Structural diagram of angle adjusting plate

3.4.2 覆土滚筒及组件 图 12 为覆土滚筒及组件 结构简图,主要由滚筒悬挂臂、人土轮齿、螺旋导土 板、出土槽、支撑筋、轴承及圆筒壳体等部件组成。 在滚筒的入口处设有均布的螺旋导土板,能够将取 土圆盘送进的土壤输送到覆土位置,再通过出土槽 漏出,完成种行覆土。

设计选用的滚筒直径为400 mm、长度为1420 mm,滚筒悬挂臂用壁厚3 mm的30 mm×30 mm的 方管制作,为保证滚筒正常旋转,选用半轴与轴承 配合使用,呈两侧对称分布。为保证整个装置的强 度及圆度,装置两侧各设3根辐条,辐条采用Φ10 的普通碳钢,两端分别焊接在半轴及圆筒壳体上。

螺旋导土板在整个装置中起到输送、导流土壤 的作用,并与膜上覆土质量直接关联,其导流效果 与螺旋导土板旋向及均布个数相关^[23]。设计时依 据土壤由外向内输送原理,选用常用组数4,材料选 择2mm厚的普通钢板。土壤由螺旋导土板两侧向 中央输送,每经过一个出土槽口土量就发生递减。 因此,为保证覆土均匀性及封堵膜孔所必需的土 量,需设计适宜的出土槽宽度。经田间试验得出:出



1.滚筒悬挂臂;2. 人土轮齿;3. 螺旋导土板;
 4. 出土槽;5. 支撑筋;6. 轴承;7. 半轴;8. 辐条
 1. Drum suspension arm; 2. Penetration gear teeth; 3. Spiral guide plate;

4. Export soil trough; 5. Support ribs; 6. Bearings; 7. Half axis; 8. Spokes
 图 12 覆土滚筒及组件结构简图

Fig.12 Structural diagram of covering soil drum and components

土槽宽度由外向内呈对称分布,依次设置为40 mm、45 mm、50 mm,其中,中央出土槽宽度设置为60 mm。

覆土滚筒滚动时,滚筒内土壤随滚筒内壁一起 上升并在螺旋导土板的引导下由两侧向中央轴向 移动,遇到出土槽即发生漏土,直至中央出土槽时 全部漏完。本机对称均布 4 组螺旋导土板(取螺旋 导土板最低点时角度为 0°,则每组螺旋导土板运输 土壤的角度范围为 0~90°),选取土壤在螺旋面 *A* 点处于临界滑动状态(螺旋导土板处于 90°位置), 分析土壤沿螺旋导土板 *A* 点切面的螺旋线方向滑 动的基本条件^[25],根据图 13 建立方程(9):

$$\begin{cases} N = F\sin\theta\\ f = N\tan\varphi \end{cases}$$
(9)

式中,F为土壤颗粒随滚筒转动时周围土壤对其挤 压力与重力等沿圆周切向的合力(N);f为A 点螺旋 切线方向滑动时的摩擦阻力(N);N 为挖掘铲对土 壤的反作用力(N);θ为螺旋角(°);φ为土壤与螺旋 导土板的摩擦角(°)。

为使土壤沿着螺旋导土板向下移动,并顺利完成种行覆土,则必须满足如下条件:

$$F\cos\theta > f \tag{10}$$

综合(9)、(10)式可得:

$$\theta < \frac{\pi}{2} - \varphi \tag{11}$$

为了保证土壤沿螺旋导土板轴向顺利滑动,螺 旋导土板上任意一点的螺旋角θ必须满足(11)式, 再综合考虑螺旋导土板表面粗糙度、土壤水分等因 素^[25],取 $\varphi = 20^{\circ}$,故螺旋导土板上任意一点的螺旋 角 $\theta < 70^{\circ}$ 。

设土壤沿螺旋导土板轴向运动时加速度为 *a*,则土壤的运动方程为:

$$ma = N\cos\theta - f\sin\theta \qquad (12)$$

式中,m为土壤质量(kg)。

综合式(9)、(12) 可得:

$$a = \frac{F}{2m} \sin 2\theta - \frac{F}{m} \tan \varphi \sin^2 \theta \qquad (13)$$

忽略其它因素影响,确定轴向输土量是螺旋角 θ 的函数^[26]。分析导土板螺旋角 θ 对加速度*a*的影 响,当*a*取最大值,对应的 θ_1 即为螺旋导土板的最佳 螺旋角。因此对*a*的 θ 求导,并令 $\frac{da}{d\theta} = 0$,求其极大 值即可得到最佳螺旋角 θ_1 。

村 a 的 θ 求导,将
$$\frac{da}{d\theta}$$
 = 0 代入公式(13) 得:
cos2θ - tanφsin2θ = 0 (14)

将 $\varphi = 20^{\circ}$ 代入式(10),解得最佳螺旋角 $\theta_1 = 35^{\circ}$,所以螺旋导土板的螺旋角设计值为 35°。

3.4.3 运输调整装置 为适合西北地区小块地种 植模式,设计了可翻转的膜上覆土装置,机具运输 时采用简单销接的方式将膜上覆土装置垂直固定, 此设计减小了机具长度,解决了运输及地头转弯问 题。翻转后机架与滚筒的相对位置如图 14 所示。

如图 14,滚筒悬挂臂与机架上设有两对配对的 孔,覆土滚筒工作时机架与覆土滚筒销接于 0 位 置,A₁,A₂随地势高低其相对位置不断发生变化。运 输或掉头时 0A₁沿图 14 所示方向与 0A₂重合,机架 与覆土滚筒销接于 A₁(A₂)位置,此时,机具长度减 小,方便运输及转弯。

4 田间试验

4.1 试验条件

2019 年 3 月末在甘肃省定西市陇西县福星镇 庞家岔村进行了田间移栽试验。试验用地为水平梯



图 13 导土板上土壤的受力分析 Fig.13 Force analysis of soil on the spiral batten

田,地块已进行耕翻整地,地表平整,无大土块、秸 秆、杂草等障碍物,地面坡度小于5°,用地土壤类型 为黄绵土。种植面积约为0.6 hm²,土壤平均含水率 为18%,容重为1.03~1.15 g·cm⁻³,土壤坚实度< 280×10³ Pa,空气平均温度约为20℃。作业时选用 的配套动力为东方红454 拖拉机,发动机标定功率 为(12 h)33.075 kW,田间作业情况如图15 所示。

4.2 试验方案与方法

试验完成后,依据标准 JB/T 10291—2013《旱 地栽植机械》和 JB/T 7732—2006《铺膜播种机》对 党参覆膜移栽机性能进行测定。主要试验指标为 党参种苗埋苗率、露苗率、栽植合格率、栽植深度合 格率、膜边覆土厚度合格率、膜边覆土宽度合格率。 同时,检测松土铲、开沟器、限深轮、整形镇压装置、 覆膜装置、膜上覆土装置等关键部件的工作可靠性。



图 14 运输时机架与滚筒的相对位置





(a)党参移栽作业图 Schematic diagram of transplanting Codonopsis pilosula



(b)移栽效果示意图 Schematic diagram of transplanting effect

图 15 田间试验 Fig.15 Field experiment 在试验田随机选择长 50 m 的已种植区域进行 检测,两端预备区域不小于 10 m,拖拉机往返各设 两段测定区域,每段测定区域重复 10 次试验并测得 试验数据,求出 10 次重复试验测定结果的平均值。 其中,埋苗率、露苗率、栽植合格率、栽植深度合格 率的计算方法如式(15)~(20)^[27]:

$$C = \frac{N_M}{N_S} \times 100\% \tag{15}$$

$$E = \frac{N_L}{N_S} \times 100\% \tag{16}$$

$$Q = \frac{N_H}{N_s} \times 100\% \tag{17}$$

$$H = \frac{N_{SH}}{N} \times 100\% \tag{18}$$

$$N_{H} = N - (N_{M} + N_{L})$$
(19)

$$N_s = \operatorname{int}\left(\frac{L}{X}\right) + 1 \tag{20}$$

式中,*C*为埋苗率(%);*E*为露苗率(%);*Q*为栽植合 格率(%);*H*为栽植深度合格率(%); N_M 为埋苗株 数(株); N_L 为露苗株数(株); N_H 为合格株数(株); N_{SH} 为深度合格总株数(栽植深度为h时, h_{-1}^{+2} 为合 格,单位取 cm)(株);N为测定段内的总株数(株); N_s 为测定段内的设计株数(株);*L*为测定段的长度 (cm);*X*为设计株距(cm)。

对机具进行膜边覆土厚度合格率、膜边覆土宽 度合格率试验,在已选定的50m测区内往返的两个 行程上交错选定4个小区内进行,每个小区长度为 5m,在每个小区内均匀布设11个点作为数据采集 点。其中,膜边覆土厚度合格率、膜边覆土宽度合 格率计算公式如下^[28]:

$$\theta = \frac{g_1}{G} \times 100\% \tag{21}$$

式中, θ 为膜边覆土厚度合格率或膜边覆土宽度合 格率(%); g_1 为小区内测定的符合要求的合格点数 量(膜边覆土厚度 $\geq 25 \text{ mm}$ 、膜边覆土宽度 $\geq 35 \text{ mm}$ 即为合格)(个);G为小区内测定膜边覆土厚 度、膜边覆土宽度的总数量(个)。

4.3 试验结果与分析

利用上述测定计算方法,所得党参覆膜移栽机 性能试验结果如表4所示。

由表4可知,本研究设计的垄畦覆膜种行覆土 参苗移栽机通过田间试验测定所得的党参种苗埋 苗率、露苗率、栽植合格率、栽植深度合格率,膜边 覆土厚度合格率、膜边覆土宽度合格率等指标均满 足国家及行业标准要求。经多次试验,样机各机构 运行稳定,除部分机构通过试验做了微调外,其他 无故障发生,可靠性较高。经试验,该机平均生产 率约为0.14 hm²·h⁻¹,可一次性完成开沟、播苗、起 垄、整形、覆膜、覆土作业,大大节约了种植成本。

表 4 田间试验结果

指标 Index	技术要求 Technical Requirement	测试均值 Test mean
埋苗率/% Seedling bury percentage	≤5	4.1
露苗率/% Exposed seedling percentage	≤5	2.6
栽植合格率/% Qualified rate of planting	≥90	92.0
栽植深度合格率/% Qualified rate of planting depth	≥75	87.5
膜边覆土厚度合格率/% Qualified rate of covering soil thickness on the film edge	≥95	95.9
膜边覆土宽度合格率/% Qualified rate of covering soil width on the film edge	≥95	96.3

5 结 论

1)设计了垄畦覆膜种行覆土党参苗移栽机,通 过理论分析及仿真模拟,确定了关键部件技术参数。 尖角长翼型开沟器总长为 500 mm、开沟器分流板夹 角为 60°、覆土圆盘直径为 380 mm、圆盘偏角为 40°、 圆盘倾角为 15°、覆土滚筒螺旋导土板的螺旋角为 35°。

2)田间试验表明,垄畦覆膜种行覆土参苗移栽 机埋苗率为4.1%、露苗率为2.6%、栽植合格率为 92.0%、栽植深度合格率为87.5%、膜边覆土厚度合 格率为95.9%、膜边覆土宽度合格率为96.3%、平均 生产率约为0.14 hm² · h⁻¹,田间性能试验指标均达 到国家和行业标准要求。

参考文献:

- [1] 陈来红.党参地膜高垄平栽技术[J].中国农业信息,2015,(4): 112-114.
- [2] 房惠玲. 甘肃省党参产业技术创新战略联盟成立[N],每日甘肃网-甘肃经济日报,2018-10-23.
- [3] 李红斌,陈学庚,郑炫,等.2ZB-6型膜上移栽机的设计[J].农机化 研究,2014,36(11):137-140,150.
- [4] 范志华,刘文亮,马巍,等.全自动人参精量播种机关键设备的研究 [J].农业与技术,2012,(12):38.
- [5] 武科,陈永成,毕新胜.几种典型的移栽机[J].新疆农机化,2009,(3):12-14.
- [6] 崔巍,颜华,高希文,等.旱地移栽机械发展现状与趋势[J].农业工程,2015,5(2):15-18.
- [7] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等.移栽机械发展现状与展望[J].农业机械 学报,2014,45(8):44-53.
- [8] 王新阳,张亮,李健,等.人参机械化收获设备的研究[J].南方农机,

298

2016,(12):27-28.

- [9] 卢勇涛,李亚雄,刘洋,等.国内外移栽机及移栽技术现状分析[J]. 新疆农机化,2011,(3):29-32.
- [10] 刘存祥,李晓虎,岳修满,等.我国旱地移栽机的现状与发展趋势 [J].农机化研究,2013,34(11):249-252.
- [11] 金潘,刘强.栽植机械的主要类型及性能特点[J].现代化农业, 2012,(3):67.
- [12] Kumar G V P, Raheman H. Vegetable transplanters for use in developing countries: a review [J]. International Journal of Vegetable Science, 2008, 14(3):232-255.
- [13] 陈风,陈永成,王维新.旱地移栽机现状与发展趋势[J].农机化研究,2005,(3):24-26.
- [14] 王徐建,宋建农,刘彩玲,等.甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验 [J].农业工程学报,2016,32(13):16-23.
- [15] 徐高伟,刘宏新,Farman A C,等.丹参膜上倾斜移栽机构设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):78-89.
- [16] 吴美珍,阿力木.鸭嘴式膜上移栽机存在问题及解决方法[J].新疆 农机化,2012,(3):14-16.
- [17] 王成录,陈永刚.党参露头覆膜规范化栽培技术[J].农业与技术, 2018,38(19):113-114.
- [18] 张波屏.播种机械设计原理[M].北京:机械工业出版社,1982,

393-398.

- [19] 戴飞,宋学锋,赵武云,等.全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿 真标定[J].农业机械学报,2019,50(2):49-5,77.
- [20] 石林榕,赵武云,孙伟.基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触 模型和参数标定[J].农业工程学报,2017,33(21):181-187.
- [21] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003,338-339.
- [22] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007,249-254.
- [23] 李革,艾力哈斯木,康秀生,等.地膜播种机螺旋覆土滚筒的参数优 化[J].农业工程学报,2003,19(6):135-138.
- [24] 哈尔滨工业大学理论力学教研组.理论力学(下册)[M].北京:高 等教育出版社,1997,5-8.
- [25] 梅占舰,李骅,齐新丹,等.砂壤土力学特性的测试与分析[J].沈阳 农业大学学报,2018,49(5):605-612.
- [26] 同济大学数学教研室.高等数学(上册)[M].北京:高等教育出版 社,1988,186-198.
- [27] 中华人民共和国工业和信息化部.JB/T 10291-2013 旱地栽植机械 [S].北京:机械工业出版社,2014.
- [28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.JB/T 7732-2006 铺膜播 种机[S].北京:机械工业出版社,2007.

- (上接第288页)
- [5] 唐华俊.农业遥感研究进展与展望[J].农学学报,2018,8(1): 167-171.
- [6] Foerster S, Kaden K, Foerster M, et al. Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 89(3):30-40.
- [7] 刘吉凯,钟仕全,梁文海.基于多时相 Landsat 8 OLI 影像的作物种 植结构提取[J].遥感技术与应用,2015,30(4):775-783.
- [8] Zheng B J, Myint S W, Thenkabail P, et al. A support vector machine to identify irrigated crop types using time-series Landsat NDVI data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 34:103-112.
- [9] 黄双燕,杨辽,陈曦,等.机器学习法的干旱区典型农作物分类[J].
 光谱学与光谱分析,2018,38(10):3169-3176.
- [10] 张喜旺,刘剑锋,秦奋,等.作物类型遥感识别研究进展[J].中国农 学通报,2014,30(33):278-285.
- [11] 贾坤,李强子.农作物遥感分类特征变量选择研究现状与展望[J]. 资源科学,2013,35(12):2507-2516.
- [12] 岳俊,王振锡,冯振峰,等.基于光谱与纹理特征的南疆盆地果树树 种遥感识别研究[J].新疆农业大学学报,2015,38(4):326-333.
- [13] Rodriguez-Galiano V F, Ghimire B, Rogan J, et al. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 67:93-104.
- [14] 张超,乔敏,刘哲,等.基于时序光谱和高分纹理分析的制种玉米田 遥感识别[J].农业机械学报,2018,49(5):1000-1298.
- [15] 姬旭升,李旭,万泽福,等.基于高空间分辨率卫星影像的新疆阿拉 尔市棉花与枣树分类[J].中国农业科学,2019,52(6):997-1008.
- [16] Shao Y, Lunetta, R S. Comparison of support vector machine, neural network, and cart algorithms for the land-cover classification using limited training data points[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 70:78-87.

- [17] Mas J F, Flores J. The application of artificial neural networks to the analysis of remotely sensed data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(3):617-663.
- [18] Gao T, Zhu J J, Zheng X, et al. Mapping spatial distribution of larch plantations from, multi-seasonal landsat-8 oli imagery and multi-scale textures using random forests [J]. Remote Sensing, 2015, 7(2): 1702-1720.
- [19] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45:5-32.
- [20] USGS. Landsat 8 (L8) data users handbook [EB/OL]. (2019-04-01) [2019-08-11], https://prd-wret. s3-us-west-2. amazonaws. com/ assets/palladium/production/atoms/files/ISDS-1574_L8_Data_Users _Handbook_v4.pdf.
- [21] Gilbertson J K, Kemp J, Niekerk A V, et al. Effect of pansharpening multi-temporal Landsat 8 imagery for crop type differentiation using different classification techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 134:151-159.
- [22] Lambert M J, Traoré P C S, Blaes X, et al. Estimating smallholder crops production at village level from Sentinel-2 time series in Mali's cotton belt[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 216:647-657.
- [23] 朱良,平博,苏奋振,等.多时相 TM 影像决策树模型的水稻识别提取[J].地球信息科学学报,2013,15(3):446-451.
- [24] Rodriguez-Galiano V F, Chica-Olmo M, Abarca-Hernandez F, et al. Random forest classification of Mediterranean land cover using multiseasonal imagery and multi-seasonal texture [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121:93-107.
- [25] 赵良斌,曹卫彬,唐春华,等. 新疆棉花遥感识别最佳时相的选择[J]. 新疆农业科学,2008,45(4):618-622.
- [26] 曹卫彬,刘姣娣,马蓉. 新疆棉花遥感监测识别区域的划分[J]. 农业工程学报,2008,24(4):172-176.
- [27] 苏腾飞,刘全明,苏秀川. 基于多种植被指数时间序列与机器学习的作物遥感分类研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(6):219-224.