

气液辅助式肉苁蓉播种机设计与试验

韩长杰¹ 张越¹ 尤佳¹ 刘永萍² 梁佳³ 马旭¹ 毛罕平¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆林业科学院造林治沙研究所, 乌鲁木齐 830052;
3. 巴州良佳农机制造有限公司, 焉耆 841100)

摘要: 肉苁蓉是一种寄生于梭梭、红柳等根部深处的草本植物,因其种子体积小、价格高,且播种时需要附着在寄主植物根系附近,故肉苁蓉机械化播种要求精量排种和深播。根据肉苁蓉农艺种植要求,结合人工播种方式,设计并制作了具备开沟、播种、覆土作业的肉苁蓉播种机。通过分析开沟刀盘的受力状态确定了刀盘主要结构参数及刀片布局形式,按照抛土与覆土体积恒定原则设计了导土罩结构参数,结合有限元分析软件重点对开沟刀盘及主传动轴进行模态分析,并确定了机具工作参数。对照液体喷洒量和作业速度匹配了肉苁蓉播种流量,确定了出种口形式及尺寸范围。以喷口吹送气压与喷种口开度为试验因素,播种均匀性变异系数为试验指标开展田间试验。试验结果表明:当喷口吹送气压为0.2 MPa、出种口开度为1.5 mm时,播种均匀性变异系数为13.50%,且播种深度稳定性系数不小于91.17%,满足当前肉苁蓉的种植农艺要求。

关键词: 肉苁蓉; 开沟播种机; 液体播种

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0291-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Liquid-gas-assisted *Cistanche deserticola* Seeder

HAN Changjie¹ ZHANG Yue¹ YOU Jia¹ LIU Yongping² LIANG Jia³ MA Xu¹ MAO Hanping¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China
2. Institute of Afforestation and Desertification Control, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830052, China
3. Bazhou Liangjia Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd., Yanqi 841100, China)

Abstract: *Cistanche deserticola* is a herbaceous plant that parasitizes deep in the roots of *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima*. Due to its small seed volume, high price, and the requirement that the seeds need to be attached near the roots of host plants during sowing, the mechanized sowing of *Cistanche deserticola* demands precise seed metering and deep sowing. According to the agronomic planting requirements of *Cistanche deserticola* and combined with manual sowing methods, a *Cistanche deserticola* seeder capable of ditching, sowing, and covering soil operations was designed and manufactured. By analyzing the stress state of the ditching cutterhead, the main structural parameters and the blade layout pattern of the cutterhead were determined. Based on the principle of constant volume of soil throwing and covering, the structural parameters of the soil guide cover were designed. Combined with finite element analysis software, modal analysis was mainly carried out on the ditching cutterhead and the main drive shaft, and the working parameters of the machine were determined. The sowing flow rate of *Cistanche deserticola* was matched according to the liquid spraying volume and the working speed, and the form and size range of the seed outlet were determined. Taking the blowing air pressure at the nozzle and the opening degree of the seed spraying port as experimental factors, and the coefficient of variation of sowing uniformity as the experimental index, field experiments were carried out. The results showed that when the blowing air pressure at the nozzle was 0.2 MPa and the opening degree of the seed outlet was 1.5 mm, the coefficient of variation of sowing uniformity was 13.50%, and the sowing depth stability coefficient was not less than 91.17%, which met the current agronomic planting requirements of *Cistanche deserticola*.

Key words: *Cistanche deserticola*; ditching seeder; liquid sowing

收稿日期: 2024-12-09 修回日期: 2024-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(32301720)、新疆维吾尔自治区产业技术体系项目(XJARS-07-06)、新疆维吾尔自治区天山创新团队项目(2021D14010)和新疆维吾尔自治区“三农”骨干人才培养项目(2022SNGGCG032)

作者简介: 韩长杰(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与智能农业装备研究,E-mail: hej_627@163.com

0 引言

肉苁蓉为寄生植物,一般寄生于红柳、梭梭等植物根系深处,通常需要找到寄主植物的根部再进行播种,其独特的生长方式造成了播种困难^[1-3]。近几年新疆地区商品化种植的肉苁蓉均以人工种植为主,通过人工定点挖坑、开沟,再进行播种、覆土,往往由于覆土不及时导致寄主植物根系受到暴晒死亡,严重影响了肉苁蓉的接种率^[4-7]。当前人工种植肉苁蓉仍存在播种效率低、接种率低、成本高、劳动强度大等问题,且肉苁蓉种子尺寸较小,机械化分种、播种困难,导致肉苁蓉的机械化、精量化播种难以实现^[8-9]。

国内已有部分学者对肉苁蓉播种机进行了相关研究。姚国旗等^[10]研制的大芸精量播种机,其使用轮式开沟,周围附有开沟叶片,动力来自拖拉机后输出轴,可实现开沟、播种联合作业,但覆土仍需其他机械或人工来完成;艾白都拉·阿布拉^[11]研制的多功能大芸播种机,通过开沟犁刀进行开沟,除草刀去除杂草,可实现播种、平土、除草、开沟、覆土一体化作业,但其使用机械化分种,仍存在分种困难、深播堵种等问题;何磊等^[12-13]研制的气吸式肉苁蓉播种机,使用开沟齿盘进行开沟,窝眼式排种轮进行分种,最终利用气压将种子吹入种沟内完成作业;尤佳等^[14]设计了一种链式开沟喷式肉苁蓉播种机,其使用链式开沟,将种子与营养液在种箱内混合,喷洒到沟内,由后置的刮土板实现覆土,但链式开沟作业效率较低且深播作业时仍会出现堵种现象;综上所述,现有的肉苁蓉播种机多以机械分种为主,难以解决精量分种、深播堵种等问题,目前尚未有成熟的肉苁蓉播种机在实际生产中广泛应用,亟需研制一种适用于肉苁蓉机械化种植的播种机。

针对新疆地区肉苁蓉机械化种植存在作业效率低、劳动强度大等问题,本文设计一种可实现开沟、播种、覆土一体化作业的肉苁蓉播种机,通过有限元仿真软件对开沟部件工况进行校核,开展田间试验考核该播种机工作性能,并进一步优化、改进,为肉苁蓉播种机的发展提供理论支撑。

1 整机结构与工作原理

1.1 肉苁蓉种植农艺

肉苁蓉的生长依托于梭梭等寄主植物,新疆地区种植梭梭的行距为1 m+4 m,株距为1 m,如图1所示。

播种深度是影响肉苁蓉品质、产量的重要指标,通常将其播种于寄主植物根部外侧200 mm处,播

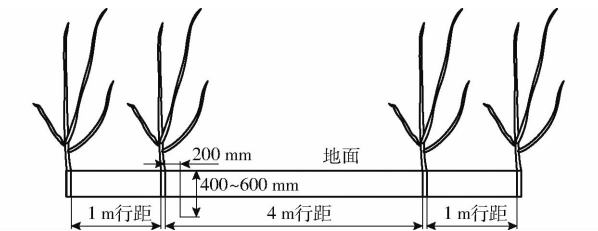


图1 肉苁蓉种植农艺示意图

Fig.1 Agronomy of *Cistanche deserticola* cultivation

种深度为400~600 mm,平均每公顷地播种750~3 750 g^[15],经测量可得,荒漠肉苁蓉种子千粒质量约0.09 g,密度为329.40 kg/m³,平均长度为0.83 mm,平均宽度为0.62 mm。

1.2 整机结构

肉苁蓉播种机主要由种箱、机架、导土罩、变速箱、开沟刀盘、刮土板、输种管等组成,整机结构如图2所示,主要技术参数如表1所示。

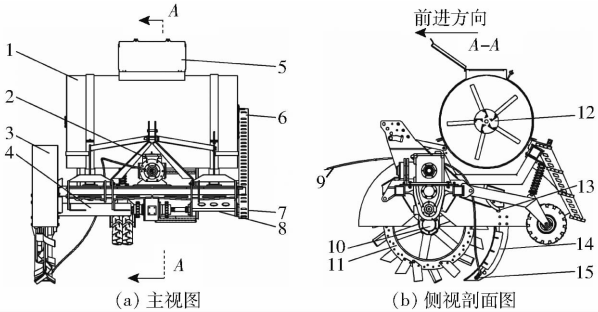


图2 肉苁蓉播种机结构示意图

Fig.2 Schematics of structure of *Cistanche deserticola* seeder

1. 种箱 2. 分动箱 3. 导土罩 4. 传动轴 5. 种箱盖 6. 皮带轮罩壳 7. 传动带轮 8. 机架 9. 气压喷吹管 10. 减速器 11. 开沟刀盘 12. 搅拌扇叶 13. 输种管 14. 刮土板 15. 喷种口

表1 肉苁蓉播种机技术参数

Tab.1 Technical parameters of *Cistanche deserticola* seeder

参数	数值
配备动力/kW	74
整机质量/kg	2 000
开沟深度/mm	0~600
开沟宽度/mm	200
开沟刀盘工作转速/(r·min ⁻¹)	500~600
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 155×2 415×2 245

1.3 工作原理

肉苁蓉播种机在播种作业前,先通过拖拉机后动力输出轴,将动力通过分动箱传递给播种箱内的搅拌装置,使种粒悬浊液搅拌均匀。开沟入土时,由拖拉机后方的三点悬挂装置调节开沟深度,同时开沟刀盘顺时针旋转开沟、抛土,使寄主植物根系裸露出来,刮土板可避免沟底回土并保证种沟平整。播

种时,刮土板后方的出种口将种粒悬浊液喷洒至寄主植物根系裸露处,较为粘稠的种粒悬浊液可保证种子不会脱落到沟底,气压喷吹管可保证喷种口在深播作业时播种流畅,避免发生堵塞。开沟播种后,开沟刀盘抛出的土壤会随刀片旋转向后上方抛出,与导土罩碰撞后落入开好的沟内从而实现覆土,整机可实现开沟、播种、覆土一体化作业。

2 关键部件设计与力学分析

2.1 开沟刀盘

2.1.1 开沟刀盘结构设计

考虑到功耗及整机结构布局,选择单行开沟、播种作业模式,为实现高效开沟并提高刀片对土壤的抛送性能,选用组合式刀片^[16-19]。为保证播种深度,根据肉苁蓉种植的相关文献^[15]并结合新疆阿克苏地区种植肉苁蓉的农艺要求,将刀盘半径 R 设为 600 mm;开沟刀盘主要由轮毂、轮辐、碎土刀片、抛土刀片等部件组成,整体结构如图 3 所示。图中 B_0 为抛土刀片作业宽度,即开沟宽度, B_1 为碎土刀片作业宽度,每间隔 20° 放置 1 把抛土刀片,间隔 120° 放置 1 组碎土刀片。

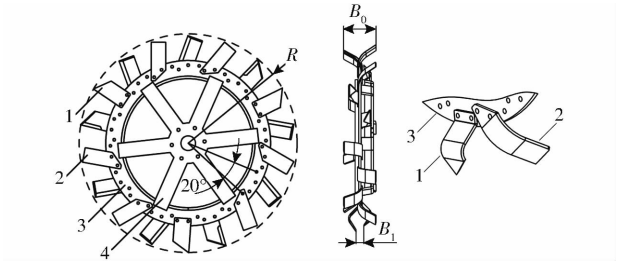


图3 开沟刀盘示意图

Fig.3 Schematic of trenching disc

1. 碎土刀片 2. 抛土刀片 3. 轮毂 4. 轮辐

2.1.2 开沟刀盘结构参数设计与分析

整机作业时,可将开沟过程分为切土、抛土两部分,且抛土量直接影响机具开沟、覆土效果,为此需构建开沟刀盘抛土体积的参数方程。首先求得单把刀片周期内的抛土面积,建立以开沟刀盘运动起点为原点 O ,机具前进方向为 x 轴,垂直地面方向为 y 轴的坐标系。为有效分析整机稳定作业时单把刀片的抛土面积,选 3 把相邻的刀片取其运动轨迹,如图 4 所示。

因刀片旋转轨迹具有周期性,故 P_1 、 P_3 距离与 P_3 、 P_5 距离相等且等于切土节距 s 。根据面积补割法,单把刀片抛土面积等于 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 所围成的平行四边形面积,其抛土面积计算公式为

$$S = sH = \frac{2\pi v_m H}{zn} \quad (1)$$

式中 S ——抛土面积, m^2

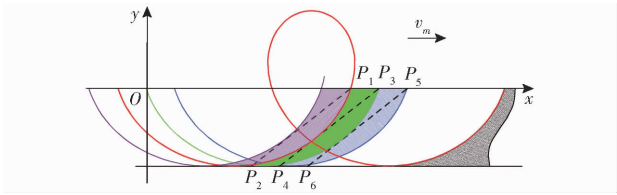


图4 刀片抛土面积示意图

Fig.4 Schematic of blade throwing area

v_m ——机具行驶速度, m/s

H ——开沟深度, m

n ——刀盘转速, r/min

z ——刀片数量

其次求得单把刀片周期内切土宽度 T ,参考文献[20],将刀片作业后切土堡片横截面积假定为平行四边形,可得单把刀片作业宽度为

$$T = l \sin \eta \quad (2)$$

式中 l ——正切刃长度, m

η ——刀具正切面弯折角, rad

最终求得开沟刀盘旋转周期内单把刀片开沟作业时的抛土体积 V 数值解为

$$V = \frac{2\pi v_m H l \sin \eta}{zn} \quad (3)$$

结合式(3)可知,抛土体积 V 主要与开沟深度 H 、刀片正切刃长度 l 、刀片正切面弯折角 η 、机具行驶速度 v_m 、刀片数量 z 等参数有关。在实际生产中,开沟刀盘设计需满足种植农艺、实用性以及通用性要求。参考新疆地区肉苁蓉种植农艺,开沟深度 H 取 400 ~ 600 mm 为最佳;行驶速度 v_m 选用开沟机常用作业参数 1.5 km/h,对应转速为 500 ~ 600 r/min^[21];参考 GB/T 5669—2017《旋耕机械 刀和刀座》,抛土刀片正切刃弯折角取 120° ,正切刃长度取 80 mm,碎土刀片正切刃弯折角取 90° ,侧切刃弯折角取 45° ,正切刃长度取 70 mm;由于刀片数量 z 增加时抛土量会减少,可降低刀片磨损,故安置 12 把抛土刀片,6 把碎土刀片,为避免土壤粘附堵塞,且易于安装,将刀片间隔均布于刀盘两侧。

切削土壤的阻力主要由刃口的切土阻力 F_t 、刀片正切面挤压土壤产生的压土阻力 F_n 、切土时刀片与土壤的摩擦力 f 组成。其中切土阻力 F_t 作用于刃口,方向与切土速度相反,可用经验公式^[22-23]近似表示为

$$F_t = K_c s l \quad (4)$$

式中 K_c 为切土阻力系数,由试验标定获得,与刀片的结构参数、切土速度和土壤的力学特性有关,单位为 Pa。

摩擦阻力 f 与土壤特性和刀片接触面的压土阻力 F_n 有关,压土阻力 F_n 作用方向与刀面法线方向一

致,其主要与土壤特性参数、刀面挤压土阀程度以及
垡片厚度有关,以 K_n 表示土壤的阻力特性,则 F_n 可
用经验公式^[24-25] 近似表示为

$$F_n = \frac{K_n B l \delta n \sin \sigma}{\lambda} \sqrt{R^2 - R B \sin \sigma_0 + \frac{B^2}{4} \cdot \sqrt{1 - 2 \lambda \sin(\omega t) + \lambda^2}}$$

(5)

其中 $\lambda = \frac{Rn}{v_m}$

式中 B ——刀片幅宽, m
 σ ——刀片滑切角, rad
 σ_0 ——刀片安装角, rad
 δ ——垡片厚度, m
 λ ——旋耕速比
 t ——刀盘旋转时间, s
 ω ——刀盘角速度, rad/s

得到切土正压力后可计算出切土摩擦力 f , 计算
式为

$$f = C_\mu A + K_f F_n$$

(6)

式中 C_μ ——土壤黏着系数, Pa
 A ——刀片正切面面积, m²
 K_f ——刀片与土壤的摩擦因数

根据式(1)~(6)可得机具开沟切土时所受阻
力 F 为

$$F = K_c \frac{2 \pi v_m}{zn} l + C_\mu A + K_f F_n$$

(7)

由式(7)可知,肉苁蓉播种机在开沟切土时的
受力除土壤的力学性质外,还与刀面宽幅 B 、刀片滑
切角 σ 、刀片安装角 σ_0 、机具行驶速度 v_m 、刀盘转
速 n 有关。结合上文所设刀片布局将刀片宽幅 B 设
为 80 mm;抛土刀片安装角取 27°,碎土刀片安装角取
5°^[26-27],滑切角取 0°~30°^[28];结合上文分析及对
抛土量的分析,行驶速度 v_m 与转速 n 仍选取
1.5 km/h 与 500~600 r/min。

2.2 导土罩

开沟作业时,开沟刀盘会将土壤抛送至导土罩
内,沿其内壁向后滑落至沟底实现覆土。导土罩的
内部空间尺寸决定土壤在抛送过程中是否流畅,若
空间过大,导土罩在土壤抛送过程中限制作用较小,
导致覆土不集中,需人工二次覆土;若空间过小,土壤
通过性较差,容易堆积在导土罩内壁,从而导致堵塞。

被刀盘抛出的土壤可以看成一束连续的土粒
流,取土粒流中的任一土粒作为分析对象,其运动轨
迹^[29] 可表示为

$$\begin{cases} x = v_0 t_1 \cos \phi \\ y = -\frac{gt_1^2}{2} + v_0 t_1 \sin \phi \end{cases}$$

(8)

其中 $v_0 = 0.7 R n$
式中 v_0 ——土粒抛出速度,通常小于刀盘线速度,
m/s

t_1 ——土粒被抛出时间, s
 g ——重力加速度, m/s²
 ϕ ——抛土方向与水平面夹角, rad

通过计算土粒落点位置可得抛送夹角 ϕ , 计算
式为

$$\begin{cases} H_1 = \frac{1}{2} g t_1^2 \\ x = v_0 t_1 \end{cases}$$

(9)

式中 H_1 ——抛送点与地表之间垂直距离, m

通过式(9)可得出当开沟深度为 600 mm 时,土
壤抛送角为 3.72°,将其代入式(8)可求得土壤运动
轨迹曲线 ab ,如图 5 所示。为保证土壤在抛送中的
流动性,使覆土集中且避免发生干涉,将导土罩尺寸
设为半径 700、1 280 mm 的圆弧组成,导土罩内壁宽
度 L 略大于开沟宽度,取 250 mm。

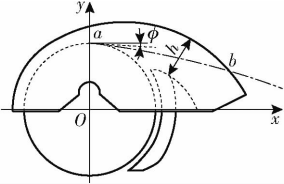


图 5 导土罩示意图

Fig. 5 Schematic of soil guide cover

结合 2.1 节对抛土量的分析可求得当机具前进
速度 v_m 为 1.5 km/h、开沟深度 H 为 600 mm、刀盘转
速为 600 r/min 时开沟刀盘周期内抛土体积 V 。

按照抛土与覆土体积恒定原则设计导土罩的内
部空间尺寸,其中 h 应满足

$$h \geq \frac{V}{v_0 t_0 L}$$

(10)

式中 h ——抛土通道高度, m
 t_0 ——开沟刀盘旋转周期, s

考虑到砂性土壤较为松散,且树根、碎石等杂物
较多,为避免堵塞,将抛土通道高度 h 取略偏大,设
为 250 mm。

2.3 播种装置

2.3.1 播种方式

因肉苁蓉种子体积小、重量轻的物粒特性,常规
的分种方式效果较差,且有农艺试验已表明,使用液
体混合接种成功率远大于撒播、种子纸等播种方
法^[30-31],故采用种子与液体混合喷洒的方式播种。
为使种箱内种子与液体均匀混合,在种箱内安置了
3 组扇叶进行旋转搅拌,如图 6 所示。

2.3.2 种粒悬浊流量分析

为实现播种作业过程中,在保证均匀播种的同

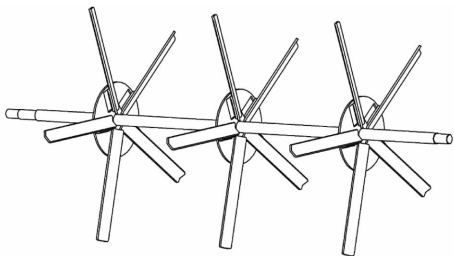


图 6 箱内搅拌扇叶示意图

Fig. 6 Mixing fan blades inside seed box

时控制液体喷洒量,需对播种口处流量进行分析。先求得在一定体积下液体的流速,如图 7 所示, e 为种箱内液面上一点,种粒悬浊液从喷种口 i 处流出,在流线 ewi 上运用伯努利方程可得

$$P_e + \frac{1}{2}\rho v_e^2 + \rho gh_e = P_i + \frac{1}{2}\rho v_i^2 + \rho gh_i \quad (11)$$

式中 h_e, h_i ——点 e, i 至喷种口距离, m

ρ ——液体密度, kg/m^3

P_e, P_i ——点 e, i 处压强, Pa

v_e, v_i ——点 e, i 处流速, m/s

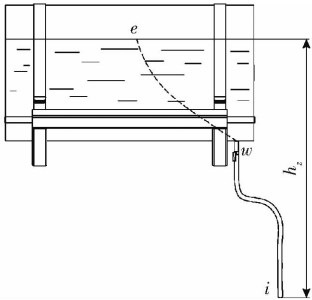


图 7 播种流量分析图

Fig. 7 Seeding flow analysis chart

其中液面上点 e 与喷种口 i 均与大气接触,所以 P_e 等于 P_i 等于大气压 P_0 ,且 h_i 等于 0,种箱内液面表面积远大于喷种口处截面积,根据连续性方程, v_e 可忽略不计。结合以上分析可得点 i 处的液体流速为

$$v_i = \sqrt{2gh_e} \quad (12)$$

则 i 播种口处的流量为

$$Q_i = v_i r^2 \pi \quad (13)$$

式中 Q_i ——播种口 i 处流量, m^3/s

r ——管道半径, m

由式(13)可知,影响喷种口处流量的主要因素为种箱内液面高度与管道半径,参考 GB/T 41628—2022《肉苕蓉培育技术》中机械接种法取播种量 $1\,500\text{g}/\text{hm}^2$,种液比选取 3:5 000,结合新疆地区肉苕蓉种植模式可得液体喷洒量为 $0.8\text{L}/\text{m}$ 。结合预试验与机具行驶速度,将播种管道内壁直径设为 12mm ,种箱出种口 w 与播种口处 i 的垂直距离设为 $1\,000\text{mm}$,可使种箱内液面较低时播种流畅且高效作业。

对喷种口 c_1, c_2 处(图 8b)应用伯努利方程,得

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho v_2^2}{2} \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} - 1 \right) \quad (14)$$

式中 P_1, P_2 —— c_1, c_2 处压强, Pa

v_2 —— c_2 处流速, m/s

A_1, A_2 —— c_1, c_2 处横截面面积, m^2

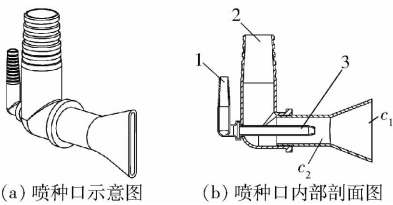


图 8 喷种口结构示意图

Fig. 8 Schematics of seed injection port

1. 进气口 2. 进种口 3. 喷吹装置

由式(14)可知,当 c_2 处横截面面积一定时, c_1 处横截面面积越小,喷种口处喷洒压力越大。结合预试验发现,当喷种口开度大于 3.5mm 时,喷出液体形态为柱状,喷洒面积相对较小,喷种口开度小于等于 3.5mm 时,喷出液体形态为雾状,喷洒面积相对较大。因此,根据肉苕蓉种子的物粒特性,选取喷种口开度 $d(1.0 \sim 3.5\text{mm})$ 作为播种性能试验因素。

由于深播作业时喷种口不可避免地会与砂土接触,容易与其粘连导致堵种,种粒悬浊液在重力作用下难以冲破砂土与种粒悬浊液粘连处。为此在喷种口添设喷吹装置(图 8),通过气流辅助喷吹,解决堵种的同时可以使肉苕蓉种子与寄主植物根系更接近,进一步增加接种成功率。通过预试验选用不同气压进行调试可知,当喷口吹送气压为 $0.15 \sim 0.20\text{MPa}$ 时,播种效果较优,故将其选为播种性能试验因素。

3 模态仿真

由于整机结构重心偏向刀盘一侧,在转速波动、外界激振力作用下,容易使整个刀盘传动系统产生振动、弯曲,其主要影响因素是转子系统的结构设计以及材料的选择,当转子系统转动频率接近其固有频率时会引起整个结构的共振。需通过模态仿真计算出转子系统的固有频率以避免整机在作业时由转速过高引起共振与变形。

3.1 模型建立与预处理

因转子系统模型较为复杂,将模型进行简化,并主要对刀盘以及主要传动轴进行仿真。通过三维建模软件对开沟刀盘、齿轮箱、联轴器等建模,如图 9 所示。

将模型导入有限元分析软件后进行划分网格,考虑到均衡精度与效率,将网格尺寸设为 15mm ,再对不同特征区域进行调整、加密,以提高网格质量。

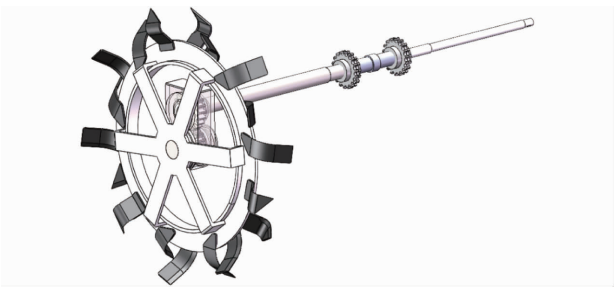


图9 刀盘及传动轴仿真模型

Fig.9 Simulation model of cutter and transmission shaft

划分结果为数量 191 947,单元数量 104 093。根据实际应用情况对各个零部件建立接触来模拟作业时的装配情况,将齿轮箱作为固定支撑,转速范围选取 0 ~ 600 r/min,材料选择如表 2 所示^[32-34]。

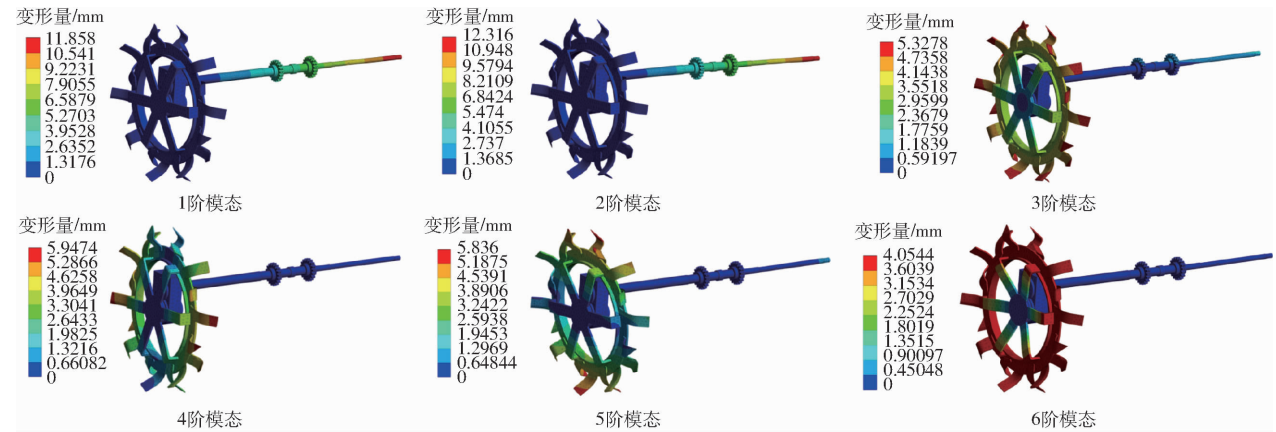


图10 模态分析结果

Fig.10 Modal analysis results

表3 刀盘转子各阶振动形式分析

Tab.3 Analysis of vibration forms of each order of cutter head rotor			
阶次	振型特征	模态频率/Hz	危险因素
1	绕 y 轴扭曲	15.39	传动轴末端出现位移最大值
2	绕 y 轴扭曲	23.33	传动轴末端发生形变
3	绕 y 轴扭曲	27.74	刀盘外围发生形变
4	绕 z 轴扭曲	42.36	刀盘绕 z 轴扭转
5	绕 x 轴扭曲	44.72	刀盘绕 x 轴扭转
6	沿 x 轴方向前后拉伸	52.37	刀盘整体发生最大变形

为避免共振,通常要求激振频率 μ 与固有频率 μ_1 满足 $\mu < 0.7\mu_1$ 或 $\mu > 1.4\mu_1$ ^[35],由图 10、表 3 可知,刀盘转子系统的最低和最高固有频率分别为 15.39 Hz 和 52.37 Hz,激振频率应小于 10.78 Hz 或大于 73.31 Hz,而工作要求转速范围为 150 ~ 600 r/min,所产生的频率范围为 2.5 ~ 10 Hz,不会与开沟刀盘产生共振,满足工作要求。

4 试验

4.1 试验条件及设备

肉苁蓉播种机田间试验于 2024 年 5 月在新疆

表2 开沟刀盘及传动轴材料参数			
Tab.2 Material parameters of trenching cutter head and transmission shaft			
零部件名称	材料	杨氏模量/Pa	泊松比
开垦刀片	45Mn	2.1×10^{11}	0.28
碎土刀片	Q345	2.0×10^{11}	0.3
传动轴	C45	2.09×10^{14}	0.269
齿轮箱	HT150	1.1×10^{11}	0.28
齿轮、刀盘架、联轴器	40Cr	2.0×10^{11}	0.24

3.2 仿真分析

配置材料后对其前 6 阶模态进行求解,查看模态仿真结果,得到刀盘及传动轴主要振型及模态,如图 10、表 3 所示。

阿克苏地区沙雅县荒漠植物示范点进行。试验田土壤性质为砂土,试验前测得地表含水率为 5% ~ 8%,地下 500 mm 左右含水率为 11% ~ 19%,土壤坚实度为 710 ~ 2 160 kPa(与滴灌管放置的位置有关)。选用荒漠肉苁蓉种子进行试验,液体选用清水、2,6-二甲氧基对苯醌、腐植酸膜、ABT 生根粉、红糖混合,比例为 1 000:0.02:30:50:10,种液混合比为 3:5 000^[31]。试验设备主要包括自主研发的肉苁蓉播种机、时风 1004 型拖拉机、土壤坚实度仪、UNIT-T 型转速计、气压调压阀、卷尺、钢板尺、电子秤等,田间试验情况如图 11 所示。



图11 肉苁蓉播种机田间试验

Fig.11 Field test situation of *Cistanche deserticola* seeder

4.2 试验方法

通过上文对播种部分的分析,选用喷口吹送气压、喷种口开度作为试验因素(表 4),播种均匀性变

异系数作为试验指标开展播种试验。因肉苁蓉种子尺寸较小,播种到土壤里难以观测,无法对播种试验做到直观反映,试验时使肉苁蓉播种机以正常作业速度运行,将种子喷洒在一条垂直白色纱布上,按照 5 cm 为一个节点划分竖状区间,在机具行驶稳定后取中间段 50 cm,数出区间内的种子数量,得到样本 X_1 ,如此重复得到 10 个样本 $X_1 \sim X_{10}$,并统计、计算其播种均匀性变异系数。

表 4 试验因素水平
Tab.4 Factors and levels

水平	因素	
	喷种口开度 A/mm	喷口吹送气压 B/MPa
1	1.0	0.15
2	1.5	0.20
3	2.0	
4	2.5	
5	3.0	
6	3.5	

使拖拉机悬挂肉苁蓉播种机将开沟刀盘入土深度调至 450 mm,以播种深度稳定性系数为试验指标在田间进行播种深度试验。在作业区域随机选取 4 个测区,长度为 5 m,每个测区随机选取 5 个测点,测点位置远离地头,以地表为基准,分别测量其开沟深度、播种深度,计算播种深度变异系数、播种深度稳定性系数。

4.3 试验结果与分析

试验测得不同水平下播种均匀性变异系数如表 5 所示。

表 5 播种均匀性变异系数试验结果
Tab.5 Test results of coefficient of variation of seeding uniformity

喷种口开度/mm	喷口吹送气压/MPa	变异系数/%
1.0	0.15	25.62
1.5	0.15	21.49
2.0	0.15	18.96
2.5	0.15	19.69
3.0	0.15	22.48
3.5	0.15	28.82
1.0	0.20	25.40
1.5	0.20	13.50
2.0	0.20	16.57
2.5	0.20	19.35
3.0	0.20	20.10
3.5	0.20	28.09

根据表 5 可知,肉苁蓉播种机在不同喷口吹送气压、喷种口开度下播种均匀性变异系数均不大于 28.82%,且较优组合为喷口吹送气压 0.2 MPa、喷种口开度 1.5 mm,对应播种均匀性变异系数为

13.50%,满足新疆地区荒漠肉苁蓉种植需求,故将其选为播种作业参数。

播种作业过程中测得机具正常作业平均前进速度为 0.4 m/s,整机停靠在地头时使开沟刀盘空转,使用转速仪对其转速进行测量,当转速达 600 r/min 时并无共振发生,故将刀盘旋转速度设为 500 ~ 600 r/min。将 1 000 kg 种粒悬浊液装入种箱中,其中包含 600 g 荒漠肉苁蓉种子,整机正常行驶速度下可播种作业 1.2 km,约 0.4 hm²,符合 GB/T 41628—2022《肉苁蓉培育技术规程》中播种量 1 500 g/hm² 要求。作业过程中观察开沟、播种痕迹,沟内播种并无断条现象,播种范围均有寄主植物根系,且覆土流畅,播种深度稳定性试验结果如表 6 所示。通过分析可知,当开沟刀盘入土深度为 450 mm 时,最大平均播种深度为 447.4 mm,最小平均播种深度为 437.2 mm,播种深度变异系数不大于 8.83%。

表 6 播种深度稳定性试验结果
Tab.6 Stability test results of sowing depth

测区 序号	平均开沟 深度/mm	平均播种 深度/mm	播种深度 合格率/ %	播种深度 变异系 数/%	播种深度 稳定性系 数/%
1	458.6	437.2	100	8.79	91.21
2	464.0	445.0	100	8.83	91.17
3	485.0	447.4	100	8.56	91.44
4	450.8	438.4	100	7.78	92.22

综合上述分析可知,实际播种深度虽有波动,但波动范围较小,均满足荒漠肉苁蓉种植农艺要求的播种深度^[15],符合 GB/T 41628—2022《肉苁蓉培育技术规程》标准中机械化开沟深度应达到 400 ~ 600 mm 与播种量 1 500 g/hm² 的要求,且拖拉机后输出轴转速为 760 r/min 时,开沟刀盘转速可达到 600 r/min 稳定作业,能有效提高作业效率,适用于新疆地区肉苁蓉机械化种植。

5 结论

(1)建立了开沟刀盘抛土体积参数方程,并通过建立开沟刀盘开沟时的力学模型,得到开沟刀盘及刀片的受力与其结构参数之间的函数关系;按照抛土与覆土体积恒定原则确定了导土罩结构参数;通过分析液体喷洒量与机具行驶速度的关系确定了播种流量,借助预试验确定了出种口形式及尺寸范围,并通过添设气体喷吹装置解决了深播作业堵种的问题。

(2)利用有限元仿真软件对开沟部件及传动轴进行模态仿真分析,将开沟刀盘转速设为 0 ~ 600 r/min,求解其 6 阶模态对应的固有频率,得到共振频率范

围为 15.39 ~ 52.37 Hz,不会产生共振。

(3)分别进行了播种均匀性与播种深度稳定性试验,试验过程中,肉苁蓉播种机出种流畅,播种效果良好。试验表明:肉苁蓉播种机在喷口吹送气压为 0.2 MPa、喷种口开度为 1.5 mm 时,播种均匀性变异系数为 13.50%,且播种、覆土流畅,均未发生堵塞;平均开沟深度可达 485 mm,播种深度稳定性系数不小于 91.17%,播种深度满足新疆地区肉苁蓉种植农艺要求,深播作业稳定可靠。肉苁蓉播种机满足 GB/T 41628—2022《肉苁蓉培育技术规程》中机械化播种的要求,适用于新疆地区肉苁蓉机械化种植。

参 考 文 献

[1] 葛廷进,吕瑞恒,王峰,等. 新疆北部管花肉苁蓉栽培技术[J]. 陕西林业科技, 2021, 49(3): 110 – 112.
GE Tingjin, LÜ Ruiheng, WANG Feng, et al. Cultivation techniques of *Cistanche tubulosa* in Northern Xinjiang[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2021, 49(3): 110 – 112. (in Chinese)

[2] 赵志信. 和田管花肉苁蓉产业现状及发展对策[J]. 现代农业科技, 2019(9): 72 – 73.

[3] 刘燕燕. 梭梭人工造林及肉苁蓉人工栽培技术[J]. 乡村科技, 2019(35): 98 – 99.

[4] 达世彩. 张掖市肉苁蓉产业发展现状及对策建议[J]. 现代园艺, 2014(7): 32, 114.

[5] 孔维亮. 阿拉善肉苁蓉产业化问题研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014.
KONG Weiliang. Study on the problem of cistanche industry in Alashan banner[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[6] 帕尔哈提·吾吐克,迪丽拜尔·吾吐克,地力木拉提. 新疆肉苁蓉种植技术现状及推广与应用[J]. 新疆林业, 2006(3): 34 – 35.

[7] XU Rong, CHEN Jun, CHEN Shilin, et al. *Cistanche deserticola* Ma cultivated as a new crop in China[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 56(1): 137 – 142.

[8] 翟明,范吉平,李天林. 梭梭林栽培及肉苁蓉种植技术[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(5): 34 – 36.

[9] 闫自明. 肉苁蓉人工种植技术研究[J]. 农业开发与装备, 2020(3): 201 – 205.

[10] 姚国旗,王峰,张军. 大芸精量播种机:201220727527.0[P]. 2013 – 08 – 31.

[11] 艾白都拉·阿布拉. 多功能大芸播种机:201020132886.2[P]. 2010 – 12 – 22.

[12] 何磊,刘向新,张军,等. 气吹式肉苁蓉播种机的设计[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 151 – 154, 158.
HE Lei, LIU Xiangxin, ZHANG Jun, et al. Design of air blowing cistanche seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(5): 151 – 154, 158. (in Chinese)

[13] 何磊,李智勇,刘向新,等. 2BR – 1 肉苁蓉播种机的研制与应用[J]. 新疆农垦科技, 2014, 37(10): 29 – 30.

[14] 尤佳,杨文奇,韩长杰,等. 喷酒式肉苁蓉接种机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 255 – 259, 268.
YOU Jia, YANG Wenqi, HAN Changjie, et al. Design and test of sprayed *Cistanche deserticola* seeder[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 255 – 259, 268. (in Chinese)

[15] 翟明,李天林. 荒漠肉苁蓉种植穴位与接种率解析[J]. 现代园艺, 2023, 46(10): 35 – 36, 39.

[16] JAFAR H A, SURENDRA S. Optimization and evaluation of rotary tiller blades: computer solution of mathematical relations[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 1 – 7.

[17] 康建明,李树君,杨学军,等. 圆盘式开沟机作业功耗仿真分析及试验验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 8 – 15.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Experimental verification and simulation analysis on power consumption of disc type ditcher[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 8 – 15. (in Chinese)

[18] 秦宽,梁小龙,曹成茂,等. 茶园切抛组合式开沟刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 74 – 82.
QIN Kuan, LIANG Xiaolong, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of combined cutting and throwing ditching blade for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 74 – 82. (in Chinese)

[19] 曾熠,蒋啸虎,吴明亮,等. 基于 DEM – MBD 的油茶林分层切抛式开沟刀组研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 30 – 42.
ZENG Yi, JIANG Xiaohu, WU Mingliang, et al. Development of the layered cut and throw ditching blade groups for oil tea forest based on DEM – MBD[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(8): 30 – 42. (in Chinese)

[20] 郑侃,李宇飞,夏俊芳,等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向往复土刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 63 – 73.
ZHENG Kan, LI Yufei, XIA Junfang, et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 63 – 73. (in Chinese)

[21] 王少伟,李善军,张衍林,等. 山地果园开沟机倾斜螺旋式开沟部件设计与优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 11 – 22.
WANG Shaowei, LI Shanjun, ZHANG Yanlin, et al. Design and optimization of inclined helical ditching component for mountain orchard ditcher[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(23): 11 – 22. (in Chinese)

[22] 桑正中,王长兵. 逆转旋耕过程中土壤切削的研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(4): 127 – 130.

SANG Zhengzhong, WANG Changbing. Study on soil-cutting of up-cut rotary cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(4): 127 – 130. (in Chinese)

[23] 刘大为,谢方平,叶强,等. 1K – 50 型果园开沟机开沟部件功耗影响因素分析与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 19 – 28.

LIU Dawei, XIE Fangping, YE Qiang, et al. Analysis and experiment on influencing factors on power of ditching parts for 1K – 50 orchard ditching[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 19 – 28. (in Chinese)

[24] 宋建农,李自华. 反转旋耕理论分析[J]. 北京农业工程大学学报, 1990, 10(3): 15 – 22.

SONG Jiannong, LI Zihua. Theoretical studies of reverse rotary tillage [J]. Journal of Beijing Agricultuer Engineering University. 1990, 10(3): 15 – 22. (in Chinese)

[25] 贾洪雷,陈忠亮,郭红,等. 旋耕碎茬工作机理研究和通用刀辊的设计[J]. 农业机械学报, 2000,31(4): 29 – 32.

JIA Honglei, CHEN Zhongliang, GUO Hong, et al. Study on working principle of rotary tillage and stubble cutting and design of universal knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 29 – 32. (in Chinese)

[26] 赵铁军,王金武. 水稻秸秆整株还田埋草弯刀滑切角与安装角分析[J]. 农机化研究, 2007,29(11): 58 – 60, 63.

ZHAO Tiejun, WANG Jinwu. Analysis and research of grass removing angle and setting angle of straw-mulching bent blade of straw-returned-native-filed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(11): 58 – 60, 63. (in Chinese)

[27] 廖庆喜,谢昊明,张青松,等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99 – 110

LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99 – 110. (in Chinese)

[28] 丁为民,王耀华,彭嵩植,等. 反转旋耕刀滑切角分析与计算[J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 26 – 29, 21.

DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi, et al. Calculation and analysis of grass removing angles of up-cut rotary blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 26 – 29, 21. (in Chinese)

[29] 李金琦. 旋转开沟机[M]. 北京:中国农业机械出版社,1984.

[30] 刘永萍. 肉苕蓉种子特性及其液体接种技术研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2019.

LIU Yongping. Study on seed characteristics and liquid inoculation technique of cistanche[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[31] 新疆林科院造林治沙研究所. 人工种植肉苕蓉液体接种方法:CN104472186A[P]. 2017 – 06 – 13.

[32] ISTVAN K, ZOLTAN H, ISTVAN O, et al. Discrete element modeling of vibrating tillage tools[J]. Engineering Computations, 2015, 32(2): 308 – 328.

[33] WANG Jinwu, XU Changsu, XU Yanan, et al. Resonance analysis and vibration reduction optimization of agricultural machinery frame—taking vegetable precision seeder as an example[J]. Processes, 2021, 9(11): 1979.

[34] HUANG Guojun, WANG Hongrong, LIANG Xincheng. Vibration analysis on the rack of electric mini-tiller[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2218(1): 012068.

[35] 孙妮娜,王晓燕. 秸秆粉碎还田与整地复式作业机连接装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 15 – 24, 87.

SUN Ni'na, WANG Xiaoyan. Design and experiment of connection device of duplex straw crushing returning and soil preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 15 – 24, 87. (in Chinese)