

双系统中小粒林木种子精量播种机的设计

李芝茹¹ 苗振坤^{1*} 明² 吴立国¹ 毕宏伟¹ 李艳娜¹ 何山¹ 南方¹

(1. 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省七台河市勃利县林业和草原局七台河 154500)

摘要: 为实现对种壳脆硬、球度低、形状不规则的中小粒林木种子的精量播种, 设计了基于气吹-振动双重作用供种的精量穴盘播种机。具体以樟子松种子为例, 应用压痕法、反相分析运算法则、EDEM 中的 Hertz-Mindlin 模型等方法, 探究其力学特性和建立种子的种群空间形态模型, 据此应用 SolidWorks 进行播种机结构设计。该播种机主要由气动系统、电控系统、穴盘、播种机构、供种机构、压穴机构、穴盘输送机构等组成。其供种系统设有气吹-振动组合式种子流化装置, 通过气吹和振动的双重作用使种子颗粒群有效分离, 在气流的连续作用下种子持续保持“沸腾”的运动状态, 确保吸附取种过程中, 种子能相对稳定的处于有效吸种位置以提高设备的吸附成功率。经播种试验, 当种盘振动频率 20 Hz, 振幅为 5 mm, 穴盘输送速度 0.045 m/s 时, 其空穴率最低, 为 1.74 %, 重播率 0.26 %, 播种合格率 98 %, 穴播速度可达到 300 盘/h。通用性强, 可匹配硬质常规穴盘和纸质蜂窝穴盘。

关键词: 精量播种机; EDEM; 气吹-振动组合式; 有效吸附; 蜂窝穴盘

Design of Double System Precision Seeder for Small and Medium-sized Tree Seeds

Abstract: In order to realize precision sowing of the small and medium-sized tree seeds, which with brittle and hard shell, irregular shape and low sphericity, a precise seeder which based on air blowing and vibration and match seedling trays was designed. Take *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seed for example, the application of indentation method, inverse analysis algorithms, the Hertz-Mindlin method which from EDEM as model were used to explore the mechanical properties and establish the population spatial configuration model of seed. aerodynamic characteristics, the population spatial configuration model of seed was established, then the key components of precision seeder were designed. The seeder was mainly composed of pneumatic system、electronic control system、seedling trays、seeding mechanism、seeds supply mechanism、punch mechanism、seedling trays conveying mechanism and so on. The seeds supply system was supported by blowing-vibration device, which make seeds group effective separation and flow, keep the seeds movement state such like "boiling", then ensure the seed adsorption process accomplish. Keep the stable movement state of seeds can improve the adsorption rate of the equipment, Through sowing experiment, when the vibration frequency of trays was 20 Hz, and vibration amplitude was 5 mm, and running speed of trays conveying mechanism was 0.045 m/s, the cavity rate was 1.74 %, repetitive seeding rate was 0.26 % while the qualified rate of sowing is 98 %, the sowing efficiency was 300 tray/h. The precision seeder which have strong versatility can match hard conventional seedling trays and paper honeycomb seedling trays.

Key words: Precision seeder; EDEM; blowing-vibration combined; efficacious sucking; alveolate seedling trays.

近年来, 工厂化育苗技术迅速发展, 推动了苗木培育产业结构的调整和升级, 加快了农林行业发展的现代化进程(别之龙等, 2019; 苗振坤, 2014)。据第九次全国森林资源清查结果显示: 我国的人工林面积为 8003.1 万 hm^2 , 人工林规模居世界首位(中国林业网, 2022)。在保证木材生产和充分发挥森林生态功能的建设目标下, 我国在发展各类人工林方面成绩斐然, 这些与林木工厂化育苗的技术支撑密切相关。精量穴盘播种作为林木工厂化容器育苗技术的关键环节, 已逐步代替了传统的手工播种, 通过负压吸种、正压投种的气吸式精量播种机, 更适宜播种形状不规则、球度低的种子; 赵清来等对油莎豆精量播种机的排种机构进行了研究和设计, 采用气吸式排种配合圆形排种盘进行播种试验, 漏播率 $\leq 4.2\%$ (赵

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901305); 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2019SY040)。

* 通讯作者: 苗振坤, 硕士, 高级工程师。研究方向为林业装备与信息化。E-mail: mzk871026@126.com。

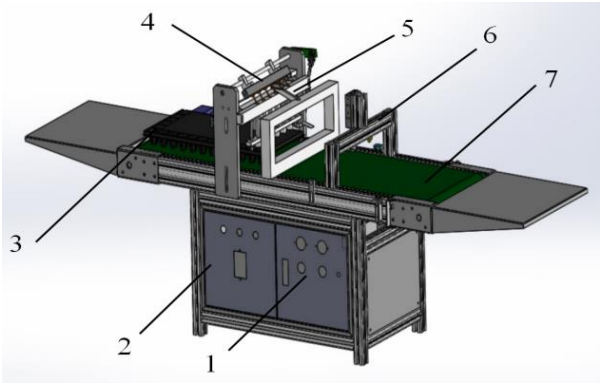
清来等，2022)。卢宇等着重分析勾轮鸭嘴式精量排种器等关键部件，设计了“双U型”棉花精量播种机，播种空穴率 1.6 % (卢宇等，2021)。李晓冉等研发了适用于温室大棚等狭窄空间的蔬菜精量播种机，同样采用的是负压吸种、正压排种的方式进行播种，漏播率≤5 % (李晓冉等，2022)。其他针对蔬菜 (Younis *et al*，2020)、烟草 (谢海军等，2016)、药材 (周金华等，2016) 等不同播种对象的精量播种研究都取得了一定的成果。

不同于蔬菜、粮食育苗，林木工厂化容器育苗具有出苗慢、育苗周期长的特点，林木种子采种困难、大多种壳脆硬、形状不规则、球度低 (苗振坤等，2019；白帆等，2017；吴昊等，2011)，传统的供种方式较难保证播种合格率，如何建立更完善的吸附取种系统以保证播种精度、节约良种，有针对性的选择适宜的育苗穴盘以降低育苗成本亟待研究 (Bhaskar *et al*，2008；Naik *et al*，2017)。目前对中小粒林木种子精量播种的试验数据较为缺乏，本文设计了一款适用于常规硬质育苗穴盘和纸质折叠蜂窝穴盘的精量播种机，采用气吹-振动组合式供种解决了振动不连续的问题，提高了取种吸附成功率并有效降低重播率及空穴率，增设种子自动填装装置以实现自动、及时、精准的向供种系统填装种子 (苗振坤等，2020)。该设备功能完善、适用性强，能有效节约良种、提高育苗经济效益，为中小粒林木容器育苗技术的发展提供数据参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 整机结构及参数

应用 SolidWorks 软件设计建模，考察机构运行是否干涉并进行相关验算，设计该林木中小粒种子精量穴盘播种机如图 1 所示：主要由气动系统、电控系统、穴盘、播种机构、供种机构、压穴机构、穴盘输送机构等组成。其特点是供种机构采用气吹-振动组合式供种方式，供种机构内的种子在气吹、振动双重作用下，种子间相互分离，达到准流体状态，减小取种阻力，提高取种精度。为提高设备通用性，设计其既可匹配常规硬质穴盘，又可匹配折叠蜂窝穴盘。



1.气动系统 pneumatic system 2.电控系统 electronic control system 3.穴盘 tray 4.播种机构 sowing device 5.供种机构 seed provide device 6.压穴机构 punching device 7.穴盘输送机构 trays conveying device

图 1 整机结构示意图

Fig.1 Tructure diagram of the machine

该播种机在保证功能和性能前提下，结构紧凑，其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 播种机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of the seeder

参数	数据	备注
parameter	data	remarks

外形尺寸（长*宽*高）/（mm*mm*mm）	1200*540*700	
Boundary dimension(Length*Width*Height)		
适用种子等效直径（mm）	1~5	中小粒林木种子
Equivalent diameter of applicative seed		small and medium-sized tree seeds
	32 穴常规穴盘	
	Regular seeder trays of 32 cups	聚乙烯
适用穴盘	540*300*70（mm）	polythene
Applicative trays	88 穴蜂窝穴盘	
	alveolate seeder trays of 88 cups	纸质
	540*440*85（mm）	paper characteristics
穴盘输送机构运行速度（m/s）	0.045	
Running speed of trays conveying device		
播种效率（盘/h）	300	
Seeding efficiency		
播种合格率（%）	98	
Qualified rate of sowing		
整机质量（kg）	75	去除种子和穴盘
Weight of the equipment		Exclusive seeds and trays

1.2 工作原理

工作时，供种装置内种子在气吹-振动组合式供种装置作用下，达到“沸腾”的运动状态，将装有育苗基质的育苗穴盘置于穴盘输送机构上，当穴盘到达指定位置后，触发光电传感器，然后压穴机构开始对基质进行逐行压穴，此时取种机构进行负压取种，通过改变取种机构内部气压，完成正压投种，之后进入下一个播种周期。

2 种群空间形态模型的建立与关键部件设计

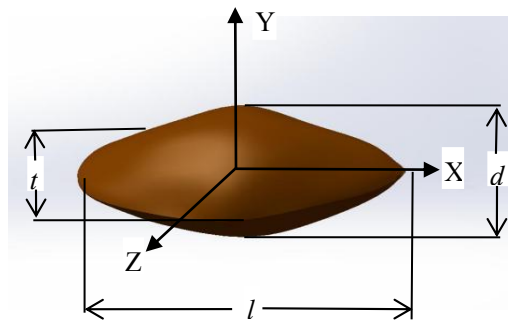


图 2 樟子松种子三维坐标与几何特征

Fig.2 The three-dimensional coordinate system for the seeds of *Pinus sylvestris*.

对樟子松种子进行精量播种时，种子经外力作用达到准流体状态，其中种子与种子之间、种子与供种机构之间都存在力的作用，这些力的作用影响吸种成功率。由于流场中气流的方向、速率等机械作用与种子的极限载荷、弹性模量等力学特性显著相关（康启新等，2021），因振动造成的吸种孔附近流场改变对吸种过程有直接影响（韩烨，2018）。因此以樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）为例，探究其静力学特性和空气动力学特性、建立种群空间形态模型，据此进行播种机关键部件的设计。

2.1 种子静力学特性分析

本研究用樟子松种子纯净度为 98.1 %，千粒重 7.12~7.37 g，含水率 11.76 %，密度 0.72 g/m³，其几何

特征如图 2 所示，随机抽取 100 粒种子测量其长（ l ）、宽（ t ）、厚（ d ）三轴尺寸均服从正太分布（图 3）。

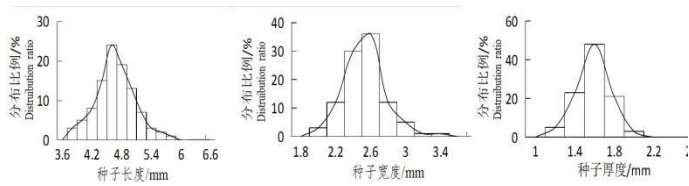


图 3 种子的三轴尺寸分布

Fig.3 Triaxial dimension Size distribution of seeds.

分别将种子平放、侧放、立放，在这 3 种典型挤压方式下，应用微机电子万能试验机（最大试验力 100 N，力分辨率 0.1 N，位移分辨率 0.01 mm）对其进行压缩试验并得出数据（表 2）。

表 2 樟子松种子压缩试验数据

Tab.2 The compression test data of *Pinus sylvestris*.

放置方式 Placementmode	最小破裂载荷/N						标准差 Standarddeviation
	Minimum rupture load					平均值 Mean value	
	1	2	3	4	5		
平放 Horizontal placement	7.7	8.1	7.5	7.8	7.8	7.78	0.22
侧放 Side placement	3.8	4.2	3.8	3.9	4.1	3.96	0.18
立放 Vertical placement	5.3	5.7	5.6	5.2	5.5	5.46	0.21

应用压痕法（Miao Z K *et al*, 2020）研究种子的静力学特性，再根据 Kick 定律相关公式及反相分析运算法则（丁幼春等，2021；朱占江等，2022）得到樟子松种子的相关力学特性值（表 3）。

表 3 樟子松种子力学特性

Tab.3 The mechanical characteristics of *Pinus sylvestris*.

最大压痕深度	残余压痕深	最大压痕载					
h_{max}/mm	度 h_r/mm	荷 F_{max}/N	曲线斜率	接触刚度	最大接触面积	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
Maximum indentation	Residual indentation	Maximum indentation	C/MPa	$S/(N/mm)$	A_{max}/mm^2	Elasticitymodulus	Poissonratio
depth	depth	load	Rateofcurve	Contactrigidity	Maximum contact area		
0.5	0.24 ± 0.03	5.2 ± 0.15	20.8 ± 0.09	29.00 ± 2.31	4.813 ± 0.013	6.051 ± 0.001	0.40 ± 0.01

2.2 建立种群空间形态模型

根据相应公式（Miao Z K *et al*, 2019），计算得出樟子松种子的悬浮速度范围是 5.3~6.5 m/s。。由此运用 EDEM 软件，建立振动时樟子松种子的种群空间形态模型。

2.2.1 粒接触模型

在 EDEM 中，常用的颗粒接触模型主要有无滑动接触模型、黏附接触模型、运动表层接触模型、线弹性接触模型及线型黏附接触模型等（Guo S J *et al*, 2022；薛亚军等，2021；毛美姣等，2021）。本设计选取 EDEM 中常规的 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型，研究精量播种过程中，樟子松种子与种子之间及种子与供种机构之间的接触情况。

2.2.2 建立 粒模型和振动状态下空间形态模型

根据樟子松种子三轴尺寸可将其简化为椭球体，应用 EDEM 建立樟子松种子颗粒模型（图 4），模拟种盘在 Z 轴方向上做小振幅高频率简谐振动，种盘激振使种子群“沸腾”起来，其空间形态模型如图 5 所示，通过不断尝试不同振幅和频率组合，动态观察和探究不同振动参数下种子的运动状态，最终确定当

频率为 20 Hz，振幅为 5 mm 时，樟子松种子的种群空间分布最为均匀，此时进行吸种的吸取效果最佳。

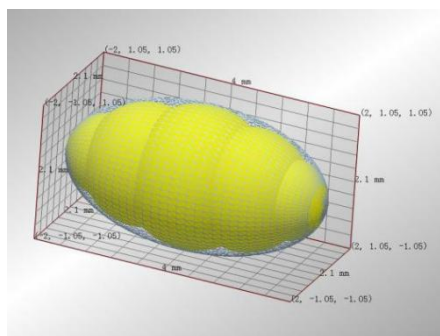


图 4 樟子松种子模型

Fig.4 Model of *Pinus sylvestris*.seeds

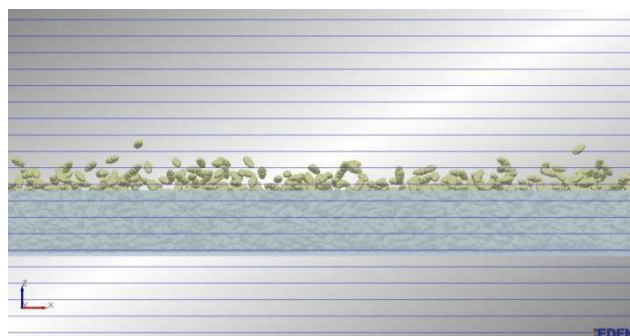


图 5 振动状态下种子空间形态

Fig.5 Spatial morphology of seed in vibration condition

2.3 供种机构的设计

2.3.1 气吹供种试

通过对种子种群空间形态模型的建立和分析，为保证对振动状态下种子的有效吸附，基于气吹供种原理，设计时改变传统的大容积气室，用隔板将矩形气室分隔成一定数量等容积的独立小气室（图 6）。在气吹供种试验时，发现自然堆落的种子在气流的作用下，会在一定范围内跳动。种子层数为一层时，种群的空间形态分布均匀能够满足吸附取种需求。当增加种子层数后，为保证有效吸附需增大供种气流流速，种子间的碰撞次数会明显增加，种子的运动范围增大，空间分布过于疏散，不利于吸附取种。虽然气吹供种能够使种子相互分离，但是随着种子的逐渐减少，所需供种气流流速会逐渐降低，若不及时调整气流流速，将难以实现取种系统有效取种，因此需设计气吹基础上的种子流化装置。

2.3.2 供种机构的设计



图 6 播种机供种气室

Fig 6 The air chamber for seed supply of precision seeder

振动供种方式对种子的形状有一定的要求，且振动力不连续难以保证取种精度。针对气吹供种量与供种气流流速无法精准匹配的问题，设计了气吹-振动组合式中小粒林木种子流化装置（图 7），以满足对非丸粒化（球度低）且尺寸小、外形不规整、流动性差种子的播种需求，保证排种器在取种瞬间，种子处于相对稳定的空间位置。该设计基于气吹供种基础，采用振动种盘的方法使种子近似处于一种理想的“沸腾”状态，再通过供种装置的气流作用，使种子颗粒群有效分离。以自然堆叠 10 层为例，沸腾状态种子受气流作用与自身重力平衡，根据种子悬浮速度范围 5.3~6.5

m/s，结合千粒重 7.12~7.37 g，流化装置圆形气孔直径 1 mm，通过换算可知将种子悬浮所需气压约为 0.24 kPa，这样在吸附取种过程中，因为气流的连续作用，使种子能相对稳定的处于有效吸种位置以保证吸附取种时间，以提高吸附成功率。

该气吹-振动组合式供种流化装置实物图如图 8 所示, 工作原理为: Y 型五通气动快速接头进气口进入

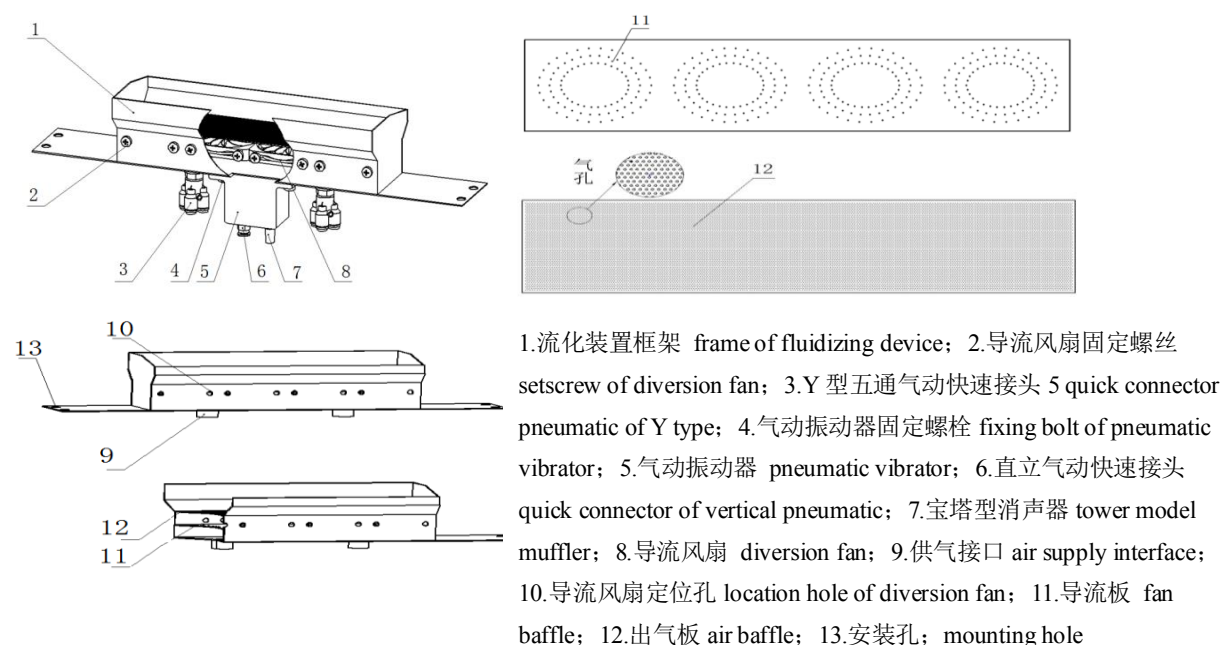


图 7 气吹-振动组合式种子流化装置简图

Fig.7 Simple diagram of air-vibration combined seed fluidizing device

的气源通过导流板的导流作用, 气体从导流孔流出且流速有一定的差异, 此时气流会推动导流风扇旋转, 气流不断地从导流口流出再加上导流风扇的旋转作用, 进而保证出气板上每个出气孔的气流流速无明显差异, 通过调节 Y 型五通气动快速接头进气口气流流速, 可实现对出气板中出气孔的气流流速的控制; 通过调节直立气动快速接头进气口气流流速, 可实现对气动振动器激振参数的控制。通过调节两处进气口气流流速来达到种子流化的目的。

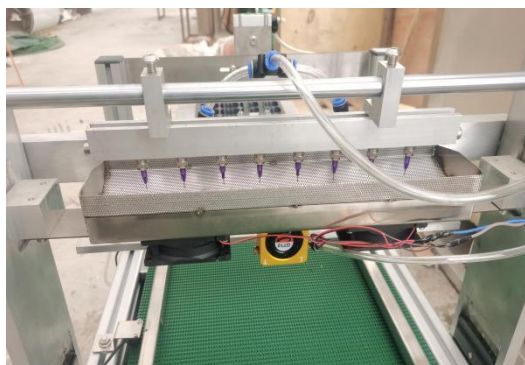


图 8 气吹-振动组合式供种装置

Fig.8 The air-vibration combined seed fluidizing device

2.4 取投种装置的设计

根据设计要求, 为对硬质育苗穴盘和软质可折叠蜂窝的播种需求, 有针对性的设计了两套取投种装置 (图 9)。通过气动换向阀转换取投种系统所需的正负压, 其中吸种负压由真空发生器 (图 10) 提供, 其原理是真空发生器喷射的压缩空气产生的卷吸流动使吸附腔气压低于标准大气压, 由此完成对种子的吸取; 投种正压由空气压缩机提供, 将吸取的种子投入对应的管道里完成播种, 并增设调压阀对正负气压值进行调节以应对不同种子的吸取和投放。

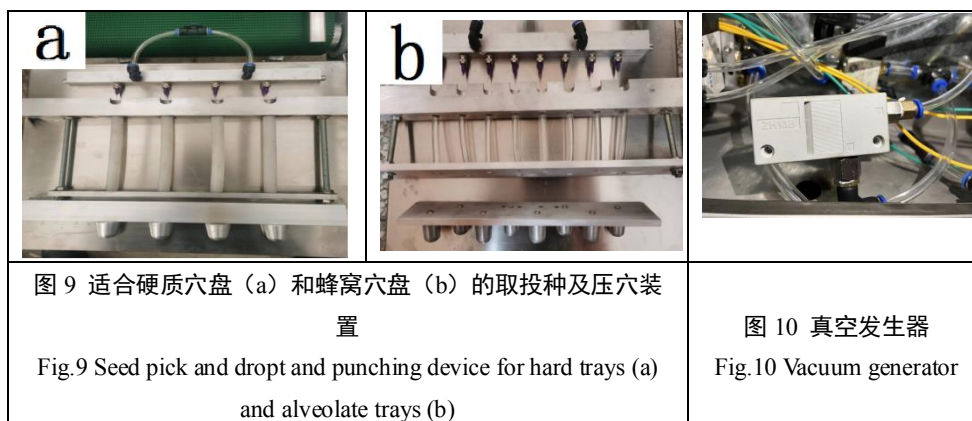


图 9 适合硬质穴盘 (a) 和蜂窝穴盘 (b) 的取投种及压穴装置
Fig.9 Seed pick and dropt and punching device for hard trays (a) and alveolate trays (b)

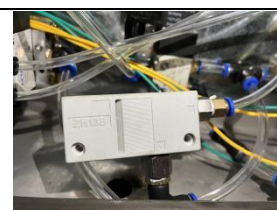


图 10 真空发生器
Fig.10 Vacuum generator

2.5 吸种针的选取

为提高播种机通用性, 本设计采用成本低、易更换的点胶针头 (图 11) 完成对樟子松种子的吸取和投放, 针对不同吸种孔直径 (D)、吸种负压值 (P) 进行 2 因素 3 水平全因子取种试验 (苗振坤等, 2018), 其中吸种孔直径 (D) 分别取 D_1 : 0.5 mm、 D_2 : 0.7 mm、 D_3 : 0.9 mm, 吸种负压值 (P) 分别取 P_1 : 6.7 kPa、 P_2 : 7.7 kPa、 P_3 : 8.7 kPa, 共 32 即 9 个试验参数组合, 每个参数组合重复试验 3 次考察取种成功率, 通过反复试验得出: 当吸种孔直径为 0.9 mm、吸种负压值为 6.7 kPa 时, 对樟子松种子的取种成功率最大。因此确定该精量播种的吸种负压 6.7 kPa, 投种正压 0.5 kPa, 配合吸种嘴孔径 0.9 mm。本试验选择 KUHNAST 型 18G 点胶卡口针头, 内径 0.9 mm, 外径 1.2 mm, 管长 13 mm, 可通过选择不同规格点胶针头以适应不同尺寸林木种子。



图 11 吸种点胶针头
Fig.11 Dispensing needles for seeds suck

2.6 种子自动装填装置

在供种装置上方设计种子自动填装装置 (图 12), 以保证供种装置内的种子数量维持在固定的范围。其中, 种子自动装填装置包括种箱、投种口、出种口、出种口大小调节板、导流板、直线振动器等, 该振动式种子自动装填装置, 通过控制器控制直线振动器的振动参数, 能够控制种子的填装速度, 进而实现自动、及时、精准的向供种系统填装种子; 能够有效降低在固定气流流速下的重播率及漏播率, 使供种系统内种子群保持性对稳定的“沸腾”状态。

3 精量播种设备总成与试验

3.1 精量播种设备总成

为提高设备通用性, 提高育苗经济效益, 设计该精量播种机 (图 13), 可适用于规格符合樟子松容器育苗技术规程 (山东省质量技术监督局, 2017) 的常规育苗穴盘 (540 mm*300 mm*70 mm) 和纸质蜂窝穴盘 (540 mm*440 mm*85 mm) 如图 14, 通过人工切换控制系统 (图 15) 和更换取投种装置、压穴机构来实现穴盘转换。



图 13 双系统精量穴盘播种机

Fig.13 Dual system precision tray seeder

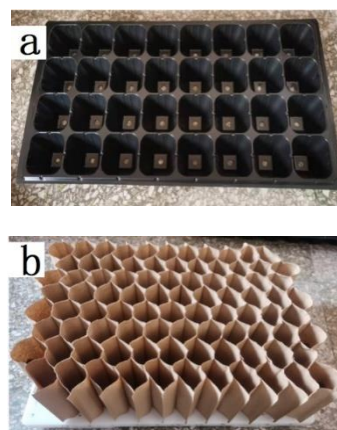


图 14 (a) 硬质育苗穴盘 32 穴 (b) 纸质蜂窝穴盘 88 穴

Fig.14 (a) Hard seeder trays(32 cups) (b) Papery alveolate seeder trays(88 cups)

3.2 樟子松精量播种试验

3.2.1 试 目的及材料

为验证本设计中的精量穴盘播种机穴播速度、空穴率、苗盘匹配性等情况，选用大兴安岭加格达奇地区樟子松种子进行播种试验。试验用基质为泥炭、蛭石、珍珠岩按 3: 1: 1 的比例配置而成，播种穴盘（图 15）选用 32 穴常规聚乙烯穴盘和 88 穴纸质蜂窝穴盘。空气压缩机为科麦斯 KOMAX120L 型；依据《单粒(精密)播种机试验方法》（中国国家标准管理委员会，2005）要求对样机进行播种试验，试验分常规穴盘组和纸质穴盘组分别进行，每组试验累计播种 3 小时。

3.2.2 实 步

首先将备好的苗盘置于播种机输送带，取适量（种子自然堆叠 10 层以上）种子倒入填装装置，检查穴盘放置情况，将播种机通电，空气压缩机给压，按下启动按钮进行播种试验，播种过程中需人工补充穴盘。调整穴盘输送机构运行速度，找出适合樟子松种子精量播种的最优技术参数。

3.2.3 试 结果与分析

通过播种试验可知，除了吸种孔径、吸种正、负压外，供种机构的振动参数、苗盘输送机构的运行速度与播种成功率密切相关，运行速度过慢有悖于精准、高效播种的设计初衷，运行速度过快则取投种正负压转换过于频繁，吸种孔吸附不稳定，易出现无效投种造成空穴率升高。经过反复试验，当种盘振动频率 20 Hz，振幅为 5 mm，穴盘输送速度 0.045 m/s 时，其空穴率最低，为 1.74 %，重播率 0.26 %，播种合格率 98 %，穴播速度可达到 300 盘/h。可通过更换吸种嘴实现对其他种子的精量播种。试验中由于穴盘摆放不及时、穴盘刮到播种机边缘导致传感器拾取不到信号、压缩机气压供应不足等原因，试验中止次数较多。如何在保证播种精基础上，提高播种机适用性、延长设备连续作业时间，仍需进一步深入研究和探索。

4 结束语

文章以樟子松种子为例，应用压痕法、反相分析运算法则、EDEM 中的 Hertz-Mindlin 模型等方法，探究其空气动力学特性、建立种子的种群空间形态模型和颗粒接触模型，据此应用 SolidWorks 进行播种机关键部件的设计。设计的精量播种设备适用于种壳脆硬、形状不规则、球度低的林木中小粒种子。供种系统采用气吹-振动组合式种子流化装置供种，提高了吸种精度，经试验穴播速度可达到 300 盘/h，空穴率 1.74 %，重播率 0.26 %，播种合格率 98 %。通用性强，可匹配常规穴盘和纸质蜂窝穴盘，能有效节约良种、提高育苗经济效益，为中小粒林木容器育苗技术的发展提供设备支持和数据参考。但目前设备的连续作业时间不长，如何在保证播种精基础上，进一步提高播种机适用性、延长整机连续作业时间，

提高与大型机械化基质装填、覆土、喷淋等作业的匹配度，仍需进一步深入研究和探索。

参考文献

- 别之龙, 黄丹枫. 工厂化育苗原理与技术. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- (Bie Z L, Huang D F. Principle and technology of industrialized seedling raising. BeiJing: Chinese Agricultural press, 2019.)
- 苗振坤. 气吸针板式林木种子精密播种机的设计与研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- (Miao Z K. The design and research on suction needle plate precision seeder of forest tree seed. BeiJing: Chinese Academy of Forestry, 2014.)
- 中国林业网. 第九次全国森林资源清查统计表. <http://www.forestry.gov.cn/gjslzyqc.html>, 2022-03-01.
- (China Forestry Network. Statistical table of the Ninth nationwide forest resources inventory[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/gjslzyqc.html>, 2022-03-01.)
- 赵清来, 陈晓明, 许顺, 等. 气吸式油莎豆精量播种机排种器设计和试验. 吉林农业大学学报: 1-9[2022-05-02].
- (Zhao Q L, Chen X M, XU S, et al. Design and test on the seed metering device of suction-type *Cyperus Esculentus* precision planter. Journal of Jilin Agriculture University: 1-9[2022-05-02].)
- 卢宇, 蒋延金, 陈立东, 等. 双 U 型棉花精量播种机设计与试验. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 34-41.
- (Lu Y, Jiang Y J, Chen L D, et al. Design and experiment of double U type cotton precision seeder. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42 (10): 34-41.)
- 李晓冉, 张银平, 刁培松, 等. 小型气力式蔬菜精量播种机设计与试验. 农机化研究, 2022, 44(4): 54-62.
- (Li X R, Zhang Y P, Diao P S, et al. Design and test of small pneumatic precision seeder for vegetables. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(4): 54-62.)
- YOUNIS S M, SHEDED R S M, ALI T H, et al. Development of a drum seeding metering unit for sowing vegetable plug tray seedlings. Plant Archives, 2020, 20(1): 3119-3130.
- 谢海军, 王广源, 李志伟. 烟草种子穴盘播种装置设计与试验. 农机化研究, 2016, 38 (2): 162-166.
- (Xie H J, Wang G Y, Li Z W. Design and Experiment of Seeding Mechanism for Tobacco Coated Seed. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38 (2): 162-166.)
- 周金华, 赖庆辉, 高筱钧. 滚轮圆刷式三七精密排种器的仿真分析与试验验证. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(4): 509-516.
- (Zhou J H, Lai Q H, Gao Y J. Simulation analysis and experiment of roller-round brush precise seed-metering device for *Panax notoginseng*. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2016, 42(4): 509-516.)
- 苗振坤, 李芝茹, 徐克生, 等. 锥形吸种孔对樟子松芽种发育的影响. 森林工程, 2019, 35(3): 13-19.
- (Miao Z K, Li Z R, Xu K S, et al. The influence of cone sucking hole on the growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* bud seeds. Forest Engineering, 2019, 35(3): 13-19.)
- 白帆, 吴昊, 肖冰, 等. 国内外林木种子采摘与处理设备概述. 林业机械与木工设备, 2017, 45(12): 4-10.
- (Bai F, Wu H, Xiao B, et al. Summary of tree seed picking and processing equipment at home and abroad. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2017, 45(12): 4-10.)
- 吴昊, 董希斌. 林木种子采收技术与装备研究进展. 森林工程, 2011, 27(4): 24-29.
- (Wu H, Dong X B. Research progress in tree seed harvesting technology and equipment. Forest Engineering, 2011, 27(4): 24-29.)
- Bhaskar G, Sirohi N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322-329.
- Naik M D A, Thakur H M. Design and analysis of an automated seeder for small scale sowing applications for tray plantation method[J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2017, 10(1): 716-723.
- 苗振坤, 吴立国, 满大为, 等. 一种振动式种子自动填装装置, 中国, CN210928583U. 2020-07-07. <https://www.patenthub.cn/>
- (Miao Z K, Wu L G, Man D W, et al. A type of vibration device for automatic seed filling, China, CN210928583U. 2020-07-

07. <https://www.patenthub.cn/>)

康启新, 张国忠, 郑侃, 等. 施力方向与加载速率对蒜头种子力学特性的影响. 华中农业大学学报, 2021, 40(4): 231-238.
(Kang Q X, Zhang G Z, Zheng K, et al. Effects of force direction and loading speed on seed mechanical properties of *Allium chinense*. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(4): 231-238.)

韩烨. 二维流场中圆截面植物与流场耦合的力学特性的数值研究. 兰州: 兰州大学, 2018.

(Han Y. Numerical study of mechanical properties of circular cross section plant coupled with two-dimensional fluid field. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.)

Miao Z K, Li Z R, Wu L G, et al. Determination and Analysis of Physical Characteristics of *Pinus sylvestris*. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2020, 14(6): 753-759.

丁幼春, 王凯阳, 刘晓东, 等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展. 农业工程学报, 2021, 37(8): 30-41.

(Ding Y C, Wang K Y, Liu X D, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small-size seeds. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 30-41.)

朱占江, 康敏, 刘奎, 等. 核桃及其机械破壳后主要组分悬浮速度理论计算与试验研究. 四川农业大学学报: 1-14[2022-04-09].

(Zhu Z J, Kang M, Liu K, et al. Theoretical calculation and experimental study on suspension velocity of walnut and its main components after mechanical shell cracking. Journal of Sichuan Agricultural University: 1-14 [2022-04-09].)

Miao Z K, Li Z R, Xu K S, et al. The numerical simulation analysis of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* seeds Vibration Situation Based on EDEM. International Conference on Mechanical Engineering and Green Manufacturing, 2018(4): 359-365.

Guo S J, Tie Y, Xiao F S, et al. Evolution of gas kick and overflow in wellbore and formation pressure inversion method under the condition of failure in well shut-in during a blowout. Petroleum Science, 2022, 19(2): 678-687.

薛亚军, 贺福强, 陈发江, 等. 基于离散元法的木质板材压制成形过程仿真与分析. 林业机械与木工设备, 2021, 49(5): 52-57.

(Xue Y J, He F Q, Chen F J, et al. Simulation and analysis of wood sheet pressing process based on discrete element method. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(5): 52-57.)

毛美姣, 许庆, 刘静莉, 等. 硬质合金化学机械抛光工件-磨粒-抛光垫接触状态研究. 中国机械工程, 2021, 32(17): 2074-2081.

(Mao M J, Xu Q, Liu J L, et al. Contact states of workpiece-abrasive particles-polishing pad in cemented carbide CMP processes. China Mechanical Engineering, 2021, 32(17): 2074-2081.)

苗振坤, 李芝茹, 吴立国, 等. 樟子松芽种精量穴盘播种试验. 森林与环境学报, 2018, 38(2): 229-233.

(Miao Z K, Li Z R, Wu L G, et al. Experiment of precision plug sowing on bud seed of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica*. Journal of Forest and Environment, 2018, 38(2): 229-233.)

山东省质量技术监督局 DB14/T 1416-2017, 樟子松容器育苗技术规程. 2017.

(Standards Press of Shanxi. DB14/T 1416-2017, Container seedling technical protocol of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica*.)

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准管理委员会. GB/T 6973-2005, 单粒(精密)播种机试验方法. 2005.

(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 6973-2005, testing methods of single seed drills (precision drills))