

王洋,张青松,胡乔磊,等.油菜基质块苗移栽机倾斜式分苗装置设计与稳定性分析[J].华中农业大学学报,2020,39(4):147-155.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.04.020

油菜基质块苗移栽机倾斜式分苗装置设计与稳定性分析

王洋,张青松,胡乔磊,何坤,肖文立,廖庆喜

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要 针对传统移栽机在油菜移栽过程中苗块易翻倒导致分苗装置分苗失效的问题,设计了一种适用于油菜基质块苗移栽机的倾斜式分苗装置。分析了分苗装置结构组成与分苗过程,确定了分苗装置主要结构参数;构建了分苗过程依次连续输送和夹持分离阶段苗块力学模型,依据动力学分析明确了影响分苗稳定性的主要因素。分析得出,当苗块摩擦系数一定且同步带倾角在 $24.5^{\circ}\sim 35.0^{\circ}$ 时,有利于依次连续输送阶段苗块不翻倒;分苗夹持力越大,夹持分离阶段苗块分苗效果越优。优选得出分苗装置关键参数:同步带倾角 γ 为 30° ,分苗夹持力 $f_{j1} > 0.8$ N,分苗气缸工作气压 P 为 $0.5\sim 0.8$ MPa。分苗装置分苗试验表明:苗块翻倒率为 4.2% ,分苗成功率为 92.5% ,满足油菜基质块苗分苗需求。

关键词 油菜;自动移栽机;基质块苗;分苗装置;稳定性分析;倾斜式分苗

中图分类号 S 223.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)04-0147-09

油菜是重要的油料作物之一,我国油菜实际种植面积和油菜籽总产量常年位居世界前列^[1]。长江流域是油菜与水稻的水旱轮作区,茬口矛盾紧^[2-5],机械化育苗移栽是该地区油菜主要种植方式之一^[6-9]。分苗装置是与送苗、取苗装置等部件相配套,处于承上启下关系的关键部件,其作业效果直接影响到移栽机的整机性能^[10-12]。我国移栽机分苗等关键环节长期依靠人工来完成,制约了移栽效率,研究自动化分苗装置意义重大^[13-14]。

国外移栽机及配套分苗装置的研制起步较早,如 Ferrari Futura 型移栽机^[15],设计以曲柄滑块机构为主体的分苗装置,实现对蔬菜基质块苗高频次分苗作业;Regero R2010T 型移栽机^[16],基于气动控制原理设计分苗装置,实现了全自动化分苗作业,分苗过程稳定可靠。上述国外移栽机分苗功能较为成熟,但有待进一步完成结构改进,以满足长江流域冬油菜种植农艺要求^[17]。在国内,汲文峰等^[18]基于振动原理设计分苗装置,利用曲柄摇杆机构完成苗杆的有序连续进给,实现了机械化分苗功能;廖庆喜等^[19]研制输送带式钵苗分苗装置,通过输送带实现钵苗连续输送,采用合页板夹持钵体实现钵苗分

苗;那明君等^[20]设计纸筒式钵苗分苗机构,通过定位带实现钵苗对齐,采用分苗圆盘完成钵苗排序和分离。以上学者的相关研究基本实现了连续输送和逐一分离的分苗功能,为分苗装置的研制提供了参考,但在分苗过程中均出现苗块翻倒等不稳定因素,降低了分苗成功率,移栽质量有待提高。

针对传统移栽机在油菜移栽过程中苗块易翻倒导致分苗装置分苗失效的问题,本研究结合国内外相关研究及油菜基质块苗移栽机实际分苗需求,设计集连续输送和夹持分离工序为一体的倾斜式分苗装置,构建分苗过程苗块力学模型,开展分苗稳定性分析,优选分苗装置关键参数,旨在为提高油菜基质块苗移栽机分苗效果及移栽质量提供参考。

1 材料与方 法

1.1 分苗装置结构组成与分苗过程

1) 油菜基质块苗特征参数分析。根据前期研究^[21]中的基质成分配比,选用华油杂 62 油菜种子,自制工具制备油菜基质块苗,并开展适栽期油菜基质块苗特征参数分析。如图 1 所示,自育苗 20 d 起,随机选取并标记 30 株基质块苗,测量苗块两侧

收稿日期:2020-04-24

基金项目:国家油菜产业技术体系专项(CARS-12);农业部农业科研杰出人才及创新团队;湖北省丘陵山区主要农作物机械化生产关键技术装备研发与集成示范

王洋,硕士研究生.研究方向:现代农业装备设计与测控. E-mail: wangyhzau@163.com

通信作者:张青松,博士,讲师.研究方向:现代农业装备设计与测控. E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

面间距离,记为苗块边长 b ;底部至幼苗顶端的垂直距离,记为苗高 H_m ;测量幼苗最宽两点间距离,记为苗幅宽 B_m ;测量根茎结合处直径,记为颈部直径 D_m ,每隔 4 d 采集 1 次,即记录时间为播种后 20~32 d。在播种后 28~32 d 的适栽期内,统计各参量数据取均值,用于试验的油菜基质块苗特征参数如表 1 所示。

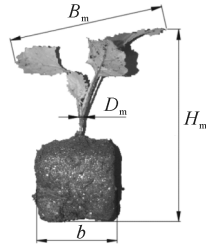


图 1 油菜基质块苗特征参数测量

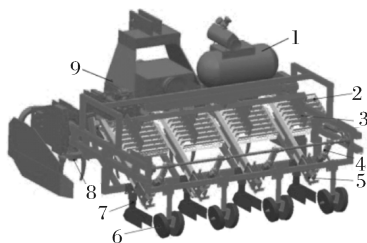
Fig.1 Measurement of rapeseed substrate seedling

表 1 油菜基质块苗特征参数统计表

Table 1 Parameters of rapeseed substrate seedling

参数 Parameters	取值 Values
油菜籽品种 Variety	华油杂 62 Huayouza 62
苗龄/d Seedling age	28~32
苗块边长/mm Side length of seedling block	38~40
苗高/mm Seedling height	114.5
苗幅宽/mm Seedling width	68.7
颈部直径/mm Rhizome diameter	1.3
苗块质量/g Mass of seedling block	85
基质含水率/% Water content of substrate	23~30

2) 倾斜式分苗装置结构组成与分苗特点。如图 2 所示,油菜基质块苗移栽机主要由立式旋耕驱动耙、倾斜式分苗装置、取苗装置、开沟器及覆土轮等组成,其中倾斜式分苗装置是其关键部件之一。该



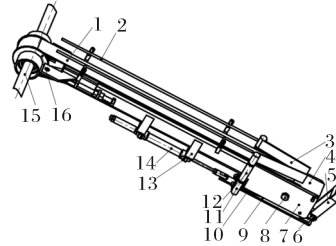
1.空气压缩机 Air compressor; 2.载苗盘 Seedling tray; 3.送苗装置 Delivery device; 4.取苗装置 Pick-up device; 5.分苗装置 Detach device; 6.覆土轮 Soil-covering wheel; 7.开沟器 Ditch opener; 8.旋耕刀 Rotary tiller; 9.立式旋耕驱动耙 Vertical rotary tiller machine.

图 2 油菜基质块苗移栽机

Fig.2 Rapeseed substrate seedling transplanter

机可一次性完成送苗、分苗、取苗投苗及开沟与覆土等作业。

倾斜式分苗装置主要由同步带、驱动带轮、主动轴、分苗夹板、载苗台、挡苗板、分苗拉杆、分苗气缸等组成,其结构如图 3 所示。其中同步带、驱动带轮及主动轴等构成同步带输送苗机构,分苗夹板、载苗台及挡苗板等构成双动式夹挡苗机构。



1.同步带 Belt; 2.导苗光轴 Bare rod; 3.分苗夹板 Seedling detach splint; 4.载苗台 Seedling table; 5.挡苗板 Flip seedling plate; 6.挡苗副板 Seedling vice plate; 7.从动带轮固定板 Driven pulley fixed plate; 8.从动带轮轴 Driven pulley shaft; 9.分苗拉杆 Seedling detach rod; 10.转动短板 Inner grooved rod; 11.L 型转动套筒 Rotating sleeve; 12.固定套筒 Fixed sleeve; 13.分苗气缸固定架 Cylinder fixing frame; 14.分苗气缸 Cylinder; 15.驱动带轮 Driving pulley; 16.主动轴 Driven shaft.

图 3 倾斜式分苗装置结构示意图

Fig.3 Structural diagram of seedling inclined detach device

倾斜式分苗装置特点:分苗夹板对称分布于同步带两侧,分苗时可相向运动夹紧苗块;分苗夹板与挡苗板分别铰接于分苗拉杆两端,可随气缸协同运动。采用同步带作为第一动力源,用于将整排苗块连续向下输送;采用分苗气缸作为第二动力源,驱动分苗夹板向内收缩夹持苗块,同时驱动挡苗板顺时针旋转为取苗动作让位。

3) 倾斜式分苗装置工作过程与分苗要求。根据倾斜式分苗装置结构及工作特点,可将完整的分苗过程分为依次连续输送、夹持分离、挡板让位和伸长复位等 4 个阶段,其中依次连续输送、夹持分离为其关键阶段。初始时,分苗气缸处于伸长状态,分苗夹板向外侧张开,挡苗板紧贴载苗台外壁。工作时:①同步带将整排苗块连续向下输送,使苗块逐一过渡至载苗台上,即为依次连续输送阶段;②当前一枚苗块运动至挡苗板前,分苗气缸收缩,分苗夹板相向收拢夹持后一枚苗块,前一枚苗块处于待取苗状态,即为夹持分离阶段。③在夹持分离同时,挡苗板向下翻转远离载苗台,为取苗动作让位,即为挡板让位阶段;④当最前一枚苗块被取苗后,分苗气缸伸

长,各机构回位至初始状态,等待下次分苗,即为伸长复位阶段。

根据倾斜式分苗装置分苗过程和工作特点,为保证有效分苗,需满足如下分苗要求:①为保证分苗过程的连续性和分苗效率,同步带应能够实现对整排苗块连续输送,同时在连续输送时苗块不应翻倒;②为保证分苗效果及后续取苗可靠,分苗夹板提供的分苗夹持力需有效实现对苗块逐一夹持分离;③分苗夹持力作用下苗块应不偏移或翻倒,以确保分苗有效。

1.2 分苗装置结构设计与分析

1)同步带轮设计。初始选定默认参数为:传动比为1,设计带轮最大功率0.2 kW,最大转速150 r/min,工况系数(K_A)为1.0,齿数为50。查阅相关设计手册^[22]选择带轮齿型为HTD 5M型圆弧齿,节距为5 mm,带轮节圆直径为79.58 mm,外圆直径 $d_2=78.44$ mm,根据苗块边长确定带轮宽度为40 mm,故同步带轮型号为HTD 50-5M-40。

2)同步带设计。为保证同步带连续输送不间断,同步带上应至少可同时容纳2排(即16枚)苗块,则同步带上首枚和末枚苗块间的最小距离 L_b 需满足:

$$L_b \geq n_a b \quad (1)$$

式(1)中: b 为苗块边长,mm; L_b 为首株和末株基质块间的最小距离,mm; n_a 为同步带上同时容纳的苗块最大数量。则2个同步带轮之间的最小中心距 L_d 以及同步带节线长度 L_p 满足:

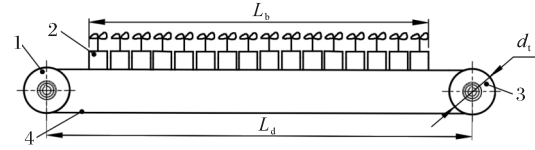
$$L_d \geq L_b + d_1 \quad (2)$$

$$L_p \approx 2L_d + \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + \frac{(d_1 - d_2)^2}{4L_d} \quad (3)$$

式(2)~(3)中: d_1 为同步带轮直径,mm; L_d 为2个同步带轮之间的最小中心距,mm; L_p 为同步带节线长度,mm。

为便于分苗作业,留有2枚苗块余量,故取 $n_a=18$,苗块边长取最大值 $b=40$ mm,同步带轮直径与节圆直径相同,取 $d_1=79.58$ mm,代入式(1)~(3)中计算,并选择相近标准节线长度 $L_p=1870$ mm,标准中心距 $L_d=810$ mm。

3)同步带许用最大倾角 γ_M 分析。油菜基质块苗苗块自然状态下与接触面产生相对滑动的临界角度定义为自然摩擦角。同步带输送苗的过程中,要求苗块自然状态下与同步带不会产生相对滑动,即同步带许用最大倾角 γ_M 应小于其自然摩擦角 α_z 。

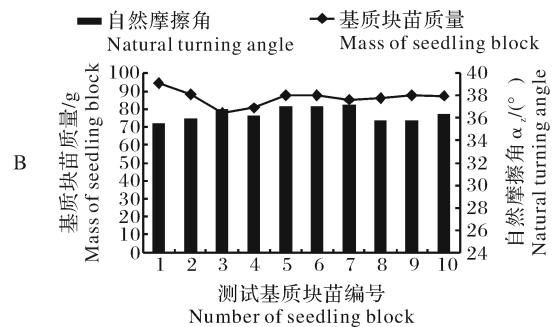
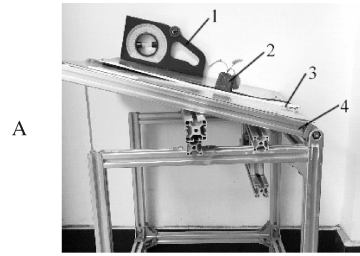


1.驱动带轮 Driving pulley; 2.基质块苗 Rapeseed substrate seedling; 3.从动带轮 Driven pulley; 4.同步带 Belt.

图4 同步带输送苗机构结构简图

Fig.4 Structural diagram of belt convey mechanism

本研究借助型材搭建简易自然摩擦角测定装置,如图5A所示。试验随机选取适栽期10株基质块苗,依次标记并称质量处理,逐一测量其自然摩擦角,每组试验重复3次,对试验结果进行统计。由图5B所示可知,苗块质量均匀,实际测定的自然摩擦角与苗块质量无明显相关性,且自然摩擦角 α_z 稳定在 $35.5^\circ \sim 37.5^\circ$,通过对试验数据求解均值可知,苗块自然摩擦角 α_z 均值为 36.3° ,因此同步带许用最大倾角 γ_M 为 36.3° 。



A:测量过程 Measurement process; 1.JZC-B2型万向角度仪 JZC-B2 angle measure instrument; 2.油菜基质块苗 Rapeseed substrate seedling; 3.同步带 Belt; 4.自然摩擦角测定装置旋转面 Natural friction angle measure device; B:测量结果 Measurement results.

图5 苗块自然摩擦角测量过程与测量结果

Fig.5 Natural flip angle measurement of seedlings

图6为双动式夹挡苗机构结构示意图,其执行动作为联动式,各组成部件结构参数对分苗效果有显著影响。

4)分苗夹板设计。分苗夹板应实现对苗块侧面水平夹持动作,根据苗块几何参数,设计分苗夹板宽

度 b_i 为 25 mm。分苗夹板通过夹持动作对苗块进行限位与分离,设计分苗夹板一次性夹持同步带前端的 1 枚苗块,为保证夹持过程不影响后续输送的苗块,取分苗夹板设计长度 l_i 为 2 倍苗块长度,即取 l_i 为 80 mm。分苗夹板完全张开时,其张开后两夹板间距不影响苗块的通过性,设计两夹板间距为 45 mm,则对应的分苗夹板旋转角 θ_i 为 20° 。

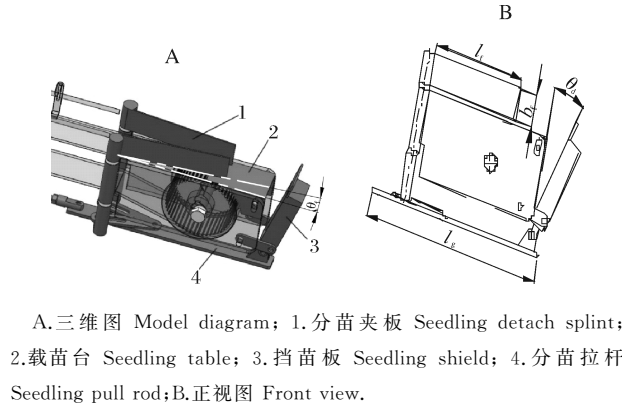


图 6 双动式夹挡苗机构结构示意图

Fig.6 Structural diagrams of double-acting clamped mechanism

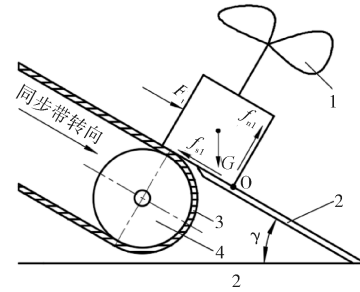
5) 挡苗板翻转角设计。挡苗板应及时完成对取苗装置的让位动作,同时其翻转角 θ_d 直接影响分苗拉杆长度和直线运动行程。挡苗板顺时针翻转时对取苗动作进行让位,当 θ_d 过小时,挡苗板让位不足,将与取苗轨迹相干涉;当 θ_d 过大时,挡苗板翻转时间变长,影响整体分苗效率;同时分苗拉杆设计长度和行程将增加,影响设计空间。因此,根据挡苗板的空间布局,取挡苗板翻转角 θ_d 为 15° 。

6) 分苗拉杆与分苗气缸设计。取分苗拉杆设计长度 l_g 为 120 mm,结合挡苗板翻转角 θ_d ,计算分苗拉杆运动行程为 20 mm。分苗气缸直接安装于同步带输送苗机构下方,要求分苗气缸缸径不宜过大,同时为节约压缩空气用量,选定分苗气缸缸径为 16 mm,由于分苗拉杆的运动行程为 20 mm,为便于安装选取分苗气缸最大行程为 25 mm,故分苗气缸型号为 MALJ16×25-25 微型气缸,其行程在 0~25 mm 内可调。

1.3 分苗装置分苗稳定性分析

1) 依次连续输送阶段分析。苗块依次排队,经由同步带过渡至载苗台为分苗过程的依次连续输送阶段。该阶段苗块是否顺利过渡至载苗台,是实现连续输送的关键。在分析苗块受力时,假设幼苗主茎秆处于直立状态,苗块形状规整且密度均匀,苗块

质心点即为立方体几何中心点^[23]。如图 7 所示,取倾斜同步带上单枚苗块为研究对象,对其进行受力分析。



1.苗块 Seedling block; 2.载苗台 Seedling table; 3.同步带 Belt; 4.同步带轮 Belt wheel.

图 7 依次连续输送阶段苗块受力分析图

Fig.7 Static analysis of seedling block in transporting stage
为保证同步带具有足够输送力,使得当同步带上相互推挤的苗块数为最小值时(即同时连续输送苗块数为 2),苗块间最小推挤力 f_{t1m} 仍能使其顺利过渡至载苗台上,则苗块间最小推挤力 f_{t1m} 需满足:

$$\begin{cases} f_{t1m} + G \sin \gamma - f_{s1} > 0 \\ f_{t1m} = G \sin \gamma - \mu_1 G \cos \gamma \\ f_{s1} = \mu_2 f_{n1} \\ f_{n1} = G \cos \gamma \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: f_{n1} 为载苗台对苗块的支持力,N; f_{s1} 为载苗台与苗块之间的摩擦力,N; f_{t1m} 为苗块间推挤力最小值,N; G 为苗块受到自身的重力,N; γ 为同步带倾角, $(^\circ)$; μ_1 为苗块与同步带间摩擦系数; μ_2 为苗块与载苗台间摩擦系数。

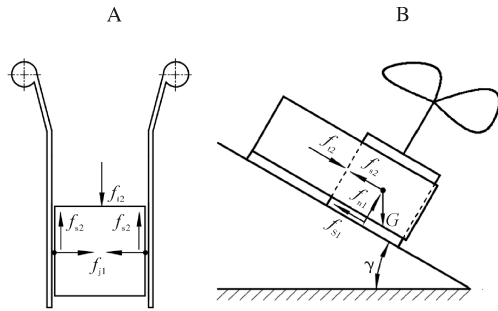
当连续输送的苗块达到一定数量时,苗块所受推挤力最大,易翻倒造成拥堵^[24],影响后续苗块输送及分苗动作,则苗块间最大推挤力 f_{t1M} 需满足:

$$\begin{cases} \sum M(o) = \frac{b}{2} f_{t1M} + \frac{b}{2} G \sin \gamma - \frac{b}{2} G \cos \gamma < 0 \\ f_{t1M} = (n_b - 1)(G \sin \gamma - \mu_1 G \cos \gamma) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: n_b 为同时推挤输送的苗块最大数, f_{t1M} 为苗块间推挤力最大值。由(4)~(5)可知,在既定苗块质量、同步带倾角及苗块摩擦系数下,依次连续输送阶段的稳定性主要受同步带倾角影响。适当增加同步带倾角 γ ,有利于苗块连续输送,但同步带倾角 γ 过大时,苗块稳定性降低易翻倒。

2) 夹持分离阶段分析。苗块过渡至载苗台后,分苗夹板对其进行逐一夹持,以保证前枚苗块的取

苗动作能独立进行。该阶段分苗夹板需实现对苗块的有效夹持,保证苗块不会出现偏移。如图8所示,取倾斜载苗台上被分苗夹板夹持的单枚苗块为研究对象,对其进行受力分析。



A:俯视图 Top view; B:侧视图 Side view.

图8 夹持分离阶段苗块受力分析图

Fig.8 Static analysis of seedling block in separating stage

分苗夹板能够对苗块进行有效夹持,即苗块在向下运动方向不产生位置偏移,则分苗夹板的夹持力需满足:

$$\begin{cases} f_{12} - f_{s1} - 2f_{s2} + G\sin\gamma < 0 \\ f_{s2} = \mu_3 f_{j1} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: f_{j1} 为分苗夹板对苗块的夹持力,N; f_{s2} 为分苗夹板对苗块的摩擦力,N; f_{12} 为夹持分离时苗块间推挤力,N; μ_3 为苗块与分苗夹板间的动摩擦系数。

分苗气缸是分苗夹持力的动力源,分苗气缸输出推力决定了分苗夹板夹持力的大小。本设计所用分苗气缸为标准单杆气缸,其气缸理论推力:

$$F_t = \lambda P \frac{5\pi d_t^2}{2} \quad (7)$$

式(7)中: F_t 为气缸理论推力,N; P 为气缸工作压力,MPa; d_t 为分苗气缸活塞杆直径,mm; λ 为分苗气缸理论推力修正系数, $\lambda \leq 0.5$ 。由公式(7)可知,在气缸缸径一定时,分苗夹持力 f_{j1} 主要与气缸工作压力 P 有关,气缸工作压力越大,气缸的理论推力越大,则分苗夹持力越大。

综合分析式(6)~(7)可知,分苗过程夹持分离阶段,在既定苗块质量、同步带倾角及苗块摩擦系数下,分苗夹板对苗块的有效夹持与气缸工作压力 P 和分苗夹持力 f_{j1} 有关。分苗气缸工作压力 P 越大,则分苗夹持力 f_{j1} 越大,苗块与分苗夹板间不易产生相对偏移。因此在满足分苗夹持力需求前提下,合理选择气缸工作压力 P ,可使苗块的夹持分离越平稳。

2 结果与分析

2.1 分苗装置关键参数分析

参照文献[25-26]方法进行苗块摩擦试验,得到苗块与同步带(聚氨酯材料)、分苗夹板(薄铁板材料)及载苗台(304钢板材料)间摩擦系数,如表2所示。

表2 苗块摩擦系数

Table 2 Friction coefficient of seedling block

测试材料 Materials	静摩擦系数 μ_s Coefficient of static friction		动摩擦系数 μ_d Coefficient of dynamic friction	
	均值 Mean	置信区间 Confidence	均值 Mean	置信区间 Confidence
	聚氨酯同步带 Belt	0.739	[0.735,0.743]	0.659
薄铁板 Iron plate	0.708	[0.702,0.714]	0.607	[0.603,0.610]
304钢板 304 plate	0.304	[0.294,0.314]	0.251	[0.245,0.257]

1)同步带倾角 γ 分析。将表2苗块摩擦系数相关数值代入式(4)计算可得,为达到苗块间最小推挤力 f_{t1m} 要求,同步带倾角 $\gamma \geq 24.5^\circ$ 。根据同步带同时整排输送8枚苗块特点, n_b 取8,代入式(5)计算可得,为保证苗块连续输送时不翻倒,同步带倾角需满足 $\gamma \leq 35.0^\circ$ 。综上,依次连续输送阶段为保证分苗稳定性,同步带倾角 γ 需满足: $24.5^\circ \leq \gamma \leq 35.0^\circ$,该取值范围小于同步带许用最大倾角 36.3° ,符合设计要求。为便于加工和装配,取同步带倾角 γ 为 30° 。

2)分苗夹持力 f_{j1} 与分苗气缸工作压力 P 分析。分析夹持分离时苗块间推挤力 f_{12} 应取最大值,即与推挤输送时苗块间最大推挤力 f_{t1M} 一致,联立式(6)~(7)可得,夹苗分离阶段分苗夹持力满足条件的表达式如(8)所示,计算得到分苗夹持力 f_{j1} 需满足: $f_{j1} > 0.8 N$ 。

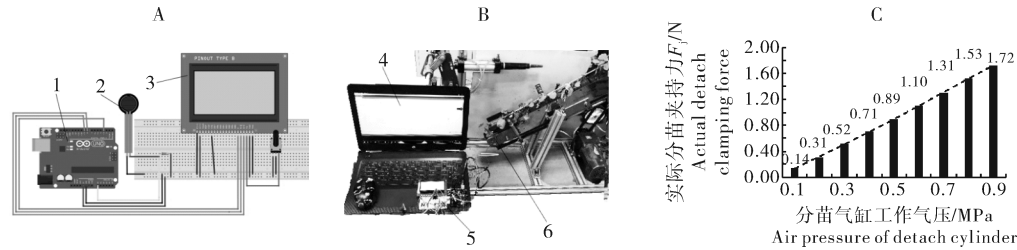
$$f_{j1} > \frac{7(G\sin\gamma - \mu_1 G\cos\gamma) + G\sin\gamma - \mu_2 G\cos\gamma}{2\mu_3} \quad (8)$$

为探究分苗气缸实际工作压力适用范围,以满足分苗夹持力 $f_{j1} > 0.8 N$ 的实际需求。基于FSR402薄膜压力传感器和Arduino开发板设计一款夹持力检测装置,如图9A所示为其接线原理图。工作时,将FSR402薄膜压力传感器安装至分苗夹板上,分苗夹板夹持苗块时,传感器膜片所在电路电压值产生变化,Arduino开发板将其转换为标准信号输出,LCD液晶显示器用于实时显示夹持力,同

时电脑端窗口实时显示压力变化值,检测过程如图 9B 所示。在 0.1~0.9 MPa 工作气压范围内,分苗气缸工作气压 P 与实际分苗夹持力 F_j 对应关系变化如图 9C 所示。

当工作气压 P 变大时,实际分苗夹持力 F_j 也随

之增大,工作气压 P 与实际分苗夹持力 F_j 间呈线性关系。当 $P \geq 0.5$ MPa 时,实际分苗夹持力 $F_j > 0.8$ N,满足最小分苗夹持力需求;同时为节省用气量并减少气缸振动,设定工作气压上限为 0.8 MPa。因此,优选气缸工作气压 P 为 0.5~0.8 MPa。



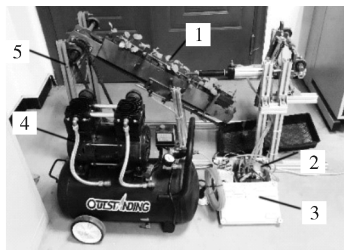
A. 装置接线原理 Wiring principle; B. 夹持力检测过程 Experiment process; C. 夹持力检测结果 Experiment results. 1. Arduino 开发板 Arduino development board; 2. FSR402 薄膜压力传感器 FSR402 membrane pressure sensor; 3. LCD 液晶显示器 LCD liquid crystal display; 4. 后处理计算机 Post-processing computer; 5. 夹持力检测装置 Clamping force detection device; 6. 倾斜式分苗装置 Seedling inclined detach device.

图 9 夹持力检测装置与检测结果

Fig.9 Detection device and results for detach clamping force

2.2 分苗装置分苗试验

选用自制的油菜基质块苗为试验材料,育苗时间为 2019 年 9 月,育苗周期为 28 d,育苗地点为华中农业大学农业机械培训基地。试验设备为 JZC-B2 型万向角度仪(测量精度: $\pm 0.1^\circ$)、如图 10 所示的油菜基质块苗移栽机倾斜式分苗装置试验台、奥突斯公司生产的 OTS-1500W-40L 型无油静音空气压缩机(气压精度: ± 0.1 MPa)及气动程序控制器等。试验主要考察苗块翻倒及分苗效果,故以苗块翻倒率和分苗成功率为试验指标,其计算方法如式(9)~(10)所示。



1. 油菜基质块苗 Rapeseed substrate seedling; 2. 电磁换向阀 Electro-magnetic directional valve; 3. 气动程序控制器 Pneumatic program controller; 4. 空气压缩机 Air compressor; 5. 试验台 Experiment bench.

图 10 试验设备

Fig.10 Experiment equipment

$$\eta_t = \frac{N_t}{N} \times 100\% \quad (9)$$

$$\eta_s = \frac{N_s}{N} \times 100\% \quad (10)$$

式(9)~(10)中: η_t 为苗块翻倒率,%; η_s 为分苗成功率,%; N 为样本总数; N_t 为苗块翻倒数; N_s 为分苗成功数,若苗块在夹持分离前翻倒,仍记为分苗失效。

试验前使用 JZC-B2 型万向角度仪调节同步带倾角为 30° ,调节空气压缩机气压表使工作气压为 0.8 MPa,在保证分苗效率需求下,调节气动程序循环周期为 1.5 s,即分苗频率为 40 株/min。为保证同步带具有足够输送能力,在同步带线速度为 60~90 mm/s 条件下开展分苗试验,试验共分为 4 组,每组试验重复 3 次。单次试验一次性放置 11 株油菜基质块苗于同步带上,取前 10 株作为样本,统计苗块翻倒和分苗成功情况。

如图 11 所示,倾斜式分苗装置分苗试验表明:当同步带线速度为 60 mm/s 时,苗块翻倒率最低、分苗成功率最高;当同步带线速度逐渐增大时,苗块翻倒率逐渐增大、分苗成功率逐渐降低;统计各组试验数据取均值,得到苗块翻倒率为 4.2%,分苗成功率为 92.5%,满足油菜基质块苗分苗需求。

试制加工 4 套倾斜式分苗装置并装配在移栽机上,在华中农业大学校内试验田内,使移栽机在东方红 954 拖拉机作用下牵引运行,如图 12 所示。油菜基质块苗移栽机通过性良好,各部件依次正常运行,但受地表平整度和土壤含水率等影响,后续有待进一步开展田间试验以验证整机性能。

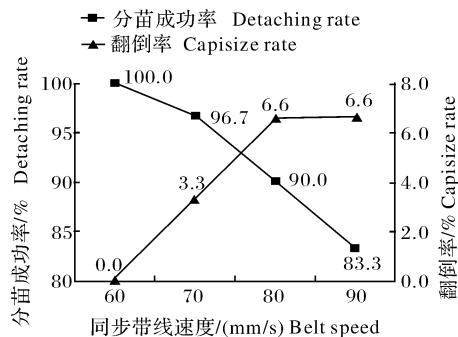


图11 倾斜式分苗装置分苗试验结果

Fig.11 Experiment results of inclined detach device



图12 油菜基质块苗移栽机田间运行图

Fig.12 Field operation diagram of rapeseed substrate seedling transplanter

3 讨论

本研究设计了适用于油菜基质块苗移栽的倾斜式分苗装置,采用倾斜同步带输送苗、双侧分苗夹板夹持分苗,可实现整排苗块连续输送与逐一夹持分离。开展了倾斜式分苗装置设计与主要结构参数分析,确定同步带轮型号为HTD 50-5M-40,分苗夹板旋转角 θ_1 为 20° ,挡苗板翻转角 θ_a 为 15° ,分苗拉杆设计长度 l_g 为120 mm,分苗气缸型号为MALJ16 \times 25-25。开展了苗块在依次连续输送和夹持分离阶段分苗稳定性分析,结果显示依次连续阶段分苗稳定性与同步带倾角有关;夹持分离阶段分苗稳定性及分苗效果与分苗夹持力和气缸工作气压有关。满足分苗稳定性要求优选的倾斜式分苗装置关键参数组合为:同步带倾角 γ 为 30° ,分苗夹持力 f_{j1} $>$ 0.8 N,分苗气缸工作气压 P 为0.5~0.8 MPa。分苗试验得到苗块翻倒率为4.2%,分苗成功率为92.5%,满足油菜基质块苗分苗需求。

实际作业中,影响倾斜式分苗装置分苗效果的因素较多,后续还将开展分苗与送苗、取苗等环节匹

配度研究,探究影响分苗效果的主要运行参数;考虑田间机器振动对苗块稳定性的影响;同时兼顾苗块基质损失情况,开展田间试验以验证整机性能并提高移栽质量。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M].Beijing:China Statistics Press,2018(in Chinese).
- [2] 刘明峰,胡先朋,廖宜涛,等.不同油菜品种适栽期机械化移栽植株形态特征研究[J].农业工程学报,2015,31(z1):79-88. LIU M F, HU X P, LIAO Y T, et al. Morphological parameters characteristics of mechanically transplanted plant in suitable transplanting period for different rape varieties [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(z1):79-88(in Chinese with English abstract).
- [3] 廖庆喜,刘明峰,张照,等.油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J].农业机械学报,2015,46(11):49-56. LIAO Q X, LIU M F, ZHANG Z, et al. Multi-objective optimization design of double five-bar transplanting mechanism for rape pot seedling[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2015,46(11):49-56(in Chinese with English abstract).
- [4] 汤庆,吴崇友,袁文胜,等.油菜毯状苗高速移栽机覆土镇压装置结构设计[J].中国农机化学报,2016,37(3):20-22,33. TANG Q, WU C Y, YUAN W S, et al. Structure design on compacting and covering soil device of rape shallow transplanting machine[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(3):20-22,33(in Chinese with English abstract).
- [5] 向伟,吴明亮,官春云,等.油菜钵体苗移栽栽植孔成型机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(10):40-48,58. XIANG W, WU M L, GUAN C Y, et al. Design and test of transplanting hole-forming machine for rapeseed potted seedlings[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2017, 48(10):40-48,58(in Chinese with English abstract).
- [6] 吴俊,汤庆,袁文胜,等.油菜毯状苗移栽机开沟镇压部件设计与参数优化[J].农业工程学报,2016,32(21):46-53. WU J, TANG Q, YUAN W S, et al. Design and parameter optimization of ditching and compacting parts of rapeseed carpet seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2016, 32(21):46-53(in Chinese with English abstract).
- [7] 张照,廖庆喜,许博,等.油菜钵苗移栽机栽植机构参数匹配与轨迹分析[J].华中农业大学学报,2017,36(2):108-116. ZHANG Z, LIAO Q X, XU B, et al. Parameters matching and trajectory analysis of transplanting mechanism for rapeseed pot seedling [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(2):108-116(in Chinese with English abstract).
- [8] 廖庆喜,张照,胡乔磊,等.油菜钵苗移栽机气动取苗机构设

- 计与轨迹分析[J].农业机械学报,2017,48(11):70-78.LIAO Q X,ZHANG Z,HU Q L,et al.Design and trajectory analysis of pneumatic picking-up mechanism for rape paper pot seedling [J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2017,48(11):70-78(in Chinese with English abstract).
- [9] 陈超鹏,全伟,吴明亮,等.基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(4):433-439.CHEN C P,QUAN W,QU M L,et al. Parameter optimization of vertical soil-filling hole-forming parts for rapeseed transplantation based on discrete element method[J].Journal of Hunan Agricultural University(natural sciences edition),2019,45(4):433-439(in Chinese with English abstract).
- [10] 毛灿,罗海峰,朱毅,等钵苗移栽机械研究现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2020,41(1):215-222.MAO C,LUO H F,ZHU Y,et al. Research status and development trend of seedling transplanting machinery[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2020,41(1):215-222(in Chinese with English abstract).
- [11] 石新异,杨启志,徐莉,等.一种新型直动式钵苗分苗装置的设计与试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(3):301-306,312.SHI X Y,YANG Q Z,XU L,et al.Design and experiment of a new direct action pot seedling separating equipment [J].Journal of Jiangsu University(natural science edition),2019,40(3):301-306,312(in Chinese with English abstract).
- [12] 常航.蔬菜自动移栽机分苗机构及控制系统设计研究[D].镇江:江苏大学,2018.CHANG H. Design and research of seedling separation mechanism and control system of vegetable automatic transplanter[J].Zhenjiang:Jiangsu University,2018(in Chinese with English abstract).
- [13] 何达力,王磊,黄海东,等.藜蒿扦插机分苗取苗机构的设计与运动分析[J].华中农业大学学报,2013,32(4):116-121.HE D L,WANG L,HUANG H D,et al.Mechanism design and kinematic analysis of parting and taking of transplanter for *Artemisia selengensis* using fresh cuttings[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2013,32(4):116-121(in Chinese with English abstract).
- [14] 王永维,何焯亮,王俊,等.旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J].农业工程学报,2018,34(3):19-25.WANG Y W,HE Z L,WANG J,et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land [J].Transactions of the Chinese Society of agricultural engineering,2018,34(3):19-25(in Chinese with English abstract).
- [15] 韩绿化,毛罕平,赵慧敏,等.蔬菜穴盘育苗底部气吹式钵体松脱装置设计[J].农业工程学报,2019,35(4):37-45.HAN L H,MAO H P,ZHAO H M,et al.Design of root lump loosening mechanism using air jets to eject vegetable plug seedlings[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2019,35(4):37-45(in Chinese with English abstract).
- [16] LI L H,WANG C,ZHANG X Y,et al.Mechanized cultivation technology of seedling-growing bowl tray made of paddy straw and its effects on rice production[J]. International agricultural engineering journal,2015,24(3):97-103.
- [17] 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.YU X X,ZHAO Y,CHEN B C,et al.Current situation and prospect of transplanter[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2014,45(8):44-53(in Chinese with English abstract).
- [18] 汲文峰,吴启明,黄海东,等.基于振动机理的藜蒿扦插机分苗机构设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(S1):21-27.JI W F,WU Q M,HUANG H D,et al.Design and experiment of seedling separation device of *Artemisia arborescens* transplanter based on vibration mechanism[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2015,31(S1):21-27(in Chinese with English abstract).
- [19] 廖庆喜,胡先朋,张照,等.油菜移栽机分苗装置分苗过程与钵苗钵体完整性分析[J].农业工程学报,2015,31(16):22-29.LIAO Q X,HU X P,ZHANG Z,et al. Analysis on detaching process of detaching device and seedling pot integrity about rape transplanter[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2015,31(16):22-29(in Chinese with English abstract).
- [20] 那明君,颜世东,杨波,等.玉米纸筒钵苗移栽机输送分苗装置性能研究[J].东北农业大学学报,2016,47(10):51-57.NA M J,YAN S D,YANG B,et al. Study on conveying and separating seedling device of corn paper pot seedling transplanter[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2016,47(10):51-57(in Chinese with English abstract).
- [21] 胡乔磊,廖庆喜,王洋.油菜机械移栽栽培基质块力学与生物学特性分析[J].农业工程学报,2019,35(24):58-65.HU Q L,LIAO Q X,WANG Y. Mechanical and biological characteristics analysis of mechanically transplanted rapeseed substrate block seedlings[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2019,35(24):58-65(in Chinese with English abstract).
- [22] 成大先.机械设计手册[M].4版.北京:化学工业出版社,2002.CHENG D X.Handbook of mechanical design[M].Fourth edition.Beijing:Chemical Industry Press,2002(in Chinese).
- [23] 许博,廖庆喜,王洋,等.油菜纸钵苗移栽机气动插入式取苗过程分析与试验[J].华中农业大学学报,2018,37(6):119-129.XU B,LIAO Q X,WANG Y,et al.Analysis and experiment of seedling process for inserting paper rape pot seedling transplanter[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2018,37(6):119-129(in Chinese with English abstract).
- [24] 耿端阳,张铁中.直动双挡销式钵落苗系统设计[J].吉林大学学报(工学版),2005(5):495-499.GENG D Y,ZHANG T Z. Design of detaching and dropping plug seedlings mechanism with straight movement and double stopping pin[J].Journal of Jilin University(engineering and technology edition),2005(5):495-499(in Chinese with English abstract).
- [25] 王英,陈建能,吴加伟,等.用于机械化栽植的西兰花钵苗力学

- 特性试验[J].农业工程学报,2014,30(24):1-10.WANG Y, CHEN J N, WU J W, et al. Mechanics property experiment of broccoli seedling oriented to mechanized planting[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(24):1-10(in Chinese with English abstract).
- [26] 韩长杰,徐阳,张静,等.半自动压缩基质型西瓜钵苗移栽机设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(13):54-61.HAN C J, XU Y, ZHANG J, et al. Design and experiment of semi-automatic transplanter for watermelon seedlings raised on compression substrate[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2018, 34(13):54-61(in Chinese with English abstract).

Design and stability analyses of inclined detach device for rapeseed substrate seedling transplanter

WANG Yang, ZHANG Qingsong, HU Qiaolei, HE Kun, XIAO Wenli, LIAO Qingxi
College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

Abstract Mechanized transplanting of rapeseed is an efficient planting mode. However, the complicated structure and instability of seedling detaching process affects the transplanting quality of rapeseed substrate seedling. An inclined detach device for rapeseed substrate seedling transplanter was developed to solve the problem that the seedling transplanting device of the traditional transplanting machine is easy to tip over during the transplanting of rapeseed. The structural composition and the seedling detach processes were analyzed. The key components were designed and the main structural parameters of the seedling detach device were determined. A mechanical model of seedlings in the transporting and separating stages of the seedling detach process was constructed to analyze the main factors affecting the stability of the seedlings. The results showed that the seedling block was stable during the transporting stage when the frictional characteristics of the seedlings were constant and the inclination angle of the belt was between 24.5° and 35.0° . The larger of the clamping force, the better of the separation effect in the separating stage. The optimized key parameters of the seedling detach device included 30° inclination angle of the belt(γ), larger than 0.8 N clamping force(f_{j1}), and 0.5-0.8 MPa air pressure of the cylinder(P). The results of bench experiment showed that the capsizes rate of seedlings block was 4.2% and the detaching rate was 92.5%, meeting the needs of seedling detaching of rapeseed substrate seedling. It will provide a reference for designing detach device of rapeseed substrate seedling transplanter.

Keywords rapeseed; automatic transplanter; substrate seedling; detach device; stability analyses; seedling inclined detach

(责任编辑:陆文昌)