

油菜纸钵苗移栽机气动插入式取苗过程分析与试验

许 博¹ 廖庆喜^{1,2} 王 洋¹ 胡乔磊¹

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128

摘要 设计一种油菜纸钵苗移栽机气动插入式取苗装置, 构建取苗过程的力学模型, 通过取苗各阶段的关键参数优选试验, 获得取苗装置最优参数组合。选择倒四棱台形纸钵, 并设计一种双针插入式取苗末端执行器, 根据取苗针间距要求确定取苗执行气缸型号为 MHS4-20D。气动取苗过程分为取苗阶段、送苗阶段和脱苗阶段, 各阶段力学分析与参数优选试验表明, 取苗针与苗钵基质间摩擦力不小于 3.67 N、苗钵脱落高度低于 380 mm 时取苗装置可有效实施取苗功能。台架试验表明, 当取苗针为直径 4 mm 不锈钢、插入苗钵基质深度 20 mm、脱苗高度 340 mm 时, 取苗成功率达 92%。田间试验结果表明, 气动插入式取苗装置取苗效果满足钵苗移栽机技术要求。

关键词 油菜; 移栽机; 纸钵苗; 取苗装置; 气动

中图分类号 S 223.92 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2018)06-0119-11

我国大部分冬油菜种植于长江流域, 采用一年两熟或一年三熟种植模式, 茬口矛盾严重^[1-3]。机械化移栽是解决油菜茬口矛盾的主要方式^[4-6], 取苗装置作为移栽机的关键部件, 对移栽机的种植效率和栽植质量有着决定性的影响^[7-10]。国内外研究者对穴盘苗和裸苗移栽机均有研究, 研制出了结构简单、性能可靠的取苗装置。如, 意大利 Ferrari 公司成功研制了一款全自动移栽机, 实现了穴盘苗取苗、送苗、分苗和栽苗的全自动化, 取苗、送苗作业效率较高^[11]。Ryu 等^[12]等借助笛卡尔坐标系对气动取苗爪的结构进行了研究, 为穴盘苗取苗末端执行器设计提供了参考依据。叶秉良等^[13-14]设计了一种偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构, 能实现高速抓取钵苗和裸苗; 韩绿化等^[15-17]针对穴盘苗设计了一种两指四针钳夹式取苗末端执行器, 能成功将幼苗从穴盘内取出。但上述钵苗取苗装置仍采用机械式, 取苗结构和过程复杂。针对上述问题, 本研究以油菜纸钵苗为研究对象, 设计一种气动插入式取苗装置^[18], 对取苗过程进行力学分析与参数优选试验, 得到取苗装置取苗过程的最优参数组合, 为油菜纸钵苗移栽机气动取苗装置关键参数优选提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 油菜纸钵苗移栽机取苗装置设计

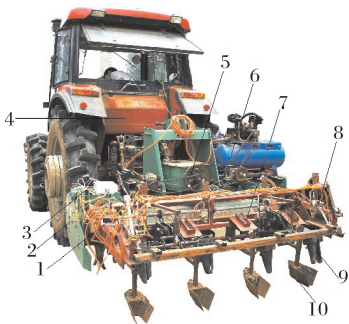
1) 油菜纸钵苗移栽机结构组成及工作原理。油菜纸钵苗移栽机主要由旋耕机、传动系统、气动取苗装置、放苗盘、栽植器及其他辅助系统组成(图 1)。取苗装置将放置在放苗盘上的苗钵逐个取出, 运送至栽植器上方, 苗钵脱离取苗装置落入栽植器完成移栽作业(图 2)。气动取苗装置由空压机提供压缩空气, 通过 PLC 控制盒和电磁换向阀控制各气缸动作; 栽植器由拖拉机动力输出轴提供动力, 通过传动系统控制栽植频率, 与取苗频率一致; 旋耕机与类船形铲式开沟犁为苗钵完成苗床整理。

2) 钵体选型。油菜幼苗的各项参数与生长情况决定了取苗装置的结构与参数设计。近年来, 油菜钵苗由于育苗方式简单, 适用于机械化移栽而得到广泛关注^[19-20]。本研究选用 60 mm×30 mm×60 mm(上边长×下边长×高)倒四棱台形纸钵作为育苗容器(图 3)。

3) 取苗方式。传统取苗方式分为插入式与插拔式(图 4)。采用插入式取苗时, 取苗针垂直插入苗钵基质后在气缸作用下向中间靠拢, 通过取苗针与苗钵基质间摩擦力 f 约束苗钵自由度。插拔式取

收稿日期: 2017-12-05
基金项目: 国家油菜产业体系专项(CARS-12); 农业科研杰出人才及创新团队; 湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)
许 博, 硕士研究生, 研究方向: 现代农业装备设计与测控。E-mail: 1273155687@qq.com
通信作者: 廖庆喜, 博士, 教授, 研究方向: 现代农业装备设计与测控。E-mail: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

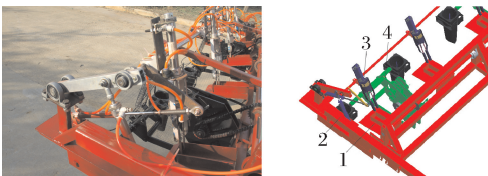
苗方式则是取苗针以一定倾角插入苗钵基质,通过取苗针 对苗钵基质的支持力 F_N 约束苗钵自由度,投苗时将幼苗与基质一起从育苗容器内拔出。当取苗针与苗钵基质间作用力足够大时,2 种取苗方式均能防止苗钵脱离取苗针,稳定取苗。



1.电磁换向阀 Electromagnetic directional valve; 2.旋耕机 Gyrotiller; 3.PLC 控制盒 PLC control box; 4.拖拉机 Tractor; 5.传动系统 Drive system; 6.空压机 Air compressor; 7.放苗盘 Seedling plate; 8.取苗装置 Seedling picking-up device; 9.栽植器 Planting apparatus; 10.类船形铲式开沟犁 Ship shaped shovel type furrow plow.

图 1 油菜纸钵苗移栽机实物图

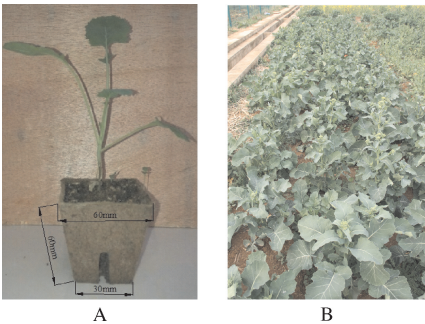
Fig.1 Paper rape pot seedling transplanter



1.放苗盘 Seedling plate; 2.机架 Body frame; 3.末端执行器 End effector; 4.栽植器 Planting apparatus.

图 2 气动取苗装置

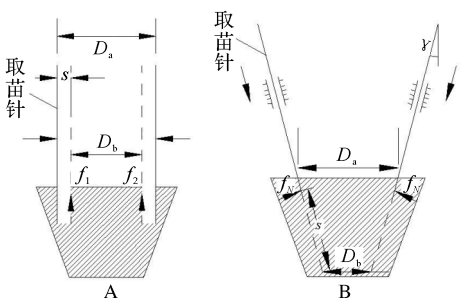
Fig.2 Pneumatic seedling picking-up device



A:纸钵苗适栽期生长情况 The growth of paper pot seedlings during the suitable period of planting; B:纸钵苗田间生长情况 (5 个月) Field growth of paper pot seedlings.

图 3 油菜纸钵苗生长情况

Fig.3 Growth situation of paper rape pot seedling

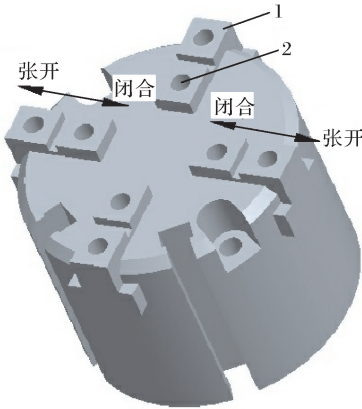


A:插入式取苗 Inserting seedling; B:插拔式取苗 Pluggable seedling.

图 4 传统取苗方案

Fig.4 Traditional picking-up method

气缸动作件通常为直线运动,实现取苗针以一定倾角 γ 插入苗钵中,插拔式取苗需要借助一系列滑轨、滑块、连杆、摆杆等辅助零件^[9],结构复杂。选用 MHS4 型手指气缸作为末端执行器动作器件,通过滑块的径向位移,不需要其他辅助零件,即可完成插入式取苗动作,图 5 为手指气缸模型。本研究中末端执行器采用插入式取苗方案,实际取苗步骤所需辅助零件相对较少,结构简单。



1.手指气缸滑块 Finger cylinder block; 2.内螺纹固定孔 Internal screw fixed hole.

图 5 手指气缸模型

Fig.5 Finger cylinder model

4)末端执行器结构设计。末端执行器实现插入式取苗方式的动作步骤如图 6 所示,取苗针插入苗钵基质后,手指气缸闭合抓紧苗钵,将苗钵运送至指定位置后手指气缸张开,苗钵脱离取苗针。

根据取苗步骤需求,设计了双针插入式末端执行器,其结构示意图如图 7A 所示。I 号气缸为直线伸缩气缸,伸缩杆伸长时完成步骤(1),缩进时在脱苗板辅助下完成步骤(5),手指气缸滑块张开、闭

合可完成步骤(2)、(3)、(4)。为将取苗针固定在手
指气缸滑块上,取苗针上端加工成外螺纹,长度为
20 mm;为减小取苗针插入苗钵基质时的正压力,下

端磨尖处理,其结构示意图如图 7B 所示,由于
 $l_1>l_2$,将主体长度 l_1 视为取苗针整体长度,其直
径 d 无法直接确定,有待对其进行优选。

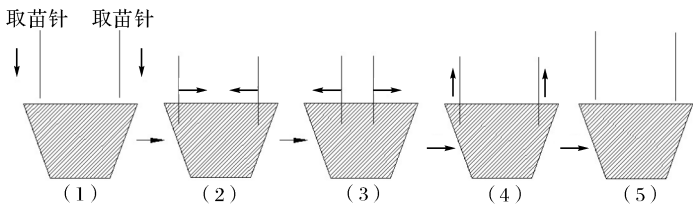
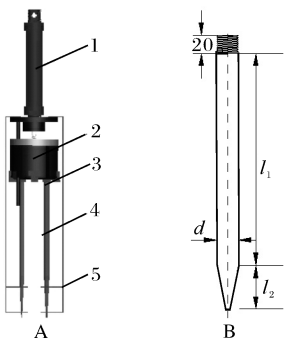


图 6 插入式取苗步骤
Fig.6 Steps of inserting picking



A: 双针插入式末端执行器 Double needle insertion terminal ac-
tuator; 1. I 号气缸 No.1 cylinder; 2.手指气缸 Finger cylinder;
3.手指气缸滑块 Finger cylinder block; 4.取苗针 Seedling needle;
5.脱苗板 Plantlet stripping; B:取苗针 Seedling needle.

图 7 末端执行器结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of end effector

5)末端执行器参数设计。为避免末端执行器伤
及油菜幼苗,取苗针插入苗钵时两针间距应大于幼
苗主分支宽,手指气缸不触及幼苗顶部,各项取苗参
数如图 8 所示,基于此建立规划目标

$$\begin{cases} \min D_b > [D] \\ D_a - D_b = 2s \end{cases} \quad (1)$$

$$\min l_1 > [M] + h \quad (2)$$

式(1)~(2)中, D_b 为手指气缸闭合时取苗针间
距,mm; $[D]$ 为幼苗主分支宽,mm; D_a 为手指气缸
张开时取苗针间距,mm; $[M]$ 为幼苗高度,mm; h
为取苗针插入苗钵基质深度,mm; s 为手指气缸滑
块行程,mm。

根据适栽期油菜幼苗植株形态特征确定主分支
宽和高度^[21], $[D]$ 、 $[M]$ 分别为 20、167 mm。取苗
针插入苗钵后不应对钵体壁造成损伤,根据钵体尺
寸建立约束条件。

$$D_a < L_2 - 2h \tan \alpha \quad (3)$$

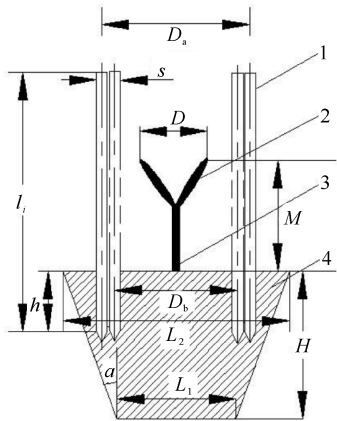
式(3)中, L_2 为钵体上边长,为 60 mm; α 为钵

体倾角,为 14° 。

取苗针插入苗钵基质足够深度才能使取苗针与
基质间的摩擦力保证取苗装置稳定取苗,但取苗针
不能穿过钵体,因此

$$[H] \leq h \leq H \quad (4)$$

式(4)中, H 为钵体高度,为 60 mm; $[H]$ 为取
苗装置有效实施取苗功能时,取苗针插入苗钵基质
的最小深度。



1.取苗针 Seedling needle; 2.幼苗主分支 Main branch of seed-
ling; 3.幼苗主茎秆 Main stem of seedling; 4.苗钵 Seedling pot.

图 8 取苗参数示意图

Fig.8 Parameters of picking

将已知参数带入到该双重规划目标问题中进行
求解,根据式(1)~(4)计算得到:

$$\begin{cases} 20 < D_b = D_a - 2s < (60 - 0.5[H] - 2s) \\ l_1 > 167 + [H] \end{cases} \quad (5)$$

取苗针插入苗钵基质深度 $[H]$ 暂取为 30 mm。
则在手指气缸闭合时取苗针间距至少为 20 mm,张
开时间距至多为 45 mm,取苗针长度至少为 197
mm 时可避免损伤幼苗和钵体。根据取苗针间距要
求可确定手指气缸型号,本研究选用三泰气动科技

有限公司生产的 MHS4-20D 型手指气缸,其手指闭合间距 D_b 为 20 mm,张开间距 D_a 为 24 mm,行程 s 为 2 mm。

6)取苗装置。将伸缩气缸、末端执行器、机架以及连接件组合成取苗装置(图 9),可实现自动取苗功能。各气缸型号及关键参数如表 1 所示。初始阶段 I 号、II 号气缸处于缩进状态,III 号气缸处于伸长状态,手指气缸处于张开状态。

1.2 取苗装置取苗过程力学分析

为使取苗装置有效实施取苗功能,对取苗装置取苗过程中各阶段苗钵开展力学分析,为参数优选提供理论依据。在进行力学分析时,假设取苗针为

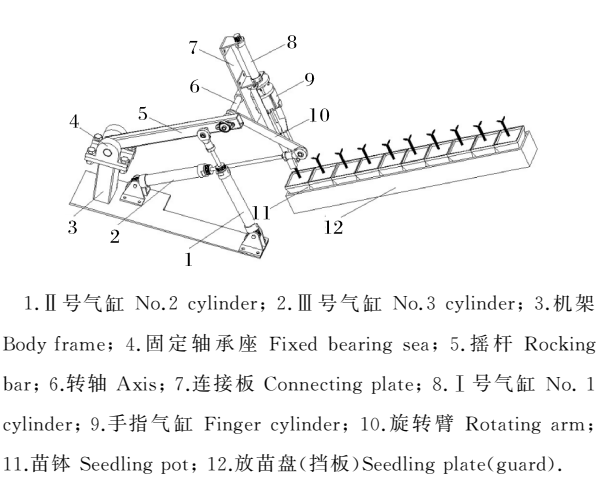


图 9 取苗装置取苗示意图

Fig.9 Schematic diagram of picking-up device

表 1 气缸型号及关键参数

Table 1 Cylinder type and key parameters

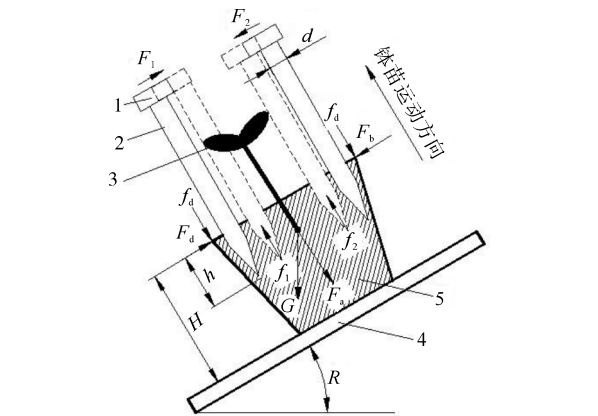
气缸型号 Air cylinder model	伸缩杆直径/mm Diameter of telescopic rod	行程/mm Distance	压强/MPa Pressure	伸缩速度/(mm/s) Expansion speed
I 号气缸(MAC16×50) No. I cylinder	8	50	0.8	30~800
II 号气缸(MAC20×100) No. II cylinder	8	100	0.8	30~800
III 号气缸(MAC20×100) No. III cylinder	8	100	0.8	30~800
手指气缸(MHS4-20D) Finger cylinder	/	2	0.8	/

圆柱形刚体,钵苗基质为均质材料结构体,幼苗主茎秆处于直立状态。

1)取苗阶段。放苗盘上有序放置 n 株钵苗,取苗针对准首苗钵, I 号气缸伸长,取苗针插入苗钵基质,手指气缸滑块闭合,取苗针对苗钵施加预紧力, II 号气缸伸长,苗钵短暂加速后,恒速离开放苗盘,此为取苗阶段。放苗盘上首苗钵的受力示意图如图 10 所示。为保证整个取苗阶段处于稳定状态,苗钵不应有平行于放苗盘平面的位移,故在此平面上的受力平衡方程为:

$$\begin{cases} F_1 + F_d - F_2 - F_b - G(\sin(R) - u_{sp}\cos(R)) = 0 \\ F_1 - F_2 = 0 \\ F_d = nG(\sin(R) - u_{sp}\cos(R)) \\ F_b = (n-1)G(\sin(R) - u_{sp}\cos(R)) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, u_{sp} 为苗钵与放苗盘前挡板间的静摩擦系数; F_1 、 F_2 为单个取苗针对苗钵的预紧力, N; G 为苗钵平均重力, N; F_d 为放苗盘前挡板对首苗钵压力, N; F_b 为后续苗钵对首苗钵压力, N; f_1 、 f_2 为单个取苗针与苗钵基质间的摩擦力, N; f_d 为首苗钵与放苗盘前挡板间的摩擦力, N; f_b 为首苗钵与后续苗钵间的摩擦力, N; R 为放苗盘倾角,与苗钵自然翻转角一致,为 30° 。



1.手指气缸滑块 Finger cylinder block; 2.取苗针 Seedling needle; 3.油菜幼苗 Rape seedlings; 4.放苗盘 Seedling plate; 5.苗钵基质 Seedling pot matrix.

图 10 取苗阶段苗钵受力示意图

Fig.10 Force diagram of seedling pot in seedling stage

取苗针对苗钵的预紧力 F_1 (F_2) 取决于手指气缸滑块行程及苗钵基质坚实度,而基质坚实度与其成分与含水率相关^[22]。本研究在特定基质成分与含水率前提下进行分析与试验,这里视预紧力为定值。为使苗钵成功离开放苗盘,在其运动方向上应

满足：

$$f_1 + f_2 > f_d + f_b + G \cos(\beta) + F_a \quad (7)$$

式(7)中, F_a 为苗钵离开放苗盘瞬间因加速度产生的惯性力, N。式(7)满足：

$$\begin{cases} f_d = F_d u_{sp} \\ f_b = F_b u_{sb} \\ F_a = ma \\ a = \frac{v_{II}}{t} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, u_{sb} 为苗钵与苗钵间的静摩擦系数； v_{II} 为Ⅱ号气缸伸缩速度, mm/s； t 为苗钵加速运动时间, s； m 为苗钵平均质量, kg。

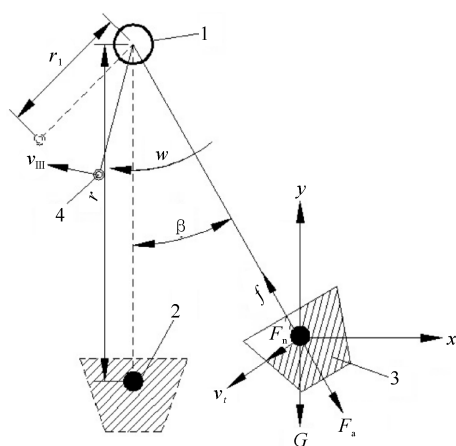
Ⅱ号气缸推、拉力可由公式 $F_Q = P \times \pi D^2 / 4$ 得到, 约 40 N, 远大于苗钵重力, 故将加速运动时间视为定值, 取 $t = 0.1 \text{ s}^{[9]}$ 。根据钵苗抗挤压破损特性^[23], 为防止首苗钵因后续钵体的压力过大而破损, 放苗盘上苗钵数 n 最大取 10。在计算取苗过程中所需取苗针与苗钵基质间摩擦力最大值时, 各气缸伸缩速度取最大值, 即 $v_I = v_{II} = v_{III} = 800 \text{ mm/s}$ 。

根据式(6)、(7)、(8), 当放苗盘上苗钵数量 n 、质量 m 和加速运动时间 t 一定时, 取苗针与苗钵基质间的摩擦力 f_1 (f_2) 越大、Ⅱ号气缸伸缩速度 v_{II} 越小, 越有利于有效实施取苗, 但减小Ⅱ号气缸速度会降低取苗效率。取苗针与苗钵基质间的摩擦力包括静摩擦力 f_j 和因基质的粘着力而产生的滑移阻力 f_h , 由于苗钵基质为均匀结构体, 则存在如下关系：

$$\begin{cases} f_1 = f_2 = f_j + f_h = (F_1 + p_s) \cdot u_{sz} \\ s = \pi \cdot d \cdot h \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, u_{sz} 为取苗针与苗钵间的静摩擦系数； s 为取苗针与苗钵基质间的接触面积, mm^2 ； p 为粘附因子, 取决于取苗针材料。由式(9)分析可知, 为增大取苗针与苗钵基质间的摩擦力, 可选用摩擦系数较大的材料、增大取苗针直径和插入苗钵基质深度, 但过大的取苗针直径和插入深度会增大取苗针插入苗钵基质体积, 增加对基质的根土破坏程度, 这对钵苗移栽是不利的, 需对取苗针材料、直径、插入苗钵基质深度进行参数优选。

2) 送苗阶段。苗钵离开放苗盘后, Ⅲ号气缸缩进带动旋转臂转动, 进而带动Ⅰ号气缸及手指气缸以转轴为中心旋转至竖直方向, 苗钵被运送至栽植器口上方的过程为送苗阶段。将 2 个取苗针视作一个整体, 送苗阶段苗钵的受力简图如图 11 所示。



1. 转轴 Axis; 2. 苗钵质心 Centroid of seedling pot; 3. 苗钵 Seedling pot; 4. 旋转臂 Rotating arm.

图 11 送苗阶段苗钵受力简图

Fig.11 Force diagram of seedling pot in feed seedling pot

送苗阶段苗钵作圆周运动, 为保证苗钵不脱离取苗针, 稳定送苗, 根据图 11 所示受力分析, 应满足：

$$\begin{cases} \sum F_x = f \sin \beta + F_n \cos \beta - F_a \sin \beta = 0 \\ \sum F_y = f \cos \beta - F_a \cos \beta - G - F_n \sin \beta = 0 \end{cases} \quad (0 < \beta < R) \quad (10)$$

式(10)中, f 为 2 个取苗针与苗钵摩擦力合力, N; F_a 为苗钵在旋转过程中的离心惯性力, N; F_n 为取苗针对苗钵的支持力, N; β 为任一时刻取苗针与竖直方向夹角, ($^\circ$)。消去 F_n 后可得：

$$f = f_1 + f_2 = F_a + G \cos \beta \quad (11)$$

苗钵离心惯性力可由式(12)确定：

$$F_a = m \frac{v_t^2}{r} \quad (12)$$

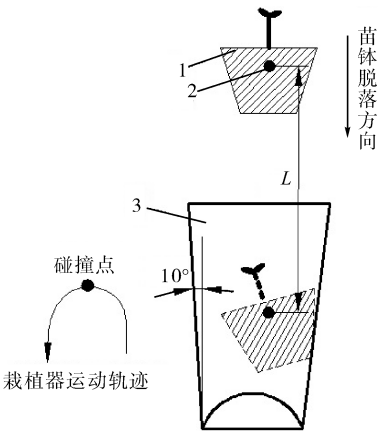
式(12)中, v_t 为苗钵切向线速度, mm/s; r 为苗钵旋转半径, mm。

由式(11)、(12)可知, 当 $\beta = 0$, 即苗钵处于最低点时, 所需取苗针与苗钵基质间的摩擦力最大, 为保证成功送苗, 摩擦力应满足：

$$f > m \frac{v_t^2}{r} + G \quad (13)$$

送苗阶段苗钵质心与旋转臂角速度一致, 苗钵旋转半径 r 为 270 mm, 旋转臂长度 r_1 为 160 mm, 则苗钵最大切向线速度为 $v_t = 270 \times v_{III} / 160 = 1350 \text{ mm/s}$ 。当苗钵质量、旋转半径一定时, 取苗针与苗钵基质间摩擦力越大、Ⅲ号气缸伸缩速度越小, 越有利于保证送苗成功率, 同样的, 减小Ⅲ号气缸速度会降低取苗效率。

3)脱苗阶段。苗钵被运送至栽植器上方后,I号气缸缩进,脱苗板反推苗钵脱离取苗针,苗钵落入栽植器的过程为脱苗阶段(图 12)。



1.苗钵 Seedling pot; 2.苗钵质心 Centroid of seedling pot; 3.栽植器 Planting apparatus.

图 12 脱苗阶段示意图

Fig.12 Schematic diagram of removing seedling stage

取苗装置与栽植器一起随机组前进,位置相对固定,苗钵脱离取苗针后相对于栽植器做初速度为零的自由落体运动。理想的取苗装置与栽植器运动匹配关系是:当苗钵脱离取苗针落入栽植器并与栽植器壁碰撞时,栽植器正处于运动轨迹最高点,竖直方向瞬时速度为零。则苗钵与栽植器碰撞时的相对速度为苗钵自由落体速度 v_z ,该速度可确定为

$$v_z = \sqrt{2gL} \tag{14}$$

式(14)中, g 为重力加速度, m/s^2 ; L 为苗钵自由落体高度,mm。当苗钵与栽植器壁碰撞时,苗钵基质颗粒黏结滑移、坍塌和重新排列,苗钵基质产生破损,影响幼苗存活率^[24]。根据式(14),苗钵自由落体高度 L 越大,碰撞相对速度 v_z 越大,苗钵基质破损率也就越大^[25]。根据相关文献与移栽经验,苗钵基质破损率应控制在 2% 以内^[26-27]。考虑到移栽作业时取苗装置与栽植器运动匹配关系无法达到理想状态,实际碰撞相对速度大于同高度苗钵自由落体速度,这里将苗钵基质破损率合格指标定为 1.8%。

1.3 取苗装置关键参数优选试验

根据取苗各阶段力学模型分析,取苗装置有效实现取苗功能的条件是取苗针与苗钵基质间的摩擦力能克服首苗钵与放苗盘前挡板及后续苗钵间的摩擦力、重力和因加速度产生的惯性力,使苗钵随取苗针一起运动,且脱离取苗针后与栽植器壁碰撞时基

质破损率低于 1.8%。首苗钵与放苗盘前挡板及后续苗钵间的摩擦力、重力和速度变化产生的惯性力均可通过计算得出,但由于基质颗粒的滑移,取苗针与苗钵基质间的摩擦力无法定量计算,苗钵脱落后由碰撞产生的破损程度也无法通过模型定量描述。本研究通过相关仪器对取苗针与苗钵基质间摩擦力、苗钵脱落碰撞破损率进行测试与分析,以对取苗装置关键参数进行优选。

试验前在纸钵中育苗,营养基质由营养土与田间黏土经孔径 2 mm 网筛筛选过的细土按体积比 1 : 1 混合组成,育苗品种为华油杂 62。育苗时基质完全填充纸钵内部空间,油菜籽投放在基质平面以下 20~30 mm 处,幼苗根系可对基质形成良好包络。培育 30 d 至油菜幼苗适栽期,测得苗钵平均质量为 138 g,采用干湿质量法测得苗钵基质平均含水率为 35.6%。

为保证取苗装置有效实施取苗功能,并使取苗针插入苗钵基质体积尽量小,需对取苗针材质、直径及插入苗钵基质深度进行优选试验。选取取苗针材质(A)、直径(B)、插入苗钵基质深度(C)3 个试验因素,各因素分别取 3 个水平,试验因素水平表如表 2 所示,选取正交表 $L_9(3^4)$ 安排试验方案,采用单因素单水平重复试验方法,每组试验重复进行 5 次。取苗针材质在市场可选材料里选择,本研究里选用 ABS 工程塑料、不锈钢和铝合金。取苗针直径分别选择为 4、5、6 mm,插入苗钵基质深度分别为 15、20、25 mm,各参数取苗针如图 13 所示。

表 2 因素水平表

Table 2 Factor level table

水平 Level	材质 Material	直径 d /mm Diameter	深度 h /mm Depth
1	ABS 工程塑料 ABS engineering plastic	4	15
2	不锈钢 Stainless steel	5	20
3	铝合金 Alufer	6	25

2 结果与分析

2.1 苗钵摩擦系数测试

为获得放苗盘上首苗钵与放苗盘前挡板及后续苗钵间的摩擦力,利用 MXD-02 型摩擦系数仪(济南兰光机电技术有限公司,精度 0.001)测定苗钵与前挡板(45 号钢)、苗钵与苗钵间摩擦系数(表 3)。苗钵与前挡板间的静摩擦系数 $u_{sp} = 0.535$,置信度为 0.966;苗钵与苗钵间的静摩擦系数 $u_{sb} = 0.623$,



图 13 不同参数取苗针

Fig.13 Seedling needles with different parameters

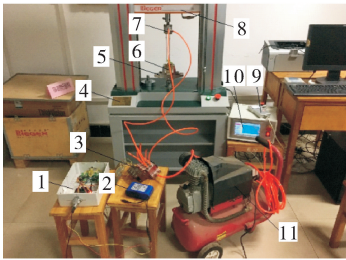
置信度为 0.950。结合式(6)、(7)、(12)与已知参数计算可得,各阶段所需取苗针与苗钵基质间摩擦力应满足:取苗阶段 $f_{取}>2.82\text{ N}$,送苗阶段 $f_{送}>2.10\text{ N}$ 。考虑苗钵质量分布和机具、气缸振动,取苗针与苗钵基质间摩擦力应满足: $f>1.3\times\max\{f_{取},f_{送}\}$,即 $f>3.67\text{ N}$ 时取苗装置可有效实施取苗功能。

2.2 取苗针-苗钵基质摩擦力测试

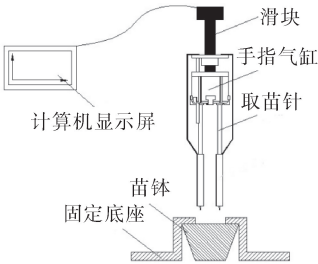
选用 RGM-3005 型电子万能材料机(瑞格尔仪器有限贸易分公司),将手指气缸(接不同参数取苗针)挂接在万能材料机滑块,苗钵固定在底座上(图 14)。按预定试验方案将取苗针插入苗钵基质后,手指气缸闭合,滑块以 30 mm/min 的速度向上提升,根据在计算机显示屏上读取的作用力峰值可得取苗针与苗钵基质间的摩擦力最大值。

表 3 摩擦系数测试结果
Table 3 Friction coefficient test results

测试材料 Test materials	静摩擦系数 U_s Static friction coefficient		动摩擦系数 U_d Dynamical friction coefficient	
	均值 Mean	置信度 Confidence level	均值 Mean	置信度 Confidence level
前挡板(# 45 钢) Head board(# 45 steel)	0.535	0.966	0.512	0.983
苗钵 Seedling pot	0.623	0.950	0.554	0.963



A



B

A:测试平台实物图 Physical map of test platform;1.PLC控制盒 PLC control box; 2.12 V 电池 12 V battery; 3.电磁换向阀 Electro-magnetic directional valve;4.RGM-3005 型电子万能材料机 RGM-3005 electronic universal material machine; 5.固定底座 Fixed base; 6.苗钵 Seedling pot; 7.手指气缸 Finger cylinder; 8.滑块 Slider; 9.材料机遥控器 Material machine remote control; 10.计算机显示屏 Computer screen; 11.空压机 Air compressor; B:测试平台示意图 Sketch map of test platform.

图 14 万能材料机取苗平台

Fig.14 Universal material machine seeding platform

当取苗针材质选用铝合金、直径为 5 mm、插入苗钵基质深度为 15 mm 时,进行 5 次重复摩擦力测试,测得摩擦力峰值平均值为 3.98 N,取苗针插入苗钵基质体积为 294.4 mm³。按照同样的方法,测

试其他组合取苗针-苗钵基质摩擦力(表 4)。正交试验结果显示,各因素对取苗针-苗钵基质摩擦力影响的敏感度由高到低依次为取苗针直径、插入苗钵基质深度、取苗针材质,摩擦力与取苗针直径、插入

表 4 取苗针-苗钵基质摩擦力正交试验

Table 4 Orthogonal test results of friction between seedling needle and seedling pot matrix

试验编号 Test team	材质(A) Material	直径(B) Diameter	深度(C) Depth	摩擦力 f /N Friction	插入体积 V/mm^3 Volume
1	1	1	1	3.20	188.4
2	1	2	2	4.12	392.5
3	1	3	3	4.94	706.5
4	2	1	2	3.76	251.2
5	2	2	3	4.00	490.6
6	2	3	1	4.08	423.9
7	3	1	3	3.48	314.0
8	3	2	1	3.98	294.4
9	3	3	2	4.62	565.2
K_1	12.26	10.44	11.26		
K_2	11.84	12.10	12.50		
K_3	12.08	13.64	12.42		
R	0.42	3.20	1.24		

因素主次顺序
Decreasing sequence of factors

B>C>A

表 5 取苗针-苗钵基质摩擦力方差分析

Table 5 Variance analysis between seedling needle and seedling matrix

差异源 Difference source	偏差平方和 Sum of squares	自由度 Free degree	均方 Mean square	F	显著性 Significance
B	1.71	2	0.85	14.17	*
C	0.32	2	0.16	2.67	/
$e^{\Delta}(=A+e)$	0.23	4	0.06	/	/

注 Note: $F_{0.01}(2,4)=18, F_{0.05}(2,4)=6.94$.

深度呈正相关。试验组除 1、7 外,其他组合所测摩擦力均满足有效取苗要求。4 号试验组中取苗针插入基质体积最小,对苗钵根土破坏程度最小,因此,将 4 号试验方案作为优选参数组合,即取苗针材质为不锈钢,直径为 4 mm,工作时插入苗钵基质深度为 20 mm。根据表 5 方差分析,因素 B 对摩擦力影响显著,因素 C 对摩擦力有一定影响,为有效增加摩擦力,可优先增大取苗针直径,其次增加插入基质深度。3 种材质的取苗针表面均光滑,与基质间的粘附因子和摩擦系数相差不大,因素 A 对摩擦力影响不显著,编入新偏差。

2.3 苗钵自由落体碰撞试验

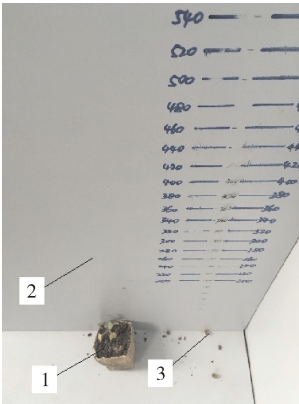
苗钵自由落体碰撞试验以落下高度 L 为变量,苗钵基质破损率 K 为评价指标,试验如图 15 所示。以随机 5 个苗钵为 1 组进行同高度跌落试验,试验前测量苗钵质量 m_i ,将苗钵从指定高度跌落至倾角为 10° 的斜面上,测量跌落苗钵质量 m_j ,则苗钵基质破损率 K_{ij} 可由式(15)计算得到

$$K_{ij} = \frac{m_i - m_j}{m_i} \times 100\% (i = j = 1 \cdots 5)$$

(15)

在不同高度重复多次试验后,试验结果如图 16

所示。试验中苗钵跌落时,部分基质破碎成颗粒弹跳至钵体外,造成损失。根据试验结果,随着苗钵跌落高度的增加,基质破损率随之增大,当跌落高度超过 380 mm 时,平均破损率超过 1.8%。在设计加工移栽机具时,取苗装置脱苗点与栽植器高度应小于 380 mm。



1.苗钵 Seedling pot; 2.倾斜面 Incline; 3.跌落颗粒 Falling particles.

图 15 苗钵自由落体试验

Fig.15 Seedling pot free fall test

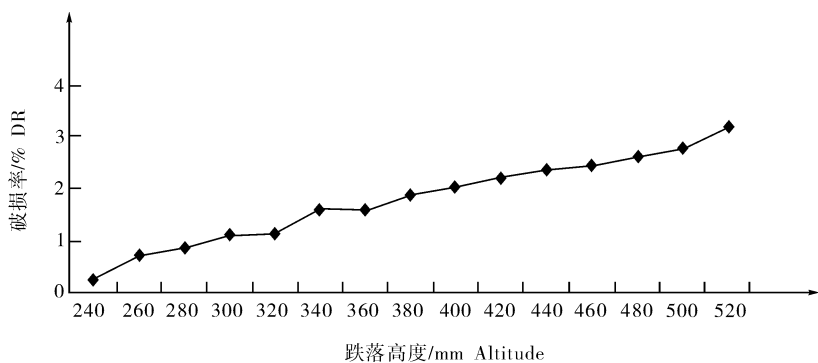


图 16 苗钵自由落体试验结果
Fig.16 Seedling pot free fall test results

2.4 优选参数组合台架验证试验

为验证优选参数组合方案对于油菜移栽作业的实际效果,对优选参数组合进行了台架验证试验(图 17)。试验采用直径 4 mm 的不锈钢取苗针,插入苗钵基质深度为 20 mm,苗钵脱落高度为 340 mm。各气缸伸缩速度无法定量控制,试验中以取苗频率为因素,间接反映气缸速度,开展单因素重复试验,每组试验重复 5 次,每次试验放置 10 株钵苗,试验中取苗装置对幼苗无明显损伤,试验结果如表 6 所示。取苗作业 15 d 后,观察苗钵基质与幼苗生长情况(图 18),基质保存完整,幼苗全部存活。台架试验结果表明,随着取苗频率增加,气缸伸缩速度加快,取苗成功钵体数逐渐减少,成功率逐渐下降。当取苗频率从 15 株/min 增加到 20 株/min 和从 20 株/min 增加到 25 株/min 时,取苗成功率分别下降 2.13%、6.52%,后者下降明显。综合考虑取苗成功

率与取苗效率,将气动取苗装置取苗作业频率选为 20 株/min,取苗成功率为 92%。

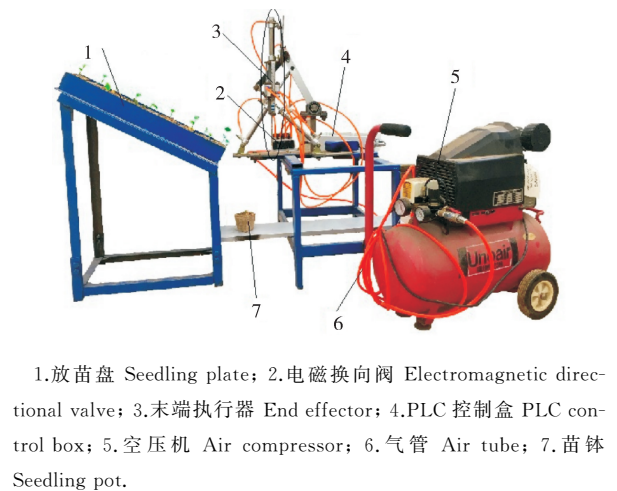


图 17 台架试验

Fig.17 Bench test

表 6 优选参数组合台架试验

Table 6 Bench test of optimal parameter combination

取苗频率/(株/min) Seedling frequency	取苗成功钵体数 The number of successfully seedlings	取苗成功率/% Success rate	幼苗损伤率/% Injury rate	幼苗存活率/% Survival rate
15	47	94	0	100
20	46	92	0	100
25	43	86	0	100

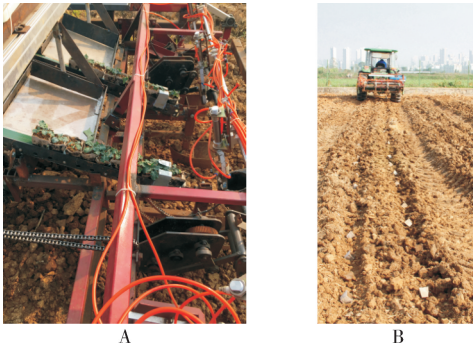
于 2017 年 11 月在华中农业大学校内试验基地开展了田间试验。试验前对田间试验地旋耕平整处理,测得土壤平均坚实度为 57.1 kPa,平均含水率为 19.22%。试验使用约翰迪尔 1054 拖拉机作为动力源,连续栽植油菜钵苗,试验效果如图 19 所示。试验中幼苗无明显损伤,取苗装置稳定取苗,漏栽率低于 5%,满足油菜钵苗移栽机技术要求。

3 讨 论

根据适栽期油菜幼苗生长特性及苗钵尺寸要求,设计了双针插入式末端执行器,通过双目标规划优化了取苗针间距与长度,进而确定手指气缸型号为 MHS4-20D。对取苗装置取苗过程各阶段构建了力学模型,并进行了力学分析。苗钵基质成分与



图 18 钵钵基质与幼苗生长情况
Fig.18 Situation of seedling pot substrate and seedling growth



A: 试验准备 Test preparation; B: 试验效果 Test effect.

图 19 油菜移栽机田间试验
Fig.19 Field test of transplanter

含水率一定时,取苗与送苗阶段的取苗效果与取苗针-钵钵基质间摩擦力相关,脱苗阶段的取苗效果与脱苗高度相关。钵钵摩擦系数测试结果表明,为保证取苗装置有效实施取苗功能,取苗针与钵钵基质间摩擦力不小于 3.67 N。取苗针-钵钵基质摩擦力测试试验表明,取苗针材质为不锈钢,直径 4 mm,插入钵钵基质深度 20 mm 时,满足取苗针与钵钵基质间摩擦力要求,且对基质根土破坏程度最小。为有效增大摩擦力,可优先增大取苗针直径,其次增加插入基质深度。优选参数组合台架验证试验表明,钵钵脱落高度取 340 mm、取苗装置取苗频率为 20 株/min 时,取苗成功率达 92%。取苗后将钵钵继续栽植 15 d,钵钵基质保存完整,幼苗生长良好。根据田间试验结果,气动插入式取苗装置取苗效果满足油菜钵钵移栽机技术要求。

实际作业中,影响气动取苗装置取苗效果的因素较多,后续有待进一步研究取苗针表面结构、油菜钵钵基质机械物理特性等因素对取苗效果的影响,

以期提高取苗装置取苗成功率;同时,在保证取苗成功率前提下,可优化气缸动作步骤,使各气缸同时运动,进而提高取苗效率。

参 考 文 献

- [1] 王寅,鲁剑巍.中国冬油菜栽培方式变迁与相应的养分管理策略[J].中国农业科学,2015,48(15):2952-2966.
- [2] 王跃勇,于海业.穴盘幼苗机械手取苗基质完整率影响因素试验与分析[J].农业工程学报,2015,31(14):65-71.
- [3] 向伟,吴明亮,官春云,等.油菜钵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.
- [4] 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.
- [5] 张照,廖庆喜,许博,等.油菜钵钵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.
- [6] 周梅芳,俞高红,赵匀,等.椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵钵取苗机构的参数优化与试验[J].农业工程学报,2014,30(18):13-21.
- [7] 童俊华,蒋焕煜,蒋卓华,等.钵钵自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J].农业工程学报,2014,30(16):8-16.
- [8] 刘娇娣,曹卫彬,田东洋,等.基于钵钵力学特性的自动移栽机执行机构参数优化试验[J].农业工程学报,2016,32(16):32-39.
- [9] 刘继展,李茂,李男,等.草莓穴盘苗移栽末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(11):49-58.
- [10] 赵雄,王川,杨茂祥,等.非圆齿轮行星轮系自动取苗机构逆向设计分析[J].农业工程学报,2015,31(16):30-36.
- [11] 李华,曹卫彬,李树峰,等.辣椒穴盘苗自动取苗机构运动学分析与试验[J].农业工程学报,2015,31(23):20-27.
- [12] RYU K H, KIM G Y. Development of a gripper for robotic transplanter and evaluation of its transplanting performance[J]. Korean society for agricultural machinery, 1998, 23(3): 271-276.
- [13] 叶秉良,李丽,俞高红,等.蔬菜钵钵旋转式取苗机构动力学分析与试验[J].农业机械学报,2014,45(6):70-78.
- [14] 叶秉良,俞高红,陈志威,等.偏心齿轮-非圆齿轮行星系取苗机构的运动学建模与参数优化[J].农业工程学报,2011,27(12):7-12.
- [15] 韩绿化,毛罕平,严蕾,等.穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J].农业机械学报,2015,46(7):23-30.
- [16] 韩绿化,毛罕平,胡建平,等.穴盘苗自动移栽钵钵力学特性试验[J].农业工程学报,2013,29(2):24-29.
- [17] 韩绿化,毛罕平,胡建平,等.温室穴盘苗自动移栽机设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(11):59-67.
- [18] 廖庆喜,张照,胡乔磊,等.油菜钵钵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):1-10.
- [19] 廖庆喜,刘明峰,张照,等.油菜钵钵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.
- [20] 俞亚新,骆春晓,俞高红,等.椭圆-不完全非圆齿轮行星系取苗机构参数优化[J].农业机械学报,2013,44(6):62-68.
- [21] 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(增刊 1):79-88.

[22] 胡静,毛罕平,胡胜尧,等.穴盘苗斜楔块片状式取苗末端执行器设计[J].农机化研究,2016,7(7):133-141.

[23] 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.

[24] 冯青春,王秀,姜凯,等.花卉幼苗自动移栽机关键部件设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(6):21-27.

[25] KUMAR G V, RAHEMAN H. Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings[J]. Biosystems engineering, 2011, 110(2): 189-197.

[26] 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.

[27] TSUGA K. Development of fully automatic vegetable transplanter[J]. Japan agricultural research quarterly, 2000, 34(1): 21-28.

Analysis and experiment of seedling process for inserting
paper rape pot seedling transplanter

XU Bo¹ LIAO Qingxi^{1,2} WANG Yang¹ HU Qiaolei¹

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China ;
2.Southern Grain and Oil Crops Collaborative Innovation Center, Changsha 410128, China

Abstract A pneumatic insertion picking-up device is developed to solve the problem that the structure and seedling process of mechanical picking-up device for paper seedling transplanter are complicated. The mechanical model of seedling process was constructed. Key parameters of each seedling stage were optimized and the optimal parameter combination of the plant was obtained. The 60 mm×30 mm×60 mm(above length×below length×height) pour four square table shaped paper pot was used as seedling pot. A kind of double needle insertion type terminal actuator was designed. According to the requirement of the spacing of the needles, the model of the actuating cylinder is MHS4-20D. It was confirmed that the pneumatic picking-up process can be divided into stage of seedling, feeding and seedling removing. Results of mechanical analysis and parameter optimization test of each stage showed that when the friction between seedling needles and seedling pot matrix is not less than 3.67 N with dropping height of seedling pot less than 380 mm, the seedling picking-up device can effectively carry out the function of picking. The result of bench test showed that optimal parameters include the seedling needles are made of stainless steel with a diameter of 4 mm, inserting depth of 20 mm and dropping height of 340 mm, the success rate of seedling is 92%. The results of field testing showed that the effect of the pneumatic insertion picking-up device meets the technical requirements of the pot seedling transplanter. It will provide a reference for designing the pneumatic picking-up device and optimizing key parameters of the pot seedling transplanter.

Keywords rape; transplanter; paper pot seedling; picking-up device; pneumatic

(责任编辑:陆文昌)