

蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置设计与试验

金鑫¹ 杜新武¹ 杨传华² 姬江涛¹ 董哲³ 颜华³

(1. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003; 2. 佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154000;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对目前穴盘蔬菜自动移栽中钵苗离盘转运至导苗筒过程钵体损伤大、机构轨迹复杂及机电气控制成本高等问题,设计了一种由纵向移盘机构、顶苗机构、横向移盘机构、导苗筒、夹苗机构等组成的纯机械传动式蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置。利用功能-动作过程-动作法(F-P-A法)对穴盘苗自动输送过程进行动作分解,确定了符合各环节动作要求的机构形式;运用运动建模、仿真和精度综合分析等方法,并结合农艺与动力学要求,得出横向移盘机构圆柱凸轮最大压力角 $\alpha_{\max}=29.32^{\circ}$,夹苗机构的苗爪翻转凸轮行程 $h_p=29\text{ mm}$ 等关键部件参数;基于建立的时序分析模型,利用 Visual Studio 编写了可视化的蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置时序分析程序,通过对各机构动作进行匹配,优选出一组最佳参数:纵移机构初始相位角 $\varphi_z=185^{\circ}$,顶苗机构初始相位角 $\varphi_d=108^{\circ}$,曲柄长度 $a=78\text{ mm}$,连杆长度 $b=112\text{ mm}$,偏距 $e=20\text{ mm}$,苗爪翻转机构初始相位角 $\varphi_f=15^{\circ}$,苗爪开合机构初始相位角 $\varphi_k=135^{\circ}$ 。以苗龄期45 d、3种不同含水率的番茄穴盘苗为试验对象,进行自动输送试验。结果表明:穴盘苗基质含水率和取苗速度对装置取苗成功率均有影响,呈负相关,基质损失率则与取苗速度关系不大;该装置能够实现140株/min的取苗速度(取苗成功率超过95%),当基质含水率为符合育苗规范的32.79%时,取苗成功率98.44%、基质损失率36.67%,满足移栽农艺要求且远超人工移栽效率。

关键词: 蔬菜穴盘苗; 自动移栽; 自动输送装置; 设计; 试验

中图分类号: S225.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0103-09

Design and Experiment on Automatic Transporting Mechanism for Vegetable Potted Seedlings

Jin Xin¹ Du Xinwu¹ Yang Chuanhua² Ji Jiangtao¹ Dong Zhe³ Yan Hua³

(1. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154000, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of transporting, such as complexity of the mechanism, high cost of the electrical control system, pot damage in the process of transplanting, a new automatic seedling transplanting device was designed, which consists of vertical movement mechanism, ejecting mechanism, horizontal movement mechanism, guiding mechanism and gripping mechanism. The specific form of each mechanism were determined by using F-P-A method. The cam's maximum pressure angle was determined as 29.32° and the cam displacement was determined as 29 mm according to agricultural requirements using virtual modeling, simulation and accuracy analysis. The sequence analysis model program was built with the Visual Studio software, and a group of optimal parameters was obtained with this program. The initial phase angle of vertical mechanism was 185° , initial phase angle of ejecting mechanism was 108° , the length of the crank was 78 mm, the length of the connecting bar was 112 mm,

收稿日期: 2016-01-19 修回日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505130)、黑龙江省科学基金项目(E2015042)和河南省教育厅高校科研项目(15A416003)

作者简介: 金鑫(1986—),男,讲师,博士,主要从事经济作物种苗高速栽插与低损收获技术研究,E-mail: jx.771@sina.com

通信作者: 姬江涛(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业技术装备研究,E-mail: jji0907@163.com

the eccentricity was 20 mm, the initial phase angle of the gripping mechanism was 15° and the initial phase angle of the opening and closing mechanism was 135°. The experiment was done with three different moisture contents of the tomato seedlings aged 45 d. The experiment result showed that the moisture content and gripping speed both had impacts on the success rate of the seedlings, and both had negative correlation, the gripping speed had little impact on the damage of the seedling. This device had the performance that the maximum gripping speed was 140 plants per minute at which the success rate of gripping was above 95%, and the success rate of gripping was 98.44% and the damage rate of the seedling was 36.67% at the condition that the moisture content was 32.79%, which meets the agricultural requirements and was faster than the manual.

Key words: vegetable potted seedling; automatic transplanting; automatic transporting device; design; experiment

引言

穴盘苗自动移栽技术关键是如何实现由机器替代人工连续地将钵苗取出并投入分苗机构,其中包括苗盘的准确进给、钵苗的夹持取出、放苗等作业环节,称为穴盘苗自动输送技术。要求有一定效率的同时保证钵体损伤小,以免影响后续种植作业,降低秧苗成活率。

目前,国内外对穴盘苗自动输送技术均有研究^[1-2],其中取苗方式和机理是研究热点,主要集中于入穴扎取式和顶出-夹取式^[3-10]。苗钵顶出-夹取相比扎取苗钵多出一道工序,但从降低基质损失的角度来看:苗钵是由草炭、蛭石、珍珠岩等基质在植株根系盘绕下组成的块状体,根据文献[11]提出的土壤黏附力学理论,土壤抗拉强度最低、抗压强度最高;通常情况下土壤抗压强度是抗拉强度的10倍以上^[12-13]。扎取苗钵方式在执行拔出动作时,将会对钵体产生拉力,苗钵基质容易在拉拔作用下断裂,导致取苗不完整,此外,执行机构的运动轨迹相对复杂、精度要求较高^[14];而顶出-夹取方式的动作都是对钵体基质施加压力,理论上对苗钵造成的损伤较小。

目前,采用顶出-夹取方式的穴盘苗自动输送装置大都以PLC为控制器,气缸、电动缸或液压马达为驱动元件;纯机械式驱动由于装置结构相对复杂,机构动作同步控制难^[1-2],因此目前研究较少。但基于PLC的电气液等控制元件成本较高,以法拉利全自动2行移栽机为例,引进价格约65万元,目前难以在国内推广,为此本文简化结构,以纯机械传动代替电气液控制,降低成本的同时提高作业稳定性。在综合分析穴盘苗自动输送各环节动作要求的基础上,确定各执行机构形式;采用运动建模、仿真和基于动作时序模型的参数优选等方法,获得机构的最佳参数组合,并进行试验验证。

1 穴盘苗自动输送装置整体设计

1.1 设计要求

本研究针对目前广泛使用的128穴蔬菜穴盘苗,采用纯机械方式实现整盘苗的进给、取出和投放等一整套输送过程。其中,包含苗盘的步进输送、穴盘苗顶出、钵体夹持、夹苗爪翻转及投苗等动作。具体设计要求如下:

- (1)苗盘有序、精准进给。能够实现苗盘的精确定位和准确步进,定位精度控制在1 mm以内,且无累计误差。
- (2)穴盘苗低损取、投。减少对穴盘苗钵体和幼苗的损伤,整个过程基质损失率在35%以下,漏苗率控制在5%以下。
- (3)穴盘苗高速输送。各部件动作同步准确衔接,取苗速度达到120株/min。
- (4)工作连续。能够实现128(16×8)穴苗盘的连续供盘作业。
- (5)适应性强。要与现有的半自动栽植机具匹配,通过少量改进,能直接安装在吊杯式和导苗管式半自动移栽机上。

1.2 整机结构与工作原理

如图1所示,蔬菜穴盘苗自动输送装置主要由

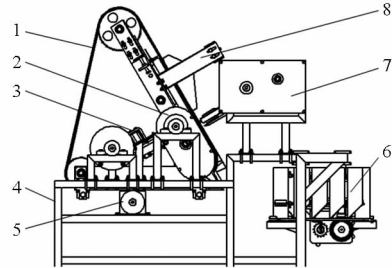


图1 穴盘苗自动输送装置结构简图
Fig.1 Structure of automatic transporting device for vegetable potted seedlings

- 1. 苗盘进给装置 2. 纵向移盘机构 3. 顶苗机构 4. 机架
- 5. 横向移盘机构 6. 导苗筒 7. 夹苗机构 8. 引导板

苗盘进给装置(纵向移盘机构、横向移盘机构及苗盘架等组成)、顶苗机构和夹苗机构组成。苗盘架与水平机架呈 60°角安装,顶苗杆和夹苗爪均与苗盘架垂直配置,导苗机构水平安装于机架后。横、纵向移盘机构的作用是控制穴盘苗在规定距离和周期内,正确有序地进入顶苗位置;顶苗机构通过利用顶苗杆穿过苗盘底部漏水孔将穴盘苗从钵底完全顶出,与此同时夹苗机构将苗钵夹持住,然后夹苗爪翻转 60°打开将穴盘苗投入导苗筒中,完成一次穴盘苗的自动输送。

作业原理:穴盘苗自动输送装置采用一个动力

源驱动,进而传递至各个机构,保证了进给苗、顶苗、夹苗、翻转投苗等环节动作同步。苗盘横向放置于进给装置苗盘架上,每排 16 株苗,顶苗机构每转动一周,顶出 8 株;随后苗盘横移一次,横向移盘机构凸轮从近休位置到达远休位置,顶苗机构顶出剩下的 8 株;然后纵向移盘机构带动苗盘进给一个穴距,顶苗机构顶出下一排的 8 株,横向移盘机构凸轮从远休位置回到近休位置,再顶出该排剩余 8 株,完成一个循环,在穴盘苗进给与顶出的过程中,夹苗机构始终同步作业,与苗茎同向夹持穴盘苗钵体,并翻转投苗,取苗过程如图 2 所示。

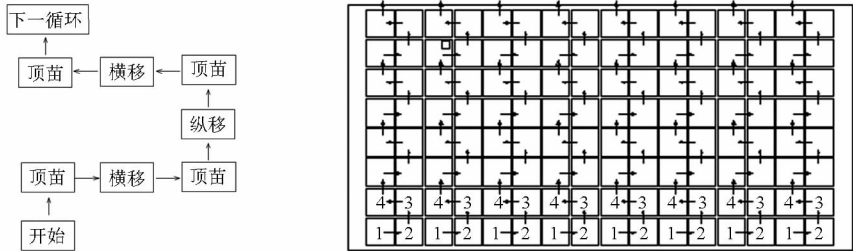


图 2 取苗作业原理图
Fig. 2 Working scheme of seedlings picking-up

1.3 动作分析与传动方案设计

1.3.1 动作分解

利用功能-动作过程-动作法(F-P-A 法^[15]),即由机械所要实现的功能去构思机械的工艺动作过程,然后将工艺动作过程进行动作分解得到相应的执行动作),可将穴盘苗自动输送装置分解为穴盘步进进给动作、顶苗动作、夹苗爪开合与翻转动作,其动作原理见图 3。

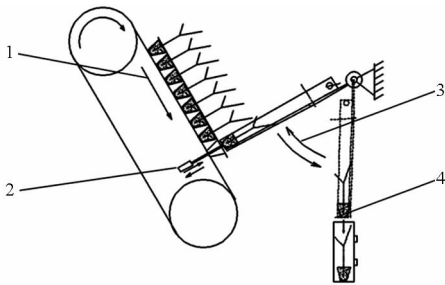


图 3 穴盘苗自动输送动作原理图
Fig. 3 Schematic diagram of automatic transporting for vegetable potted-seedlings

1. 苗盘进给动作 2. 顶苗动作 3. 苗爪翻转 4. 夹苗动作

各部件的运动要求如下:

(1) 苗盘纵向移动:满足顶苗条件时,苗盘静止不动,顶完一排,苗盘纵向移动一个穴距的距离,运动过程中保持动作稳定,定位准确,其动作为间歇的步进运动。

(2) 苗盘横向移动:采用间隔顶苗方式,即顶杆间隔布置,一次顶出一排苗的一半(即 8 株),然后苗盘横移一次,再顶出剩余 8 株,这需苗盘横移动

作,要求在顶苗时苗盘保持静止不动,在顶苗的间隙时完成横向移动,该动作是一个间歇直线往复运动。

(3) 顶苗动作:要求一排 8 根顶杆同时从穴盘底部对应的漏水孔将钵苗顶出,在此之前需有一定时间保证苗盘进给到位,即顶苗动作与苗盘步进动作不能发生干涉,其动作为直线往复运动。

(4) 夹苗爪开合动作:夹苗爪应以张开状态到达取苗位置,当顶杆将苗顶出后,夹苗爪闭合,将钵苗夹持,并以闭合状态直至投苗位置后打开,钵苗落入导苗筒中,随后继续以打开状态至下次夹苗。

(5) 夹苗爪翻转动作:顶杆将苗顶出后,夹苗爪夹住苗钵,然后摆动至导苗筒正上方,等钵苗投入导苗筒且苗盘完成进给后,再转回初始位置,该动作要求夹苗爪能摆动一定的角度,并且在两个摆动的极限位置有一定的停留时间,其动作可以看作是一个间歇的摆动动作。

1.3.2 动力传动设计

在对各机构动作分析的基础上,设计了穴盘苗自动输送装置传动方案,如图 4 所示,整个装置运行无较大扭矩,且转速要求低;按照取苗速度 80 ~ 240 株/min 设计,则顶苗机构转速范围 10 ~ 30 r/min,选取 0.75 kW 变频调速电动机为室内试验提供动力。动力首先由链传动传递到顶苗机构和横移机构,通过链传动传递到苗爪翻转机构,苗爪翻转凸轮和苗爪开合机构由齿轮副实现联动。整个机构由一个动力源提供动力,保证各个机构的动作同步。

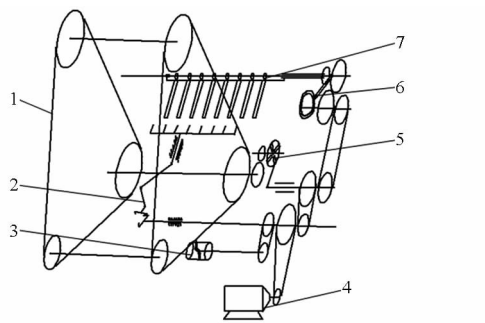


图 4 传动方案示意图

Fig.4 Schematic of transmission scheme

- 1. 苗盘进给装置 2. 顶苗机构 3. 横向移盘机构 4. 电动机
- 5. 纵向移盘机构 6. 苗爪翻转机构 7. 苗爪开合机构

2 关键部件设计与参数优选

2.1 顶苗机构

装置工作时,链传动将动力传递给苗盘移动机构和顶苗机构,顶苗机构做周期性的往复直线运动将钵苗从穴盘中顶出,研究表明,在顶苗过程中,钵苗的顶出位移和顶杆直径对钵苗顶出后的完整性有比较大的影响^[16],为了保证顶出苗钵的完整性,必须选取合适的顶杆尺寸和位移。顶苗机构的运动简图如图 5 所示。

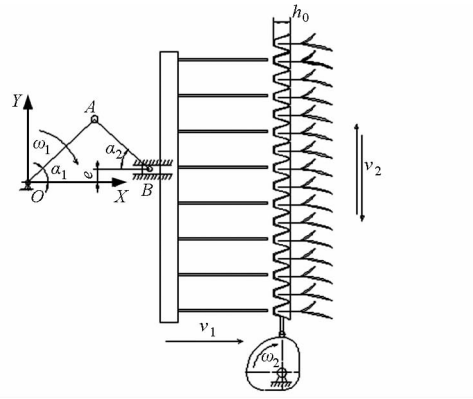


图 5 顶苗机构简图

Fig.5 Structure of seedling pushing-out mechanism

图中 A、B 点的位移方程为

$$\begin{cases} x_A = a \cos \alpha_1 \\ y_A = a \sin \alpha_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_B = x_A + b \cos \alpha_2 \\ y_B = y_A + b \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 a——曲柄 OA 的长度,mm

b——连杆 AB 的长度,mm

α₁——曲柄 OA 角位移,rad

α₂——连杆 AB 的角位移,rad

由 α₁ = ω₁t, a sin α₁ = b sin α₂ + e 得

$$\cos \alpha_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{a \sin \alpha_1 - e}{b} \right)^2} \quad (3)$$

式中 ω₁——曲柄角速度,rad/s

e——偏距,mm

B 点质心的运动方程为

$$\begin{cases} x_B = a \cos(\omega_1 t) + b \cos \left(\sqrt{1 - \left(\frac{a \sin(\omega_1 t) - e}{b} \right)^2} \right) \\ y_B = e \end{cases} \quad (4)$$

B 点速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_B = -a\omega_1 \cos(\omega_1 t) - \frac{a\omega_1 (\sin(\omega_1 t) - e) \cos(\omega_1 t)}{b \sqrt{1 - \left(\frac{a \sin(\omega_1 t) - e}{b} \right)^2}} \\ \dot{y}_B = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由以上公式可以看出,顶苗机构的运动状态主要与 OA、AB 杆长、转速及偏心距有关,实际加工过程中,由于运动副之间间隙和构件制造的误差因素,装配后会使从动件产生一定的输出误差,顶苗机构的顶杆需要从苗盘底部的排水孔穿出,漏水孔的直径略大于顶杆的直径,顶杆如果与孔壁发生干涉将会影响系统的正常工作,所以,要对曲柄滑块顶苗机构进行运动分析和精度综合分析,根据郭仁生^[17]提出的大批量构件制造统计数据显示线性尺寸的变化服从正态分布理论,利用 Matlab 软件进行编制计算,结果如图 6 所示。

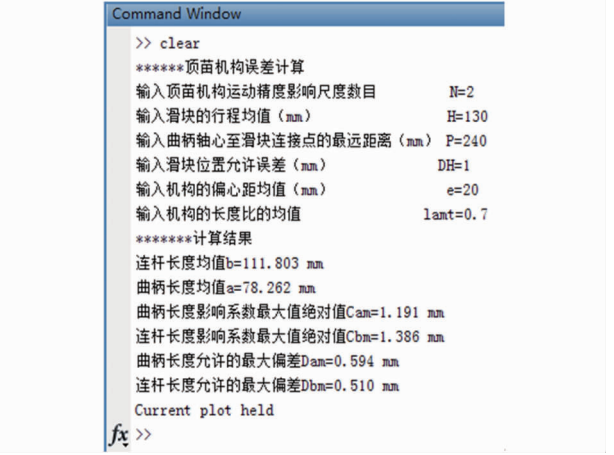


图 6 Matlab 计算结果

Fig.6 Calculating results by Matlab

穴盘底部的漏水孔直径为 10 mm,考虑到漏水孔的一致性误差、机构的加工误差及机械振动等问题,需要预留 2 mm 的允许误差。根据计算结果,偏距 e = 20 mm,确定曲柄 OA 长度 a = 78 mm,连杆 AB 长度 b = 112 mm;选取直径为 6 mm 的冷拔圆钢作为顶苗杆,曲柄长度 a 和连杆长度 b 的允许最大偏差分别为 Δa = 0.594 mm 和 Δb = 0.51 mm,保证了顶苗机构的运动精度在漏水孔尺寸允许范围之内。

$n = 5$ (即槽轮机构转动一次角度 $\beta' = 360/n = 72^\circ$), 则齿轮副减速比为 $i = 5/16$ 。验算步进距离

$$\frac{\beta' i Z_P}{360} = \frac{72 \times 5 \times 72 \times 8}{360 \times 16} = 36 \text{ mm} \quad (9)$$

满足机构设计要求。

2.4 夹苗机构

穴盘苗被顶出后,经夹苗机构的苗爪将其苗钵夹持进而运送至导苗筒中,夹苗机构要完成苗爪的开合和翻转两个动作(如图 10 所示)。苗爪在凸轮机构和齿轮齿条机构的合成运动下做往复翻转运动,控制苗爪开合的凸轮做圆周运动。

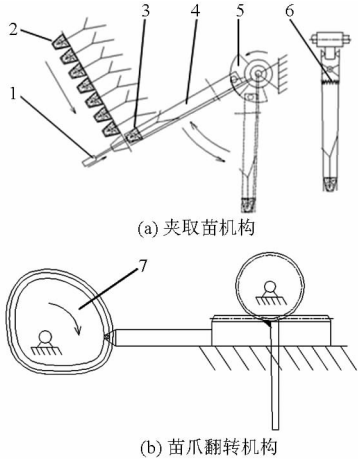


图 10 苗爪翻转机构原理图

Fig. 10 Schematic of seedling clamp turning-over mechanism
1. 顶苗杆 2. 苗盘 3. 穴盘 4. 苗爪 5. 苗爪开合凸轮
6. 回位弹簧 7. 苗爪翻转凸轮

夹苗机构是间歇的往复摆动运动,苗爪在夹持苗钵翻转时,应保持夹紧稳定,翻转冲击小,不致将苗钵甩脱;为了减小冲击,采用加速度变化较小的正弦加速度曲线,苗爪翻转凸轮的运动方程为

$$h_p = \begin{cases} H \left(\frac{\varphi}{90} - \frac{\sin \frac{2\pi\varphi}{90}}{2\pi} \right) & (0 \leq \varphi \leq 90^\circ) \\ H & (90^\circ < \varphi \leq 180^\circ) \\ H \left[1 - \frac{\varphi - 180}{90} + \frac{\sin \frac{2\pi(\varphi - 180)}{90}}{2\pi} \right] & (180^\circ < \varphi \leq 270^\circ) \\ 0 & (270^\circ < \varphi \leq 360^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

式中 h_p ——苗爪翻转凸轮的行程,mm
 H 的取值取决于取苗位置与落苗位置夹角,设苗盘与水平面夹角为 γ ,落苗位置选取竖直位置。则

$$H = \frac{\gamma \pi m_p z_p}{2\pi} \quad (11)$$

式中 m_p ——齿轮齿条机构的模数,mm
 z_p ——齿轮的齿数

根据前阶段的研究,取苗盘与水平面夹角 $\gamma = 60^\circ$,根据空间位置选取齿轮齿数 $z_p = 22$,模数 $m_p = 2.5 \text{ mm}$,则

$$H = \frac{60 \times \pi \times 2.5 \times 22}{360} \approx 28.798 \text{ mm}$$

为了便于加工制造,取 $H = 29 \text{ mm}$ 。

2.5 参数优选

2.5.1 时序建模

顶苗杆顶苗过程中穴盘要保持静止状态,即要保证曲柄滑块机构在 X 方向位移大于顶苗位移,为避免顶杆与穴盘产生运动干涉,曲柄所转的相位角应与横向、纵向移盘机构的远休或近休相位角相对应。根据此要求结合图 2 所示取苗作业时序原理,建立数学模型

$$x_B = a \cos(\omega_1 t) + b \sqrt{1 - \left(\frac{a \sin(\omega_1 t) - e}{b} \right)^2} \quad (12)$$

设 $x_{B_{\max}}$ 为 x_B 的最大值, x_0 为顶苗点位置坐标,则顶苗动作时的顶苗位移为 $x_{B_{\max}} - x_0$,可建立

$$a \cos \alpha + b \sqrt{1 - \left(\frac{a \sin \alpha - e}{b} \right)^2} = x_{B_{\max}} - x_0 \quad (13)$$

其中 $0 \leq \alpha \leq 2\pi$,根据曲柄滑块的轨迹方程可知方程有两个解 α_1 和 α_2 ,则 $2\pi - |\alpha_2 - \alpha_1|$ 为顶苗机构到达顶苗点之后所对应的相位角。为使顶苗机构与移盘机构不产生干涉,需满足

$$\begin{cases} |\alpha_2 - \alpha_1| > 2\beta_1 \\ 2\pi - |\alpha_2 - \alpha_1| < 4\beta_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中 β_1 ——苗盘纵移的运动相位角, ($^\circ$)
 β_2 ——苗盘横移机构远休或近休相位角, ($^\circ$)

根据此条件,可列方程组求得 α_1 、 α_2 和 x_0 。根据 $a = 78 \text{ mm}$ 、 $b = 112 \text{ mm}$ 、 $e = 20 \text{ mm}$ (第 2.1 节),可求得 $x_{B_{\max}} = 200 \text{ mm}$;根据时序条件,设计的移盘机构的休止角为 $\beta_1 = 108^\circ$ 、 $\beta_2 = 120^\circ$ 、 $\alpha_2 > \alpha_1$ 。将所得参数值代入式 (12),获得方程组并求解得 $x_0 = 69.3714$ 、 $\alpha_1 = 68.7^\circ$ 、 $\alpha_2 = 308.7^\circ$,经过取整处理,且要使横向移盘机构有一定的预留时间,取 $x_0 = 55 \text{ mm} > h_0 (45 \text{ mm})$ (穴孔深),保证了顶苗机构与横、纵向移盘机构各动作间均有一定预留时间。

2.5.2 人机交互时序优选分析

根据各机构数学模型,利用 Microsoft Visual Studio 软件编写了可视化的蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置时序分析程序,如图 11 所示。通过人机对话,可以改变各机构的参数,图形区将会实时生成顶苗、横移、纵移、苗爪开合和苗爪翻转的位移曲线图;进行时序分析,可输入的参数包括:顶苗机构的曲柄长度、连杆长度、偏心距、顶苗位置,横移机构的

凸轮行程(即苗盘的穴距),纵移机构的初始相位、槽轮槽数,苗爪翻转机构的初始相位和凸轮行程。图形区输出的图形为:横移机构、顶苗机构和苗爪翻转机构的位移曲线图;纵移机构和苗爪开合机构的动静脉冲图。根据图形求得一组最佳的机构参数,使各个机构的动作得以匹配,避免产生干涉。

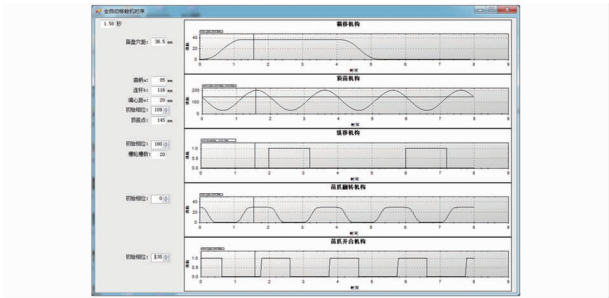


图 11 穴盘苗自动输送装置时序分析辅助程序界面
Fig. 11 Software interface of timing analysis for automatic transporting device of vegetable potted seedlings

通过运动时序的可视化分析,发现苗盘横移机构的运动周期最长,以其开始转动的初始相位角为原点,各机构的参数为:横移机构的位移为 $s = 36\text{ mm}$,纵移机构的初始相位角 $\varphi_z = 185^\circ$,顶苗机构的初始相位角 $\varphi_d = 108^\circ$,曲柄长度 $a = 78\text{ mm}$,连杆长度 $b = 112\text{ mm}$,偏距 $e = 20\text{ mm}$,苗爪翻转机构的初始相位角 $\varphi_f = 15^\circ$,苗爪开合机构的初始相位角 $\varphi_k = 135^\circ$ 。

3 试验

3.1 试验条件

试验于 2015 年 12 月 24—26 日,在中国农业机械科学研究所土壤植物机器系统国家重点实验室内进行,试验期间室温 $14 \sim 17\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(1) 试验仪器:穴盘苗自动输送装置样机,变频调速电动机(转速范围 $6 \sim 240\text{ r/min}$),i2000 型电子天平,DZG-6020 型真空干燥箱,秒表,信封,游标卡尺(量程 200 mm ,精度 0.02 mm),台秤。

(2) 试验材料:以色列 1918 品种的番茄穴盘苗,苗龄期 45 d,育苗基质主要成分泥炭、珍珠岩和蛭石的质量比为 $3:1:1$,苗钵盘根状态良好,出苗率大于 98% ;随机测量 50 株试验用苗,平均苗高 130.84 mm 、叶展宽 72.66 mm 、主茎粗 2.98 mm ;采用信封和干燥箱测得 3 批不同含水率的试验用穴盘苗平均含水率分别为: 20.45% 、 32.79% 和 43.09% 。

3.2 试验指标

取苗成功率为

$$\eta_1 = \frac{W}{W_0} \times 100\% = \frac{W_0 - W_1 - W_2}{W_0} \times 100\% \quad (15)$$

式中 W ——取苗成功个数
 W_0 ——穴盘苗总数
 W_1 ——未顶出的穴盘苗数
 W_2 ——未成功夹取到位的穴盘苗数

取苗结束后苗钵大部仍然残留在苗盘中的秧苗个数为未顶出的穴盘苗数 W_1 ;苗爪未能夹取到或者在落苗动作前穴盘苗就从苗爪中脱落的秧苗数为未成功夹取到位的穴盘苗数 W_2 。

基质损失率为

$$\eta_2 = \frac{m}{m_0} \times 100\% = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_0} \times 100\% \quad (16)$$

式中 m ——整个取苗过程中基质损失质量,kg
 m_0 ——整盘苗总质量(不包括苗盘),kg
 m_1 ——顶苗过程中的基质损失质量,kg
 m_2 ——夹苗过程中的基质损失质量,kg
 m_3 ——落苗过程中的基质损失质量,kg

苗盘进给装置底部收集的基质和残留在穴盘中的基质为顶苗过程中的基质损失质量 m_1 ;在取苗爪运行轨迹下方收集的基质为夹取过程中的基质损失质量 m_2 ;导苗筒内残留的基质为落苗过程中的基质损失质量 m_3 。

3.3 试验方法

采用 3 批穴盘苗进行试验,每批取 3 盘苗为 1 组(出苗率均为 100%),共计 9 盘苗 3 组并标号(每盘苗 128 株,每个试验因素组合测试 1 盘苗),前期测得 3 批穴盘苗基质的平均含水率分别为 20.45% 、 32.79% 和 43.09% 。设定 3 种取苗速度约 80 、 110 、 140 株/min ,对应变频器的频率分别为 2.5 、 3.5 、 4.5 Hz 。对 3 种含水率的 3 组穴盘苗进行不同取苗速度的钵苗自动输送试验,试验过程中观察顶苗和夹取到位穴盘苗的情况,进行记录;在装置底部放置已知质量的塑料板,用于收集散落的基质,穴盘苗输送完成后再对穴盘和导苗筒中的基质加以收集及称量,见图 12。

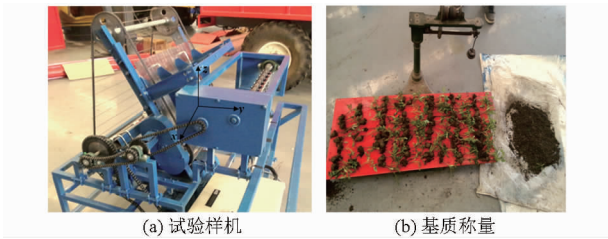


图 12 试验样机及基质称量
Fig. 12 Test prototype and nursery substrate weighing

3.4 结果与分析

穴盘苗自动输送试验结果见表 1。

表 1 穴盘苗自动输送试验结果

Tab. 1 Experiment results of automatic transporting for vegetable potted seedlings									
含水率/%	取苗速度/(株·min ⁻¹)	W ₀ /个	W ₁ /个	W ₂ /个	W/个	m ₀ /kg	m/kg	η ₁ /%	η ₂ /%
20.45	80	128	0	0	128	1.15	0.3	100.00	26.09
	110	128	0	1	127	1.3	0.45	99.22	34.62
	140	128	0	2	126	1.2	0.4	98.44	33.33
32.79	80	128	0	0	128	1.49	0.54	100.00	36.24
	110	128	1	1	126	1.53	0.53	98.44	34.64
	140	128	1	1	126	1.5	0.55	98.44	36.67
43.09	80	128	1	1	126	1.62	0.64	98.44	39.51
	110	128	1	4	123	1.68	0.72	96.09	42.86
	140	128	2	4	122	1.7	0.68	95.31	40.79

根据表 1,对取苗成功率 η_1 进行方差分析,结果显示含水率 (A) $F_A > F_{0.05}(2,4)^{[19]}$ 且 $P \leq 0.01$,说明穴盘苗含水率对取苗成功率的影响非常显著;取苗速度 (B) $F_B > F_{0.05}(2,4)$ 且 $0.01 < P \leq 0.05$,说明取苗速度对取苗成功率的影响较显著。从图 13a 中可以看出,穴盘苗自动输送装置具有较高的取苗成功率,即使在取苗速度为 140 株/min 时,取苗成

率仍大于 95%,观察发现在试验范围内含水率越大,苗钵基质与穴盘间黏附力增大,甚至超过根系的结合力,导致顶苗过程大量基质残余穴孔;同时取苗速度过大顶苗机构会产生一定幅度振动,造成顶苗杆与苗盘漏水孔壁摩擦加剧,影响顶苗准确性,因此在含水率 43.09%、取苗速度 140 株/min 时,取苗成功率相对较低。

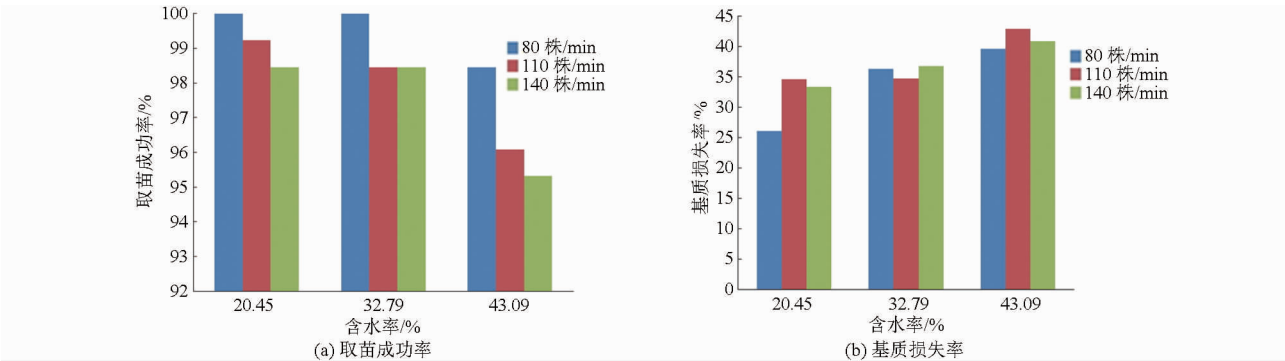


图 13 试验因素对作业质量的影响

Fig. 13 Effect of experimental factors on working quality

根据表 1,对基质损失率 η_2 进行方差分析,结果显示含水率 (A) $F_A > F_{0.05}(2,4)^{[19]}$ 且 $0.01 < P \leq 0.05$,说明穴盘苗含水率对基质损失率的影响较显著;取苗速度 (B) $F_B < F_{0.05}(2,4)$,说明取苗速度对基质损失率的影响不显著。由图 13b 可知,相同含水率的穴盘苗其基质损失率随取苗速度的升高均无明显变化,说明穴盘苗自动输送装置在取苗速度较高的情况下,仍能保持较低的基质损失率;含水率对基质损失率有一定影响,在含水率为 43.09% 时,平均基质损失率为 40.79%。通过观察发现,基质损失主要发生在落苗阶段,占基质损失总量的 2/3 左右,这主要是因为此次试验的基质含水率控制在较低范围且秧苗的根系生长情况较好,在顶苗阶段苗钵底部基质受力后,在秧苗直径方向产生了压缩变形,而后苗钵基质两侧受到夹紧力,并产生了垂直于秧苗直径方向的压缩变形,在先后被施加了两个方向的载荷之后,苗钵底部基质已经发生了坍塌和颗

粒间的重新排列,但是在根系的包裹和缠联作用并未脱落,最后钵苗靠重力自由落体,苗钵底部与导苗筒撞击,基质在此过程中大量脱落;此外,在顶苗时高含水率穴盘苗的基质脱离位移较大,苗钵底部基质并未完全从穴盘中顶出,苗钵底部基质在随夹苗爪翻转时与穴盘刮蹭,使基质损失量增大。

综合上述试验分析,设计的蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置在取苗速度 140 株/min 时,取苗成功率超过 95%,远超人工作业效率;为避免因苗钵基质损失带来的栽后成活率和直立度低,以及带苗等问题,在满足农艺要求的前提下,应尽量降低装置所用穴盘苗基质的含水率。

4 结论

(1)设计了一种纯机械传动式蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置,采用圆柱凸轮机构实现苗盘的往复横移,齿轮-槽轮机构进行苗盘的纵向进给,通过偏

置曲柄滑块机构执行顶苗动作,由凸轮和齿轮齿条机构配合完成夹苗爪的翻转与开合。

(2)利用运动建模、仿真和精度综合分析等方法,结合机构较小冲击作业要求,确定了该装置各机构关键结构和运动参数,其中横向移盘机构的圆柱凸轮最大压力角 $\alpha_{\max}=29.32^{\circ}$,纵向移盘机构的槽轮槽数 $n=5$ 、减速齿轮传动比 $i=5/16$,夹苗机构的苗爪翻转凸轮行程 $h_p=29\text{ mm}$;通过对自动输送装置中各机构运动时序的可视化分析,优选出一组最佳参数:横移机构位移 $s=36\text{ mm}$,纵移机构初始相位角 $\varphi_z=185^{\circ}$,顶苗机构初始相位角 $\varphi_d=108^{\circ}$,曲

柄长度 $a=78\text{ mm}$,连杆长度 $b=112\text{ mm}$,偏距 $e=20\text{ mm}$,苗爪翻转机构初始相位角 $\varphi_f=15^{\circ}$,苗爪开合机构初始相位角 $\varphi_k=135^{\circ}$ 。

(3)装置的穴盘苗自动输送试验结果表明:在试验范围内,含水率和取苗速度对取苗成功率均影响显著,其中含水率影响更大;基质损失率受含水率影响较大,而与取苗速度关系不大;取苗速度 140 株/min 时,取苗成功率超过 95% ,作业效率远超人工。结合农艺要求,在含水率为 32.79% 时,基质损失率降至 36.67% ,更有利于后续栽植作业。

参 考 文 献

- 1 韩长杰,杨宛章,张学军,等.穴盘苗移栽机自动取喂系统的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(8):51-61.
HAN Changjie, YANG Wanzhang, ZHANG Xuejun, et al. Design and test of automatic feed system for tray seedlings transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 51-61. (in Chinese)
- 2 杨传华,方宪法,杨学军,等.基于PLC的蔬菜钵苗移栽机自动输送装置[J].农业机械学报,2013,44(增刊1):19-23,18.
YANG Chuanhua, FANG Xianfa, YANG Xuejun, et al. Automatic delivery mechanism of potted-seedling for vegetable transplanter based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Sup.1):19-23,18. (in Chinese)
- 3 吴俊敏,张小超,金鑫,等.苗盘钵苗自动识别及控制装置的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(1):47-52.
WU Jianmin, ZHANG Xiaochao, JIN Xin, et al. Design and experiment on transplanter pot seedling disk conveying and positioning control system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 47-52. (in Chinese)
- 4 童俊华,蒋焕煜,蒋卓华,等.钵苗自动移栽机器人抓取指钳夹持苗坨参数优化试验[J].农业工程学报,2014,30(16):8-16.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, JIANG Zhuohua, et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 8-16. (in Chinese)
- 5 韩绿化,毛罕平,缪小花,等.基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J].农业机械学报,2013,44(11):260-265.
HAN Lühua, MAO Hanping, MIAO Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260-265. (in Chinese)
- 6 胡敏娟,吴崇友,袁文胜,等.穴盘苗自动取苗机构的研究分析[J].农机化研究,2012,34(7):78-83.
HU Minjuan, WU Chongyou, YUAN Wensheng, et al. Research on the automatic pick up device for plug seedling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(7): 78-83. (in Chinese)
- 7 俞高红,刘炳华,赵匀,等.椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗自动移栽机构运动机理分析[J].农业机械学报,2011,42(4):53-57.
YU Gaohong, LIU Binghua, ZHAO Yun, et al. Kinematic principle analysis of transplanting mechanism with planetary elliptic gears in automatic vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 53-57. (in Chinese)
- 8 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.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 23-30. (in Chinese)
- 9 陈科,杨学军,颜华,等.基于Matlab的全自动移栽机取苗机构设计与参数优化[J].农业机械学报,2013,44(增刊1):24-26,32.
CHEN Ke, YANG Xuejun, YAN Hua, et al. Design and parameter optimization of seedling pick-up mechanism based on Matlab[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Sup.1): 24-26, 32. (in Chinese)
- 10 王蒙蒙,宋建农,刘彩玲,等.蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(14):49-57.
WANG Mengmeng, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 49-57. (in Chinese)
- 11 任露泉.土壤粘附力学[M].北京:机械工业出版社,2011.
- 12 李小昱,雷廷武,王为.土壤抗压强度的试验研究[J].农业工程学报,2001,17(5):19-21.
LI Xiaoyu, LEI Tingwu, WANG Wei. Experimental research on unconfined compression strength of soil[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 19-21. (in Chinese)
- 13 孙明星,党进谦,康顺祥.原状黄土单轴抗拉特性研究[J].水利与建筑工程学报,2006,4(3):23-26.
SUN Mingxing, DANG Jinqian, KANG Shunxiang. Study on monaxial tensile character of undisturbed loess[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2006, 4(3): 23-26. (in Chinese)
- 14 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.
LI Hua, CAO Weibin, LI Shufeng, et al. Kinematic analysis and test on automatic pick-up mechanism for chili plug seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 20-27. (in Chinese)
- 15 邹慧君.机构系统设计与应用创新[M].北京:机械工业出版社,2008.
- 16 JIN Xin, DU Xinwu, JI Jiangtao, et al. Physical characteristics of plug seedling transplanted by the return-blank type transplanter[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2015, 24(4): 1-10.
- 17 郭仁生.机械工程设计分析和Matlab应用[M].3版.北京:机械工业出版社,2011.
- 18 孙桓,陈作模.机械原理[M].6版.北京:高等教育出版社,2001.
- 19 陈魁.试验设计与分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2005.