doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.007

探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构优化设计与试验

尹大庆[1,2]　王佳照[1]　周脉乐[1,2]　杨禹超[1]　王金武[1]

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 北方寒地现代农业装备技术重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了提高蔬菜钵苗取苗机械化程度和取苗效率,设计了一种探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构,可实现快速取推钵动作。以大果哈椒钵苗作为取苗对象,分析了取苗机构的工作原理,建立了机构运动学模型,确立其优化目标,运用 Visual Basic 6.0 开发可视化辅助分析软件,优化得出满足要求的最佳参数,形成相应的理论轨迹。建立三维模型,对模型进行虚拟仿真设计,得出仿真轨迹。采用 3D 打印技术进行试验样机制造,运用高速摄影技术提取试验样机实际工作轨迹,验证了实际轨迹与理论轨迹、仿真轨迹的一致性。试验测得实际取苗针最大入钵力,运用相似理论原理,推算出试验样机最大入钵力,并得到钵土最佳基质比为 0.4,进行试验样机取苗试验,取苗成功率为 96.87%,满足蔬菜钵苗取苗要求,验证了机构设计的正确性与可行性。

关键词: 蔬菜钵苗; 取苗机构; 探出取推钵式; 参数优化; 取苗试验

中图分类号: S223.92　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0064-08

Optimal Design and Experiment of Vegetable Potted Seedlings Pick-up Mechanism for Exploring and Picking - Pushing Plugs

YIN Daqing[1,2]　WANG Jiazhao[1]　ZHOU Maile[1,2]　YANG Yuchao[1]　WANG Jinwu[1]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology in North Cold Region*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to improve the mechanization degree of vegetable plug seedlings pick-up, realize the automatic seedlings pick-up of vegetable plug seedlings and improve the seedlings pick-up efficiency, a kind of pick-up mechanism for exploring and picking-pushing vegetable plug seedlings was studied and designed, which can realize the action of picking up and pushing plug seedlings quickly. Big fruit chili plug seedlings were taken as the objects of seedling pick-up. The working principle of seedlings pick-up mechanism was analyzed, the kinematic model of the mechanism was established, its optimization goal was established, and the visual auxiliary analysis software was developed by using Visual Basic 6.0. the optimum parameters to meet the requirements were optimized and the corresponding theoretical trajectory was formed. The three-dimensional model was established, the virtual simulation design of the model was carried out, and the simulation trajectory was obtained. 3D printing technology was used to manufacture the test prototype, and the actual trajectory of the test prototype was extracted by using high-speed photography technology, and the consistency between the actual trajectory and the theoretical trajectory and the simulation trajectory was verified. In order to make the effect of the test prototype consistent with the actual mechanism, the maximum entry force of the actual seedling needle was measured, and the maximum pedestal soil force of the test prototype was calculated by using the principle of similarity theory, and the optimum matrix ratio of the plug soil was 0.4. The seedling pick-up test was completed. The success rate of seedlings pick-up was 96.87%, which met the requirements of vegetable plug seedlings pick-up and verified the correctness and feasibility of the mechanism design.

Key words: vegetable plug seedlings; seedlings pick-up mechanism; exploring and picking-pushing plugs type; parameter optimization; seedlings pick-up test

收稿日期: 2019-07-18　修回日期: 2019-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)、东农学者计划青年才俊项目(18QC20)和北方寒地现代农业装备技术重点实验室开放项目(KF18-04)

作者简介: 尹大庆(1970—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计与应用研究,E-mail: 63900962@qq.com

通信作者: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械和机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com

0　引言

蔬菜移栽机主要包括取苗机构和植苗机构两部分，其中取苗机构是全自动移栽机的核心部分。取苗方式分为手动取苗、自动取苗两种。手动取苗劳动强度大，成本高，耗时耗力；自动取苗省时、省工，大大缓解了农忙时节劳动力不足的问题，降低了劳动强度、节约了成本，提高了生产效率。因此，研究蔬菜钵苗全自动取苗机构具有实际意义[1-2]。

近年来，国内外学者对取苗机构开展了一系列研究[3-6]。国外对取苗机构的研究以欧美和日韩国家为主[7]。澳大利亚 Transplant systems 公司、美国 Morning Star 公司、荷兰 TTA 公司生产的全自动移栽机，均采用气动式取苗机构，由气缸驱动取苗末端执行器运动取苗，自动化程度较高，但机构复杂；日本洋马公司研制的连杆-滑槽式取苗机构，取苗爪在齿轮和连杆-滑槽机构的共同作用下取苗，其滑道易磨损，效率低；韩国 CHOI 公司[8]研制的五杆滑道式取苗机构，通过推杆驱动取苗针闭合与张开，完成取苗、投苗动作，取苗成功率高，但效率较低。综上所述，目前欧美国家研制的全自动移栽机械，均采用机电一体化技术，整体结构复杂，成本高；日本、韩国研制的取苗机构效率较低，并且与我国蔬菜钵苗移栽农艺要求存在较大差异。

国内徐丽明等[9]提出的平面四连杆式取苗机构，结构简单，但取苗的速率较低；田昆鹏等[10]研制的曲柄导轨滑槽取苗机构，夹苗针随着推杆的伸缩做张开闭合动作，结构简单，生产成本低，该机构一周期只能取一次苗，效率不高；俞高红等[11]提出的椭圆-不完全非圆齿轮行星轮系的取苗机构，利用旋转式非匀速间歇传动方式进行取苗，其推苗爪相对于取苗爪运动，进而控制取苗与推苗，可较好满足取苗要求，但间歇运动适于低速情形；王文卿[12]设计了适用于旱田钵苗移栽的夹钵式末端执行器，苗针探出，进行取苗、推苗动作，效率也不高。国内全自动取苗机构的研究还处于试验阶段，未见实际应用[13-15]。

为了提高取苗机构的工作效率，本文采用不等速行星轮系驱动的取苗机构，为使取出的钵苗能够准确投入到植苗机构的鸭嘴中，推苗必须迅速。针对这一问题，进行创新设计，提出一种新型探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构，以取推一体式取苗末端执行器代替传统单一取苗或推苗的取苗末端执行器，实现快速取苗、主动推苗的动作，缩短推苗时间，提高投苗准确性；结合非圆齿轮回转式传动方式[16]，采用“一”字形取苗轨迹代替“鹰嘴”形取苗轨迹[17]，进一步优化取苗姿态，以实现取钵不伤苗的目的。

1　机构组成与原理

1.1　轨迹分析

取苗末端执行器按照取苗方式可分为夹茎秆式和取钵土式[18-21]，夹茎秆式取苗方式取苗力均值 4～6 N[22]。选用市场上较为常见的大果哈椒钵苗为作业对象，通过试验验证钵苗茎秆轴向拉断力均值为 5.63 N。由于钵苗茎秆轴向拉断力均值小于夹茎秆式取苗方式的最大取苗力，所以采用夹茎秆取苗方式取苗易对钵苗茎秆造成损伤，结合蔬菜钵苗所使用秧盘尺寸大的特点，采用取钵土式取苗方式进行取苗作业。

为保证取苗过程中土钵被完整取出，两取苗臂送苗过程中相互不干涉且不与苗箱干涉，并实现快速取苗、精准投苗等动作，结合现有取苗机构，提出一种探出取推钵式取苗机构，其轨迹分析如图 1 所示。机构在一个周期内要完成取苗、持苗、推苗、回程 4 个连续阶段。

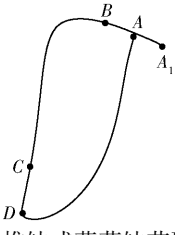


图 1　探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构轨迹

Fig. 1　Trajectory of vegetables seedlings pick-up mechanism for exploring and picking - pushing plugs

(1)A_1AB 取苗段：取苗针在拨叉以及弹簧等的作用下瞬时探出，同时推钵板回缩，取苗针探出扎入钵土过程中取苗针回转向内并紧，经过弧形路线，扎入钵土 30 mm 时，形成托举式姿态，之后，取苗臂壳体带动取苗末端执行器反向于苗箱运动，钵土被取出，在 B 点完成取苗动作。

(2)BC 持苗段：取苗针夹持住钵土在取苗臂壳体的回转动作带动下，由轨迹 B 点运动到 C 点。

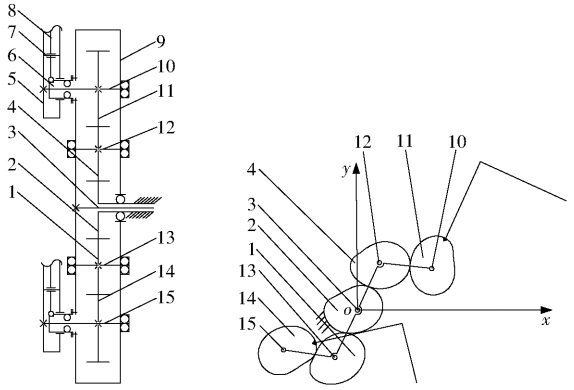
(3)CD 推苗段：取苗针在拨叉的作用下收回，同时推钵板推出，钵土在取苗针和推钵板的相对运动以及推钵板的撞击力作用下落下，推苗结束。

(4)DA 回程段：取苗针及推钵板由取苗臂壳体带动，空行程回到取苗点准备。

1.2　工作原理

取苗机构由齿轮箱和取苗臂两部分构成，如图 2 所示。齿轮箱由齿轮箱左壳体、齿轮箱右壳体、5 个非圆齿轮等构成。5 个非圆齿轮相互啮合形成

的行星轮系构成传动机构。取苗臂部分由凸轮、拨叉、取苗臂壳体、取苗末端执行器组成,其中取苗末端执行器由驱动总成(拨叉滑道、取苗臂滑杆、推钵板滑道、弹簧座、驱动推板槽固接形成驱动总成)、推土拨叉、驱动推板、推钵板、推拉座板、左取苗针、右取苗针组成,如图 3 所示。



(a) 主视图 (b) 侧视图

图 2 取苗机构工作原理图

Fig. 2 Working schematics of seedlings pick-up mechanism

1. 下中间轮 2. 太阳轮 3. 太阳轴 4. 上中间轮 5. 取苗臂壳体 6. 凸轮 7. 拨叉轴 8. 拨叉 9. 齿轮箱 10. 上行星轴 11. 上行星轮 12. 上中间轮轴 13. 下中间轮轴 14. 下行星轮 15. 下行星轮轴

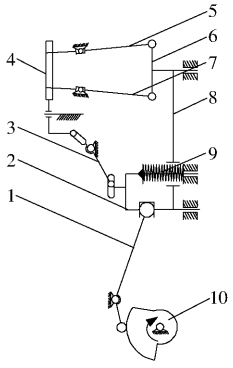


图 3 取苗末端执行器工作原理图

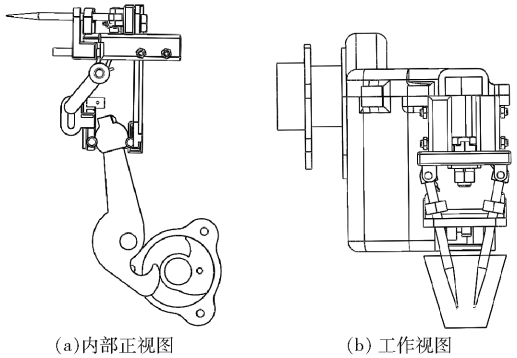
Fig. 3 Working schematic of seedling terminal actuator

1. 拨叉 2. 驱动总成 3. 推土钵叉 4. 推钵板 5. 左取苗针 6. 推拉座板 7. 右取苗针 8. 驱动推板 9. 弹簧 10. 凸轮

齿轮箱工作原理:太阳轴传入动力,带动齿轮箱壳体匀速传动;太阳轮与法兰盘固接,两中间轮在太阳轮两侧与其形成啮合转动;行星轮在两中间轮两侧分别与两中间轮啮合转动;取苗臂壳体与行星轮固接,并做不等速转动。

由于两个取苗臂运动的轨迹和姿态相同,所以选取一个取苗臂进行分析,工作原理如下:拨叉铰接在取苗臂壳体内部,并与固接于齿轮箱壳体外部的凸轮接触形成相对运动;取苗臂在随齿轮箱做圆周运动的同时,在非圆齿轮的驱动下做不等速转动,与凸轮、拨叉、取苗末端执行器配合形成“一”字形探入土钵式取苗轨迹。

取苗末端执行器工作原理:拨叉上端与拨叉滑道构成高副,带动驱动总成水平运动。推土拨叉铰接在取苗臂壳体上,两端分别与推钵板滑道、推钵板形成高副,并在拨叉的驱动下带动推钵板运动。驱动推板一端插入驱动推板槽内,另一端固定在推拉座板上。左右取苗针呈锥形配置,铰接在推拉座板上,并可移动地插入与取苗臂壳体固接的支撑底座上方孔,与推钵板形成相对运动,其结构如图 4 所示。在取苗作业过程中,取苗针沿着钵内侧壁插入钵土内,推钵板回缩,当取苗针尖点达到“一”字形轨迹尖点时,苗针不再向土钵内运动,并形成托举姿态夹紧钵土。在取苗臂壳体的带动下,从穴盘中取出钵土,完成取苗动作。经上述反向驱动过程,在推钵板与左右取苗针相对运动中,取苗针回缩,推钵板给予钵土撞击力,使取苗针夹取的钵体快速推脱,完成推钵作业。



(a)内部正视图 (b) 工作视图

图 4 取苗臂结构图

Fig. 4 Structural diagrams of seedling arm

2 机构运动学模型

2.1 非圆齿轮节曲线成型方法

运用拉格朗日五次插值多项式,插值 6 个节点,保证形成平缓无波动的函数图形,避免 Runge 现象发生[23],第 1 个节点与第 6 个节点重合,保证非圆齿轮节曲线封闭。

拉格朗日插值公式

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^{n} y_i l_i(x) \tag{1}$$

其中

$$l_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{n} \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (i = 0, 1, \cdots, n) \tag{2}$$

式中 $l_i(x)$——拉格朗日基函数

x_i——节曲线上各点横坐标值

y_i——节曲线上各点纵坐标值

根据上述公式,使用者仅需给出点坐标,即可求出曲线方程,将节曲线的点坐标由直角坐标转换为极坐标形式

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \tag{3}$$

$$\varphi_i = \arctan\frac{y_i}{x_i} \tag{4}$$

式中　r_i——节曲线向径

φ_i——向径极角

2.2　运动学模型建立

非圆齿轮行星轮系运动示意图如图 5 所示[24]。

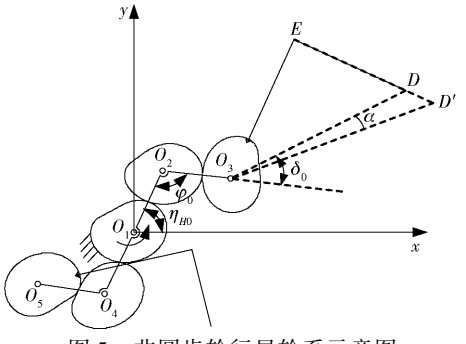


图 5　非圆齿轮行星轮系示意图

Fig. 5　Schematic of non-circular planetary gear train

由于机构关于太阳轮中心对称，故取一侧机构进行分析。太阳轮固定在机架上，行星架（齿轮箱壳体）逆时针匀速转动，R_1表示太阳轮节曲线半径，R_2表示上中间轮节曲线半径，η_{H0}表示行星架的初始安装角，$\pi-\varphi_0$表示行星架拐角，δ_0表示取苗臂在取苗针探出前与行星架的夹角，$\delta_0+\alpha$ 表示取苗臂在取苗针探出后与行星架的夹角，$l_{O_1O_2}$表示太阳轮与上中间轮的中心距，$l_{O_2O_3}$表示上中间轮与上行星轮的中心距，l_{O_3E}表示第 1 段取苗臂长度，l_{ED}表示第 2 段取苗臂长度，l_{O_3D}表示行星轮回转中心到取苗针尖点距离，$l_{O_3D'}$表示取苗针探出后行星轮回转中心到取苗针尖点距离。当行星架转过 η 后，行星架相对机架的绝对转角为

$$\eta_H(\eta) = \eta_{H0} + \eta \tag{5}$$

太阳轮的相对和绝对转角为

$$\begin{cases}\theta_1(\eta) = -\eta\\ \eta_1(\eta) = \eta_{H0}\end{cases} \tag{6}$$

上中间轮的相对和绝对转角为

$$\begin{cases}\theta_2(\eta) = \displaystyle\int_0^{-\eta}\frac{R_1(x)}{l_{O_1O_2}-R_1(x)}\mathrm{d}x\\ \eta_2(\eta) = \eta_H(\eta)+\theta_2(\eta)\end{cases} \tag{7}$$

上行星轮的相对和绝对转角为

$$\begin{cases}\theta_3(\eta) = \displaystyle\int_{\pi-\varphi_0}^{\theta_2(\eta)+\pi-\varphi_0}\frac{R_2(x)}{l_{O_2O_3}-R_2(x)}\mathrm{d}x\\ \eta_3(\eta) = \eta_H(\eta)+\pi-\varphi_0-\eta_{30}-\theta_3(\eta)\end{cases} \tag{8}$$

其中　$$\eta_{30} = \int_0^{\pi-\varphi_0}\frac{R_2(2\pi-x)}{l_{O_2O_3}-R_2(2\pi-x)}\mathrm{d}x \tag{9}$$

式中　η_{30}——行星架偏角引起的行星轮初始安装角

由于齿轮 4 与齿轮 2 对称、齿轮 5 与齿轮 3 对称，其转角相差 180°。

太阳轮转动中心位置坐标为

$$x_1(\eta) = y_1(\eta) = 0 \tag{10}$$

上中间轮转动中心坐标为

$$\begin{cases}x_2(\eta) = l_{O_1O_2}\cos(\eta_{H0}+\eta)\\ y_2(\eta) = l_{O_1O_2}\sin(\eta_{H0}+\eta)\end{cases} \tag{11}$$

上行星轮转动中心坐标为

$$\begin{cases}x_3(\eta) = x_2(\eta)+l_{O_2O_3}\cos(\eta_{H_0}+\eta+\pi-\varphi_0)\\ y_3(\eta) = y_2(\eta)+l_{O_2O_3}\sin(\eta_{H_0}+\eta+\pi-\varphi_0)\end{cases} \tag{12}$$

对上取苗臂的取苗针尖点进行分析，第 1 段取苗臂尖点坐标为

$$x_E(\eta) = l_{O_3E}\cos(\eta_{H0}+\beta+\eta-\theta_3(\eta))+x_3(\eta) \tag{13}$$

$$y_E(\eta) = l_{O_3E}\sin(\eta_{H0}+\beta+\eta-\theta_3(\eta))+y_3(\eta) \tag{14}$$

其中取苗臂初始安装角

$$\beta = \pi-\varphi_0+\delta_0+\arctan\frac{l_{ED}}{l_{O_3E}}$$

第 2 段取苗臂尖点坐标分 3 种情况讨论：

（1）取苗针探出前第 2 段取苗臂尖点 D 坐标为

$$x_D(\eta) = l_{O_3D}\cos(\eta_{H0}+\pi-\varphi_0+\delta_0+\eta-\theta_3(\eta))+x_3(\eta) \tag{15}$$

$$y_D(\eta) = l_{O_3D}\sin(\eta_{H0}+\pi-\varphi_0+\delta_0+\eta-\theta_3(\eta))+y_3(\eta) \tag{16}$$

（2）取苗针探出后第 2 段取苗臂尖点 D'坐标为

$$x_{D'}(\eta) = l_{O_3D'}\cos(\eta_{H0}+\pi-\varphi_0+\delta_0+\eta-\theta_3(\eta)+\alpha)+x_3(\eta) \tag{17}$$

$$y_{D'}(\eta) = l_{O_3D'}\sin(\eta_{H0}+\pi-\varphi_0+\delta_0+\eta-\theta_3(\eta)+\alpha)+y_3(\eta) \tag{18}$$

（3）取苗针探出过程中，建立取苗机构末端执行器示意图，如图 6 所示。

由于左右取苗针对称，取一侧取苗针对取苗针探出过程进行分析，其中 M 点为坐标原点，l_1表示拨叉上段长度，l_2、$l_{IT}-l_3$表示拨叉上端点与取苗针铰接点的 y 向距离和 x 向距离，λ 表示拨叉上段与 x 轴之间夹角，θ_{I0}表示取苗针与推拉钵板的夹角，假设 θ_{I0}已知，l_5表示取苗针长度。

拨叉上端点 N 点坐标为

$$x_N = x_M + l_1\cos\lambda \tag{19}$$

$$y_N = y_M + l_1\sin\lambda \tag{20}$$

取苗针铰接点坐标为

$$x_I = x_N + l_{IT} - l_3 \tag{21}$$

$$y_I = y_N + l_2 \tag{22}$$

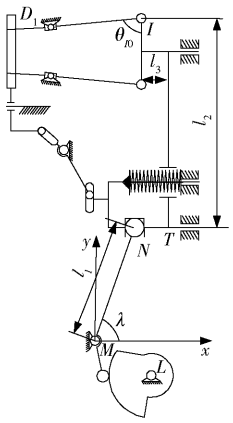


图 6 取苗机构末端执行器示意图

Fig. 6 End-effector kinematic model diagram of seedlings pick-up mechanism

取苗针探出过程中第 2 段取苗臂尖点 D_1 坐标为

$$x_{D1} = x_I + l_5 \sin\theta_{l0} \tag{23}$$

$$y_{D1} = y_I - l_5 \cos\theta_{l0} \tag{24}$$

3 机构多目标优化与仿真

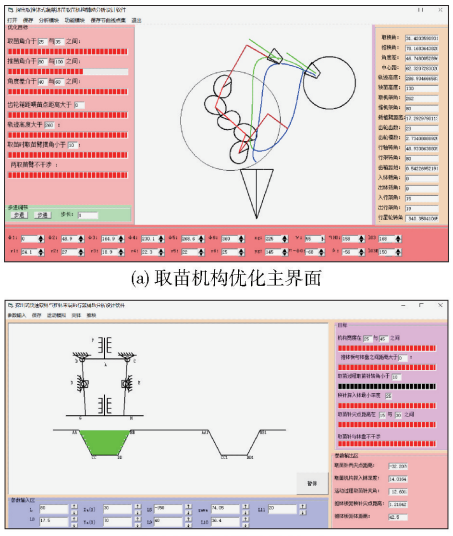
3.1 优化目标

根据蔬菜钵苗取苗的农艺要求,取苗机构的运动干涉、角度变化、轨迹形态等特性,确立了 7 个优化目标[25]:①取苗角介于 25°~35°之间。②推苗角介于 80°~100°之间,保证投苗直立度。③角度差介于 40°~60°之间,保证取苗臂从取苗位置到投苗位置转过的角度约等于苗箱倾角,保证秧苗直立状态下推苗。④齿轮箱与喂苗点距离大于 0,避免齿轮箱体与植苗机构干涉。⑤轨迹高度大于 260 mm,取苗期秧苗已经长到一定高度,保障取出的秧苗不与苗箱上的秧苗干涉。⑥取苗时取苗臂摆角小于 10°,避免土钵与钵盘干涉,挤碎土钵。⑦两取苗臂不干涉,避免取苗过程中两个取苗臂发生碰撞。

3.2 优化设计软件

基于可视化优化软件 Visual Basic 6.0,根据取苗机构的理论模型,以及通过人机交互方式优化目标,开发了取苗机构辅助优化设计软件。通过优化设计软件图形显示区,观察取苗机构相对运动模拟,如图 7 所示,蓝色轨迹为取苗实际轨迹。

应用开发的取苗机构辅助优化设计软件,得到一组满足优化目标的机构参数。齿轮节曲线参数包括:$\varphi_1 = 0°$,$\varphi_2 = 48.9°$,$\varphi_3 = 164.9°$,$\varphi_4 = 230.1°$,$\varphi_5 = 268.6°$,$\varphi_6 = 360°$,$r_1 = 24.1$ mm,$r_2 = 27$ mm,$r_3 = 18.9$ mm,$r_4 = 22.3$ mm,$r_5 = 22$ mm,$r_6 = 25$ mm。结构参数包括:行星架初始安装角 $\eta_{H0} = 158°$,行星架拐角 $\pi - \varphi_0 = -68°$,取苗臂初始安装角 $\beta = -56°$,



(a) 取苗机构优化主界面

(b) 末端执行器优化界面

图 7 取苗机构优化软件界面

Fig. 7 Optimization of software interface for seedlings pick-up mechanism

苗箱中心点横坐标值 $x_g = 225$ mm,苗箱中心点纵坐标值 $y_g = 145$ mm,苗箱倾角 $\gamma = 55°$,第 1 段取苗臂长度 $l_{O_3E} = 150$ mm,行星轮回转中心到取苗针尖点距离 $l_{O_3D} = 168$ mm。

3.3 仿真

根据优化设计所得的参数,完成取苗机构的三维设计,并在 ADAMS 仿真软件中进行模拟仿真,如图 8 所示。

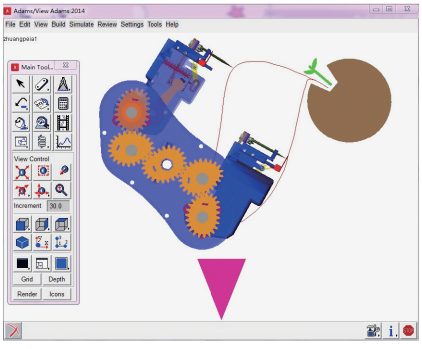


图 8 ADAMS 仿真轨迹

Fig. 8 ADAMS simulation trajectory

4 试验

4.1 轨迹与姿态验证试验

利用仿真软件对机构进行虚拟仿真验证后,采用可快速成型的 3D 打印技术对取苗机构的零部件进行加工,并完成机构装配。将试制好的机构安装在台架上,设定机构转速 40 r/min,采用 phantomv 5.1 高速摄像机得到实际工作轨迹,试验样机的实际工作轨迹如图 9 所示,并记录下取苗针尖点的轨迹和姿态。将摄影所得轨迹与理论轨迹、虚拟轨迹相对比,结论基本一致,验证了理论设计的正确性。

取苗段有些许差异，是由于理论轨迹的取苗段轨迹由两段轨迹合成，仿真轨迹和实际轨迹取苗段轨迹是由弹簧控制取苗针探出形成。

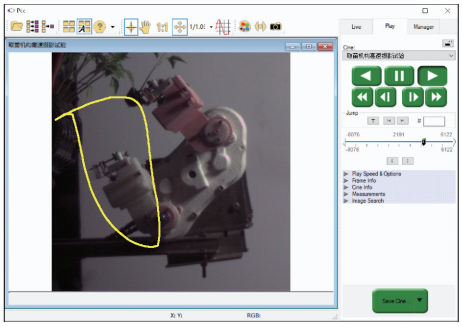


图 9　试验样机的实际工作轨迹

Fig. 9　Trajectory of physical prototype

4.2　取苗机构台架试验

4.2.1　相似理论预试验

由于试验样机为 3D 打印材质，实际机构加工材料为 45 号钢，两种材料的强度存在一定的差异，为使取苗试验结果更接近于实际值，采用相似理论原理，将试验样机与实际机构力学性能进行对比，求出试验样机所能承受的最大入钵力，从而配比相对应的基质比。

3D 打印材料为聚乳酸，查文献[26]得，聚乳酸材料构件的许用拉应力为 40 MPa；查机械手册可知 45 号钢材料的许用拉应力为 598 MPa。根据经验可知，当钵土为原土、土壤湿度在 20% 左右时适合移栽。考虑机构安全，由力学试验测取土壤湿度为 10% 左右时实际取苗过程中的单根针最大入钵力，均值为 34.87 N。

由相似理论公式

$$\frac{[\sigma]_{\text{Steel 45}}}{[\sigma]_{\text{3D printing supplies}}}=\frac{\sigma_{\text{Steel 45}}}{\sigma_{\text{3D printing supplies}}} \tag{25}$$

求出试验样机最大入钵力平均在 2.33 N 左右。根据所得到的力和常用基质配比，采用试凑法，确定符合最大入钵力的钵土最佳基质比（原土与基质质量比）为 0.4∶1，如表 1 所示。

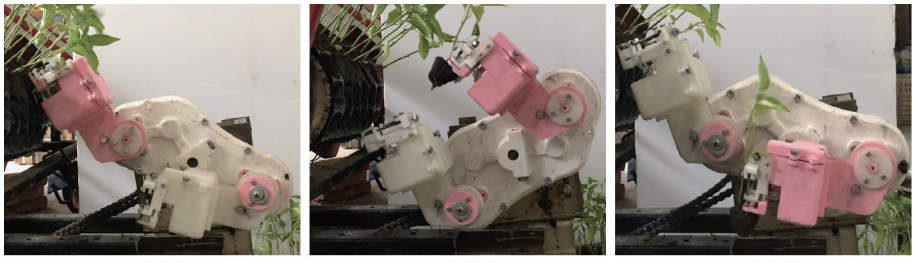
表 1　不同基质配比对入钵力的影响

Tab. 1　Effect of different matrix ratio on pedestal soil force

基质配比	最大入钵力均值/N
1.6∶1	18.26
1.4∶1	12.78
1∶1	6.95
0.6∶1	4.59
0.4∶1	2.63

4.2.2　台架试验

为了进一步验证取苗机构的可行性，根据所选基质，进行试验样机的取苗试验，如图 10 所示。



(a) 取苗段　　(b) 持苗段　　(c) 推苗段

图 10　取苗机构各个关键位置的姿态

Fig. 10　Key postures of pick-up seedlings mechanism

本试验选用 72 穴穴盘，上口径 40 mm×40 mm，下口径 20 mm×20 mm，高度 35 mm，设置台架工作转速 40 r/min，对应取苗效率 80 株/min。选用大果哈椒作为试验对象，日龄 60，苗高 15 mm 左右。共选取 4 盘共 288 株大果哈椒钵苗进行验证试验。其中共顺利取出 279 株苗，顺利推出 279 株苗，取苗成功率为 96.87%。秧苗未取出的原因有：秧苗体质较弱，盘根效果不理想；塑料秧钵钵体变形；秧钵侧壁及孔底不光滑等。

5　结论

（1）提出了一种用于蔬菜钵苗机械化取苗的探出取推钵式蔬菜钵苗取苗机构，具有钵苗取苗效率高、主动推苗的特点，末端执行器采用取苗与推苗两机构组合设计，推钵时取苗针收缩，推钵板伸出给予钵土撞击力，使取苗针夹取的钵体快速推脱，完成推钵作业。

（2）根据取苗机构的实际需求，结合农艺要求，确立其优化目标，基于可视化优化软件 Visual Basic 6.0，通过人机交互方式，开发了取苗机构辅助优化设计软件，得到满足要求的机构参数。

（3）使用 ADAMS 软件对取苗机构进行虚拟仿真设计，制造试验样机，进行高速摄影试验，将仿真轨迹、实际轨迹与理论轨迹进行对比，轨迹形状基本一致。

（4）运用相似理论原理，确定试验样机最大入钵力及钵土最佳基质比为 0.4，搭建试验台架，进行样机取苗试验，取苗成功率为 96.87%，取苗效率为 80 株/min，验证了机构设计的正确性和可行性。

参 考 文 献

[1] 吕志军,单伊尹,王杰,等. 蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J]. 中国农机化学报,2017,38(11):30 - 34.
LÜ Zhijun, SHAN Yiyin, WANG Jie, et al. Research progress of vegetable transplanting machine and prospects of seedling-picking machinery of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(11): 30 - 34. (in Chinese)

[2] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):44 - 53.
YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44 - 53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140808&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)

[3] FENG Qingchun, ZHAO Chunjiang, JIANG Kai, et al. Design and test of tray-seedling sorting transplanter[J]. International Journal of Agricultural Biological Engineering, 2015, 8(2): 14 - 20.

[4] YE Bingliang, YI Weiming, YU Gaohong, et al. Optimization design and test of rice plug seedling transplanting mechanism of planetary gear train with incomplete eccentric circular gear and non-cir cular gears[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 43 - 55.

[5] 廖庆喜,张照,胡乔磊,等. 油菜纸钵苗移栽机气动取苗机构设计与轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):70 - 78.
LIAO Qingxi, ZHANG Zhao, HU Qiaolei, et al. Design and trajectory analysis of pneumatic picking-up mechanism for rape paper pot seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 70 - 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.009. (in Chinese)

[6] ZHOU Maile, SUN Liang, DU Xiaoqiang, et al. Optimal design and experiment of rice pot seedling transplanting mechanism with planetary bezier gears[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(6): 1537 - 1548.

[7] 何亚凯,颜华,崔巍,等. 蔬菜自动移栽技术研究现状与分析[J]. 农业工程,2018,8(3):1 - 7.
HE Yakai, YAN Hua, CUI Wei, et al. Research situation and analysis on automatic transplanting technology for vegetable seedling[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(3): 1 - 7. (in Chinese)

[8] CHOI W C, KIM D C, RYUI K, et al. Development of seedling pick-up device for vegetable transplants[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 45(1): 13 - 19.

[9] 徐丽明,张铁中,史志清. 玉米自动移栽机取苗机构的设计[J]. 中国农业大学学报,2000,5(4):58 - 60.
XU Liming, ZHANG Tiezhong, SHI Zhiqing. Design of seedling picking mechanism of maize automatic transplanter[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 58 - 60. (in Chinese)

[10] 田昆鹏,毛罕平,胡建平,等. 自动移栽机门形取苗装置设计与试验研究[J]. 农机化研究,2014,36(2):168 - 172.
TIAN Kunpeng, MAO Hanping, HU Jianping, et al. Design and experimental study on the door-shaped picking seedling mechanism of auto-transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 168 - 172. (in Chinese)

[11] 俞高红,陈志威,赵匀,等. 椭圆—不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的研究[J]. 机械工程学报,2012,48(13):32 - 39.
YU Gaohong, CHEN Zhiwei, ZHAO Yun, et al. Study on vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 32 - 39. (in Chinese)

[12] 王文卿. 钵苗移栽机构夹钵式末端执行器的优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
WANG Wenqing. Optimization design and experimental study of pot-clipping style end effector for pot seedling transplanting mechanism[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[13] 周梅芳,俞高红,赵匀,等. 椭圆齿轮行星轮系蔬菜钵苗取苗机构的参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(18):13 - 21.
ZHOU Meifang, YU Gaohong, ZHAO Yun, et al. Parameter optimization and test on pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears for vegetable plug seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 13 - 21. (in Chinese)

[14] 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.
ZHAO Xiong, WANG Chuan, YANG Maoxiang, et al. Reverse design and analysis of automatic seedling pick-up mechanism with non-circular gear planetary train[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 30 - 36. (in Chinese)

[15] 贾毕清,叶梦蝶,翟晓南,等. 蔬菜移栽机凸轮-连杆组合式取苗机构设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(6):78 - 82.
JIA Biqing, YE Mengdie, ZHAI Xiaonan, et al. Design and tests of cam-link combination pick-up device for vegetable transplanters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 78 - 82. (in Chinese)

[16] 俞高红,俞腾飞,叶秉良,等. 一种新型行星轮系机构的研究[J]. 机械工程学报,2013,49(15):55 - 61.
YU Gaohong, YU Tengfei, YE Bingliang, et al. Research on a new planetary gear train mechanism[J]. Journal of Machanical Engineering, 2013, 49(15): 55 - 61. (in Chinese)

[17] 赵匀,张留远,张昊,等. 共轭凸轮与行星轮系组合式水稻钵苗移栽机构:201210421617.1[P]. 2012 - 10 - 30.

[18] 赵匀,张卫星,辛亮,等. 探入式番茄钵苗移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):105 - 112.
ZHAO Yun, ZHANG Weixing, XIN Liang, et al. Design and experiment of extensible potted tomatoes seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 105 - 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.

1000-1298.2019.01.011.(in Chinese)

[19] 赵匀,刘志平,辛亮,等.水稻钵苗膜上移栽机构优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):87-93.
ZHAO Yun,LIU Zhiping,XIN Liang,et al. Optimization design and experiment of transplanting mechanism of rice pot seedling on film[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):87-93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180410&journal_id=jcsm. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.010.(in Chinese)

[20] 赵雄,沈明,陈建能,等.棉花移栽机旋转式取苗机构的运动学分析及虚拟试验[J].农业工程学报,2014,30(8):13-20.
ZHAO Xiong,SHEN Ming,CHEN Jianneng,et al. Kinematic analysis and virtual experiment of rotary pick-up mechanism on cotton transplanter[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(8):13-20.(in Chinese)

[21] 周梅芳,徐建军,童俊华,等.花卉穴盘苗取栽一体式自动移栽机构设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(20):44-51.
ZHOU Meifang,XU Jianjun,TONG Junhua,et al. Design and experiment of integrated automatic transplanting mechanism for taking and planting of flower plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(20):44-51.(in Chinese)

[22] 赵匀,刘星,薛向磊,等.茄子钵苗移栽机构优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(5):152-160.
ZHAO Yun,LIU Xing,XUE Xianglei,et al. Optimal design and experiment of potted eggplant seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):152-160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180517&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.017.(in Chinese)

[23] 李庆扬,王能超,易大义.数值分析[M].北京:清华大学出版社,2008.

[24] 赵匀.农业机械分析与综合[M].北京:机械工业出版社,2009.

[25] 代丽,孙良,赵雄,等.基于运动学目标函数的插秧机分插机构参数优化[J].农业工程学报,2014,30(3):35-42.
DAI Li,SUN Liang,ZHAO Xiong,et al. Parameters optimization of separating-planting mechanism in transplanter based on kinematics objective function[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(3):35-42.(in Chinese)

[26] 陆文君,孙君,石世宏.聚乳酸基木塑 3D 打印材料性能研究[J].合成技术及应用,2018,33(3):10-12.
LU Wenjun,SUN Jun,SHI Shihong. Structure and properties of polylactic acid based wood plastic 3D printing material[J]. Synthetic Technology & Application,2018,33(3):10-12.(in Chinese)

(上接第 63 页)

[18] 叶秉良,刘安,俞高红,等.蔬菜钵苗移栽机取苗机构人机交互参数优化与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(2):57-62.
YE Bingliang,LIU An,YU Gaohong,et al. Parameters optimization with human-computer interaction method and experiment of vegetable seedling pick-up mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(2):57-62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130212&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.012.(in Chinese)

[19] 蒋卓华. 温室钵苗移栽机的优化设计及移栽过程力学分析[D].杭州:浙江大学,2017.
JIANG Zhuohua. Optimal design of automatic transplanter in greenhouse and force analysis for transplanting process[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2017.(in Chinese)

[20] 韩振浩,颜华,陈科,等.基于 MatLab 的顶苗机构设计与参数优化[J].农机化研究,2017,39(1):142-146.
HAN Zhenhao,YAN Hua,CHEN Ke,et al. Design and parameter optimization of seedling expeller mechanism based on MatLab[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(1):142-146.(in Chinese)

[21] 赵匀,刘星,薛向磊,等.茄子钵苗全自动移栽机构优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(5):152-160.
ZHAO Yun,LIU Xing,XUE Xianglei,et al. Optimal design and experiment of fully-automated potted eggplant seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):152-160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180517&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.017.(in Chinese)

[22] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.1):24-26,32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2013s105&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.005.(in Chinese)

[23] 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 Yongwei,HE Zhuoliang,WANG Jun,et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):19-25.(in Chinese)