

蔬菜自动移栽机对置秧盘交替自动取投苗机构研究

陈 斌¹ 胡广发¹ 刘 文² 孙松林¹ 孙超然¹ 肖名涛¹

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410428; 2. 永州职业技术学院, 永州 425100)

摘要: 针对现有蔬菜自动移栽机茎秆夹持式和钵体顶出式取苗方式的缺点, 基于顶出-夹取结合式取苗方式, 设计了一种适用于对称布置可弯曲秧盘的交替式取投苗机构。阐述了该机构工作原理、关键点运动轨迹和结构组成。分析了关键因素对秧苗夹持点运动轨迹的影响方式并优选了取值: 驱动曲柄转速 10 r/min, 取投苗摇杆长度为 309 mm, 驱动气缸伸出速度 25 mm/s, 0.8 s 内完成拔苗, 伸出时刻为提前 0.4 s。该参数组合下秧苗夹持点在拔苗阶段最大横向位移 9.6 mm, 累计横向位移 0 mm, 理论提升高度 44 mm, 满足取投苗作业理论要求。以苗龄 45 d 的辣椒秧苗为作业对象, 进行了栽植频率 70 ~ 120 株/(min·行) 的取投苗性能试验, 试验结果表明, 该交替取投苗机构在栽植频率 100 株/(min·行) 时可实现取苗成功率 93%, 投苗成功率 95%, 总体成功率 88%, 满足取投苗作业要求, 验证了该取投苗机构的可行性。

关键词: 蔬菜自动移栽机; 自动取投苗机构; 对置秧盘; 顶出-夹取结合式

中图分类号: S223.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0131-09

OSID:



Alternate Automatic Seedling Picking and Dropping Mechanism Based on Symmetrically Arranged Seedling Trays for Automatic Vegetable Transplanters

CHEN Bin¹ HU Guangfa¹ LIU Wen² SUN Songlin¹ SUN Chaoran¹ XIAO Mingtao¹
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China
2. Yongzhou Vocation Technical College, Yongzhou 425100, China)

Abstract: China is the largest vegetable producer and consumer in the world, and seedling transplanting is the main method of vegetable cultivation. To address the shortcomings of the two types of automatic vegetable transplanters, the stalk clamping type and the pot ejection type, which are used to pick up seedlings, an alternating seedling picking and dropping mechanism was designed based on the combined ejecting-clamping picking method for symmetrically arranged bendable seedling trays. The mechanism was driven by the combination of crank rocker and cylinder. After the seedling ejecting device released the seedling from the cavity wall of the seedling tray, the pneumatic seedling clip clamped the seedling from the seedling picking position to the seedling throwing position to complete the seedling picking and throwing operation, and the seedling picking and throwing were carried out alternately on the front and rear sides of the seedling tray, thus enhancing the efficiency. The working principle, key point motion trajectory and structural composition of the mechanism were analyzed. The influence of key factors on the trajectory of seedling clamping point was analyzed and the following values were selected. The drive crank speed was 10 r/min, the length of the seedling throwing rocker was 309 mm, the drive cylinder extension speed was 25 mm/s, the seedling pulling was completed within 0.8 s, and the extension moment was 0.4 s ahead. Under this combination of parameters, the maximum lateral displacement of seedling clamping point in the seedling pulling stage was 9.6 mm, the accumulated lateral displacement was 0 mm, and the theoretical lifting height was 44 mm, which met the theoretical requirements of seedling picking and dropping operation. The performance test of picking and dropping seedlings under the planting frequency of 70 ~ 120 seedlings/min in a single row was carried out with 45 d growth time of pepper seedlings as the operation object. The test results showed that the mechanism can achieve 93%

success rate of seedling picking, 95% success rate of seedling dropping and 88% overall success rate at planting frequency was 100 plants/min in a single row, which met the requirements of seedling picking and dropping operation. The feasibility of the seedling picking and dropping mechanism was verified.

Key words: automatic vegetable transplanter; automatic seedling picking and dropping mechanism; symmetrically arranged seedling trays; combined ejector – picker type

0 引言

目前穴盘苗的蔬菜移栽机械以半自动为主,机械主要完成栽植作业,取苗投苗需要由人工完成,受人工取投苗速度限制,移栽效率较低,无法满足蔬菜产业快速发展的需求,全自动移栽机已成为主要发展方向。穴盘苗取苗装置是全自动移栽机的关键部件,其取苗效率、取苗效果直接影响移栽机的栽植效率和栽植效果。

针对不同秧盘、秧苗以及栽植农艺要求的特点,国内外学者提出了不同的取苗方式,并在取苗方法的基础上开发了多种取苗装置或者末端。目前主流的取苗方式包括插入茎秆夹持式^[1-3]、钵体夹取式^[4-6]、钵体顶出式^[7-9]、顶出-夹取结合式^[10-11]、气力式^[12-13]等。由于秧苗钵体的抗拉强度远低于抗压强度^[14-16],茎秆夹持式和钵体夹取式在取苗过程中对钵体施加拉力,易对秧苗钵体造成损伤,破坏秧苗根系,导致钵体破裂。钵体顶出式取苗方式是对秧苗钵体施加压力,取苗过程中秧苗损伤程度较低,但由于秧苗与秧盘穴壁之间的粘附力各不相同,因此存在秧苗顶出过程中压缩程度不同、顶出后落苗轨迹不一致、落苗点不可控等问题。

本文基于顶出-夹取结合式取苗方式,开展对置秧盘交替取投苗策略分析,以可弯曲秧盘及用其培育的辣椒钵苗为作业对象,设计一种曲柄摇杆附加直线气缸的对置秧盘交替自动取投苗机构,该机构与送盘、投苗、栽植等机构组成的供苗装置装载于大型移栽机上,配合旋耕装置、起垄装置、开沟装置等,可实现多行自动移栽,相较于传统多行移栽机用工量少。针对该自动取投苗机构进行机构运动学建模,仿真分析关键参数对气动苗爪运动轨迹的影响,得到符合作业要求的参数值;开展多栽植频率下的取投苗性能试验,以验证该取投苗方案的可行性。

1 对置秧盘交替取投苗策略与要求

1.1 取投苗策略分析

取投苗机构是供苗装置中的核心部件,作业时完成秧苗从秧盘到栽植装置的转移工作,直接影响移栽作业效率和作业效果。利用柔性秧盘的可弯曲特性,设计一种对称布置的秧盘布局,如图 1a 所示,

秧盘从两侧进入后,在水平阶段末端进行取苗,进入弯曲阶段后进给方向发生改变,最后从进盘口下方退出,有效减小秧盘输送机构体积。

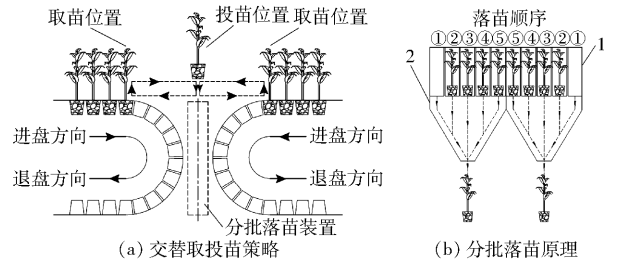


图 1 取苗、投苗、落苗原理图

Fig. 1 Principle of alternate seedling picking, dropping and planting
1. 整行接苗 2. 分批落苗

基于此对置秧盘布局,提出一种交替取投苗方法。在对置秧盘中间设置落苗机构,取投苗机构一侧苗夹在取苗位置时,另一侧苗夹则位于投苗位置,其理想轨迹如图 1 所示,苗夹在取苗位置对秧苗进行夹持后,沿竖直方向将秧苗拔出,然后水平运动至投苗位置,松开苗夹,秧苗沿竖直方向落入分批落苗装置中,落苗机构可存放取投苗装置整行投下的秧苗,并将其按等时间间隔分批次落入下方栽植装置中(图 1b),由栽植装置完成定植,也可与开沟装置配合使用,将秧苗直接落入下方植苗沟槽中。

1.2 取投苗机构结构原理

1.2.1 交替自动取投苗机构

在实际运行过程中,为减少运行过程中速度方向急变造成的冲击,物体的运动轨迹一般由平滑曲线组成,综合考虑往复运动和平面旋转运动,提出一种由曲柄摇杆机构和直线气缸共同驱动的交替自动取投苗机构,如图 2 所示。

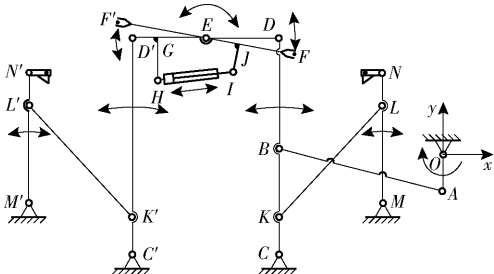


图 2 交替取投苗机构简化模型

Fig. 2 Simplified model of alternate seedling picking and dropping mechanism

以曲柄摇杆机构 $OABC$ 和四杆机构 $HEFI$ 建立封闭矢量方程

$$\boldsymbol{l}_{OA} + \boldsymbol{l}_{AB} = \boldsymbol{l}_{OC} + \boldsymbol{l}_{CB} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{l}_{HE} + \boldsymbol{l}_{EF} = \boldsymbol{l}_{HI} + \boldsymbol{l}_{IF} \tag{2}$$

将矢量方程(1)转换为解析形式,得到动点 A 、 B 的位移方程

$$\begin{cases} x_A = l_{OA} \cos \alpha_1 \\ y_A = l_{OA} \sin \alpha_1 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} x_B = x_A + l_{AB} \cos \alpha_2 = x_C + l_{BC} \cos \alpha_3 \\ y_B = y_A + l_{AB} \sin \alpha_2 = y_C + l_{BC} \sin \alpha_3 \end{cases} \tag{4}$$

对点 B 位移方程(4)进行移项、平方后,消除 α_2 ,得到

$$(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 - l_{AB}^2 + l_{BC}^2 + 2l_{BC}[(x_C - x_A) \cos \alpha_3 + (y_C - y_A) \sin \alpha_3] = 0 \tag{5}$$

连接点 A 、 C ,设 AC 与 x 轴夹角为 β_1 ,则有

$$\tan \beta_1 = \frac{y_A - y_C}{x_A - x_C} \tag{6}$$

综合方程(4)、(6),根据余弦定理可得

$$\cos(\alpha_3 - \beta_1) = \frac{l_{BC}^2 + (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 - l_{AB}^2}{2l_{BC} \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2}} \tag{7}$$

因为 $\alpha_3 - \beta_1$ 为 $\triangle ABC$ 的内角,因此有

$$0 < \alpha_3 - \beta_1 < \pi \tag{8}$$

求解 β_1 、 $\alpha_3 - \beta_1$ 、 α_3 后,通过式(4)即可求解 α_2 。求得 α_3 后,根据点 D 、 E 、 G 、 H 之间的位置关系,可依次求得其位移方程

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ x_E \\ y_E \\ x_G \\ y_G \\ x_H \\ y_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C + l_{CD} \cos \alpha_3 \\ y_C + l_{CD} \sin \alpha_3 \\ x_C + l_{CD} \cos \alpha_3 + l_{DE} \\ y_C + l_{CD} \sin \alpha_3 \\ x_C + l_{CD} \cos \alpha_3 + l_{DG} \\ y_C + l_{CD} \sin \alpha_3 \\ x_C + l_{CD} \cos \alpha_3 + l_{DG} \\ y_C + l_{CD} \sin \alpha_3 + l_{GH} \end{bmatrix} \tag{9}$$

将矢量方程(2)转换为解析形式,可得

$$\begin{cases} x_F = l_{EH} \cos \alpha_4 + l_{EF} \cos \alpha_6 = l_{HI} \cos \alpha_5 + l_{FI} \cos \alpha_7 \\ y_F = l_{EH} \sin \alpha_4 + l_{EF} \sin \alpha_6 = l_{HI} \sin \alpha_5 + l_{FI} \sin \alpha_7 \end{cases} \tag{10}$$

其中

$$\alpha_4 = \arccos \frac{l_{EH}^2 + l_{HI}^2 - (l_{EJ}^2 + l_{IJ}^2)}{2l_{EH}l_{HI}}$$

$$\alpha_5 = \frac{\pi}{2} - \alpha_4 - \arctan \frac{l_{EG}}{l_{GH}}$$

将方程(10)中已知量简化后移项、平方再相加,消去 α_7 ,得到

$$(x_E - x_I)^2 + (y_E - y_I)^2 - l_{FI}^2 + l_{EF}^2 + 2l_{EF}[(x_E - x_I) \cos \alpha_6 + (y_E - y_I) \sin \alpha_6] = 0 \tag{11}$$

连接 E 、 I ,设连线 EI 与 x 轴夹角为 β_2 ,则

$$\tan \beta_2 = \frac{y_E - y_I}{x_E - x_I} \tag{12}$$

综合方程(10)、(12),根据余弦定理可得

$$\cos(\beta_2 - \alpha_6) = \frac{l_{EF}^2 + (x_E - x_I)^2 + (y_E - y_I)^2 - (l_{FI}^2 + l_{IJ}^2)}{2l_{BC} \sqrt{(x_E - x_I)^2 + (y_E - y_I)^2}} \tag{13}$$

因为 $\beta_2 - \alpha_6$ 为 $\triangle EFI$ 的内角,因此有

$$0 < \beta_2 - \alpha_6 < \pi \tag{14}$$

求解 β_2 、 $\beta_2 - \alpha_6$ 、 α_6 后,通过式(10)求解得到 α_7 。

2.2.2 后侧推盘驱动点 N 位移方程

根据图 2 以及推盘摇杆运动原理,简化后得到如图 5 所示推盘摇杆驱动机构原理图,该机构可看作是由 $CKLM$ 组成的一套双摇杆机构,建立矢量方程

$$\boldsymbol{l}_{CK} + \boldsymbol{l}_{KL} = \boldsymbol{l}_{CM} + \boldsymbol{l}_{ML} \tag{15}$$

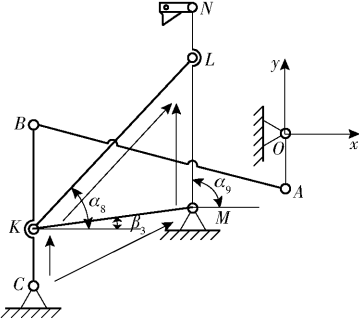


图 5 推盘摇杆驱动机构原理图

Fig. 5 Schematic of push plate rocker drive mechanism

$CKLM$ 双摇杆机构中,主动摇杆 CK 为曲柄摇杆机构 $OABC$ 的摇杆 BC 一部分,因此可得点 K 位移方程

$$\begin{cases} x_K = x_C + l_{CK} \cos \alpha_3 \\ y_K = y_C + l_{CK} \sin \alpha_3 \end{cases} \tag{16}$$

将矢量方程(15)转换为解析形式,求解点 L 位移方程

$$\begin{cases} x_L = x_K + l_{KL} \cos \alpha_8 = x_M + l_{LM} \cos \alpha_9 \\ y_L = y_K + l_{KL} \sin \alpha_8 = y_M + l_{LM} \sin \alpha_9 \end{cases} \tag{17}$$

将方程(17)进行移项、平方后,消除 α_9 ,得到

$$(x_K - x_M)^2 + (y_K - y_M)^2 - l_{LM}^2 + l_{KL}^2 + 2l_{KL}[(x_K - x_M) \cos \alpha_8 + (y_K - y_M) \sin \alpha_8] = 0 \tag{18}$$

连接点 K 、 M ,设 KM 与 x 轴夹角为 β_3 ,则有

$$\tan \beta_3 = \frac{y_K - y_M}{x_K - x_M} \tag{19}$$

综合方程(17)、(19),根据余弦定理可得

$$\cos(\alpha_8 - \beta_3) = \frac{l_{KL}^2 + (x_K - x_M)^2 + (y_K - y_M)^2 - l_{LM}^2}{2l_{KL}\sqrt{(x_K - x_M)^2 + (y_K - y_M)^2}} \quad (20)$$

因为 $\alpha_8 - \beta_3$ 为 $\triangle KML$ 的内角, 因此有

$$0 < \alpha_8 - \beta_3 < \pi \quad (21)$$

求解 $\beta_3, \alpha_8 - \beta_3, \alpha_8$ 后, 通过式 (17) 即可求解 α_9 。由于推盘驱动点 N 在杆 ML 延长线上, 因此可得点 N 位移方程

$$\begin{cases} x_N = x_M + l_{MN}\cos\alpha_9 \\ y_N = y_M + l_{MN}\sin\alpha_9 \end{cases} \quad (22)$$

2.3 拔苗过程力学模型与顶苗机构参数优化

图 6a 所示为拔苗过程示意图, 苗夹在到达取苗位置后通气, 夹持秧苗茎秆后在拔苗驱动气缸的作用下向上移动完成拔苗。秧苗被夹持时其茎秆、钵体分别受到苗夹作用力和苗盘的反作用力, 取 P, P' 为研究点, 分析取苗过程中秧苗受力关系, 如图 6b 所示。

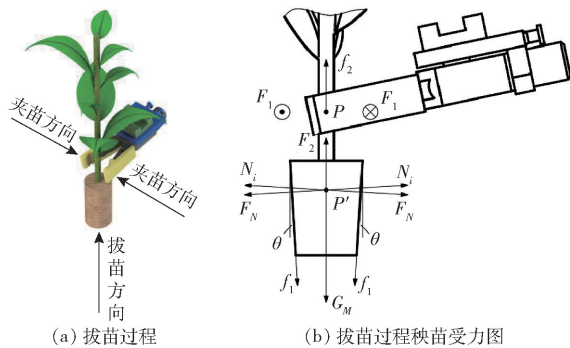


图 6 拔苗过程原理图

Fig. 6 Schematics of seedling extraction process

分析点 P, P' , 苗夹对秧苗茎秆分别有夹持力 F_1 和提升力 F_2 、苗夹与秧苗茎秆的摩擦力 f_2 ; 秧盘对钵体分别有正压力 F_N 、秧盘与钵体粘附力 N_i [14, 17]、秧盘与钵体之间的摩擦力 f_1 ; 秧苗还受本身重力 G_M 。为了将秧苗拔起, 并保持稳定状态, 气动苗夹对秧苗的提升力 F_2 要满足

$$\pi(R+r)h(f_1\cos\theta + N_i\sin\theta + G_M - F_N\sin\theta - f_2) \leq F_2 \quad (23)$$

式中 R ——秧苗钵体上端截面半径, mm
 r ——秧苗钵体下端截面半径, mm
 h ——秧苗钵体高度, mm
 θ ——秧苗钵体侧边角, ($^\circ$)

秧苗抗脱拉能力反映秧苗夹取的难易程度, 将秧苗竖直方向的合力拟定为抗脱拉力 F_q , 即

$$F_q \approx \pi(R+r)h[F_N(\mu_1\cos\theta - \sin\theta) + N_i\sin\theta + G_M - \mu_2[F_1]] \quad (24)$$

式中 μ_1 ——秧盘穴壁与秧苗间摩擦因数

μ_2 ——秧苗茎秆与苗夹间摩擦因数

$[F_1]$ ——秧苗径向抗压许用力, N

为保证秧苗顺利脱出, 苗夹对秧苗提升力 F_2 要满足

$$F_q \leq F_2 \quad (25)$$

为减少取苗过程中取苗驱动气缸负荷, 在拔苗驱动气缸作业前设置有顶苗工序, 由气缸驱动顶苗杆从秧盘穴底部进入秧盘穴, 接触到钵体后继续向上, 直至钵体与秧盘穴脱离。顶苗过程中, 顶出距离、顶苗杆直径以及顶出速度等对顶出效果有较大影响 [18-19]。参考文献 [19] 中进行的钵体顶出特性试验, 在顶苗杆直径 8 mm、顶苗气缸驱动气压 0.6 MPa、节流阀开度 100% 的情况下进行顶出距离优化试验。试验结果表明, 当顶苗杆顶出距离为 7 mm 时, 95% 的秧苗钵体能脱离秧盘穴, 顶苗过程用时约 0.8 s。

3 苗夹运动轨迹优化与结构设计

苗夹在竖直方向上的运动是其绕拔苗旋转中心轴旋转及其随曲柄摇杆机构往复摆动的复合运动, 其运动轨迹受拔苗气缸作用时刻和作用时长以及曲柄摇杆机构中各杆件长度、安装和连接位置影响。根据上文分析结果对部分参数进行取值, 通过仿真软件分析各因素对秧苗夹持点运动轨迹的影响, 确定优选参数。对关键部件进行结构设计和虚拟装配, 得到自动供苗装置。

3.1 取苗驱动气缸选型与部分参数设计分析

分析秧盘弯折半径以及考虑分批落苗装置安装空间需求, 两侧取苗点距离 d_0 取 420 mm, 则单侧取苗点与投苗点之间距离 d_{QT} 为 210 mm。育苗选用的亚美柯 D220P 型秧盘穴深 d_x 为 35 mm, 考虑拔苗过程中机具震动以及夹持点打滑对夹持点竖直方向实际提升高度的影响, 要求设计提升高度 d_T 需大于 35 mm, 设拔苗过程中杆 EF 与 x 轴方向最大夹角为 $\alpha_{6\max}$, 将以上约束条件整理为

$$\begin{cases} 2l_{EF}\cos\alpha_{6\max} = d_{QT} = 210 \text{ mm} \\ 2l_{EF}\sin\alpha_{6\max} = d_T > 35 \text{ mm} \end{cases} \quad (26)$$

计算后对结果进行取整, 当 $l_{EF} = 107 \text{ mm}$ 、 $\alpha_{6\max} = 11^\circ$ 时可满足要求, 此时提升高度 $d_T = 40.8 \text{ mm}$ 。

受交替取投苗机构运行过程中各杆件位置变化的限制, 拔苗驱动气缸的运行空间较小, 应满足结构紧凑要求。同时应选用带有缓冲功能的气缸作为拔苗驱动气缸, 减少气缸到达极限位置时的冲击。星辰气动 CDJ2D 系列迷你气缸采用气缓冲, 符合要求。具体选用 CDJ2D10-20-B 型气缸, 缸径 10 mm,

行程 20 mm,使用压力范围 0.06 ~ 0.7 MPa,活塞速度 0.05 ~ 0.75 m/s,收缩状态长度 $l_{Hmin} = 107.5$ mm,伸出状态长度 $l_{Hmax} = 127.5$ mm。

初选 $l_{DG} = 173.4$ mm, $l_{GH} = 60$ mm,根据苗夹拔苗过程中初始和终止位置,图解法得到 $l_{EJ} = 48.2$ mm, $l_{IJ} = 40$ mm。基于实际电机安装情况,初选点 C 位置为(-234.6 mm, -142.2 mm),根据 2.2 节进行计算取整,取 $l_{OA} = 51.5$ mm, $l_{AB} = 234.5$ mm, $l_{BC} = 151$ mm, $l_{CD} = 309$ mm, $l_{DE} = 210$ mm,该条件下的交替取投苗机构满足关键点位置要求。

3.2 夹持点运动轨迹影响因素分析

3.2.1 运动学仿真模型

对装置虚拟装配后进行运动学仿真,添加驱动马达和驱动函数,得到运动学仿真模型^[20]。在模型中改变气缸伸出时刻、气缸伸出速度、取投苗摇杆长度以及驱动曲柄转速,记录秧苗夹持点运动轨迹,将轨迹坐标导入绘图软件进行分析,得到不同因素条件下的运动轨迹叠加图,分析各因素对秧苗夹持点运动轨迹的影响方式。

3.2.2 关键因素影响分析

以后侧秧苗夹持点为观察对象,定义以下参数为基准参数:机构取苗速度为 100 株/(min · 行),对应曲柄转速 10 r/min,驱动气缸伸出速度 20 mm/s,伸出时刻为驱动摇杆旋转至右极限位置前 0.5 s,1 s 完成拔苗驱动,取投苗摇杆长度 309 mm。此参数下的夹持点运动轨迹如图 7 所示,该轨迹可分为接近段 ab、拔苗段 bc、转运段 cd 以及投苗段 da,其中接近段 ab 和转运段 cd 为苗夹随曲柄摇杆机构进行的摆动,拔苗段 bc 和投苗段 da 为苗夹绕轴转动与曲柄摇杆摆动的复合运动。拔苗段 bc 在 x 轴上的投影长度变化即为拔苗过程中苗夹对秧苗茎秆的横向位移,位移越大则对秧苗茎秆的拉扯作用越明显,导致秧苗在拔取过程中发生晃动,易损坏秧苗茎秆;在 y 轴上的投影长度变化即为拔苗始末位置高度变化,即理论拔苗高度。

图 8a 为基准参数下,拔苗驱动气缸伸出时刻分别为驱动摇杆旋转至右极限位置前 0.25、0.50、

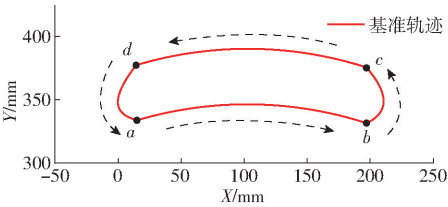


图 7 基准参数下夹持点运动轨迹及分段区间
Fig. 7 Trajectory of clamping point movement and segmentation interval under benchmark parameters

0.75 s 时的秧苗夹持点运动轨迹。由于拔苗气缸完全伸出时长为 1 s,当伸出时刻为驱动摇杆旋转至右极限位置前 0.50 s 时,拔苗段 a、b 两点的横坐标重合,夹持点在 x 轴方向上的累计位移为 0 mm,当伸出时刻为前 0.25 s 时累计位移为负,伸出时刻为前 0.75 s 时累计位移为正。由此可得出结论:在其他参数一定的情况下,若拔苗驱动气缸伸出时长为 t_1 ,当拔苗驱动气缸伸出时刻为驱动摇杆旋转至右极限位置前 $0.5t_1$ 时,拔苗阶段秧苗茎秆横向累计位移为 0 mm,将此时刻称为横向位移对称时刻。

当拔苗驱动气缸伸出速度 v_Q 分别为 13.33、20.00、26.67 mm/s 时,对应气缸伸出时长分别为 1.50、1.00、0.75 s,根据上文结论,仿真过程中应将拔苗驱动气缸伸出时刻分别改为前 0.750、0.500、0.375 s,其他参数为基准值。运动轨迹仿真结果如图 8b 所示。由图可知,拔苗气缸伸出速度越快,夹持点横向位移距离越短,拔苗过程中秧苗茎秆的横向拉扯程度越小,但秧苗在纵向上脱离秧盘穴的速度也越快,易导致夹持点打滑和秧苗钵体破碎。因此,在保证夹持点稳定和秧苗钵体完整的情况下,拔苗驱动气缸伸出速度越快越好。

图 8c 为基准参数下,取投苗摇杆长度 l_{CD} 分别为 289、309、329 mm 时的秧苗夹持点运动轨迹。从图中可以看出,随着取投苗摇杆长度的增加,夹持点运动轨迹高度增加,且接近段 ab 和转运段 cd 的长度增长,但拔苗段 bc 和投苗段 da 无明显变化。由此可得出结论,取投苗摇杆长度主要影响夹持点运动轨迹高度位置,其次影响取苗点和投苗点之间距

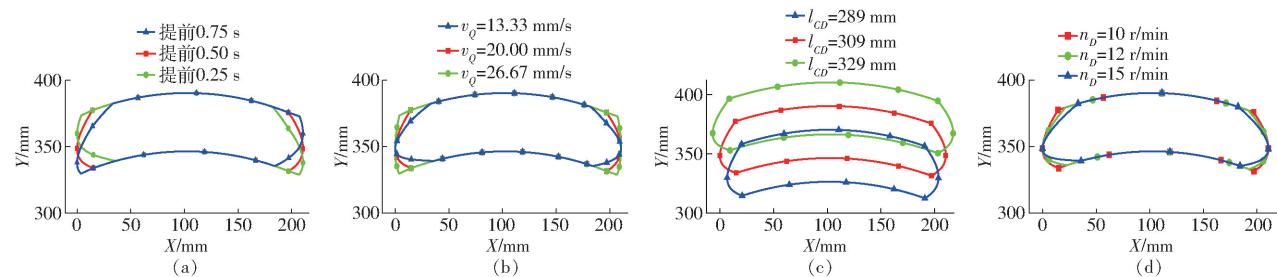


图 8 关键参数对秧苗夹持点运动轨迹的影响

Fig. 8 Effects of key parameters on movement trajectory of seedling clamping point

离,在实际取苗过程中可根据秧苗和分批落苗装置之间的位置关系调节取投苗摇杆长度,使得夹持点运动轨迹符合实际要求。

图 8d 为基准状态下驱动曲柄转速 n_d 分别为 10、12、15 r/min 时的秧苗夹持点运动轨迹。由图可知,驱动曲柄转速越快,夹持点在拔苗段的横向位移越大,对应秧苗茎秆横向拉扯越明显。因此可得出结论,驱动曲柄转速对夹持点运动轨迹的影响主要在于拔苗段横向位移,在实际取苗过程中虽然转速越快取苗效率越高,但应同步提高取苗气缸伸出速度,以抵消由转速增加带来的夹持点拔苗段横向位移的增加,同时在调节过程中由于拔苗速度和转运速度的加快,应综合考虑夹持点茎秆以及秧苗钵体的抗拉扯能力。

3.3 优选结果

综合上述秧苗夹持点运动轨迹分析过程及结论,在满足交替取投苗机构运动轨迹要求前提下选定参数:根据交替取投苗速度要求,选定驱动曲柄转速 10 r/min,对应取投苗速度 100 株/(min·行);根据供苗装置整机安装实际布局限制,选定取投苗摇杆长度 309 mm,此时摇杆固定端与秧盘输送装置平齐,便于布置;根据取苗速率和拔苗过程中夹持点的横向位移,设定驱动气缸伸出速度 25 mm/s,0.8 s 内完成拔苗;根据上文分析结果中的横向位移对称时刻,将伸出时刻设定为驱动摇杆旋转至右极限位置前 0.4 s。该参数组合下夹持点运动轨迹如图 9 所示。

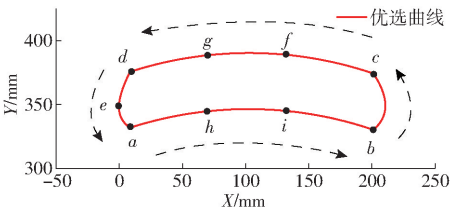


图 9 优选参数下夹持点运动轨迹及气缸执行时刻

Fig. 9 Trajectory of clamping point movement and cylinder actuation moment under preferred parameters

测得秧苗茎秆在拔苗段的最大横向位移为 9.6 mm,累计横向位移为 0 mm,理论提升高度为 44 mm。在各气缸动作时刻方面,将苗夹通气夹持时刻设定在 b ,断气松夹时刻设定在 e ,该位置下瞬时速度方向接近竖直;苗夹横向位移气缸在夹苗状态下的伸出通气时刻设定在 f ,到达 g 位置时完成横向扩张位移,空载状态下的收缩通气时刻设定在 h ,到达 i 位置时完成横向收拢移动,以达到 1.3 节所提出的交替取投苗机构运动轨迹要求。

3.4 结构设计

自动供苗装置如图 10 所示,其主要由两侧秧盘

输送机构、交替自动取投苗机构、分批落苗机构以及安装机架等组成。两侧秧苗输送机构负责秧盘供给,限定秧盘沿既定滑槽路线移动,按预设移栽机前进方向分为前侧和后侧,其中后侧安装有电机等驱动装置。分批落苗机构位于装置正中间位置,接住交替取投苗机构投放的整排秧苗后,以相同时间间隔将其落入下方植苗沟槽或栽植装置中,具体原理可参考图 1b。

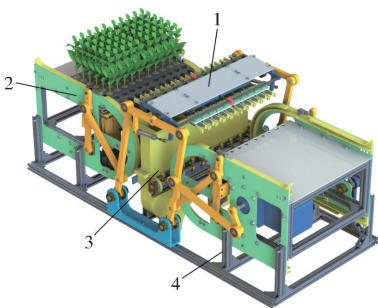


图 10 自动供苗装置结构示意图

Fig. 10 Schematic of structure of automatic seedling supply device

1. 交替取投苗机构 2. 秧盘输送机构 3. 分批落苗机构 4. 安装机架

交替自动取投苗机构参照图 1 进行设计。气动苗夹总成是该装置的关键部件,需要在作业过程中进行秧苗夹取与投放、横向位移破坏秧苗交错,同时其通过拔苗旋转中心轴安装在水平连杆上,可通过拔苗气缸的伸缩实现转动拔苗。为提高秧苗夹持稳定性,减少夹持过程中苗夹对秧苗茎秆的损伤^[21],基于 EPSMC-MINI-E 型气动机械手对其进行设计,如图 11 所示。该总成气动机械手通过辅助夹持块对秧苗茎秆进行夹持,辅助夹持块上粘贴有柔性夹持材料,用于增加与秧苗茎秆之间的摩擦力,减少夹持损伤。机械手通过安装板安装在直线导轨滑块上,且整排气动苗夹之间通过棉线互相连接,可在横向位移气缸的牵引下沿直线导轨移动。

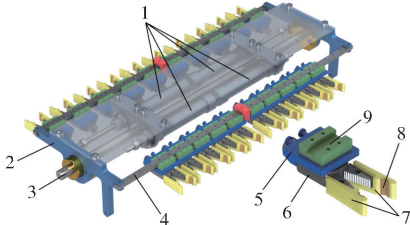


图 11 气动苗夹总成结构示意图

Fig. 11 Schematic of structure of pneumatic seedling clip assembly

1. 苗夹横向位移气缸 2. 旋转驱动架 3. 拔苗旋转中心轴 4. 直线导轨 5. 苗夹安装板 6. 气动机械手 7. 辅助夹持块 8. 柔性夹持材料 9. 直线导轨滑块

4 样机取投苗性能试验

4.1 样机研制与育苗

样机如图 12 所示,外形尺寸(长×宽×高,不含空气压缩机和电器控制元件安装板)989 mm×429 mm×450 mm,使用 24 V 直流电源驱动电机、空气压缩机以及气动控制系统工作。

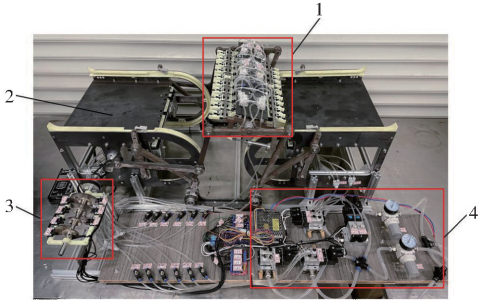


图 12 自动供苗装置样机

Fig. 12 Performance test platform of automatic seedling dropping mechanism

1. 气动苗夹总成 2. 秧盘输送机构 3. 时序控制系统 4. 气动控制元件

气动元件驱动系统如图 13 所示,图中 AS 为气源,RV 为减压阀,EV 为电磁阀,TV 为节流阀,LMJ 为前侧苗夹,LD 为前侧顶苗气缸,LH 为前侧横向位移气缸,RMJ 为后侧苗夹,RD 为后侧顶苗气缸,RH 为后侧横向位移气缸,BM 为拔苗驱动气缸。气源输出的高压空气由气动调压阀调控后输送至各处气动元件。气动苗夹均由两位三通阀控制,苗夹夹持力大小由气动减压阀调节气压控制。气缸均由二位五通电磁阀控制,运行速度通过节流阀进行调节,调节后气缸运行平稳,行程末端无冲击现象。

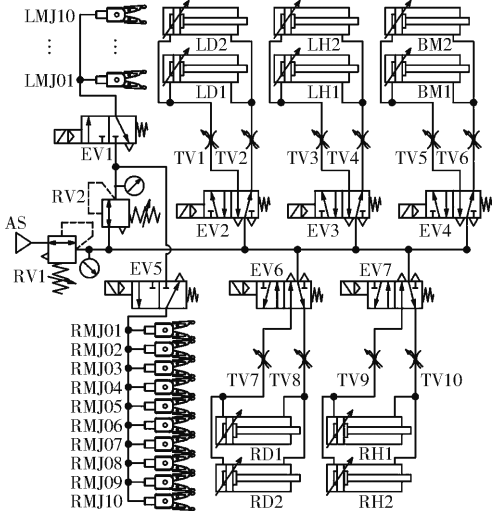


图 13 气动元件连接图

Fig. 13 Pneumatic components connection diagram

试验用兴蔬 215 辣椒秧苗在湖南农业大学周边大棚进行培育,育苗时间 2022 年 6 月 5 日至 7 月 20

日,苗龄 45 d。育苗基质采用袋装营养土,主要成分为椰糠、泥炭、珍珠岩。随机取 40 株秧苗进行物料学特性试验,测得秧苗平均高度(不包含钵体)104.3 mm,平均最大叶展幅度 82.8 mm,平均质量 9.3 g。

4.2 试验方案与评价指标

参考 JB/T 10291—2013《旱地栽植机械》,高速移栽机栽植频率大于或等于 90 株/(min·行),结合实际栽植需求,分别选取 70、80、90、100、110、120 株/(min·行)为目标栽植频率 T ,分组进行取投苗性能试验,单次试验从两边各取 1 行秧苗,共计 20 株,每组进行 3 次。通过调整电机转速来改变取投苗速率,转速测量仪器为 TA8146A 型非接触式光电转速计,最低测量转速 2.5 r/min,分辨率 0.1 r/min。试验过程如图 14 所示。

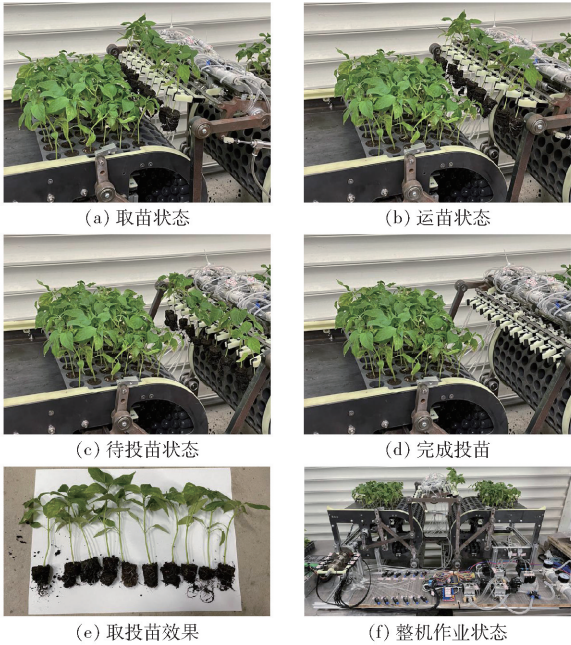


图 14 交替取投苗机构取投苗试验

Fig. 14 Alternating reciprocating seedling picking and dropping mechanism for seedling picking and dropping test

试验选取取苗成功率 Y_1 、投苗成功率 Y_2 、总体成功率 Y_3 为取投苗性能评价指标。取苗成功率用于衡量机构取苗性能,投苗成功率用于衡量机构对已成功夹取秧苗的投苗作业性能,总体成功率则用于衡量机构取投苗作业性能。取苗、投苗分开计算的目的是后期判断栽植频率对各作业阶段的影响。

$$Y_1 = n_2/n_1 \times 100\% \tag{27}$$

$$Y_2 = n_3/n_2 \times 100\% \tag{28}$$

$$Y_3 = n_3/n_1 \times 100\% \tag{29}$$

式中 n_1 ——单组试验用钵苗总数,株
 n_2 ——取苗成功株数,株
 n_3 ——投苗成功株数,株

4.3 试验结果与分析

取投苗性能试验结果如表 2 所示。

表 2 取投苗试验结果

Tab.2 Results of seedling picking and dropping tests

$T/$ (株·min ⁻¹ ·行 ⁻¹)	n_1 /株	n_2 /株	n_3 /株	Y_1 /%	Y_2 /%	Y_3 /%
70	60	57	57	95	100	96
80	60	59	56	98	95	93
90	60	56	54	93	96	90
100	60	56	53	93	95	88
110	60	44	41	73	93	68
120	60	31	25	52	81	42

试验结果表明:

(1)在 $T\leq 100$ 株/(min·行)情况下取苗效果稳定,基质损失较小,失败的主要原因是秧苗茎秆偏离秧盘穴中心位置较大,脱离苗爪捕捉范围。 $T > 100$ 株/(min·行)时取苗成功率开始下降,失败的主要原因是受机构急回特性影响机架变形,苗夹与取苗位置发生偏移。

(2)在 $T\leq 110$ 株/(min·行)情况下投苗效果稳定,失败的主要原因是秧苗下落过程中叶片被苗夹卡住。 $T > 110$ 株/(min·行)时投苗成功率开始下降,该阶段投苗失败的主要原因是取苗过程中夹持

效果较差,移动过程中秧苗提前掉落。
(3) $T\leq 100$ 株/(min·行)情况下总体成功率大于 85%,处于可靠工作状态, $T > 100$ 株/(min·行)后总体成功率明显下降,该取投苗方案不再可靠。

5 结论

(1)基于顶出-夹取结合式取苗方式,设计了一种基于可弯曲秧盘的交替取投苗机构,分析了工作原理,建立了关键点运动学模型和取苗过程力学模型。
(2)对样机进行了设计和虚拟装配,分析了机构结构参数和作业参数对夹持点运动轨迹的影响,确定了关键参数取值:驱动曲柄转速 10 r/min,取投苗摇杆长度为 309 mm,拔苗驱动气缸运行速度 25 mm/s,0.8 s 完成拔苗,伸出时刻为提前 0.4 s。该参数组合下秧苗夹持点在拔苗段最大横向位移为 9.6 mm,累计横向位移为 0 mm,理论提升高度为 44 mm,满足取投苗作业理论要求。
(3)设计了气动系统并研制了样机。开展了多取苗频率下的取投苗性能试验,试验结果表明,该取投苗机构在取苗效率 100 株/(min·行)时可达到取苗成功率 93%,投苗成功率 95%,总体成功率 88%,验证了方案可行性。

参 考 文 献

[1] 张静,龙新华,韩长杰,等.机械驱动式辣椒穴盘苗自动取投苗系统设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(5):20-30. ZHANG Jing, LONG Xinhua, HAN Changjie, et al. Design and experiments of mechanically driven automatic taking and throwing system for chili plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 20-30. (in Chinese)

[2] 李华,马晓晓,曹卫彬,等.夹茎式番茄钵苗取苗机构设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(21):39-48. LI Hua, MA Xiaoxiao, CAO Weibin, et al. Design and experiment of seedling picking mechanism by stem clipping for tomato plug seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 39-48. (in Chinese)

[3] 那明君,滕乐,周振响,等.全自动滑道式旱地钵苗移栽机构设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):54-61. NA Mingjun, TENG Le, ZHOU Zhenxiang, et al. Design and experiment of fully automatic slide-track type dryland pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 54-61. (in Chinese)

[4] 崔巍,赵亮,刘立晶,等.二阶椭圆行星轮系取苗机构参数优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):79-84,98. CUI Wei, ZHAO Liang, LIU Lijing, et al. Kinematic analysis and experiment of rotary pick-up mechanism on seedling pick-up device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 79-84,98. (in Chinese)

[5] 胡建平,潘杰,陈凡,等.基于 EDEM-RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J].农业机械学报,2022,53(5):75-85,301. HU Jianping, PAN Jie, CHEN Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 75-85,301. (in Chinese)

[6] 廖庆喜,王洋,胡乔磊,等.油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(11):93-102. LIAO Qingxi, WANG Yang, HU Qiaolei, et al. Design and experiment on pick-up device for rapeseed substrate seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 93-102. (in Chinese)

[7] 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(Supp. 1): 19-23, 18. (in Chinese)

[8] 王超,李永磊,宋建农,等.气动下压式高速移栽机自动控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):114-125. WANG Chao, LI Yonglei, SONG Jiannong, et al. Design and test of automatic control system of pneumatic ejecting type high-speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 114-125. (in Chinese)

- ZHAO Yongchao, KONG Degang, HUO Junwei, et al. Simulation and experiment of air-suction collecting and conveying equipment for small berry[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 32–39. (in Chinese)
- [23] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [24] DING X T, WEI Y Z, YAN Z Y, et al. Simulation and experiment of the spiral digging end-effector for hole digging in plug tray seedling substrate[J]. Agronomy, 2022, 12(4): 779.
- [25] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. Yolov4: optimal speed and accuracy of object detection[J]. arXiv preprint arXiv:2004.10934, 2020.
- [26] 张秀花, 静茂凯, 袁永伟, 等. 基于改进 YOLOv3-Tiny 的番茄苗分级检测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 221–229. ZHANG Xiuhua, JING Maokai, YUAN Yongwei, et al. Tomato seedling classification detection using improved YOLOv3-Tiny[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 221–229. (in Chinese)
- [27] 王艳芳, 杨夕同, 李新旭, 等. 连栋温室番茄工厂化生产育苗技术[J]. 中国蔬菜, 2018(9): 80–82. WANG Yanfang, YANG Xitong, LI Xinxu, et al. Seedling technology for tomato factory production in multi-span greenhouse [J]. China Vegetables, 2018(9): 80–82. (in Chinese)
-

(上接第 139 页)

- [9] 文永双, 张俊雄, 张宇, 等. 蔬菜穴盘苗插入顶出式取苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 96–104. WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, ZHANG Yu, et al. Development of insertion and ejection type seedling taking device for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22): 96–104. (in Chinese)
- [10] 倪有亮, 金诚谦, 刘基. 全自动移栽机取送苗系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 10–19. NI Youliang, JIN Chengqian, LIU Ji. Design and experiment of system for picking up and delivering seedlings in automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 10–19. (in Chinese)
- [11] 金鑫, 杜新武, 杨传华, 等. 蔬菜移栽穴盘苗自动输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 103–111. JIN Xin, DU Xinwu, YANG Chuanhua, et al. Design and experiment on automatic transporting mechanism for vegetable potted seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 103–111. (in Chinese)
- [12] 郭警伟, 黄勇, 戴远征, 等. 气吹式落苗装置有序排苗性能的试验研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 136–138. GUO Jingwei, HUANG Yong, DAI Yuanzheng, et al. Performance experimental study of orderly rows seedlings on a type of seedling-falling device with air blast [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 136–138. (in Chinese)
- [13] 袁挺, 王栋, 文永双, 等. 蔬菜移栽机气吹振动复合式取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 80–87. YUAN Ting, WANG Dong, WEN Yongshuang, et al. Design and experiment of seedlings unloading mechanism based on methods of air-blowing and vibration for vegetable transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 80–87. (in Chinese)
- [14] 任露泉. 土壤粘附力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 王超, 刘彩玲, 李永磊, 等. 蔬菜移栽机气动下压式高速取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 35–43, 51. WANG Chao, LIU Cailing, LI Yonglei, et al. Design and experiment of pneumatic punching high-speed seedling picking device for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 35–43, 51. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] 何亚凯. 蔬菜穴盘苗高速栽植自动取苗系统设计与研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2018. HE Yakai. Design and research on automatic pick-up system for vegetable plug seeding transplant in high speed[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese)
- [20] 袁昌富, 张宏文, 马万里, 等. 基于 SolidWorks Motion 的番茄收获机测产装置的运动学仿真分析[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 96–99, 180. YUAN Changfu, ZHANG Hongwen, MA Wanli, et al. Motion simulation analysis of yield monitor device on tomato harvester based on SolidWorks Motion[J]. Food & Machinery, 2015, 31(5): 96–99, 180. (in Chinese)
- [21] 姜凯, 陈立平, 张骞, 等. 蔬菜嫁接机器人柔性夹持搬运机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 63–71. JIANG Kai, CHEN Liping, ZHANG Qian, et al. Design and experiment on flexible clamping and conveying mechanism of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 63–71. (in Chinese)