

温室水培叶菜高速稀植机构设计与试验

童俊华^{1,3}, 孟青新¹, 辜松², 武传宇^{1,3*}, 马可¹

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;
3. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 温室水培叶菜幼苗种植需将钵苗从穴盘移栽至栽培槽中, 传统人工作业劳动强度大、效率低, 而通过移栽机自动化作业效率高、质量好。该研究设计了一种多移植手的穴盘取苗高速稀植移栽机构, 可实现穴盘内成排取苗和栽培槽变间距并行植苗作业。高速稀植移栽机采用受拉缓冲带串接针爪式多移植手减缓变间距栽植过程中的不等速冲击, 通过油压缓冲器减缓多移植手纵横向高速移动在末端位置的冲击。在移植手结构和叶菜钵苗状况确定的情况下, 对稀植作业过程中多移植手间的受拉缓冲带弹性系数 K 、水平方向平均速度 v_1 、水平运动末端油压缓冲器吸收能量 N_1 、垂直方向平均速度 v_2 和垂直运动末端油压缓冲器吸收能量 N_2 这 5 个因素进行正交试验。结果表明, 水平方向的平均速度 v_1 和水平运动末端油压缓冲器吸收能量 N_1 间的耦合关系和缓冲带弹性系数 K 对高速稀植过程的移栽成功率影响较大, 多移植手机构最优参数组合为 K 为 0.128 N/m、 v_1 为 0.49 m/s、 v_2 为 0.74 m/s、 N_1 为 6 J、 N_2 为 15 J, 此时移栽效率为 3 956 株/h, 植苗成功率为 96.70%, 满足高效稀植的作业需求。

关键词: 农业机械; 设计; 试验; 温室; 移栽; 穴盘苗; 多移植手; 水培叶菜

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.001

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-01-0001-09

童俊华, 孟青新, 辜松, 等. 温室水培叶菜高速稀植机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 1-9.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.001 <http://www.tcsae.org>

Tong Junhua, Meng Qingxin, Gu Song, et al. Design and experiment of high-speed sparse transplanting mechanism for hydroponics pot seedlings in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 1-9. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.001 <http://www.tcsae.org>

0 引言

设施园艺智能化是当前世界农业智能化装备的研发热点和产业升级的重点, 中国设施园艺装备近年来也在迅速发展^[1-3]。设施园艺中采用营养液为根系直接提供营养和水分的水培技术, 已经得到国内很多研究机构的推广与应用^[4-6]。叶菜水培作业环节中, 需将穴盘苗批量稀植移栽到栽培槽里, 通常人工作业强度大、效率低。国外学者较早开展钵苗机械化移栽的相关研究, Ting 等^[7-8]研究了一种基于 SCARA 工业机器人手臂本体安装单末端执行器进行不同规格穴盘间的移栽模式, 证明了温室钵苗机械移栽的可行性; Choi 等^[9]设计了一种五连杆取钵机构, 取苗成功率为 97%; Dong 等^[10]研制了一种由移栽机构、送盆机构、送盘机构、机架和控制器组成的多移植手蔬菜移栽机, 移栽速度为 2 800 盆/h; 日本研发了一种半自动移栽机 PVHR2-E18 移栽效率为 3 600 株/h^[11]; 意大利法拉利公司生产的 FPS 型移栽机,

移栽效率为 2 500 株/h^[12]; Dihingia 等^[13]研制一种半自动旱地钵苗移栽机, 可实现两行并联移栽作业, 移栽效率为 31 株/min。近些年, 国内学者也开展了适合本土育苗农艺的钵苗自动移栽技术研究。孙国祥等^[14]基于有限元分析, 设计一种末端机械手指, 机械手指平均移栽成功率为 95.76%, 平均伤苗率为 3.06%; 钱少明等^[15]通过建立气动驱动器中气压值与抓持能力之间关系, 研制采摘黄瓜末端执行器, 抓持成功率为 90%; 胡敏娟等^[16]设计了一种变形滑针式取苗器; 廖小花等^[17-18]对穴盘苗钵基质进行力学分析; 韩绿化等^[19-20]设计了一种轻简型自动移栽, 对于 128 和 72 孔穴盘苗, 移栽效率分别达到 122 株/h 和 1 025 株/h; 高国华等^[21]研制了一套斜入式穴盘苗移栽手爪, 试验测试移栽成功率可达 98%; 胡建平等^[22]设计了一种 8 爪并联作业式高效全自动钵苗移栽设备, 移栽成功率可达 90.23%; 马锐等^[23]设计了一种整排夹持的全自动移栽机末端执行器, 并进行结构参数优化; 许春林等^[24]提出了一种 Hermite 插值行星轮系全自动草莓钵苗移栽机构, 取苗成功率为 92%; 党玉功等^[25]研制一种单自由度开式铰链四杆取苗机械臂, 取苗成功率 91.32%; 马晓晓等^[26]对一种番茄钵苗自动取苗装置进行结构优化; 周昕等^[27]研制了一种刚度大、精度高及累积误差小的并联移栽机器人, 试验测试移栽机构加速度高于 20 mm/s² 时, 移栽钵苗合格率明显降低; 童俊华等^[28]研究一种指铲式末端执行器, 通过增大指铲与苗钵基质的

收稿日期: 2020-09-14 修订日期: 2020-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0701504); 广东省重点领域研发计划项目 (2019B020222004); 浙江省重点研发项目 (2018C02046)

作者简介: 童俊华, 博士, 副教授, 主要从事农业装备智能化技术方面的研究。Email: jhtong@zstu.edu.cn

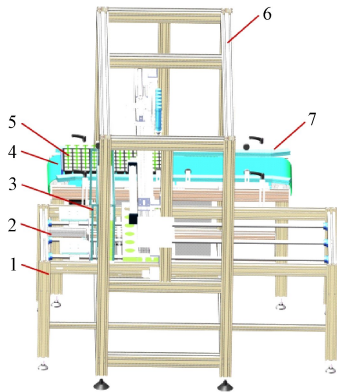
*通信作者: 武传宇, 教授, 博士生导师, 主要从事智能农业装备与机器人技术研究。Email: cywu@zstu.edu.cn

接触面积，减少穴孔内基质的残留。上述研究主要围绕单移植手抓取移栽可靠性能开展，对基于多移植手高速稀植机构的设计优化研究较少。

本文以华南地区种植较多的水培叶菜钵苗为对象，设计一种针爪式多移植手机构进行稀植移栽作业，对影响移栽成功率的多移植手变间距移植过程中的冲击因素进行正交试验分析，获得高速稀植移栽的最佳机构参数组合。

1 多移植手高速稀植机构试验平台

水培叶菜钵苗多移植手稀植作业主要包括 2 个步骤：一是多移植手并拢从穴盘中成排取苗，二是多移植手变间距分开在栽培槽中植苗。本研究设计的多移植手稀植机构试验平台由 3 个部分组成：多移植手稀植作业部件、穴盘输送部件和栽培槽输送部件，如图 1 所示。其中多移植手稀植作业部件横跨在穴盘输送部件和栽培槽输送部件上方，将供苗穴盘中叶菜钵苗移栽至空栽培槽内；穴盘输送部件用于输送供苗穴盘，其两侧设置光电传感器用于检测供苗穴盘是否到位；栽培槽输送部件间歇输送空栽培槽。本试验平台基于三菱 FX3U-63MT 型 PLC 进行自动时序控制，其结构和作业参数如表 1 所示。



1.栽培槽工作台 2.进给气缸 3.下料框 4.输送机 5.穴盘 6.多移植手稀植作业部件 7.导向件
1.Cultivation trough workbench 2.Feeding cylinder 3.Blanking frame 4.Conveyor 5.Seedling tray 6.Sparse transplanting component with multiple end effectors 7.Guiding part

图 1 多移植手高速稀植机构试验平台
Fig.1 Test platform of high-speed spare transplanting mechanism with multiple end effectors

表 1 试验平台结构和作业参数	
Table 1 Structure and operation parameters of test platform	
参数 Parameters	数值 Values
外形尺寸（长×宽×高）Boundary dimension (length × width × height)/mm×mm×mm	1 250×1 600×1 382
移植手数量 Number of end effectors	6
穴盘规格 Seedling tray specification	6 穴·行 ⁻¹ ×12 行
栽培槽尺寸（长×宽×高）Cultivation trough dimension (length×width× height)/mm×mm×mm	660×75×50
输入气压 Input air pressure/MPa	0.6–0.8
电机功率 Motor power/kW	0.75
电机转速 Motor speed/(r·min ⁻¹)	800

以甘蓝钵苗稀植为例，试验平台作业时，将供苗穴盘放置穴盘输送部件，传感器检测到供苗穴盘后，将其

输送至取苗位置；同时栽培槽输送部件将栽培槽输送至植苗位置；多移植手稀植作业部件动作，气缸驱动多移植手至最佳取苗位置，移植手成排抓取穴盘内钵苗，而后气缸带动多移植手整体上升移至植苗位置，同时多移植手等间距分开，将甘蓝钵苗整体植入对应的栽培槽槽孔内，而后多移植手整体返回初始位置；同时穴盘输送部件带动穴盘进给 1 排穴孔的距离，下一排钵苗进入移栽作业；栽培槽输送部件推送送料筒内部下个空栽培槽至植苗位置，等待下一排钵苗栽植，如此往复实现穴盘内成排取苗和栽培槽中变间距并行植苗作业。

2 关键部件设计

2.1 穴盘输送部件

根据移植作业要求，设计穴盘输送部件移送穴盘至移植手工作位置。如图 1 所示，穴盘输送部件主要由输送机和导向件组成，整体外形尺寸（长×宽×高）：1 220 mm× 440 mm×740 mm。输送机由 72 齿 3M 带轮、主从动滚筒、0.75 kW 的 80EMA-02A 型伺服电机、2.25 m 长的 5935 型网链输送带等组成。根据输送穴盘外宽尺寸（540 mm×280 mm），主、从动滚筒设计为长 346 mm、外径 25 mm、配装 4 个与网链输送带啮合的 T10 型链轮。输送机输送穴盘时，在输送带运动方向 2 侧布置设计 2040 导向型材件和直径为 30 mm 的 PU60832 型导向轮进行穴盘位置及运动方向的限制。主动带轮与伺服电机固连，通过同步带带动与从动带轮固连的主动滚筒转动，使穴盘实现按需水平间歇输送。在整排钵苗被取走后，进给一个穴孔位进行下一排钵苗夹取。为了避免输送速度过快导致穴盘和输送带打滑和停车时穴盘滑移，通过预试验，确定穴盘输送速度为 0.45 m/s。

2.2 栽培槽输送部件

如图 1 所示，栽培槽输送部件由栽培槽工作台、进给气缸和下料框组成，整体外形尺寸（长×宽×高）：1 520 mm×725 mm×900 mm。其工作原理：栽培槽填满下料框，进给气缸推动最底层栽培槽运动至工作位置，而后复位；在重力作用下料框中剩余栽培槽整体下降一个槽高。移植结束后，进给气缸推动下料框中下一个栽培槽至工作位置。为了保证气缸推杆在栽培槽中心位置顺利推动，选用亚德客 ACE 型 25 mm 缸径气缸，行程为 150 mm。

进给气缸推力 F_0 :

$$F_0 = 0.85 p D_0^2 \pi / 4 \tag{1}$$

式中 p 为输入气体平均压力，0.7 MPa； D_0 为气缸缸径，25 mm。

最底层栽培槽摩擦力 F_f :

$$F_f = K_0 M_0 g \mu \tag{2}$$

式中 K_0 为下料框最多可容纳栽培槽数量； M_0 为栽培槽质量，kg； g 为重力系数，9.8 N/kg； μ 为摩擦系数。

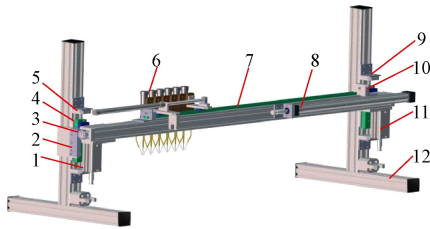
由式（1）可得进给气缸推力 F_0 为 291 N。本文设计的下料框最多可容纳 6 个栽培槽，栽培槽质量为 0.44 kg，其摩擦系数为 0.4，由式（2）可得最底层栽培槽最大摩

摩擦力 F_f 为 10 N, 小于进给气缸推力 F_0 , 进给气缸满足要求。为避免进给速度过快导致停车时栽培槽滑移, 通过预试验, 确定栽培槽平均进给速度为 0.23 m/s。

2.3 多移植手稀植作业部件

2.3.1 总体结构

多移植手稀植作业部件是移栽机的核心机构, 主要包括垂直气缸、齿条、齿轮、垂直滑轨、垂直油压缓冲器、多移植手、水平滑轨、水平横移气缸、水平缓冲器和机架, 整体外形尺寸(长×宽×高)为 1 600 mm×600 mm×1 375 mm, 如图 2 所示。多移植手机构通过水平横移气缸和垂直气缸分别在水平滑轨和垂直滑轨上进行往复运动; 利用油压缓冲器吸收气缸带动部件运行产生的冲击力, 实现柔性停车; 齿轮和齿条啮合组成同步器, 维持多移植手整体两侧同步升降。



1.左垂直气缸 2.齿条 3.齿轮 4.垂直滑轨 5.左垂直油压缓冲器 6.多移植手机构 7.水平滑轨 8.水平气缸 9.右垂直油压缓冲器 10.水平油压缓冲器 11.右垂直气缸 12.机架
1.Vertical cylinder in left 2.Rack 3.Gear 4.Vertical slide rail 5.Vertical oil shock absorber in left 6.Multiple end effectors mechanism 7.Horizontal slide rail 8.Horizontal cylinder 9.Vertical oil shock absorber in right 10.Horizontal oil shock absorber 11.Vertical cylinder in right 12.Frame

图 2 多移植手稀植作业部件结构简图

Fig.2 Simplified structure diagram of the sparse transplanting component with multiple end effectors

多移植手机构在穴盘输送部件和栽培槽输送部件之间往复运动, 1 个行程运行时间小于 4 s, 因此水平横移气缸选取亚德客 SC 气缸, 缸径为 32 mm, 行程为 580 mm。本文设计的多移植手机构水平运动总质量 M_1 为 6.5 kg, 摩擦系数为 0.3。根据公式 (1) ~ (2) 计算, 水平横移气缸推力为 478 N, 大于其水平摩擦力 19.1 N, 预试验测得多移植手机构最大平均运行速度可为 1.07 m/s, 最短运行时间为 0.54 s。

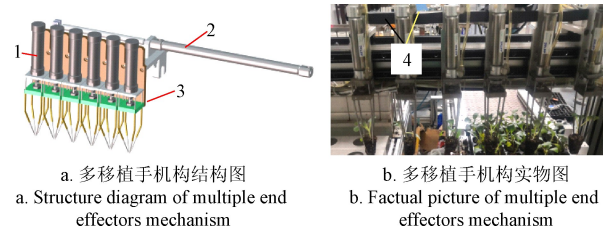
多移植手机构选取亚德客 ACE 型气缸(缸径为 40 mm, 行程为 80 mm)来实现上下升降功能。通过理论计算, 该研究设计的多移植手机构垂直单侧质量 M_2 为 13.5 kg, 和机架滑轨间摩擦系数为 0.2。根据公式 (1) ~ (2) 计算, 水平横移气缸推力为 879.2 N, 大于其竖直阻力 158.76 N (摩擦力和重力之和), 预试验测得多移植手机构竖直最大平均运行速度为 1.31 m/s, 最短运行时间为 0.06 s。由上述分析可知, 该多移植手机构运行 1 个行程最短时间为 1.32 s, 符合机构 3 800 株/h 的高速稀植设计要求。

2.3.2 多移植手机构

多移植手机构是实现钵苗整排夹取和变间距植苗的关键部件, 主要包括 6 个移植手组件、分离气缸、安装

板和受拉缓冲带, 如图 3 所示。移植手组件通过受拉缓冲带连接; 与分离气缸缸体相连移植手组件固定, 气缸拉扯推杆末端移植手组件, 从而分散相邻移植手至与相邻栽培槽间距一致; 气缸回缩带动推杆末端移植手组件依次压缩移植手组件间距, 直至与穴盘相邻穴孔间距一致。

多移植手合并时相邻中心间距与穴盘相邻穴孔中心间距一致, 为 42.5 mm, 展开时与栽培槽孔相邻间距一致, 为 100 mm。为了确保 6 组移植手正常移植作业, 分离气缸行程需为 288 mm, 考虑安装空间和分离效率满足生产需求, 选取缸径为 20 mm 的亚德客 MG 型气缸。通过理论计算, 该单移植手组件质量为 0.8 kg, 与机架导轨摩擦系数为 0.2。根据式 (1) ~ (2) 计算, 分离气缸推力为 78.5 N, 大于其分离总摩擦阻力 9.4 N, 该分离气缸满足要求。为避免分离速度过快导致钵苗基质振动破损, 通过预试验确定多移植手平均分离速度为 0.42 m/s。

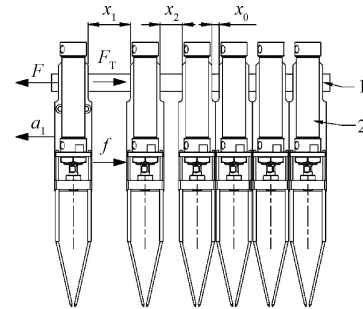


a. 多移植手机构结构图
a. Structure diagram of multiple end effectors mechanism
b. 多移植手机构实物图
b. Factual picture of multiple end effectors mechanism

图 3 多移植手机构示意图

Fig.3 Schematic diagram of multiple end effectors mechanism

移植手组件间固定等长的受拉缓冲带在分离气缸推动下实现多移植手等间距分离。多移植手组件分离存在惯性冲击, 冲击过大则影响钵苗移栽过程基质完整度和移植成功率, 其分离受力情况如图 4 所示。



1.受拉缓冲带 2.移植手组件
1.Tension buffer zone 2.End effector component

注: F 为气缸推力, N; F_T 为第一段受拉缓冲带拉力, N; f 为摩擦力, N; a_1 为第一个移植手组件加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; x_0 为受拉缓冲带起始长度, m; x_1 为第一段受拉缓冲带张紧长度, m; x_2 为第二段受拉缓冲带张紧长度, m。
Note: F is the cylinder thrust, N; F_T is the tension force of first section tension buffer zone, N; f is the friction force, N; a_1 is the acceleration of first end effector component, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; x_0 is the initial length of tension buffer zone, m; x_1 is the tension length of first section tension buffer zone, m; x_2 is the tension length of second section tension buffer zone, m.

图 4 多移植手机构分离过程受力分析示意图

Fig.4 Schematic diagram of force analysis of multiple end effectors in separation process

由图 4 可得, 第一个移植手组件的受力平衡方程为

$$\begin{cases} F - f - F_T = ma_1 \\ F_T = K(x_1 - x_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 K 为受拉缓冲带弹性系数, N/m; m 为单移植手组件质量, kg。

第二个移植手组件的受力平衡方程为

$$Kx_1 - f - K(x_2 - x_0) = ma_2 \quad (4)$$

式中 a_2 为移植手组件的垂直运动加速度, m/s^2 。

以此类推, 第 n 个移植手组件的受力平衡方程为

$$K(x_{i-1} - x_i + x_0) - f = ma_n \quad (i = 2, 3, 4, 5, 6) \quad (5)$$

式中 x_{i-1} 为受拉缓冲带第 $i-1$ 段张紧长度, m; x_i 为受拉缓冲带第 i 段张紧长度, m; a_n 为第 n 个移植手组件加速度, m/s^2 。

由式 (3) ~ (5) 可知, 当 $K=0$ 时, 第一移植手组件到达一定运行速度后, 带动第二移植手组件与其等速度运动; 第二移植手组件到达一定运行速度后, 瞬间带动第三移植手组件与其等速度运动, 依次类推, 这种刚性分离过程中的瞬时加速度比较大, 钵苗承受剧烈局部冲击振动, 破坏基质之间黏结力, 易导致钵苗移植过程中基质块散落; 当 $K>0$ 时, 第一移植手组件在分离气缸作用力下, 缓慢带动余下移植手组件进行柔性分离, 减缓钵苗移栽过程冲击振动现象。因此本研究受拉缓冲带由刚性和柔性 2 种缓冲带组成, 如图 3b 所示, 图中深色标识线代表刚性缓冲带, 浅色标识线代表柔性缓冲带。分离气缸推动多移植手组件逐步分开, 其中柔性缓冲带缓冲分离过程中的冲击, 而等长的刚性缓冲带则保证了多移植手组件在气缸停止推动后可等间距地分布开。

2.3.3 多移植手稀植作业部件碰撞过程仿真分析

通过多移植手稀植作业部件碰撞仿真分析, 为水平缓冲器和竖直缓冲器的选型提供依据。由于多移植手稀植作业部件主要以气缸作为动力源, 因此在移栽作业过程中机构停车时易产生较大冲击力。若冲击力过大, 机械振动剧烈, 易导致抓取的钵苗基质散落, 影响钵苗移栽成功率。多移植手稀植作业部件冲击振动产生原因主要为水平横移气缸和垂直气缸运行到达末端后与机架发生的碰撞。在 Solidworks 软件中进行三维模型构建, 并输出为 x_t 格式文件。将 x_t 文件导入到 Adams 软件中, 多移植手机构与机架分别设定竖直和水平 2 个方向为碰撞约束, 参考铝材料进行阻尼和密度参数设置, 具体仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 多移植手稀植作业部件仿真参数设置
Table 2 Parameter setting of simulation for the sparse transplanting component with multiple end effectors

主要参数 Main parameters	数值 Values
多移植手机构和机架垂直约束	碰撞
多移植手机构和机架水平约束	碰撞
缸体和机架约束	固定
阻尼/(N·mm ⁻¹)	150
推板密度/(g·cm ⁻³)	2.7
机架密度/(g·cm ⁻³)	2.7

由于泥炭基质持水能力差且易坍塌^[29], 水平停车冲击力过大, 钵苗水平输送过程基质块易散落, 造成钵苗在移动过程中掉落或在植入栽培槽后倒伏严重, 因此需要降低碰撞产生的冲击力。本文设计机构的气泵源压力输入范围为 0.6~0.8 MPa, 多移植手机构水平运动总质量约为 6.5 kg, 其水平末端运行速度与第一个移植手机组件运行速度相等, 为

$$v = \sqrt{2a_1l} \quad (6)$$

式中 l 为多移植手机构水平末端运行位移, m; a_1 由式 (7) 计算:

$$a_1 = (\pi PD_1^2) / 4M_1 \quad (7)$$

式中 P 为气泵源输入压力, MPa; D_1 为水平横移气缸缸径, mm; M_1 为多移植手机构水平运动总质量, kg。

由前文可知, 水平横移气缸缸径为 32 mm, 行程为 580 mm, 气泵源最大输入压力为 0.8 MPa, 由式 (6) ~ (7) 计算得水平末端运行最大平均速度为 1.07 m/s。设定稀植作业部件的多移植手水平运行速度为 1.07 m/s, 则其末端与机架进行碰撞仿真, 产生的冲击力变化如图 5a 所示。由图 5a 可知, 多移植手机构与机架水平碰撞产生的最大冲击力为 250 N。

水平横移气缸推动多移植手机构撞击机架的动能为

$$E_k = \frac{M_1 v^2}{2} \quad (8)$$

水平横移气缸推动多移植手机构撞击机架的驱动能量为

$$E_D = FS \quad (9)$$

式中 S 为碰撞缓冲位移 (初始值为 0.01 m), m。

由此可得冲击力总能量为

$$E_T = E_k + E_D \quad (10)$$

由式 (7) ~ (10) 可知, 水平横移气缸牵引多移植手机构水平运动最大速度产生的冲击总能量为 6.22 J。为降低水平碰撞产生的冲击力, 在多移植手机构水平运动末端位置安装吸收能量可调节型西捷克 AD1210 油压缓冲器, 其行程 10 mm, 最大吸收能量 12 J。此时水平横移气缸牵引移植手水平运动最大冲击力产生的总能量小于 AD1210 油压缓冲器最大吸收能量, 该油压缓冲器可起到缓解多移植手移动作业部件与机架水平碰撞产生刚性冲击力, 减少振动冲击对钵苗夹持成功率的影响。

多移植手稀植作业部件两侧各安装一个垂直气缸。若多移植手机构垂直冲击力过大, 钵苗植入栽培槽内时, 钵苗基质振散, 钵苗易掉落槽孔外部或栽培槽内部, 不利于钵苗后期生长。本文设计的多移植机构垂直单侧质量为 15.3 kg, 垂直运动加速度为

$$a_2 = ((\pi PD_2^2) / 4 + M_2 g) / M_2 \quad (11)$$

式中 D_2 为垂直气缸缸径, mm; M_2 为多移植机构垂直单侧质量, kg。

由前文可知, 本文设计水平横移气缸缸径为 40 mm, 行程为 80 mm, 气泵源最大输入压力为 0.8 MPa, 根据公式 (6) 和 (11) 计算得多移植手机构垂直最大运行速度

为 1.31 m/s。设定稀植作业部件一侧多移植手机构水平运行速度为 1.31 m/s，其和机架垂直碰撞产生的冲击力变化如图 5b 所示，由图 5b 可知，多移植手机构与机架垂直碰撞产生的最大冲击力为 370.5 N。

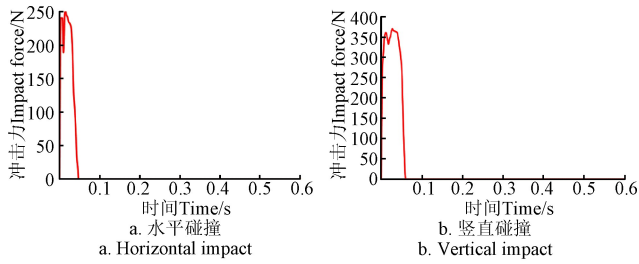


图 5 多移植手机构与机架碰撞冲击力仿真曲线

Fig.5 Simulation curve of impact force between multiple end effectors mechanism and frame

根据式 (8) ~ (11) 可知，垂直气缸牵引多移植手机构垂直碰撞最大速度产生的总能量为 16.83 J。为降低垂直碰撞产生的冲击力，在多移植手机构垂直运行末端位置安装吸收能量可调节型西捷克 AD1410 油压缓冲器，其行程 10 mm，最大吸收能量 20 J。垂直碰撞产生最大冲击力产生的总能量小于 AD1410 油压缓冲器最大吸收能量，该油压缓冲器可缓解多移植手移动作业部件与机架垂直碰撞产生的刚性冲击力，减少振动冲击对成功率的影响。

3 移栽性能试验

3.1 试验材料

试验选用杭州市萧山区雷东村农场培育的甘蓝幼苗，栽培基质由泥炭、蛭石与珍珠岩组成，基质配比 6:3:1，基质含水率为 81.01%^[30]，育苗温度为 28.5℃，培育周期 2.5 周，穴盘尺寸为 540 mm×280 mm，72 孔，PS 材质。试验钵苗为株高 $H=80\sim96$ mm，株宽 $L=45\sim58$ mm，叶片数 4~6 片，钵苗基质块高度 h_1 为 38~44 mm，上边平均宽 $l_1=41$ mm，底边平均宽 $l_2=22$ mm，如图 6 所示。

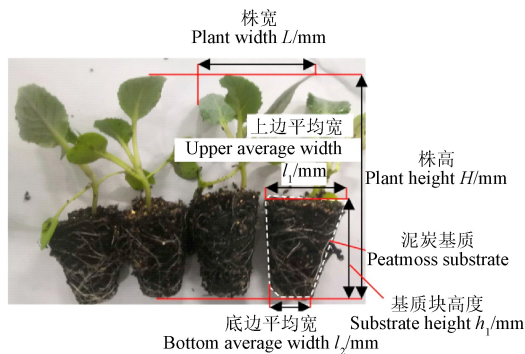


图 6 甘蓝钵苗几何尺寸

Fig.6 Geometry size of cabbage seedling tray

预试验发现，栽培槽叶菜钵苗基质块质量小于原钵苗基质块质量 40% 时，钵苗在栽培槽内易发生倾斜，叶片倾倒在管内，不利于后期的生长。定义移栽成功指标 Q 为多移植手稀植作业部件成功拾取钵苗并输送投放至栽

培槽中，且移栽后的钵苗基质块质量 \geq 原钵苗基质块质量 40%。

$$Q = \frac{S_0 - S_1 - S_2 - S_3 - S_4}{S_0} \times 100\% \quad (12)$$

式中 S_0 为钵苗总数量； S_1 为穴盘中未取出钵苗数； S_2 为移栽过程中掉落在栽培槽外部钵苗数； S_3 为移栽过程中移植手带苗数； S_4 为移栽后钵苗基质块质量 $<$ 原基质块质量 40% 钵苗数。

参考前期研究成果^[30-31]，本文采用 4 根伸缩针式机械移植手进行钵苗移栽作业，重点分析多移植手机构组件高速稀植作业过程中停车冲击对钵苗移栽成功率和效率的影响。

3.2 试验方法

在试验钵苗状态、移植手结构和抓取深度等条件相同的情况下，根据上述分析可知，多移植手高速稀植作业过程影响移栽成功率主要的因素为受拉缓冲带弹性系数 K 、水平平均速度 v_1 、水平末端油压缓冲器吸收能量 N_1 、垂直平均速度 v_2 和垂直末端油压缓冲器吸收能量 N_2 。其中 v_1 和 N_1 间存在交互作用，当 v_1 单独作用时，其值越大移栽效率越高，但成功率越低；而当水平末端缓冲器吸收能量 N_1 作用于 v_1 末端时，通过调节 N_1 值大小，缓冲移植手到达末端速度瞬间减小产生的振动冲击，从而提高移栽成功率；同样， v_2 和 N_2 间也存在交互作用， v_2 单独作用时，其值增大会导致移栽成功率越低现象，而吸收能量 N_2 作用于末端，通过调节 N_2 值大小，缓冲 v_2 末端瞬间减小产生的机械冲击振动现象，从而提高移栽成功率。因此设计五因素三水平正交试验，对温室叶菜钵苗稀植机构试验平台移栽性能进行分析。

受拉缓冲带是多移植手等间距分离的关键联接件，受拉缓冲带的弹性系数 K 决定了多移植手分离时的振动程度，但弹性系数过大，不利于气缸伸展进行移植手分离，根据多移植手稀植部件分离运动分析，选取受拉缓冲带的弹性系数 K 为 0、0.064、0.128 N/m 的 3 个水平进行试验。

钵苗在水平和垂直方向移送时，气缸作为驱动部件，垂直气缸推动多移植手机构向上运动带动抓取的钵苗与穴盘壁分离，水平横移气缸则带动多移植手机构水平移动至栽培槽上方，最后垂直气缸推动多移植手机构向下运动将钵苗植入栽培槽内；以上作业过程均为变加速变减速的运动过程，加速运动使移植手爪针与基质块间产生振动冲击，易导致苗针夹苗不稳、钵苗基质散落。移植影响因素的初步测试发现，水平平均运行速度 v_1 大于 0.7 m/s 时，移栽成功率小于 60%； v_1 小于 0.2 m/s 时，水平运动耗时大于 3 s，远大于 v_1 为 0.7 m/s 时的 0.8 s 耗时。综合考虑，通过气阀调节得到 $v_1=0.30$ 、0.49、0.68 m/s 作为水平速度的 3 个水平。同理，确定 $v_2=0.26$ 、0.50、0.74 m/s。

为减缓冲击影响，本移植装置使用的油压缓冲器为吸收能量可调节型，可通过旋转吸振器尾部调整旋钮，改变其吸收能量值来调节油压吸振器缓冲强度。油压缓

冲器吸收能量过大或过小, 对多移植手部件都为刚冲击状态, 起不到缓冲作用, 因此选取合适的吸振器缓冲强度对稳定移栽过程与提高成功率较为重要。根据运行速度和输入压力, 选取水平末端油压缓冲器吸收能量 N_1 分别为 6、9 和 12 J, 垂直末端油压缓冲器吸收能量 N_2 分

别为 10、15 和 20 J 作为试验水平。稀植移栽正交试验因素水平如表 3 所示。

基于 SPSS 分析软件进行正交试验设计, 每组试验水平测试 5 次。正交试验结果如表 4 所示, 试验平台如图 7 所示。

表 3 试验因素水平

Table 3 Experiment factors level

水平 Levels	受拉缓冲带弹性系数 Elastic coefficient of tension buffer zone $K/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	水平平均速度 Horizontal average velocity $v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	垂直平均速度 Vertical average velocity $v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	水平末端油压缓冲器吸收能量 Horizontal end oil buffer absorption energy N_1/J	垂直末端油压缓冲器吸收能量 Vertical end oil buffer absorption energy N_2/J
1	0	0.30	0.26	6	10
2	0.064	0.49	0.50	9	15
3	0.128	0.68	0.74	12	20

表 4 稀植移栽交互正交试验结果

Table 4 Interactive orthogonal experiment results of sparse transplanting

试验序号 Test No.	$K/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	空 Blank	$v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	N_1/J	$(v_1\times N_1)_1$	$(v_1\times N_1)_2$	$v_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	N_2/J	$(v_2\times N_2)_1$	$(v_2\times N_2)_2$	平均效率 Average efficiency/ $(\text{株}\cdot\text{h}^{-1})$	移栽成功率 Transplantation success rate $Q/\%$
1	0	1	0.30	6	1	1	0.26	10	1	1	2 934	96.70
2	0	2	0.49	9	2	2	0.50	15	2	2	3 816	90.00
3	0	3	0.68	12	3	3	0.74	20	3	3	4 500	83.30
4	0.064	1	0.30	12	2	1	0.50	10	1	2	3 016	86.70
5	0.064	2	0.68	9	3	3	0.26	20	2	1	4 153	93.30
6	0.064	3	0.49	6	1	2	0.74	15	3	3	3 956	96.70
7	0.128	1	0.68	6	3	1	0.50	20	2	2	4 320	93.30
8	0.128	2	0.30	9	1	2	0.74	10	3	1	3 103	90.00
9	0.128	3	0.49	12	2	3	0.26	15	1	3	3 686	93.30
10	0.128	1	0.49	12	2	3	0.74	20	3	2	3 956	90.00
11	0.128	2	0.30	9	1	2	0.50	15	2	3	3 016	100.00
12	0.128	3	0.68	6	3	1	0.26	10	1	1	4 153	93.30
13	0.128	1	0.68	6	3	1	0.74	15	3	3	4 500	93.30
14	0.128	2	0.30	9	1	2	0.26	10	1	1	2 934	96.70
15	0.128	3	0.49	12	2	3	0.50	20	2	2	3 816	96.70
P_j	90.00	92.00	94.02	94.66	96.02	92.66	94.66	92.66	93.34	94.00		
J_j	92.23	94.00	94.00	93.34	91.34	94.68	93.34	94.66	94.66	92.00		
K_j	94.07	92.66	90.00	91.30	91.30	91.32	90.66	91.32	90.66	94.66		
S_j	30.26	6.23	32.51	17.67	44.18	17.17	24.92	12.46	24.92	15.71		

注 P_j 为第 j 列因素水平 1 试验结果平均值; J_j 为第 j 列因素水平 2 试验结果平均值; K_j 为第 j 列因素水平 3 试验结果平均值; S_j 为第 j 列因素离均差平方和; $j=1,2,3$ 。
Note: P_j is average of test results of level 1 of factor in column j ; J_j is average of experiment results of level 2 of factor in column j ; K_j is average of experiment results of level 3 of factor in column j ; S_j is sum of squares of deviation from mean of factor in column j ; $j=1, 2, 3$.

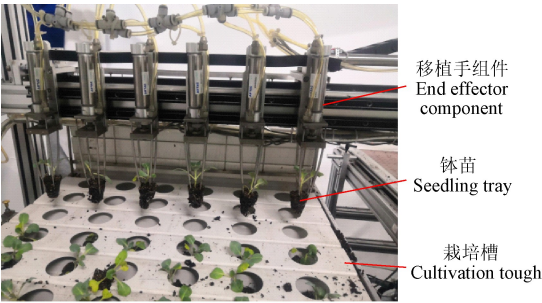


图 7 叶菜钵苗多移植手稀植移栽试验

Fig.7 Experiments of leaf plug seedlings spare transplant with multiple end-effector

3.3 试验结果与分析

为判断因素水平变化所引起的试验成功率变动显著性, 采用单因素试验方差对表 4 进行分析, 试验因素方差分析结果如表 5 所示, 由表 5 可知, N_1 、 N_2 的方差与随机序列空白方差相差不大, 其偏差主要由于试验误差造成, 其值变化对移栽成功率影响比较小。对其他试验因

素进行显著性检测, 求解其 F 值, 如表 5 所示。

表 5 试验结果方差分析表

Table 5 Analysis of variance table of test results

方差来源 Variance source	自由度 Degree of freedom	方差 Variance	F 值 F Value
K	2	15.13	4.86
空	2	3.11	1.00
v_1	2	16.25	5.23
N_1	2	8.83	2.84
v_2	2	12.46	4.01
N_2	2	8.46	2.72
$v_1\times N_1$	4	15.34	4.93
$v_2\times N_2$	4	10.00	3.20

注 (Note) : $F_{0.05}(2,12)=3.89$, $F_{0.05}(4,12)=3.26$.

由表 5 可知, 因素 K 和 v_1 对移栽成功率影响显著, v_2 次之; $v_1\times N_1$ 的交互作业交互作用大于 $v_2\times N_2$ 。多移植手机机构的水平平均速度对钵苗移栽成功率影响显著, 水平平均速度越大, 钵苗基质承受冲击力越大, 基质散

落越严重, 导致移栽成功率越低。作用于 v_1 末端的水平末端油压缓冲器吸收能量 N_1 单独作用对移栽成功影响比较小, 然而由于 v_1 和 N_1 之间耦合关系, $v_1 \times N_1$ 的交互作用对移栽成功率具有显著影响。由表 4 可知, 交互因素 $(v_1 \times N_1)_1$ 在 v_1 为 0.30 m/s, N_1 为 9 J、 v_1 为 0.30 m/s, N_1 为 12 J 和 v_1 为 0.49 m/s, N_1 为 6 J 条件下的平均移栽成功率最大为 96.02%; 其中 v_1 为 0.49 m/s, 水平末端油压缓冲器吸收能量 N_1 为 6 J 时, 平均移栽效率为 3 956 株/h, 移栽成功率为 96.70%, 综合效果最好。

受拉缓冲带弹性系数对钵苗移栽成功率影响显著性仅次于 v_1 , 当 $K=0.128$ N/m 时, 移栽成功率平均可达为 94.07%, 而 $K=0$ 时, 由于移植手组件为刚性分离, 分离过程中钵苗基质散落严重, 移栽成功率平均为 90.00%, 因此移栽过程中应选择 K 为 0.128 N/m 进行移栽作业。

多移植手机构的垂直平均速度对钵苗移栽成功率影响显著性次于受拉缓冲带弹性系数 K , 在其他影响因素相同的情况下都表现出垂直平均速度越大, 带动钵苗与穴盘壁分离过程中, 分离速度快且停止时冲击越大, 基质破坏越严重, 移栽成功率越低。作用于 v_2 末端的垂直末端油压缓冲器吸收能量 N_2 单独作用对移栽成功影响比较小, 其与 v_2 之间耦合关系对移栽成功率的影响也不大, 主要由于垂直运动对钵苗基质破损度影响比较小。

由上述分析可知, 本文多移植手高速稀植机构的稀植效率和成功率受缓冲带弹性系数、水平横移的平均速度、水平末端缓冲器吸收能量、竖直运动平均速度和竖直运动末端缓冲器吸收能量的耦合交互影响, 通过正交试验选定可获得高效稀植作业的机构参数最优组合为: 缓冲带弹性系数 K 为 0.128 N/m、水平平均速度 v_1 为 0.49 m/s、垂直平均速度 v_2 为 0.74 m/s、水平末端油压缓冲器吸收能量 N_1 为 6 J 和垂直末端油压缓冲器吸收能量 N_2 为 15 J, 试验测得移栽平均效率为 3 956 株/h, 移栽成功率为 96.70%, 适用于穴盘到栽培槽的叶菜类钵苗高速稀植作业。

4 结 论

本文针对泥炭基质水培叶菜钵苗, 设计了一种多移植手的穴盘取苗稀植移栽机构, 并对关键部件多移植手稀植作业部件进行碰撞仿真分析。选用甘蓝钵苗, 对移栽机构钵苗拾取性能开展正交试验, 确定其最优运行参数。

在缓冲带弹性系数为 0.128 N/m、多移植手的水平平均速度为 0.49 m/s、垂直平均速度为 0.74 m/s、水平末端油压缓冲器吸收能量为 6 J 和垂直末端油压缓冲器吸收能量为 15 J 时, 多移植手稀植机构的移栽效率为 3 956 株/h, 移栽成功率为 96.70%。

[参 考 文 献]

- [1] 齐飞, 魏晓明, 张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 1-9. Qi Fei, Wei Xiaoming, Zhang Yuefeng. Development status and future research emphase on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(24): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [2] 齐飞, 李恺, 李邵, 等. 世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 183-195. Qi Fei, Li Kai, Li Shao, et al. Development of intelligent equipment for protected horticulture in world and enlightenment to China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 183-195. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘霓红, 蒋先平, 程俊峰, 等. 国外有机设施园艺现状及对中国设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 1-9. Liu Nihong, Jiang Xianping, Cheng Junfeng, et al. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and its inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [4] 辜松. 设施园艺装备化作业生产现状及发展建议[J]. 农业工程技术, 2018, 38(4): 10-15.
- [5] 辜松. 对话辜松: 我国水培蔬菜机械设备现状[J]. 现代农业装备, 2016(5): 19-21.
- [6] 刘士哲. 水培蔬菜产业化前景及存在问题和解决途径[J]. 农业工程技术, 2017, 37(22): 39-45.
- [7] Ting K C, Giacomelli G A, Shen S J. Robot workcell for transplanting of seedlings. Part I: Layout and materials flow[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 1005-1010.
- [8] Ting K C, Giacomelli G A, Shen S J, et al. Robot workcell for transplanting of seedlings. Part II: End-effector development[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3): 1013-1017.
- [9] Choi W C, Kim D C, Ryu I H, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13-19.
- [10] Dong H K, Dong E K, Gong I L, et al. Development of a vegetable transplanting robot[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2012, 37(3): 201-208. (in Chinese with English abstract)
- [11] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44-53. Yu Xiaoxu, Zhao Yun, Chen Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44-53. (in Chinese with English abstract)
- [12] 肖名涛, 肖仕雄, 孙松林, 等. 油菜钵体苗移栽机构研究现状与发展趋势[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 1-6. Xiao Mingtao, Xiao Shixiong, Sun Songlin et al. Present status and development prospect of rape seedling transplanting mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [13] Dihingia P C, Kumar G V, Sarma P K et al. Hand-fed vegetable transplanter for use with a walk-behind-type hand tractor[J]. International Journal of Vegetable Science, 2015,

- 24(3): 254-273.
- [14] 孙国祥, 汪小岳, 何国敏, 等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 48-53.
Sun Guoxiang, Wang Xiaochan, He Guomin, et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 48-53. (in Chinese with English abstract)
- [15] 钱少明, 杨庆华, 王志恒, 等. 黄瓜抓持特性与末端采摘执行器研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 107-112.
Qian Shaoming, Yang Qinghua, Wang Zhiheng, et al. Research on holding characteristics of cucumber and end-effector of cucumber picking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 107-112. (in Chinese with English abstract)
- [16] 胡敏娟, 尹文庆. 穴盘苗变形滑针式取苗器的研究[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 154-158.
Hu Minjuan, Yin Wenqing. Experimental research on the deformed sliding needle pick-up device for plug seedlings[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(1): 154-158. (in Chinese with English abstract)
- [17] 缪小花, 毛罕平, 韩绿化, 等. 黄瓜穴盘苗拉力及钵体抗压性能影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 27-32.
Miu Xiaohua, Mao Hanping, Han Lühua, et al. Analysis of influencing factors on force of picking plug seedlings and pressure resistance of plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(S1): 27-32. (in Chinese with English abstract)
- [18] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 24-29.
Han Lühua, Mao Hanping, Hu Jianping, et al. Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(2): 24-29. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 with English abstract)
- [20] 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.
Han Lühua, Mao Hanping, Hu Jianping, et al. Design and test of automatic transplanter for greenhouse plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [21] 高国华, 冯天翔, 李福. 斜入式穴盘苗移栽手爪工作参数优化及试验验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 16-22.
Gao Guohua, Feng Tianxiang, Li Fu. Working parameters optimization and experimental verification of inclined-inserting transplanting manipulator for plug seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(24): 16-22. (in Chinese with English abstract)
- [22] 胡建平, 张晨迪, 王留柱, 等. 全自动温室钵苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 149-154.
Hu Jianping, Zhang Chendi, Wang Liuzhu, et al. Design and experiment on automatic greenhouse seedling transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 149-154. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马锐, 曹卫彬, 任玲, 等. 穴盘苗自动移栽机末端执行器的参数优化设计[J]. 机械设计与制造, 2019, 346(12): 185-189.
Ma Rui, Cao Weibin, Ren Ling, et al. Design and parameter optimization of end-effector on automatic plug seedling transplanter[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, 346(12): 185-189. (in Chinese with English abstract)
- [24] 许春林, 吕志军, 辛亮, 等. 全自动草莓钵苗移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 97-106.
Xu Chunlin, Lv Zhijun, Xin Liang, et al. Optimization design and experiment of full-automatic strawberry potted seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 97-106. (in Chinese with English abstract)
- [25] 党玉功, 金鑫, 李衡金, 等. 单自由度四连杆取投苗机械臂设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 39-47.
Dang Yugong, Jin Xin, Li Hengjin, et al. Design of single-degree-of-freedom four-bar seedling-taking and throwing manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [26] 马晓晓, 李华, 曹卫彬, 等. 番茄钵苗移栽机自动取苗装置作业参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 46-55.
Ma Xiaoxiao, Li Hua, Cao Weibin, et al. Optimization and experiment of working parameters of automatic seedling picking device for tomato seedlings transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 46-55. (in Chinese with English abstract)
- [27] 周昕, 蔡静. 温室并联移栽机器人设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 86-94.
Zhou Xin, Cai Jing. Design and experiment of parallel transplanting robot in greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 86-94. (in Chinese with English abstract)
- [28] 童俊华, 石虎峰, 武传宇, 等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 107-116.
Tong Junhua, Shi Hufeng, Wu Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107-116. (in Chinese with English abstract)

- [29] 张明伟. 椰糠基质与泥炭基质培育番茄苗效果对比试验[J]. 北方园艺, 2019(3): 43-44.
- [30] 黎波, 辜松, 初麒, 等. 椰糠培育叶菜种苗移植机械手设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 18-24.
Li Bo, Gu Song, Chu Qi, et al. Design and experiment on manipulator for transplanting leaf vegetables seedling cultivated by coco-peat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 18-24. (in Chinese with English abstract)
- [31] Li Bo, Gu Song, Chu Qi, et al. Development of transplanting manipulator for hydroponic leafy vegetables[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2019, 12(2): 38-44.

Design and experiment of high-speed sparse transplanting mechanism for hydroponics pot seedlings in greenhouses

Tong Junhua^{1,3}, Meng Qingxin¹, Gu Song², Wu Chuanyu^{1,3*}, Ma Ke¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Leafy vegetable cultivation with culture solution has become a promising new type of planting technology for the vegetable production in a green house. In processing, the seedlings of plugs need to be taken out from the float trays, and transplanted into the cultivation trough. However, a hand transplanting of seedlings is a major traditional operation with high labor intensity and low efficiency. In this study, a novel high-speed mechanism was designed with multiple end effectors for the sparse transplanting of hydroponics seedlings in greenhouses. Specifically, the operations of picking can realize the whole row seedlings in the float trays, while planting the seedlings in parallel with variable intervals in the cultivation troughs, particularly with high level automation, and great quality. The test platform of sparse transplanting mechanism was composed of three parts: the sparse transplanting component with multiple end effectors, transportation component of seedling tray, and cultivation trough. The sparse transplanting component with multiple end effectors was utilized to transplant the seedlings to empty cultivation trough, connecting the transportation component of seedling tray and cultivation trough. Concurrently, the transportation component of seedling tray was used to convey the seedlings. The transportation component of cultivation trough was used to convey the empty cultivation trough. A systematic optimization was made for the transplanting mechanism, thereby to obtain the best transplanting effect under the combination optimal parameters. In the transplanting mechanism, a rigid cloth belt was adopted to connect the series of needle-type multiple end effectors for equal separation. An elastic belt was also added to alleviate the unequal velocity that resulted from the variable interval process. The collision simulation of multiple end effectors mechanism was conducted on the ADAMS software, indicating a large impact force occurred at the end of cylinder. In order to cushion the movement impact, the hydraulic shock absorbers were installed at the end positions of multiple end effectors in the vertical and horizontal directions. The penetration angle and picking seedling depth were determined for the plug seedlings of leafy vegetable, according to the impact factors of transplanting mechanism. Five impact factors of transplanting effect included the belt elastic coefficient(K), average horizontal velocity(v_1), absorption energy of oil buffer at the horizontal end(N_1), average velocity in the vertical direction(v_2), and absorption energy of oil buffer at the vertical end(N_2). An orthogonal test was conducted on the factors in each group. It was found that the transplanting efficiency and transplanting success rate were inversely proportional, K , as well as v_1 , N_1 had a great impact on the transplanting success rate of seedlings. A combination of optimal mechanism parameter was obtained through analysis of variance: $K=0.128$ N/m, $v_1=0.49$ m/s, $v_2=0.74$ m/s, $N_1=6$ J, and $N_2=15$ J. In this case, the better performance can be achieved for the sparse transplanting operating component with multiple end effectors. The transplantation efficiency was 3 956 plants/h, and the transplantation success rate reached 96.70%. This mechanism can meet the actual production requirements of high-efficiency sparse transplanting.

Keywords: agriculture machinery; design; test; greenhouse; transplants; plug seedling; multiple end effectors; hydroponic leafy vegetables